



POMCA

RÍO SUCIO ALTO



El ambiente
es de todos

Minambiente



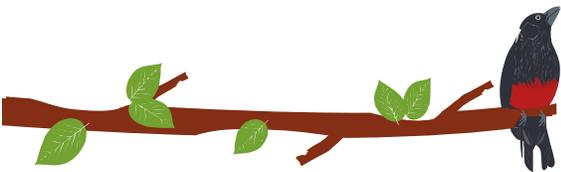
FASE DE DIAGNÓSTICO INFORME HIDROGEOLOGÍA

NOVIEMBRE DE 2019

CONTRATO No: 200-10-01-09-0240-2017

CONESTUDIOS S.A.S
NIT.811.044.748-1
PBX: 456 18 27

Carrera 46#45 #10. Oficinas 211-212. Bello, Antioquia



FASE DE DIAGNÓSTICO

TOMO I

REGISTRO DE APROBACIÓN:

Versión N°	Elaboró:	Revisó: (Pendiente)	Aprobó: (Pendiente)	Fecha:
		CONESTUDIOS S.A.S	CORPOURABA	Entidad: Funcionario: Cargo:

REGISTRO DE MODIFICACIONES:

REVISIÓN		DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES
Número	Fecha	
1	00/00/2018	Ajustes de acuerdo a concepto técnico de CORPOURABA n° _____ del (dd/mm/aaaa) _____
2	00/00/2018	Ajustes de acuerdo a concepto técnico de CORPOURABA n° _____ del (dd/mm/aaaa) _____

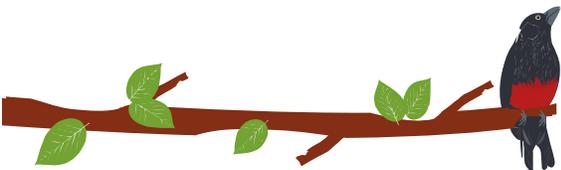


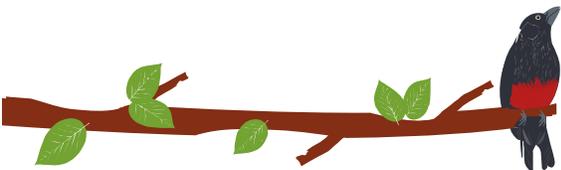
TABLA DE CONTENIDO

1.4	HIDROGEOLOGÍA	9
1.4.1	ANTECEDENTES	10
1.4.2	LOCALIZACIÓN	11
1.4.3	EL AGUA SUBTERRÁNEA Y EL CICLO HIDROLÓGICO EN LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO	12
1.4.4	OFERTA Y DEMANDA DEL AGUA SUBTERRÁNEA	17
1.4.5	EVALUACIÓN DE LA RECARGA PROVENIENTE DE LA PRECIPITACIÓN	19
1.4.6	GEOLOGÍA	29
1.4.7	EVALUACIÓN GEOFÍSICA	51
1.4.8	CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA	66
1.4.9	HIDROGEOLOGÍA.....	70
1.4.10	VULNERABILIDAD DE LOS ACUIFEROS A LA CONTAMINACIÓN.....	101
1.4.11	ASPECTOS DE ESPECIAL IMPORTANCIA HIDROGEOLOGICA.....	111
1.4.12	DEFICIENCIAS DE INFORMACIÓN.....	120
1.4.13	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la Cuenca Río Sucio Alto en las Provincias Hidrogeológicas de Colombia (IDEAM, 2010) y sobre ambientes ígneos y metamórficos de la Cordillera Occidental (IDEAM, 2013).	12
Figura 2. Figura 1.1. Ciclo hidrológico. Fuente: (Departamento de Antioquia, 2016).	13
Figura 3. Guía para el diagnóstico del recurso hídrico subterráneo. Fuente: Guía Metodológica para la Formulación de los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).	15
Figura 4. Diagrama de flujo para la construcción modelo hidrogeológico conceptual. Fuente: Guía Metodológica para la Formulación de los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).	16
Figura 5. Red hidrográfica de la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: Elaboración propia	21
Figura 6. Espacialización y clasificación de las muestras de suelos de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) presentes en la cuenca Río Sucio Alto. Elaboración propia.	23
Figura 7. Espesor y capacidad de almacenamiento de los suelos en la cuenca Río Sucio Alto. Elaboración propia.	25
Figura 8. Capacidad máxima de almacenamiento del suelo. Fuente capítulo clima.....	29
Figura 9. Mapa geológico de la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: Capítulo de geología.	30
Figura 10. Perfil geológico transversal de la cuenca Río Sucio Alto, el cual muestra los efectos de desplazamiento de las unidades geológicas. Fuente: Capítulo de geología.	31
Figura 11. Columna estratigráfica generalizada del sector norte de la Cordillera Occidental (Álvarez A. J. 1983).	32
Figura 12. Segmento de columna estratigráfica de uno de los bloques de chert levantada en la entrada a Frontino sobre la vía Medellín – Urabá (Tomado de (IDEAM, 2015).	34

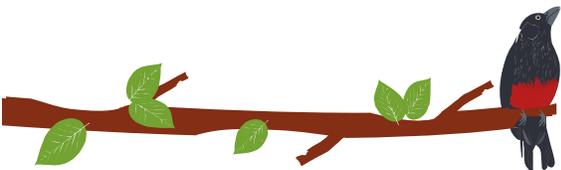




PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

Figura 13. Aspecto de las litoarenitas y lodolitas de Urrao.....	35
Figura 14. Columna estratigráfica de la Formación Guineales levantada en la vía Dabeiba – Mutatá (sección tipo) (IDEAM, 2015).....	39
Figura 15. Intercalaciones de capas de arenitas con conglomerados y lentes arenosos, se muestra además el de detalle de los conglomerados.....	40
Figura 16. Esquema tectónico y evolutivo del área de la cuenca de Río Sucio Alto con su zona de influencia (Gómez, H. 2018).....	44
Figura 17. Sectorización estructural del área de la cuenca del Río Sucio Alto. Fuente: Capítulo de geología. 48	
Figura 18. Discontinuidades presentes en el macizo rocoso de las diabasas y basaltos de San José de Urama (JK1du), estación JAM-02 vía Nacional Medellín – Turbo, municipio de Cañasgordas, vereda Cirigüan Río Verde, municipio de Uramita coordenadas (1092031.5E - 1253328.3N).....	49
Figura 19. Discontinuidades presentes en el macizo rocoso de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (K2alu), sin alterar, entrabadas, estación JAM-03, vía Nacional Medellín – Turbo, municipio de Cañasgordas, vereda Cirigüan, coordenadas (1232728.4E – 1121853.7N).....	49
Figura 20. Macizo de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (K2alu), parcialmente alterado, entrabado, con bloques de varias caras angulares, estación JAM-07, vereda Cestillal, municipio de Cañasgordas, (1110663.9E – 1250219.8N).....	50
Figura 21. Macizo rocoso de los Chert y calizas de Nutibara (K2cn), estación JAM-09 C2, vía Nacional Medellín – Turbo, municipio de Cañasgordas, vereda Botija Bajo, coordenadas (1106696.4E - 1247825.4N).....	50
Figura 22. Macizo rocoso de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (K2alu), muy fracturado, plegado, con bloques pequeños angulosos formados por intersecciones de familias de discontinuidades, persistencia de esquistosidad, estación JAM-19, vía Nacional Medellín – Turbo, municipio de Dabeiba, vereda El Pital, coordenadas (1105758.5E - 1248007.7N).	50
Figura 23. Disposición del macizo rocoso de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (K2alu), muy fracturado presente en la estación JAM-19, vía Nacional Medellín – Turbo, municipio de Dabeiba, vereda El Pital, coordenadas (1105758.5E - 1248007.7N).....	50
Figura 24. Macizo rocoso de los Basaltos de El Botón, muy fracturado, con bloques pequeños angulosos formados por intersecciones de familias de discontinuidades, parcialmente alterado, estación JAM-28, vía Nacional Medellín – Turbo, municipio de Frontino, vereda El Llano, coordenadas (1092264.9E - 1242571.3N).	51
Figura 25. Macizo rocoso de los derrames diabásicos y basálticos de los Basaltos de El Botón, muy fracturado, con bloques angulosos formados por intersecciones de familias de discontinuidades, estación JAM-28, vía Nacional Medellín – Turbo, municipio de Frontino, vereda El Llano, coordenadas (1092264.9E - 1242571.3N).	51
Figura 26. Ubicación de las Líneas de Geoelectricas en la cuenca Río Sucio Alto. Fuente (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016), (Consortio TYPASA-CRA, 2014).	53
Figura 27. Ubicación de la Línea de Geoelectrica Continua en el Área del Túnel El Toyo, entre las Localidades de Cañasgordas y Giraldo en el Departamento de Antioquia (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	54
Figura 28. Localización de la Línea de Geoelectrica Continua. G-1, Túnel 18, tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).	55
Figura 29. Interpretación del Perfil de Geoelectrica Continua G-1 - Túnel 18 tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).	56
Figura 30. Análisis e Interpretación del Perfil de Geoelectrica Continua G1 - Túnel 18 en Rocas de la Formación Urrao (K2alu) y los depósitos (Qca y QII) (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	57
Figura 31. Localización de la Línea de Geoelectrica Continua. G-2, Túnel 17 (El Toyo). Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).	58
Figura 32. Interpretación del Perfil de Geoelectrica Continua G-2 - Túnel 17 (El Toyo), tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	59
Figura 33. Análisis e Interpretación del Perfil de Geoelectrica Continua G2 - Túnel 17 (El Toyo) en Rocas de la Formación Penderisco (Ksu) y los depósitos fluviotorrenciales (Qft), tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	60

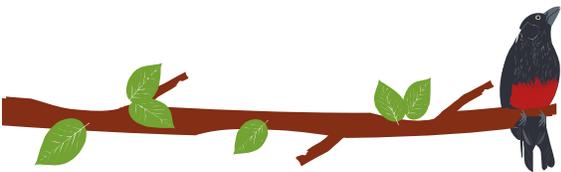




PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

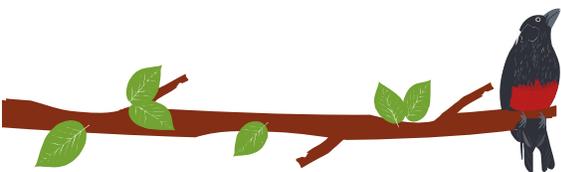
Figura 34. Localización de la Línea de Geoelectrica Continua. G-3, Túnel 17 (El Toyo).....	61
Figura 35. Interpretación del Perfil de Geoelectrica Continua G-3 - Túnel 17 (El Toyo), tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	62
Figura 36. Análisis e Interpretación del Perfil de Geoelectrica Continua G1 - Túnel 18 en Rocas de la Formación Penderisco (K2alu) y el depósito fluviotorrencial (Qft), tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).	63
Figura 37. Localizacion del túnel de Uramita en inmediaciones del centro poblado, tomado de (Consortio TYPASA-CRA, 2014).....	64
Figura 38. Tomografía eléctrica longitudinal del Túnel de Uramita, tomado de (Consortio TYPASA-CRA, 2014).	64
Figura 39. Localizacion del túnel de Fueimia, tomado de (Consortio TYPASA-CRA, 2014).	65
Figura 40. Tomografía eléctrica longitudinal del Túnel de Fueimia, tomado de (Consortio TYPASA-CRA, 2014).	65
Figura 41. Localizacion del túnel de La Llorona en inmediaciones del centro poblado, tomado de (Consortio TYPASA-CRA, 2014).....	66
Figura 42. Tomografía eléctrica longitudinal del Túnel de La Llorona (portal sur), tomado de (Consortio TYPASA-CRA, 2014).....	66
Figura 43. Relación pH vs Conductividad Eléctrica de los Datos de Parámetros Físico-Químicos in situ Tomados en Cada manantial Inventariado en la Formación Penderisco (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	69
Figura 44. Relación pH vs Sólidos Disueltos Totales de los Datos de Parámetros Físico-Químicos in situ Tomados en Cada Manantial Inventariado en la Formación Penderisco (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	70
Figura 45. Puntos de agua registrados para la cuenca Río Sucio Alto, los datos de la zona sur oriental son tomados de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).	72
Figura 46. Manantial colgado en terrazas aluviales antiguas, desembocadura río Urama sobre el río Sucio, estación GJAM-04.	73
Figura 47. Manantial en una zona de contacto entre los conglomerados de la Formación Guineales y los basaltos de El Botón, vereda Chovar, municipio de Dabeiba, departamento de Antioquia 73	73
Figura 48. Manantial en una zona de contacto entre los conglomerados de la Formación Guineales y los basaltos de El Botón, vereda Guineales, municipio de Dabeiba, departamento de Antioquia.	74
Figura 49. Manantial colgado en rocas cristalinas de la Monzonita del Cerro Frontino, estación JAM-34.	74
Figura 50. Manantial surgente en una zona de contacto entre la Monzonita del Cerro Frontino y los basaltos de La Clara - Rio Calle, estación JAM-38.	75
Figura 51. Ubicación de los puntos inventariados en el área de influencia del Proyecto Túnel del Toyo y sus vías de acceso, en los municipios de Giraldo y Cañasgordas fuente (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	78
Figura 52. Clasificación de los Manantiales Inventariados en la Formación Penderisco (K2alu) Según Meinzer (1923) tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).	80
Figura 53. Ubicación de los piezómetros construidos en la zona del túnel 17 construidos por el CONSORCIO AL MAR, para el monitoreo de aguas subterránea. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	82
Figura 54. Comportamiento de los niveles tomados en piezómetros en la zona del túnel 17. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	83
Figura 55. Nivel freático observado y utilizado en la modelación hidrológica del Tunel de Uramita.....	84
Figura 56. Nivel freático observado y utilizado en la modelación hidrológica del Tunel de Fueimia.	84
Figura 57. Nivel freático observado y utilizado en la modelación hidrológica del Tunel de La Llorona.	84
Figura 58. Nivel freático en un corte transversal en la localización del túnel de Fueimia.	85
Figura 59. Nivel freático en un corte transversal en la localización del túnel de Uramita.	85
Figura 60. Nivel freático en un corte transversal en la localización del túnel de La Llorona.	85





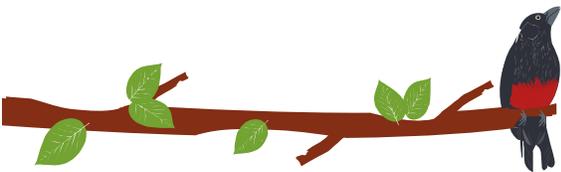
PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

Figura 61. Localización de los Piezómetros con Pruebas de Slug en el Tramo-1 (Túnel El Toyo), entre los Municipios de Cañas Gordas y Giraldo, tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	86
Figura 62. Comportamiento de la curva de los datos tomados de la Prueba de Slug de llenado (falling head) en el piezómetro PTNI 17-7. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	88
Figura 63. Comportamiento de la curva de los datos tomados de la Prueba de Slug de llenado (falling head) en el piezómetro PTNI 17-8. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	88
Figura 64. Comportamiento de la curva de los datos tomados de la Prueba de Slug de llenado (falling head) en el piezómetro PTNI 17-10. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016) ...	88
Figura 65. Comportamiento de la curva de los datos tomados de la Prueba de Slug de llenado (falling head) en el piezómetro PTNI 18-3. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	88
Figura 66. Relación Temperatura vs Altura de los Datos de Parámetros Físico-Químicos in situ Tomados en Cada Manantial Inventariado en la Formación Urrao (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	90
Figura 67. Espacialización de las rocas porosas con importancia hidrogeológica relativa grande y pequeña en la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: Elaboración propia.	91
Figura 68. Espacialización de las rocas porosas con importancia hidrogeológica relativa grande y pequeña en la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: Elaboración propia.	92
Figura 69. Rocas cristalinas con importancia hidrogeológica relativa muy pequeña o nula en la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: Elaboración propia.	93
Figura 70. Unidades hidrogeológicas identificadas para la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: propia a partir del análisis geológico escala 1:25000.	97
Figura 71. Geometría preliminar de las unidades hidrogeológicas de la cuenca Río Sucio Alto.	98
Figura 72. Red de flujo que esquematiza el flujo subterráneo natural en la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: Elaboración propia.	100
Figura 73. Métodos paramétricos para determinar la vulnerabilidad intrínseca, fuente (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010).....	102
Figura 74. Metodología GOD, desarrollada por Foster (1987).....	103
Figura 75. Parámetro G (Ocurrencia del Agua Subterránea) calculado para la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: elaboración propia.	105
Figura 76. Parámetro O (Sustrato Litológico de la Zona No Saturada) calculado para la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: elaboración propia.	107
Figura 77. Parámetro D (Sustrato Litológico de la Zona no Saturada) calculado para la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: elaboración propia.	109
Figura 78. Mapa de índices de vulnerabilidad GOD del área de la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: elaboración propia.	110
Figura 79. Mapa de pendientes utilizado para determinar las zonas potenciales de recarga hídrica.	113
Figura 80. Mapa de suelos utilizado para determinar las zonas potenciales de recarga hídrica.	114
Figura 81. Mapa de unidades geológicas utilizado para determinar las zonas potenciales de recarga hídrica.	115
Figura 82. Mapa de coberturas vegetales utilizado para determinar las zonas potenciales de recarga hídrica.	117
Figura 83. Mapa de usos del suelo utilizado para determinar las zonas potenciales de recarga hídrica.	118
Figura 84. Zonas potenciales de recarga hídrica para la cuenca Río Sucio Alto.	119



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Posible oferta de aguas subterráneas para la cuenca Río Sucio Alto.	18
Tabla 2. Estimación de la población que podría abastecerse con el agua subterránea que pueda llegar a encontrarse en la cuenca Río Sucio Alto.....	18
Tabla 3. Materiales tipos presentes en la cuenca Río Sucio Alto, teniendo en cuenta su tamaño y clasificación USCS.	23
Tabla 4. Capacidad de carga y descarga de las rocas (K) y espesor de los diferentes tipos de suelo presentes en la cuenca Río Sucio Alto.	24
Tabla 5. Promedio Excesos por UHN-1	28
Tabla 6. Datos generales de las Líneas de Prospección Geoeléctrica Continua levantadas en el área del Túnel El Toyo entre las Localidades de Cañasgordas y Giraldo. Departamento de Antioquia (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).	54
Tabla 7. Datos generales Rangos de Resistividad Obtenidos en la Línea G-1 Túnel 18. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).	57
Tabla 8. Datos generales Rangos de Resistividad Obtenidos en la Línea G-2 Túnel 17 (El Toyo). Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	60
Tabla 9. Datos generales Rangos de Resistividad Obtenidos en la Línea G-3 Túnel 17 (El Toyo).....	62
Tabla 10. Parámetros <i>in situ</i> de los Manantiales inventariadas en la Formación Penderisco (K2alu) (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	67
Tabla 11. Inventario de puntos de agua presentes en la cuenca (datos tomados de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016) y del recorrido de campo de geología).....	75
Tabla 12. Clasificación de Meinzer, 1923 (Modificada) fuente (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	78
Tabla 13. Cuadro resumen comparativo de las características básicas de las captaciones inventariadas por el PROYECTO TÚNEL DEL TOYO Y SUS VÍAS DE ACCESO, EN LOS MUNICIPIOS DE GIRALDO Y CAÑASGORDAS, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA por Unidad Geológica (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	79
Tabla 14. Características de los piezómetros y datos de niveles de agua registrados en la zona del túnel 17, construidos por el CONSORCIO AL MAR, para el monitoreo de aguas subterránea. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).	81
Tabla 15. Localización de los Piezómetros con Ejecución de Pruebas de Slug de Llenado en Rocas Asociadas a la Formación Urrao, en el Trazado del Túnel El Toyo (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).....	87
Tabla 16. Clases de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014)	102
Tabla 17. Valores asignados al parámetro G de acuerdo al Tipo de Acuífero	104
Tabla 18. Valores asignados al Sustrato Litológico de la Zona No Saturada	106
Tabla 19. Valores de nivel estático en los piezómetros del área	108
Tabla 20. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según tipo de pendiente.....	112
Tabla 21. Ponderación de la capacidad de recarga hídrica del suelo según su textura.	113
Tabla 22. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según unidad geológica.	115
Tabla 23. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según cobertura vegetal.	116
Tabla 24. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el uso del suelo.	117



1.4 HIDROGEOLOGÍA

INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta las características hidrogeológicas de las rocas presentes en la cuenca Río Sucio Alto, siguiendo la metodología propuesta por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (Struckmeir & Marat, 1995) para la elaboración de mapas hidrogeológicos de tipo general. El trabajo responde a la necesidad de delimitar unidades hidrogeológicas con base en un modelo geológico básico del subsuelo reconociendo la geometría y las fronteras tectono-estratigráficas de las unidades acuíferas regionales. En este sentido, se utilizó como base el mapa geológico de la cuenca elaborado a escala 1:25.000.

Las unidades acuíferas están directamente relacionadas con las condiciones geológicas y geoquímicas de las unidades de roca o sedimento, que por almacenar y transmitir el agua se denominan acuíferos, y por su carácter semipermeable o permeable pueden ser acuitados o acuífugos que inhiben de manera lenta o definitiva el paso del agua; por consiguiente, es posible a través del conocimiento geológico determinar la posibilidad de ocurrencia de aguas subterráneas a partir de la geometría y el tipo de roca presente en el subsuelo, aplicando técnicas directas de observación en afloramientos o técnicas indirectas que aprovechan las propiedades geofísicas de las rocas como son: la geoelectrónica, la sísmica, etc. La ocurrencia de acuíferos también está determinada por la disponibilidad natural de agua atmosférica que se recarga por los poros de las rocas y por fracturas originadas como respuestas a los esfuerzos y dinámica del movimiento de las placas tectónicas.

El objetivo de este análisis, es realizar una caracterización hidrogeológica desde un marco regional a partir de la geología, geomorfología básica y análisis de balance hídrico generados para el POMCA, así como el análisis de la información secundaria disponible con el fin de desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual que ayude establecer medidas de manejo ambiental para los acuíferos presentes en la cuenca.

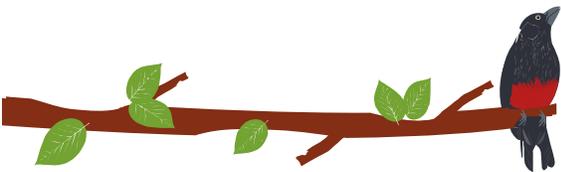
El área de la cuenca Río Sucio Alto, ha tenido un significativo desarrollo en las últimas décadas, desarrollo que va ligado a la necesidad del uso del recurso hídrico, el cual está limitado a la disponibilidad superficial y subterránea. Dadas las condiciones climáticas de la cuenca, la disponibilidad del agua superficial es abundante, y hasta el momento no se ha demandado la utilización del recurso hídrico subterráneo.

La caracterización hidrogeológica buscó identificar las unidades geológicas que puedan conformar acuíferos, la estimación de la oferta y calidad del recurso hídrico subterráneo, las condiciones de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, las zonas que deben ser objeto de protección especial, entre otros aspectos con el fin de generar un modelo hidrogeológico que permita identificar las condiciones de recarga y descarga del agua subterránea; además de las características litológicas y geométricas de la roca permeable, las secuencias estratigráficas y las respectivas condiciones hidrogeológicas locales tales como: dirección de flujo del agua subterránea, gradientes hidráulicos, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, capacidad específica y eficiencia, entre otras.

En términos generales, el 87% del área de la cuenca tiene posibilidades de aprovechamiento de aguas subterráneas representados en diferentes bloques tectónicos limitados por grandes fallas de carácter regional y local.

Teniendo en cuenta lo anterior, este capítulo se ha estructurado con un marco conceptual para precisar algunos términos, un marco metodológico que ilustra la forma de abordaje





del documento y las técnicas utilizadas para su construcción, una clasificación de las unidades hidrogeológicas y finalmente la identificación de las problemáticas inherentes al recurso.

1.4.1 ANTECEDENTES

La gestión de los recursos hídricos subterráneos se fundamenta en la búsqueda de información confiable, actualizada y pertinente sobre el estado de: ecosistemas asociados, usuarios y factores externos que pueden incidir sobre los mismos, tales como el uso de la tierra, las fuentes potenciales de contaminación y factores climáticos. Teniendo en cuenta lo anterior, el análisis de la información cuenta con el apoyo de un sistema de información geográfica (SIG) que permite el manejo, análisis y estructuración de información alfanumérica y espacial, así como la modelación de las variables físico-bióticas y socioeconómicas.

En CORPOURABA, como entidad encargada del manejo, control y protección de las fuentes de agua en la zona, no existe información sobre estudios de tipo hidrogeológico en el área de la cuenca Río Sucio Alto.

La información geológica de la cuenca, esta consignada en los documentos recopilados y organizados en su momento por INGEOMINAS hoy Servicio Geológico Colombiano (SGC), específicamente en las planchas 114-Dabeiba y 129 Cañasgordas, en ella se presentan las mejores descripciones de las unidades, acorde con la información geológica disponible:

Geología del Departamento de Antioquia (INGEOMINAS, 1999).

Atlas Geológico de Colombia, Plancha 05 (Gómez et al., 2007).

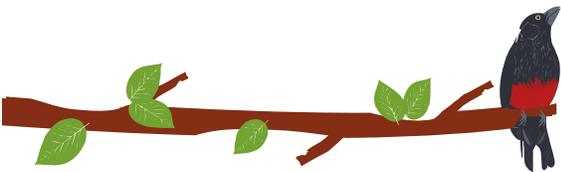
Geología de la Plancha Dabeiba-114 (Rodríguez, Zapata, & Gomez, GEOLOGÍA DE LA PLANCHA 114 DABEIBA, 2013).

Geología de la Plancha Cañasgordas-129 (González & Londoño, 2003).

Geología de la Planchas 103 – Mutatá, 104 – Ituango, 115 – Toledo (Hall R. , Álvarez, Rico, & Vasquez, 1970) y 130 – Santa Fe de Antioquia (Mejía N. , 1984) a escala 1:100.000.

Mapa geológico de Colombia. 2015, publicado por Ministerio de Minas y Energía-Servicio Geológico Nacional (Gómez y Almanza, 2015).

Para el tema hidrogeológico en el área de la cuenca Río Sucio Alto, sólo se encuentran registrados un primer informe denominado: ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA EL PROYECTO TÚNEL DEL TOYO Y SUS VÍAS DE ACCESO, EN LOS MUNICIPIOS DE GIRALDO Y CAÑASGORDAS, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016), el cual se realizó con el fin de conocer la acción constructiva de los túneles y sus posibles efectos sobre los sistemas hídricos subterráneos y superficiales, tales como: variaciones del nivel freático y la dirección del flujo subterráneo. En él se hace un análisis detallado de las condiciones hidrogeológicas del área de interés basado en estudios geológicos/geofísicos, inventarios de las diferentes capacitaciones de aguas subterráneas que se encuentren asociadas a las áreas de influencia de la citada obra, para conocer previamente la profundidad del nivel freático y la calidad del agua subterránea. Las características hidrogeológicas de las unidades geológicas atravesadas por los túneles, se determina mediante la ejecución de pruebas hidráulicas en captaciones artificiales existentes, aprovechando la construcción de pozos



exploratorios para Ingeniería y Geotécnica, los cuales fueron convertidos en piezómetros.

Adicionalmente se tiene un segundo estudio denominado: AUTOPISTA AL MAR 2. CAPÍTULO 9. ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS DE TÚNELES (Consortio TYPASA-CRA, 2014), en el cual se estudia la hidrogeología en los diferentes sitios de túneles a construir en el proyecto Autopistas Mar 2, los cuales se localizan a lo largo de los municipios de Uramita y Dabeiba, en el sector en inmediaciones del caso urbano, sector Alto de El Botón y sector de la Llorona. Se realiza una serie de exploraciones geológicas y geofísicas con el propósito de estudiar las condiciones hidrogeológicas del lugar, mediante: un planteamiento general en el cual se menciona la metodología utilizada, bibliografía consultada y características generales; seguido de una descripción hidrogeológica en la que se enuncia las características geológicas, estructurales, geomorfológicas y una estimación de valores preliminares. Luego se realiza un levantamiento hidrogeológico e inventario de puntos de agua a lo largo de todos los túneles proyectados, seguido de una descripción y estimación preliminar del riesgo hidrogeológico de cada túnel, con una descripción de los acuíferos y terrenos afectados, para finalizar con la construcción de un modelo hidrogeológico y conclusiones del estudio.

Cabe resaltar que ambos estudios solo cubren una pequeña porción del área de la cuenca, y que no toman todas las unidades geológicas que allí afloran, cubriendo un área aproximada de 20 Km², lo que representa el 0,9 % del área total de la misma. Por lo que se utiliza como valores representativos y no absolutos en relación a los cambios que se pueden presentar a lo largo de toda la cuenca.

1.4.2 LOCALIZACIÓN

A partir de un modelo geológico básico, el país se ha dividido en provincias hidrológicas (IDEAM, 2010) que agrupan cuencas geológicas con características litológicas, estructurales y geomorfológicas similares, con un comportamiento hidrogeológico homogéneo reconocible espacialmente (Figura 1). Como puede observarse, la Cuenca del Río Sucio Alto, no está asociada a ninguna Provincia Hidrogeológica de la región Andina, sin embargo, en esta cuenca pueden existir Sistemas Acuíferos formados por los materiales que suprayacen ambientes ígneos y metamórficos de la Cordillera Occidental (IDEAM, 2013) como los depósitos aluviales principalmente o por porosidad secundaria de las rocas que conforman la cuenca.

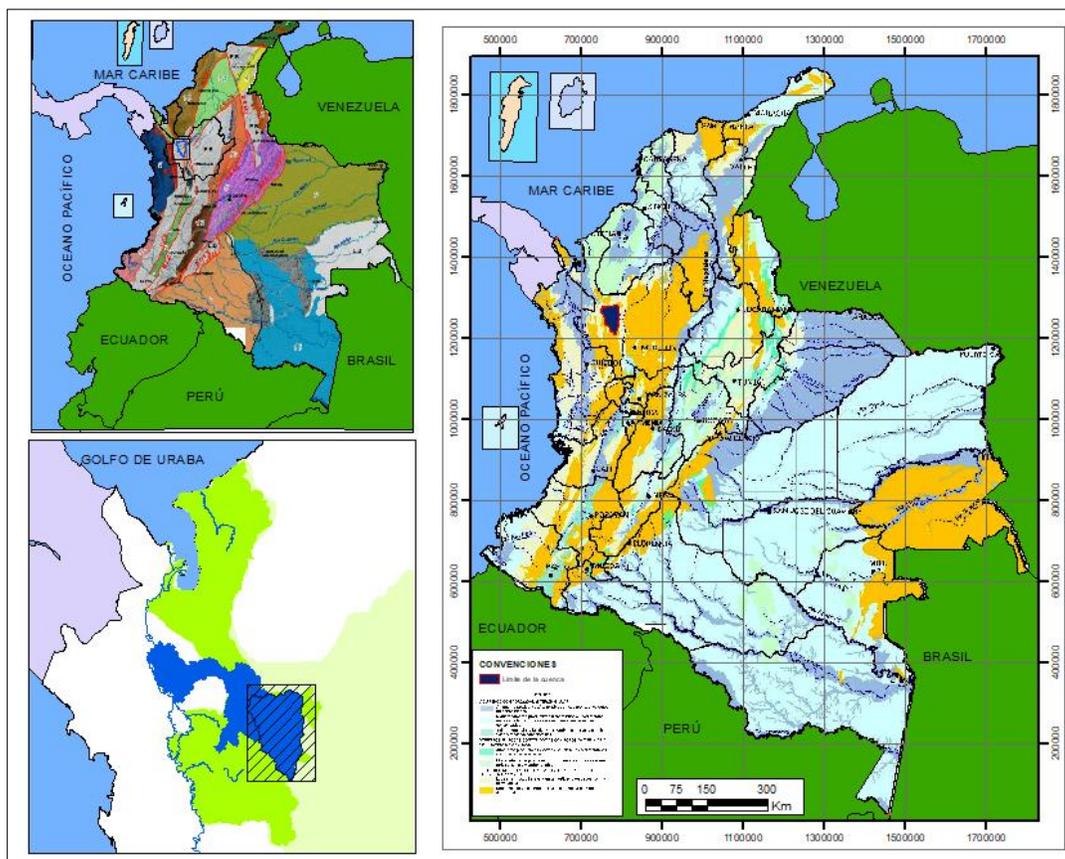
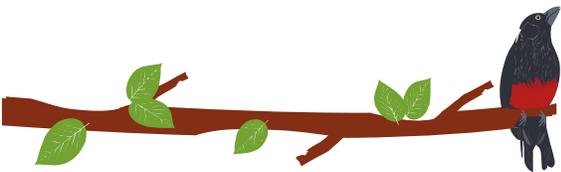


Figura 1. Localización de la Cuenca Río Sucusio Alto en las Provincias Hidrogeológicas de Colombia (IDEAM, 2010) y sobre ambientes ígneos y metamórficos de la Cordillera Occidental (IDEAM, 2013).

1.4.3 EL AGUA SUBTERRÁNEA Y EL CICLO HIDROLÓGICO EN LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO

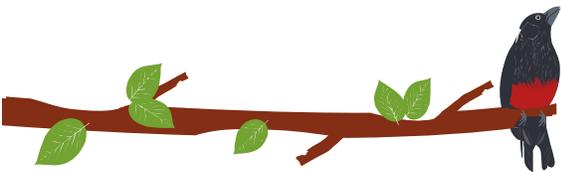
La cuenca del Río Sucusio Alto sobre la cual se realiza este análisis, se encuentra localizada a 50 km al noroccidente del departamento de Antioquia a partir del sitio donde se presenta la divisoria de aguas entre los ríos que fluyen hacia NW en dirección de la cuenca del Atrato y hacia el SE, en la subcuenca del río Tonusco que fluye hacia la cuenca del río Cauca. Topográficamente, la mayor parte del área varía entre los 2.500 y 1.400 msnm en la parte central; hacia el N se encuentran alturas de 3.200 m en las estribaciones del Nudo de Paramillo y hacia el SW, el Cerro Frontino con 3.400 m.n.s.m.

Hidrográficamente, la cuenca del Río Sucusio Alto discurre hacia el NW, siendo sus principales tributarios los ríos Urama, Verde, El Cerro, Cañasgordas y Herradura.

Geológicamente, las unidades se distribuyen en sentido N-S, con interrupciones esporádicas debido a las fallas que las controlan: las unidades más antiguas se encuentran localizadas hacia el E ocupando un 80% del área; mientras que las más recientes y tectonizadas se encuentran hacia el W.

La clasificación climática para la cuenca Río Sucusio Alto, está representada por los pisos térmicos que cuentan con una mayor ocurrencia en área, los cuales corresponden a Frio Húmedo, Templado Semi-Húmedo, Templado Húmedo y Cálido Semi-Húmedo, en donde los valores de precipitación a nivel mensual multianual oscilan en un rango de 77 mm a





281 mm, el mes que presenta las menores precipitaciones corresponde a enero. De acuerdo al balance hídrico, la cuenca presenta excesos en todos los meses, siendo los de mayor valor los meses de junio y noviembre, los valores oscilan en un rango de 40 a 250 mm/mes, esto quiere decir que los volúmenes de precipitación son mayores a la evapotranspiración real, lo cual muestra una significativa abundancia hídrica en la cuenca capaz de sustentar el desarrollo socioeconómico a largo plazo, sustentado en que tradicionalmente, en la cuenca el agua superficial ha sido la fuente principal de abastecimiento.

De acuerdo con (Serrano, 2007), el agua existe por encima y por debajo de la superficie terrestre, el agua que discurre sobre la superficie se llama "agua superficial" y el agua bajo la superficie se llama "agua subterránea" (Figura 2), ambas son partes del ciclo hidrológico, que es el movimiento recirculatorio continuo de las aguas terrestres. En la naturaleza el agua superficial y el agua subterránea están relacionadas, el agua superficial puede convertirse en agua subterránea mediante la infiltración (recarga), mientras que el agua subterránea puede convertirse en agua superficial mediante la descarga. Por lo tanto, las aguas superficiales y subterráneas están íntimamente ligadas; una de ellas no se puede considerar o evaluar sin considerar la otra.

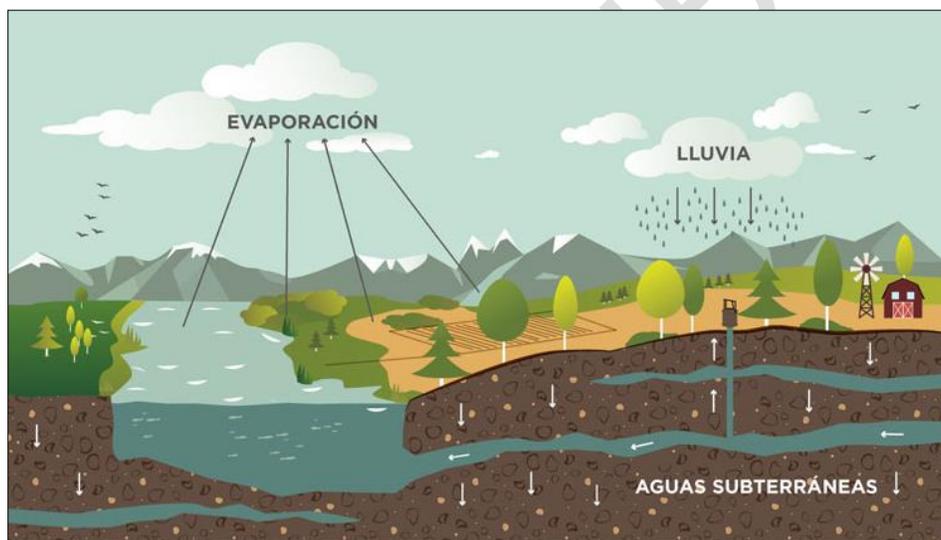


Figura 2. Figura 1.1. Ciclo hidrológico. Fuente: (Departamento de Antioquia, 2016).

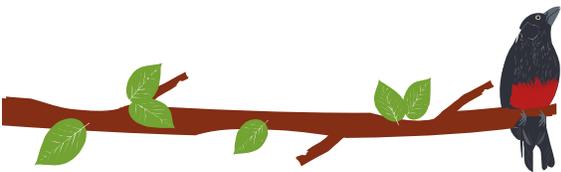
Aun cuando las aguas superficiales y subterráneas forman parte del ciclo hidrológico, puede demostrarse que difieren de dos maneras importantes:

El agua superficial es totalmente renovable, usualmente en unos días o semanas, mientras que el agua subterránea no es totalmente renovable, pudiendo tomar décadas, siglos, o aún más para renovarse.

El agua superficial fresca es escasa, particularmente cuando se compara con los grandes volúmenes de agua subterránea fresca que existen debajo de la superficie.

El ciclo hidrológico de la tierra es el mecanismo global que hace posible la transferencia de agua desde los océanos a la superficie y desde la superficie, o subsuperficie al subsuelo y a la atmósfera que envuelve nuestro planeta. Las principales variables naturales de los procesos del ciclo hidrológico son (IDEAM, 2013):

Precipitación, infiltración, escorrentía, evaporación y transpiración.



Las actividades humanas (asentamientos, industria y desarrollos agrícolas) pueden alterar los componentes del ciclo natural mediante afectaciones del uso del suelo y a través de la utilización, reutilización y vertido de residuos en los recorridos naturales de los recursos hídricos superficiales y subterráneos (Unesco, 2006).

El agua subterránea tiene su origen en la lluvia, parte de la cual se infiltra directamente a través del suelo, o desde ríos y lagos, por grietas y poros de las unidades roca sedimento, hasta alcanzar un nivel impermeable que no la deja descender más.

1.4.3.1 Marco Conceptual

En el análisis del recurso hídrico subterráneo de la cuenca Río Sucio Alto, es fundamental integrar la información geológica, hidrológica e hidrogeológica para conocer su distribución, estado, cantidad, calidad y la dinámica de las aguas subterráneas dentro de la cuenca.

Partiendo del hecho irrefutable de que la geología controla la presencia y distribución del agua en las rocas, se establece una caracterización de las unidades hidrogeológicas con base en un modelo regional, que represente el medio físico sobre el cual se desarrolla la dinámica del ciclo hidrológico en el componente subterráneo, de acuerdo con la capacidad de las rocas para almacenar y transmitir el agua.

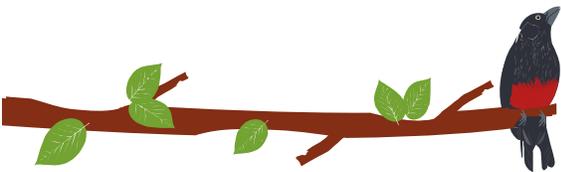
Las unidades geológicas corresponden a eventos geológicos únicos (IDEAM, 2010) cuyos límites físicos están marcados por fallas de orden regional y local documentadas en el capítulo de geología, por consiguiente, las unidades geológicas delimitadas se convierten en unidades hidrogeológicas de acuerdo con su capacidad de almacenar y permitir el paso del agua teniendo en cuenta sus propiedades de porosidad y permeabilidad.

Las unidades hidroestratigráficas (derivadas de las unidades litoestratigráficas de acuerdo con la naturaleza de los intersticios del sistema roca-sedimento) se comportan como acuíferos (rocas permeables que permiten el paso relativamente fácil de agua bajo condiciones naturales), acuitardos (permiten el paso lento del agua por sus condiciones semipermeables), acuícuerros (rocas impermeables que pueden contener agua pero no permiten su flujo o acuífugas no contienen, ni transmiten agua) (IDEAM, 2013), los acuíferos a su vez pueden ser libres, semiconfinados o confinados de acuerdo con la ubicación estratigráfica de las rocas encajantes y la posición del nivel freático.

En la cuenca se encuentran formaciones geológicas consistentes en unidades de roca porosas (arenas, gravas, etc.), o fracturadas (calizas, areniscas, basaltos, etc.) las cuales pueden contener agua en sus intersticios. Esta agua se denomina agua subterránea y los terrenos que la contienen y la pueden ceder se denominan acuíferos, el agua de un acuífero circula a favor del gradiente (pendiente) hasta encontrar un nivel de salida a la superficie en puntos definidos que se convierten en manantiales o drenajes cuyo caudal es mantenido por las aguas subterráneas especialmente en épocas de estiajes (IDEAM, 2013).

1.4.3.2 Metodología

En el análisis hidrogeológico para la cuenca Río Sucio Alto se utilizó toda la información temática generada para la cuenca, actualizada y pertinente sobre el estado del recurso hídrico, de los ecosistemas asociados y de factores externos que pueden incidir sobre los mismos, tales como el uso de la tierra, las fuentes potenciales de contaminación y factores climáticos, entre otros.



La caracterización del recurso hídrico subterráneo para la cuenca Río Sucio Alto, se hace con el fin de elaborar la línea base de oferta y demanda del agua subterránea, identificar los conflictos y problemáticas por el uso del recurso hídrico, analizar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación e identificar las fuentes potenciales de contaminación, entre otros aspectos (Figura 3), a través de esta caracterización se busca identificar unidades geológicas que conformen acuíferos, sus usos actuales y potenciales, la estimación de la oferta y calidad del recurso hídrico subterráneo, las zonas que deben ser objeto de protección especial, entre otros aspectos con el fin de generar un modelo hidrogeológico conceptual que permitan medidas de manejo ambiental para el recurso hídrico subterráneo (Figura 3).



Figura 3. Guía para el diagnóstico del recurso hídrico subterráneo. Fuente: Guía Metodológica para la Formulación de los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

El modelo hidrogeológico conceptual (Figura 4) permite determinar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, mientras que la caracterización del sistema hidrológico se precisa para poder evaluar oferta y disponibilidad.

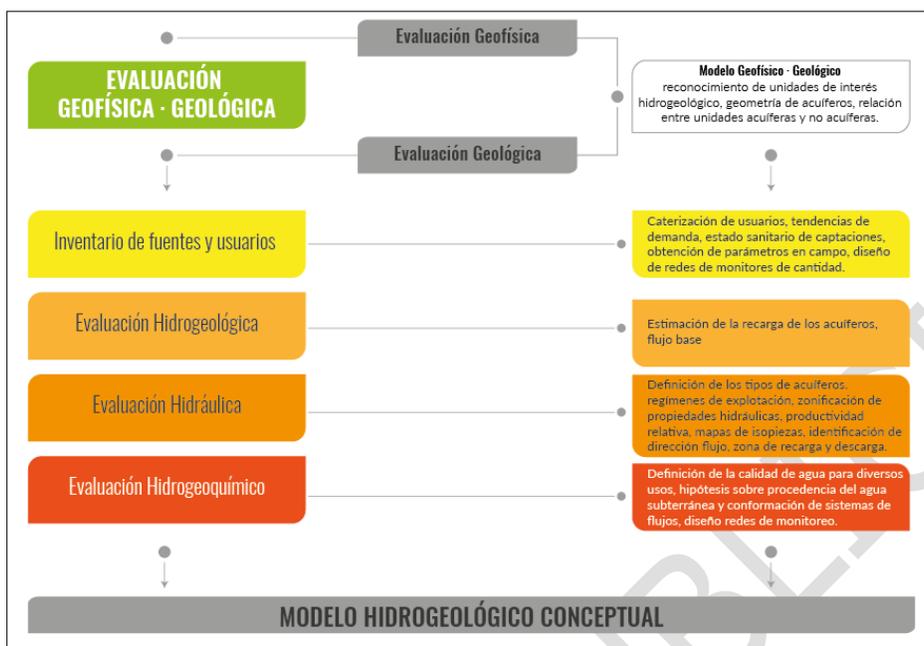
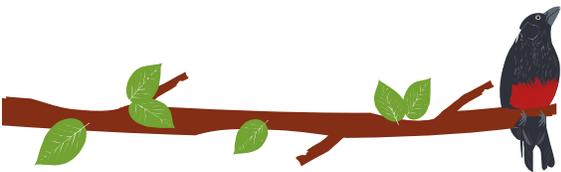


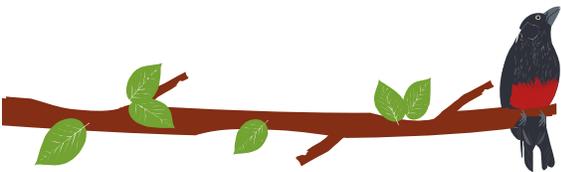
Figura 4. Diagrama de flujo para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual. Fuente: Guía Metodológica para la Formulación de los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Evaluación Geológica: en la realización de esta etapa se tuvo en cuenta toda la información consignada en el capítulo de geología, el cual presenta la interpretación geológico-estructural del área, realizada a través de la recopilación bibliográfica de los trabajos desarrollados anteriormente, fotointerpretación, procesamiento de imágenes de satélite y reconocimiento de campo. Los resultados de esta etapa están consignados en el mapa geológico de la cuenca a escala 1:25.000.

Reconocimiento hidrogeológico mediante el inventario de puntos de agua: para la cuenca no existe información de un inventario de puntos de agua (pozos, aljibes, manantiales, etc.), para suplir esta necesidad se hace uso de la información recolectada en la etapa de campo de geología y de la información consignada en los estudios AUTOPISTA AL MAR 2. CAPÍTULO 9. ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS DE TÚNELES (Consortio TYPASA-CRA, 2014), y el ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA EL PROYECTO TÚNEL DEL TOYO Y SUS VÍAS DE ACCESO, EN LOS MUNICIPIOS DE GIRALDO Y CAÑASGORDAS, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.-HIDROGEOCOL S. A., 2016), estudios en los que se realiza un inventario de manantiales a los cuales se analizaron algunas propiedades físicas y químicas del agua, caudales y niveles estáticos, información litológica e hidráulica de los piezómetros. La información recopilada durante esta etapa permitió identificar y caracterizar, de forma preliminar, los diferentes sistemas acuíferos presentes en la cuenca. Las características hidrogeológicas de las unidades geológicas relacionadas con el conocimiento de sus principales parámetros hidráulicos, se determinan mediante la ejecución de pruebas hidráulicas en captaciones artificiales existentes, aprovechando la construcción de pozos exploratorios para Ingeniería y Geotécnica, los cuales fueron convertidos en piezómetros.

Evaluación Geofísica: dentro del área de la cuenca no se registra ninguna campaña de evaluaciones hidrogeológicas regionales o detalladas, sólo se encuentra registrado el ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA EL PROYECTO TÚNEL DEL TOYO Y SUS VÍAS DE





ACCESO, EN LOS MUNICIPIOS DE GIRALDO Y CAÑASGORDAS, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016), y estudios AUTOPISTA AL MAR 2. CAPÍTULO 9. ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS DE TÚNELES (Consortio TYPASA-CRA, 2014), y en los que se hace un análisis detallado de las condiciones hidrogeológicas del área de interés basado en estudios geológicos/geofísicos, inventarios de las diferentes capacitaciones de aguas subterráneas que se encuentren asociadas al área de influencia de las obras. A través del estudio de geoeléctrica continua, se determinó la variación de la resistividad de las rocas en el subsuelo (aproximadamente hasta 300 m de profundidad) y la identificación de las capas geoeléctricas. La correlación de esta información con la obtenida en las otras etapas permitió definir la distribución espacial de los acuíferos.

Evaluación Hidrogeoquímica: el ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA EL PROYECTO TÚNEL DEL TOYO Y SUS VÍAS DE ACCESO, EN LOS MUNICIPIOS DE GIRALDO Y CAÑASGORDAS, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016) realiza algunos análisis físico-químico para las muestras de agua recolectadas en la campaña del inventario.

Evaluación Hidrológica: en esta etapa, se toman los datos consignados en el capítulo de hidrología, el cual está basado en el inventario de estaciones cercanas a la cuenca Río Sucio Alto, proveniente del catálogo de estaciones del IDEAM, este capítulo contiene los resultados y análisis relacionados con la oferta hídrica de largo plazo en condiciones normales, alta y baja humedad para la cuenca alta de río Sucio, información sirvió para realizar el balance de humedad del suelo que condujera al cálculo de la recarga potencial de los diferentes sistemas acuíferos.

Evaluación Hidrogeológica: con base en la información recopilada en las diferentes etapas, se plantea un **modelo hidrogeológico conceptual preliminar** para la cuenca Río Sucio Alto, el cual consta básicamente de los siguientes elementos (ver mapa hidrogeológico a escala 1:25.000): distribución espacial de los acuíferos, características litológicas estructurales, sistema de flujo, recarga-descarga, vulnerabilidad a la contaminación.

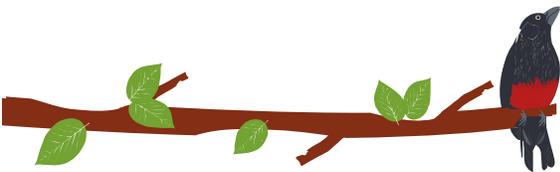
1.4.4 OFERTA Y DEMANDA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

1.4.4.1 Oferta

Por no existir datos, geofísicos, hidrogeológicos, ni fisicoquímicos para la cuenca Río Sucio Alto, no se puede calcular la disponibilidad de agua subterránea de la cuenca, sin embargo, por correlación geológica-estructural, en la cuenca se identificaron unidades potenciales de rocas sedimentarias, ígneas extrusivas e intrusivas, y sedimentos cuaternarios que pueden ser susceptibles de contener agua subterránea. Las unidades principales corresponden a bloques tectónicos de sedimentitas que predominan hacia el E, diabasas y basaltos intercalados con sedimentitas en la parte central.

En el estimativo aproximado de la oferta hídrica renovable de agua subterránea en la cuenca Río Sucio Alto, se consideran los valores de recarga, obtenidos en el balance hídrico.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, estableció mediante Resolución 872 de 2006, en el marco de la definición del Índice de Escasez para Aguas Subterráneas, la forma de calcular el caudal de agua explotable desde un acuífero; si bien esta metodología ha sido cuestionada, aún no se ha reformulado y sigue vigente. Según esta resolución el caudal explotable de agua subterránea se calcula con la expresión (CORPOURABA; Universidad de Antioquia, 2016):



$QE = a QN$

QE: Caudal explotable expresado, en m³/año.

QN: Recarga del acuífero en condiciones naturales y los componentes de recarga artificial cuando ellos son conocidos, expresada en m³/año.

a: Coeficiente adimensional, el cual puede tener un valor de 1,0, es decir toda el agua que se recarga al acuífero sea explotable.

Resumiendo las consideraciones planteadas, los valores de recarga potencial (Tabla 1 en la cuenca Río Sucio Alto, se estableció para cada uno un área de influencia para calcular el volumen de agua recargada anualmente, multiplicando recarga por área.

Tabla 1. Posible oferta de aguas subterráneas para la cuenca Río Sucio Alto.

Recarga potencial (m ³)	Area (Km ²)	Unidad Hidrogeológica
5.663.700	180.01	K2alu

Considerando una dotación aproximada de 54,75 m³/habitante/año (150 litros/habitante/día) de acuerdo a lo planteado por la Resolución 2320 de 2009 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, ahora Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y los valores de oferta de la Tabla 1, se estima la población que se podría abastecer para cada en la cuenca (Tabla 2) (CORPOURABA; Universidad de Antioquia, 2014).

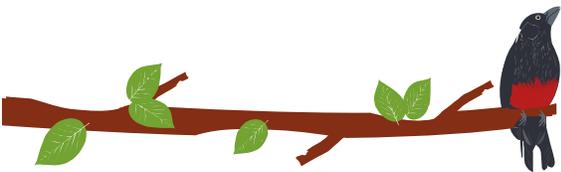
Tabla 2. Estimación de la población que podría abastecerse con el agua subterránea que pueda llegar a encontrarse en la cuenca Río Sucio Alto.

Recarga potencial (m ³)	POBLACIÓN (Hab/año)
5.663.700	103.446

1.4.4.2 Demanda

El agua cumple una función como materia prima o como insumo (IDEAM, 2014) (IDEAM & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), puede ser usada para la satisfacción directa de las necesidades humanas, como parte de un proceso productivo o demandada por los ecosistemas para su sostenimiento.

La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico –PNGIRH– en uno de sus objetivos específicos propone “caracterizar, cuantificar y optimizar la demanda de agua en el país” (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010, pág. 96). El logro de este objetivo contempla el diseño de estrategias relacionadas con: caracterización y cuantificación de la demanda de agua en cuencas priorizadas, fomento a la gestión integral del recurso hídrico en los principales sectores usuarios del agua, y uso eficiente y sostenible del agua (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010).



La demanda hídrica total, de acuerdo con el Decreto 2930 de 2010, corresponde a la suma del volumen de agua utilizada para los diferentes usos: doméstico, servicios, preservación de fauna y flora, agrícola, pecuario, recreativo, industrial, energía, minería e hidrocarburos, pesca, maricultura y acuicultura, navegación, transporte y caudal de retorno. De estos usos de agua se calculan volúmenes para los sectores, actividades y cadenas de uso.

El esquema general para la evaluación de la demanda de agua presentado en el Estudio Nacional del Agua –ENA– (IDEAM & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), considera pertinente identificar, para cada caso de estudio, los sectores objeto de análisis y la información disponible. En la cuenca Río Sucio Alto no se reporta ningún uso para las aguas subterráneas.

Siguiendo los lineamientos planteados por la Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos promulgada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en 2014, la demanda total de agua subterránea corresponde a la sumatoria de las demandas sectoriales de agua, y se calcula utilizando la siguiente expresión en m³ por año:

$$DT = DUD + DUI + DUS + DUA + DUP$$

Dónde:

DT = Demanda total de agua.

DUD = Demanda de agua para uso doméstico.

DUI = Demanda de agua para uso industrial.

DUS = Demanda de agua para el sector servicios.

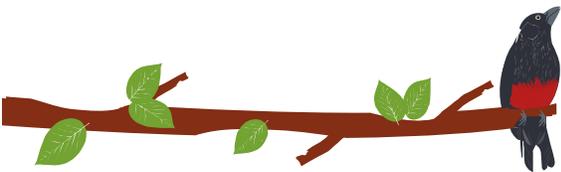
DUA=Demanda de agua para uso agrícola.

DUP= Demanda de agua para uso pecuario.

Como en la cuenca no se reporta ningún uso, la demanda de agua subterránea en la cuenca Río Sucio Alto, se puede considerar como el caudal ambiental, representado por el nivel de retención y regulación hídrica, el cual mide la capacidad de una cuenca para mantener un régimen de caudales, teniendo en cuenta su capacidad de retención de humedad y la interacción entre los factores bióticos y abióticos presentes, principalmente entre el sistema suelo-vegetación y el clima y las características morfométricas (IDEAM, 2010; MinAmbiente, 2014).

1.4.5 EVALUACIÓN DE LA RECARGA PROVENIENTE DE LA PRECIPITACIÓN

La recarga de agua a un acuífero depende de un conjunto de variables, las cuales en muchas ocasiones no se determinan de manera exacta y sencilla y aquellas que pueden medirse de manera directa, corresponden a datos puntuales que luego deben extenderse a grandes áreas (Custodio, Llamas, & Sauquillo, 2000). Autores como Lerner (Lerner R, A.S., & Simmers, 1990) (1990) y Samper (Samper, 1997) han propuesto una clasificación para los diferentes métodos de estimación de la recarga subterránea tales como medidas directas, balance de agua, técnicas de Darcy, técnicas de trazadores y métodos empíricos, en Colombia el método de Balance Hídrico es el más utilizado.



1.4.5.1 Hidrografía

Las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas hacen parte del mismo ciclo hidrológico y se encuentran constantemente en interacción. Además, la principal fuente de alimentación de las aguas subterráneas son las aguas meteóricas. Por lo anterior, es de gran importancia la evaluación de las condiciones meteorológicas e hidrológicas, para contribuir al modelo hidrogeológico con la siguiente información:

- Posibles fuentes y zonas de recarga y descarga de aguas subterráneas.
- Disponibilidad del agua para la recarga (balance hídrico superficial).

La cuenca del río Sucio Alto es de tipo continental, debido a su ubicación. Toma el nombre de río Sucio a partir de la confluencia de los ríos Cañasgordas y La Herradura a unos 800 msnm en la cordillera occidental. El río Cañasgordas nace en las inmediaciones del cerro de las Nutrias, 11 km al sur de la población de Cañasgordas, en jurisdicción de los municipios de Abriaquí y Giraldo, a unos 3.300 msnm. La cuenca del río Cañasgordas limita con la divisoria de los ríos La Herradura y Tonusco, presentando como cima destacada el cerro de Las Nutrias (aprox. 3.300 msnm); por el Suroriente, con la divisoria del río Tonusco, destacándose el Boquerón de Toyo (Depresión natural 2.200 msnm), los altos Loma Grande (2.700 msnm) y Romero (2.930 msnm); y por el Nororiente con las divisorias de los ríos Cauca y El Chuzá. El río Sucio recorre los municipios de Cañasgordas, Uramita, Dabeiba y Mutatá para desembocar al río Atrato (CORPOURABA, 2007) (Figura 5).

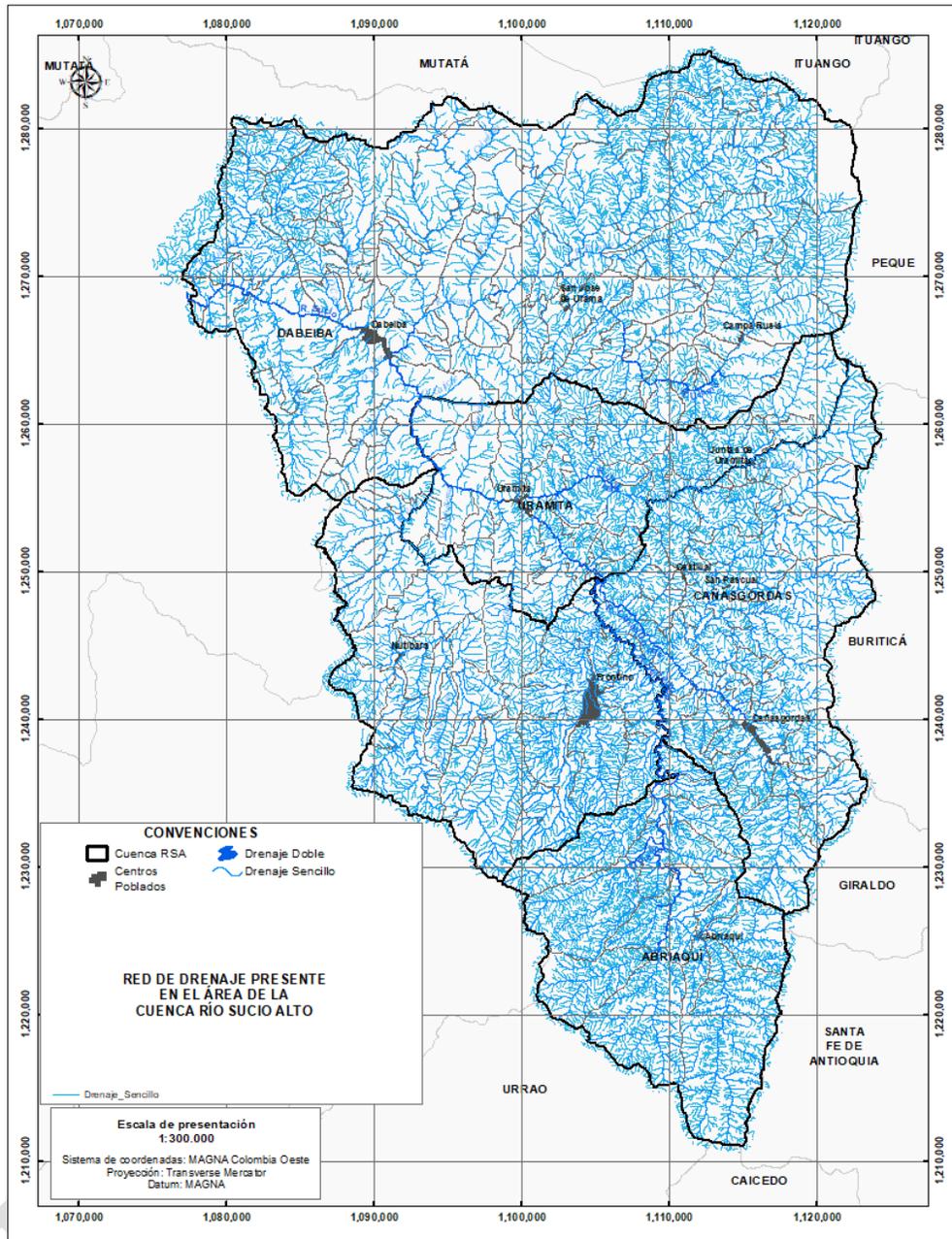
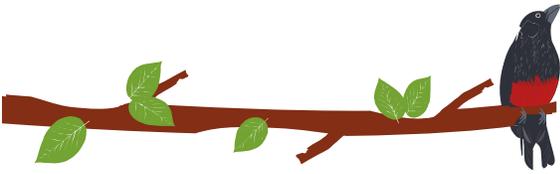
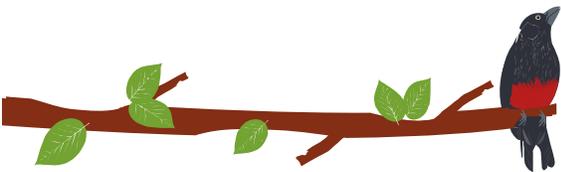


Figura 5. Red hidrográfica de la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: Elaboración propia

1.4.5.2 Suelos

La cantidad de agua procedente de la precipitación que puede llegar a los acuíferos, está controlada por su paso a través del suelo. La velocidad del movimiento del agua en el suelo y la cantidad de ésta depende de la permeabilidad del suelo, de su capacidad de retención y almacenamiento del agua, las cuales están influenciadas primordialmente por las propiedades físicas del suelo (textura, estructura, porosidad, drenaje, etc.) (López D. , 1990).



En la cuenca, las condiciones geomorfológicas (paisaje, tipo de relieve, forma del terreno), climáticas (piso térmico, provincia de humedad) y geológicas (litología/sedimentos) son los factores determinantes en la existencia de poblaciones edáficas.

Los suelos de la parte septentrional de la Cordillera Occidental están ampliamente distribuidos en la cuenca: en el sector centro-occidental son suelos derivados de rocas ígneas (diabasas y basaltos); son profundos y superficiales, excesivamente a bien drenados, textura franca fina limitados por piedra y gravilla en el perfil, pendientes escarpadas, limitados por factores físicos y químicos y exceso de humedad.

Los suelos derivados de rocas vulcanosedimentarias tipo areniscas, limolitas, cherts, tobas y milonitas; intercaladas con andesitas, basaltos, y diabasas son moderadamente profundos, drenaje moderadamente excesivo limitados por pendientes escarpadas, fragmentos de roca en el perfil y exceso de humedad.

Los suelos derivados de rocas sedimentarias clásticas (litoarenitas de Urrao); son muy superficiales, bien drenados limitados por pendientes moderadamente escarpadas, abundantes fragmentos de roca en el perfil. Textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares finos, débiles; frecuentes poros finos y medianos, pocos gruesos.

Los suelos derivados de rocas sedimentarias limo arcillosas y químicas carbonatadas (Chert y calizas de Nutibara); son moderadamente profundos y superficiales, bien drenados limitados por pendientes escarpadas, abundantes fragmentos de roca en el perfil y por la profundidad efectiva superficial y exceso de humedad.

Los suelos derivados de depósitos heteromórficos de origen aluvio- torrencial son moderadamente profundos y superficiales, bien drenados, limitados por inundaciones y por pendientes escarpadas.

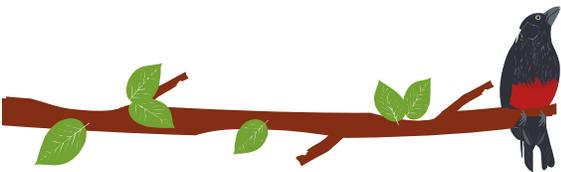
Los suelos derivados de depósitos Aluvio-coluviales heteromórficos son muy superficiales, mal drenados limitados por inundaciones frecuentes, mal drenaje, texturas gruesas.

Los suelos derivados de depósitos coluviales heteromórficos son muy superficiales, bien drenados, fragmentos de roca en el perfil y exceso de humedad.

Los suelos derivados de depósitos heteromórficos de origen torrencial predominantemente gruesos son muy superficiales, bien drenados, fragmentos de roca en el perfil muy superficiales y exceso de humedad.

Teniendo en cuenta la gran variedad de suelos y el carácter regional de la cuenca, se realizó la re zonificación del área con base en los resultados obtenidos en el capítulo de suelo y tomando como criterio las características texturales de los diferentes tipos de suelos.

Los suelos de la cuenca se clasificaron en tres grupos, según el contenido predominante de las fracciones de arena, arcillas y limos, ya que este factor influye en un alto grado sobre el almacenamiento y movimiento del agua en el suelo, se agruparon teniendo en cuenta la clasificación de suelos de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS): Fino de alta plasticidad (H), Fino de baja Plasticidad (L) y Arena (S) (Figura 6). El espesor de la formación superficial es el equivalente al espesor del depósito de suelo (depósitos superficiales y regolitos de alteración) (Figura 7).



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

Tabla 3. Materiales tipos presentes en la cuenca Río Sucio Alto, teniendo en cuenta su tamaño y clasificación USCS.

CLASIFICACIÓN O SÍMBOLO	TIPO MATERIALES
MH, CH	Fino de alta plasticidad (H)
ML, CL, ML CL	Fino de baja Plasticidad (L)
SC, SM, SP, SW, SW SM, SW SC, SP SM, SP SC Y SC SM	Arena (S)

Fuente: Elaboración propia.

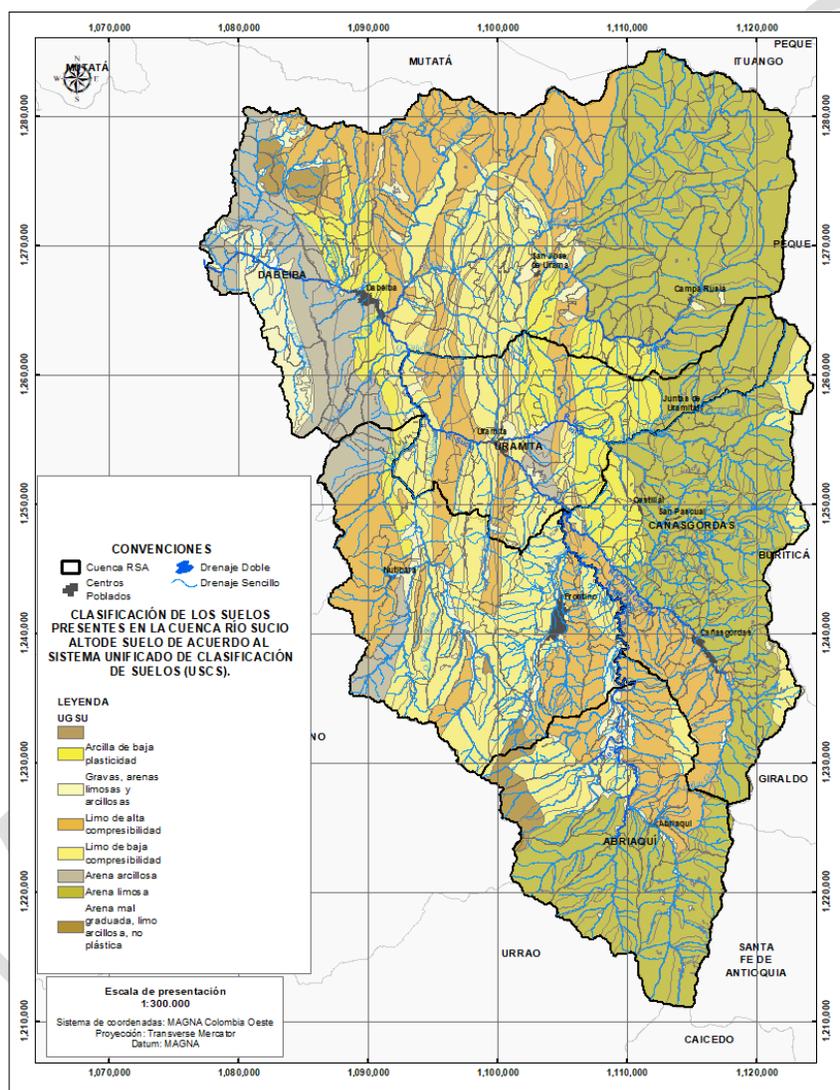
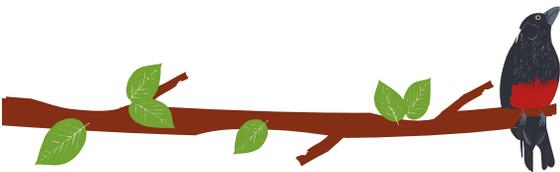


Figura 6. Espacialización y clasificación de las muestras de suelos de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) presentes en la cuenca Río Sucio Alto. Elaboración propia.

En la figura se presenta la distribución de los materiales arcillo limosos o limoarcillosos, y se observa que la mayoría de estos se presentan hacia el oeste de la cuenca. En



general, se puede inferir que la tendencia de la distribución de los materiales finos se presenta en las zonas de pendientes moderadas (menos abruptas).

La distribución de los materiales arenosos mostrados en la Figura 6 es menor que los materiales finos, con una tendencia NW, sobre el trazo de la Falla Cañasgordas (vía al mar).

La distribución de los materiales gravosos está concentrada en los sectores de depósito fluvio-torrenciales, especialmente en los abanicos aluviales.

La composición de los materiales finos está dada principalmente por MH, en segunda proporción están los ML y CL. Las humedades naturales están en un rango entre 20 y 60%, la humedad representativa está cerca de 35%.

Los materiales arenosos se componen principalmente por arenas SC y SM y en segunda proporción están las arenas con mezclas menores de materiales finos. La humedad natural está un rango de 22 y 31%.

Los materiales gravosos se componen principalmente de gravas GM. La humedad natural es de 41%.

En la Tabla 4, se presentan los tipos de suelo presentes en la cuenca Río Sucio Alto.

Tabla 4. Capacidad de carga y descarga de las rocas (K) y espesor de los diferentes tipos de suelo presentes en la cuenca Río Sucio Alto.

NOM_UNIDAD	K (m/día)	ESPESOR (m)
Suelo residual ígneo extrusivo limoso, de las Diabasas y basaltos de San José de Urama.	0.4500	12
Suelo residual ígneo extrusivo limoso de la Formación Barroso.	0.2000	15
Suelo residual ígneo extrusivo limoso de los Basaltos de La Clara - Rio Calle.	0.2000	23
Suelo residual ígneo extrusivo arenoarcilloso del Basalto de El Botón.	0.5000	15
Suelo residual ígneo extrusivo arenoarcilloso del Complejo Santa Cecilia la Equis.	0.0010	11
Suelo residual ígneo intrusivo limoso de la Diorita de Morrogacho.	0.2000	12
Suelo residual ígneo intrusivo arenoso de la Monzonita del Cerro Frontino.	0.0000	13
Suelo residual ígneo intrusivo arenoso de la Monzonita de Nudillales.	7.0000	12
Suelo residual sedimentario limoso de los Chert y calizas de Nutibara.	0.2000	
Suelo residual arenolimoso arcilloso de las Litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao.	0.5000	45
Suelo residual gravoarenoso limoso y arcilloso de la Formación Guineales.	10.0000	
Suelo residual sedimentario arenoso y arcilloso de las Sedimentitas de Beibaviejo.	0.0010	18

Fuente: Elaboración propia.

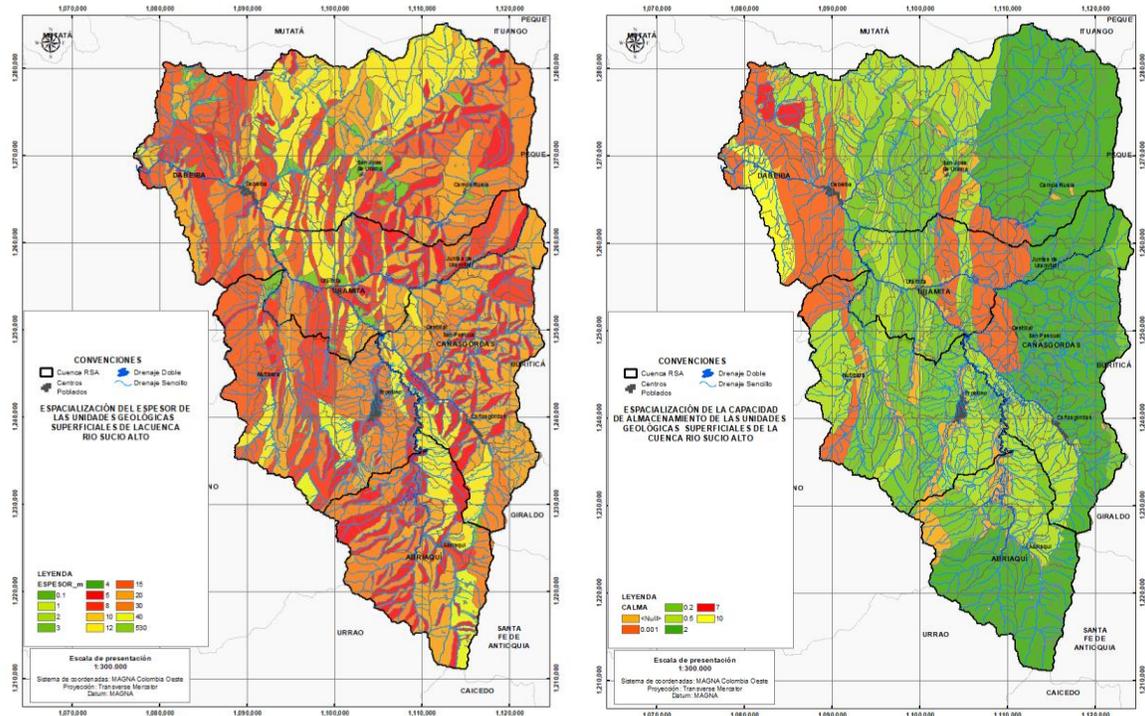
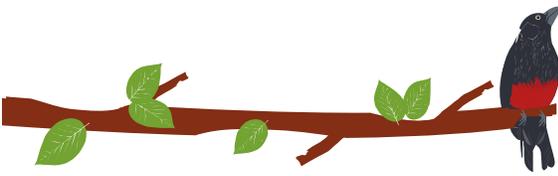


Figura 7. Espesor y capacidad de almacenamiento de los suelos en la cuenca Río Sucio Alto. Elaboración propia.

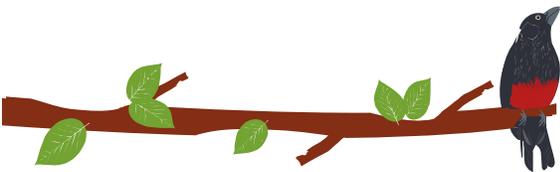
1.4.5.3 Balance Hídrico

Como se había comentado antes, el método de Balance Hídrico es el más utilizado en Colombia para la estimación de la recarga subterránea.

Este método está basado en el principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido (volumen de control), definida por unas condiciones de frontera, durante un período de tiempo. La diferencia en las entradas y las salidas debe ser igual al cambio en el almacenamiento de agua. La mayor parte de los métodos de balance de agua determinan la recarga a partir de los demás componentes, este tipo de balances se puede hacer en la zona superficial, en la no saturada y en la saturada (Vélez y Vásquez, 2004) (Vélez, M. & Vásquez, L, 2004).

El balance hídrico es una herramienta que permite estimar las ganancias de agua por lluvia o riego y las pérdidas por evaporación, escorrentía, drenaje profundo y la variación del almacenamiento de agua en el suelo. Conocer el balance hídrico de un área permite determinar, la disponibilidad del recurso hídrico y la magnitud macroclimática de los períodos con exceso o deficiencia de agua en una unidad de trabajo sometida a estudios agroclimáticos e hidroclimáticos. Existen diversos métodos para estimar estas variables de interés hidroclimático. Entre ellos se encuentra el método de Thornthwaite el cual fue empleado en el presente trabajo (García & Montoya, 1972) (ver detalle capítulo clima).

Considerando como factores fundamentales para la infiltración las características del terreno tales como la pendiente, la textura del suelo, la cobertura vegetal, entre otras, consultó las condiciones texturales de los suelos desarrollados en la cuenca, parámetros que se tuvieron en cuenta en el análisis hidrometeorológico realizado para la cuenca en



el capítulo de clima, en donde la estimación de la recarga potencial de los acuíferos, se realiza mediante la utilización del balance hídrico a nivel mensual.

El enfoque utilizado para la construcción del balance hídrico es un modelo dinámico y distribuido en el espacio, proporcionado las entradas climáticas y la capa de capacidad máxima de almacenamiento en suelo, que corresponden a datos espacialmente distribuidos.

Los términos y conceptos involucrados en el balance hídrico se definen a continuación:

Almacenamiento de agua útil (A): existe cuando la precipitación $P > Ep$, quedando una reserva de humedad que se acumula mes a mes y no puede ser superior a la capacidad del campo o cantidad máxima de agua que puede soportar el suelo en consideración.

Exceso (E): existe si la precipitación es mayor que la evapotranspiración potencial y si hay un excedente de agua, una vez completado el almacenaje en el suelo. A la suma de los excesos producidos mes a mes durante todo el año se le denomina exceso anual E .

Déficit (D): cuando la precipitación es menor que la evapotranspiración potencial, se evapora y transpira toda el agua precipitada. La cantidad que hace falta para completar el total de Ep se toma del almacenamiento y si, aun así, no se completa el valor de Ep el faltante se considera como déficit.

Evapotranspiración real (Er): es la evapotranspiración que realmente, según el método, ocurre en función del agua disponible ($P + A$). Máximo puede ser igual a la potencial.

Los métodos de cálculo para cada uno de los componen del balance hídrico descrito atrás se describen a continuación:

Calculo del almacenaje de agua útil (A)

Se verifica si la precipitación es mayor o menor a la evapotranspiración potencial en el período considerado. Se busca el mes en el que la diferencia se hace máxima y se adopta $A = 0$ o $A = CMA$, según sea $P > Ep$ o $P < Ep$, respectivamente. En el ejemplo: $P = 986$, $Ep = 656$, el mes en el que la diferencia es mayor es noviembre, al que se adjudica $A = \text{capacidad máxima de almacenamiento del suelo (CMA)}$.

El cálculo del almacenaje de agua útil de los meses calendario siguientes, es el resultado de la suma del almacenaje del mes anterior más la precipitación del mes en cuestión, constituyen el agua disponible; la diferencia entre esta (agua disponible) y la evapotranspiración potencial nos determina el almacenaje:

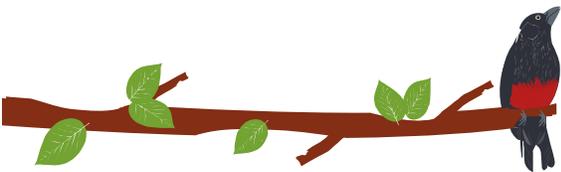
$$\text{Agua disponible} = A_{i-1} + P_i$$

$$\text{Almacenaje} = (A_{i-1} + P_i) - E_p$$

Realizar una prueba preliminar de cálculo del balance hídrico supone conseguir un valor de arranque para el almacenaje A consistente, el valor de A correspondiente al mes fijado como inicial debe ser el mes más seco o el más lluvioso, o sea 0 ó la CMA en mm: "se suponen como límites". En caso de no ser así, se parte del último valor calculado y se realiza nuevamente toda la operación y así sucesivamente hasta que haya plena coincidencia

Si $A_i > CMA$, entonces $A_i = CMA$; el excedente de CMA es el exceso de agua de ese mes E_i ; la deficiencia de ese mes, obviamente, $D_i = 0$,

Si $CMA > A$, el exceso y la deficiencia de ese mes son iguales a cero,



Si $A_i < 0$, la deficiencia $D_i = (P_i - E_{pi})$ si $P < E_{pi}$

$$D_i = E_{pi} - (P_i + A_i - 1), \text{ si } (P_i + A_i) < E_{pi}.$$

Cálculo de la variación de almacenamiento de agua útil (ΔA): es igual a la diferencia entre el valor de almacenamiento de agua útil del mes considerado y el mes anterior.

Calculo de la evapotranspiración real:

$$\text{Si } P > E_p \Rightarrow E_r = E_p$$

$$\text{Si } P < E_p \Rightarrow E_r = P + |\Delta A|$$

Comprobación del balance: para los valores anuales debe cumplirse la siguiente relación:

$$P + D = E_p + E$$

Evapotranspiración potencial (ETp): Teniendo en cuenta la practicidad del método de Thornthwaite, y la disponibilidad de información adicional para la aplicación de otros métodos de estimación de esta variable, se construyeron los campos de ETP con el método propuesto por (Thornthwaite, 1948).

$$ETP_i = K_i * 16 \left[\frac{10 * T_i}{I_j} \right]^{a_j}$$

$$I_j = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$$

$$a_j = 675x10^{-9} \cdot I_j^3 - 771x10^{-7} \cdot I_j^2 + 179x10^{-4} \cdot I_j + 0.49239$$

$$K_i = \frac{N_i}{12} * \frac{d}{30}$$

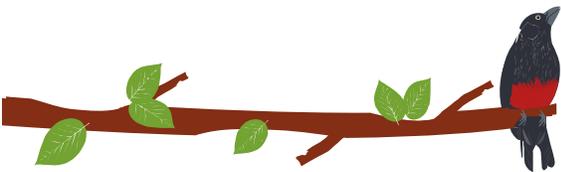
Donde ETP_i , es la evapotranspiración potencial en mm mes⁻¹, K_i , es un factor de corrección mensual en función del número de días y la latitud de la estación donde se estima el parámetro (adimensional), T_i , es la temperatura media mensual del aire en °C, I_j , es el índice de calor anual, a_j , es el exponente en función de I_j , N , es el número máximo promedio de horas de sol en horas día⁻¹ y d es número de días del mes.

La recarga potencial por precipitación se da de dos maneras:

Por un movimiento descendente del agua debido a la fuerza de gravedad.

Por el movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Para la verificación del balance hídrico se empleó la estación hidrológica Dabeiba Automática, con el fin de comprar los excesos generados con los caudales transformados en lámina de agua, el resultado de la verificación arrojo que aproximadamente el balance genera un 17% de sobre estimación en relación con los valores observados, se realizó una confirmación de los valores de brillo solar para la corrección de la evapotranspiración potencial, lo cual indica que la sobreestimación en el balance hídrico puede sugerir aportes considerables de acuíferos de más o menos 300 mm/año (para más detalle ver capítulo clima y sus anexos).



En la Tabla 5, se observa la estadística zonal para la unidad de análisis hidrológico nivel 1, se presentan excesos en todos los meses, siendo los de mayor valor los meses de junio y noviembre, los valores oscilan en un rango de 40 a 250 mm/mes, esto quiere decir que los volúmenes de precipitación son mayores a la evapotranspiración real.

Tabla 5. Promedio Excesos por UHN-1

UAH-1	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1111-010000	44.6	44.6	45.9	97.1	203.0	259.4	195.0	156.9	160.9	203.4	250.4	201.7

Fuente: Elaboración propia.

La estimación de la capacidad máxima de almacenamiento del suelo, necesaria para involucrar la capa del suelo en el balance hídrico, fue determinada a partir del estudio de suelos de la cuenca disponible a escala 1:25.000. En la estimación, se ponderaron criterios relacionados con la textura de las unidades de suelo, drenaje, profundidad y litología las cuales mediante criterio experto arrojaron unas capacidades de almacenamiento de hasta 150 mm.

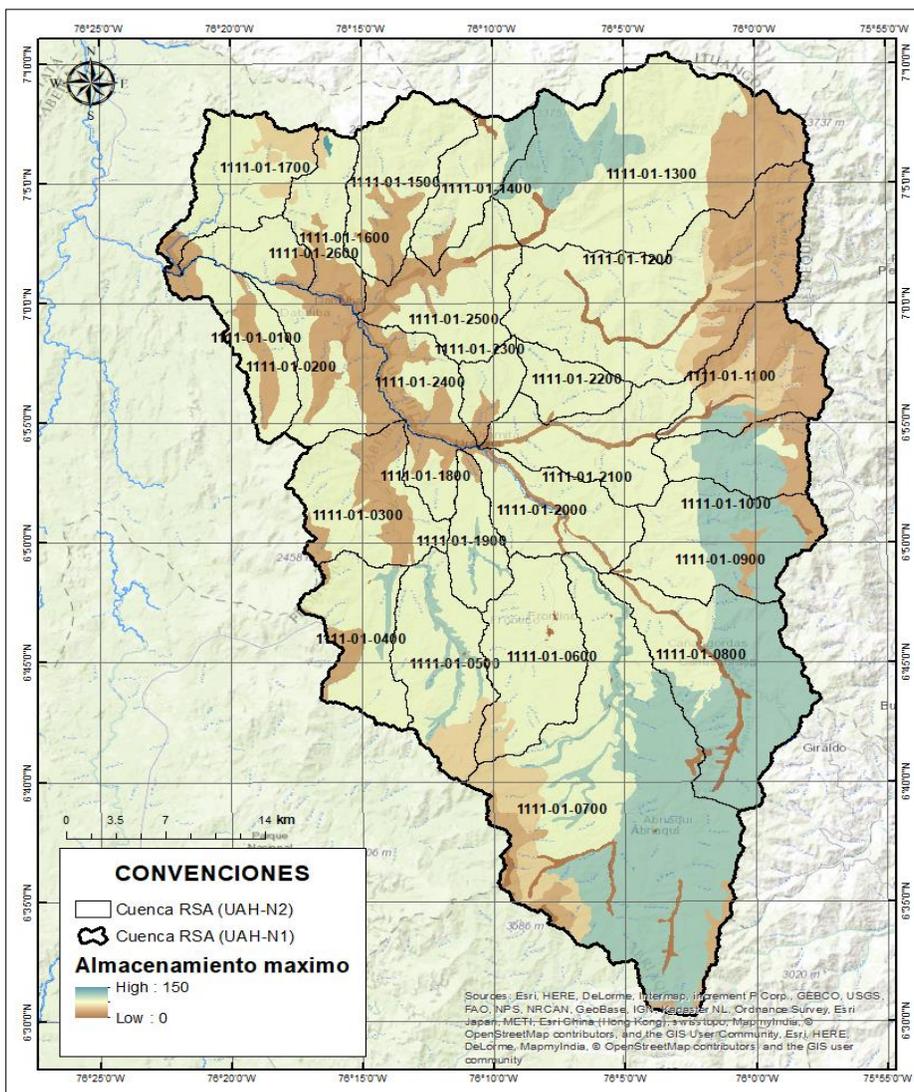
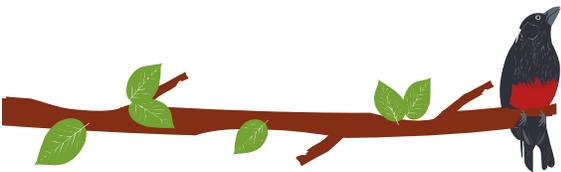


Figura 8. Capacidad máxima de almacenamiento del suelo. Fuente capítulo clima.

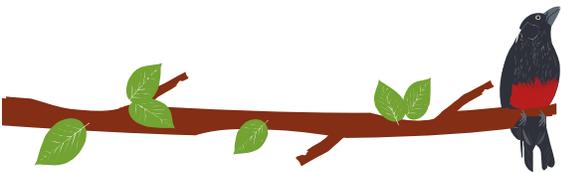
1.4.6 GEOLOGÍA

La Cordillera Occidental constituye acuífugos por su naturaleza ígneo metamórfica que no permiten la recarga directa intersticial, pero que por porosidades secundaria se puede dar el paso de agua de precipitación del ciclo hidrológico actual a través de fracturas.

En este trabajo, se intenta responder a la necesidad de delimitar unidades hidrogeológicas con base en un modelo geológico básico del subsuelo, en el cual se reconoce la geometría y las fronteras tectono-estratigráficas de las unidades acuíferas utilizando como base el Mapa Geológico de la cuenca a escala 1:25.000 (Figura 9), el cual representa la cartografía geológica-estructural, las condiciones de porosidad y permeabilidad de las unidades litoestratigráficas.

En la cuenca, litoestratigráfica y estructuralmente existe una distribución de esfuerzos compresivos en sentido W-E, que fracturan en grado sumo la secuencia central en donde se entremezclan las rocas sedimentarias cretácicas de la formación Nutibara con los





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

flujos Diabásicos, creando un típico "melange" o múltiples bloques delgados y alargados en sentido N-S. Hacia el W, predominan rocas intrusivas y volcánico-sedimentarias que contrastan morfoestructuralmente, con las sedimentitas que predominan hacia el E del área (Gómez H. , 2018) (Figura 9).

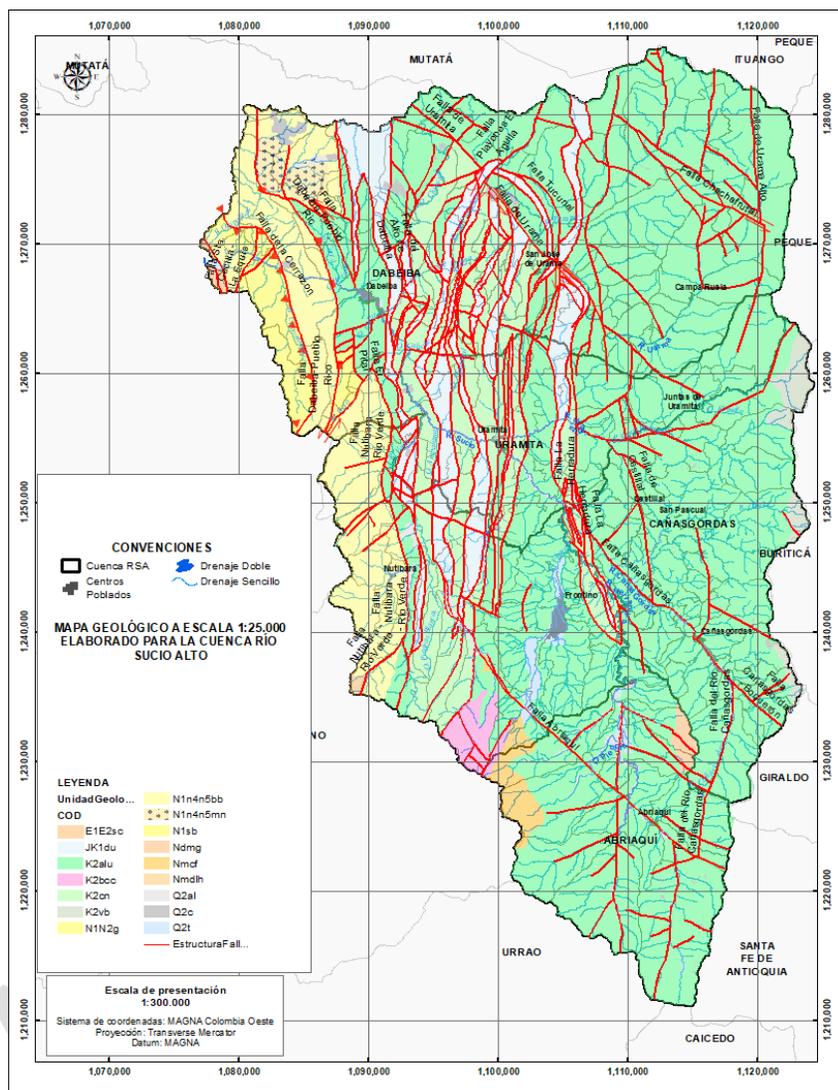
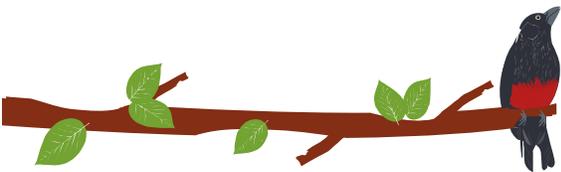


Figura 9. Mapa geológico de la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: Capítulo de geología.



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

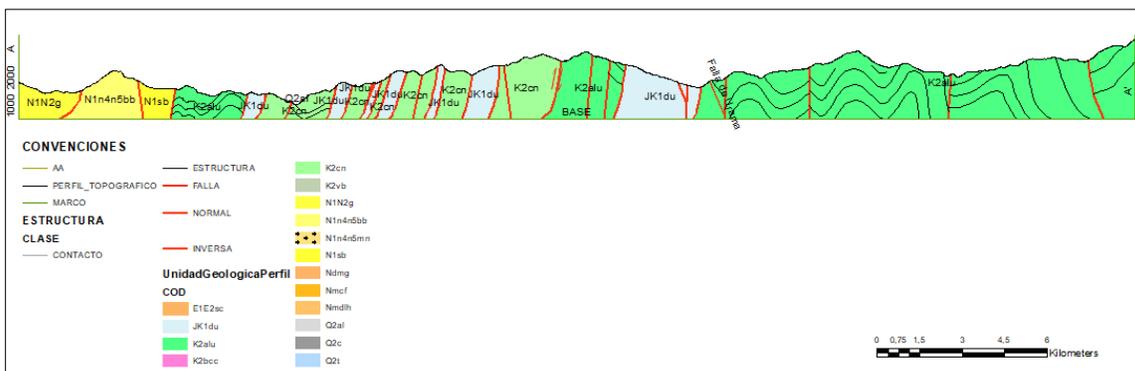


Figura 10. Perfil geológico transversal de la cuenca Río Sucio Alto, el cual muestra los efectos de desplazamiento de las unidades geológicas. Fuente: Capítulo de geología.

De acuerdo con Álvarez y González (1978) el Grupo Cañasgordas presenta una unidad basal, Formación Barroso o Vulcanitas del Barroso, y constituye la unidad litológica más antigua en la Cordillera Occidental, separada geológicamente de la Central por el Sistema de Fallas de Romeral; representa un intenso vulcanismo oceánico básico, sobre el cual se depositaron sedimentos turbidíticos del Miembro Urao y bioquímicos del Miembro Nutibara. Este último consta de lavas almohadilladas con texturas ofíticas, subofíticas junto a bloques de chert y calizas, y bloques de lodolitas, limolitas y arenitas líticas denominados Diabasas de San José de Urama, Chert y Calizas de Nutibara y Lodolitas, limolitas y arenitas líticas de Urao, que en conjunto forman el Complejo Cañasgordas o Bloque Cañasgordas (Rodríguez & Arango, 2012 y Rodríguez, et al., 2013) (Figura 11).

Al occidente de la cuenca aflora parte del Bloque Chocó - Panamá constituido por el Complejo Santa Cecilia-La Equis y el Batolito de Mandé. El primero de estos corresponde a rocas piroclásticas, derrames de lavas basálticas y andesíticas y tufas que son intruidas por el Batolito de Mandé. En la zona de colisión de los bloques Cañasgordas y Chocó Panamá ocurre el arco de El Botón (Rodríguez, Zapata, & Gomez, GEOLOGÍA DE LA PLANCHA 114 DABEIBA, 2013) constituido por plutones como la Monzonita de Nudillales y rocas basálticas y piroclásticas que forman la unidad denominada Basaltos de El Botón; en esta misma zona afloran sedimentitas de origen marino y sedimentitas continentales como la Formación Guineales.

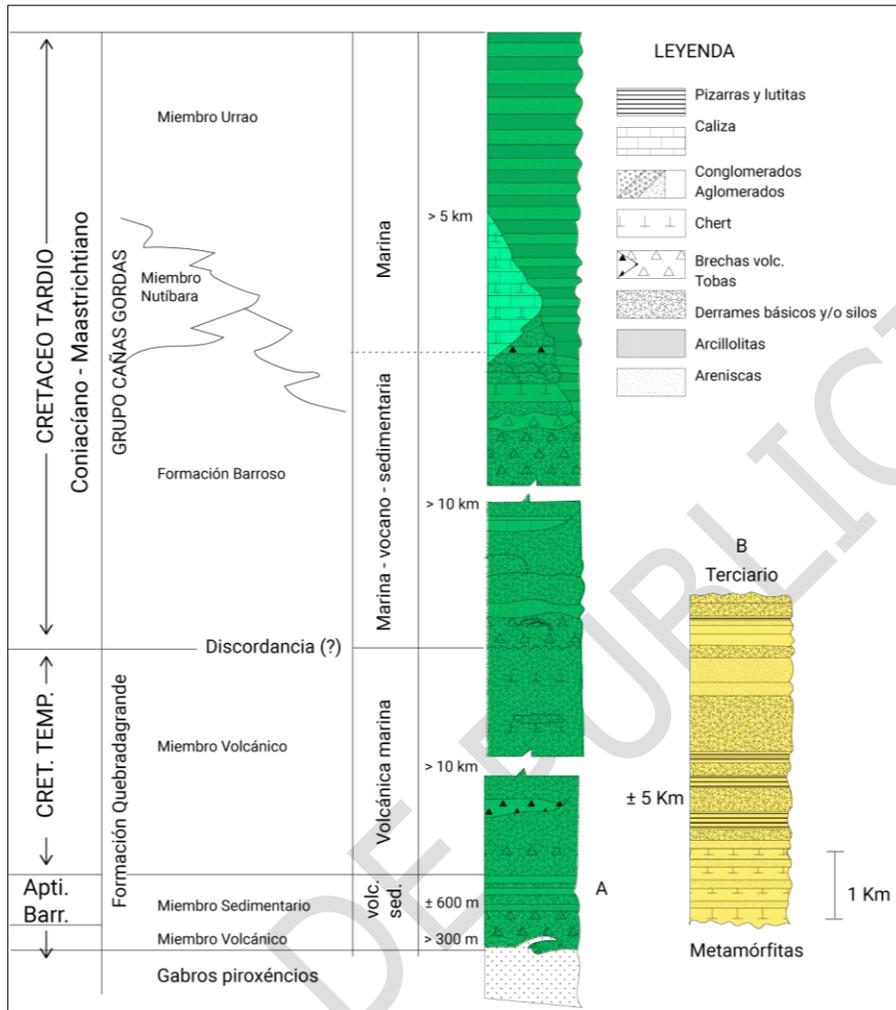
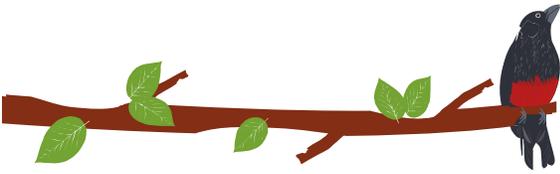
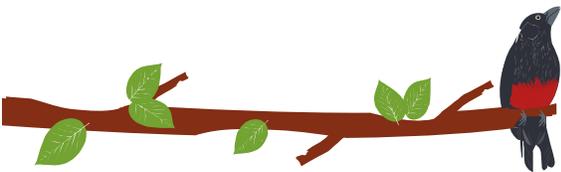


Figura 11. Columna estratigráfica generalizada del sector norte de la Cordillera Occidental (Álvarez A. J. 1983).

1.4.6.1 Estratigrafía

En el área de la cuenca del Río Sucio Alto afloran rocas sedimentarias, ígneas extrusivas e intrusivas, asociadas con posible metamorfismo de contacto y sedimentos cuaternarios. Las unidades principales corresponden a bloques tectónicos de sedimentitas que predominan hacia el E, diabasas y basaltos intercalados con sedimentitas en la parte central, y hacia el W predominio de plutones y stocks distribuidos irregularmente.

A continuación, se describen las unidades litoestratigráficas en forma organizada, desde el oriente hacia el occidente, para guardar un orden secuencial, sin tener en cuenta un concepto cronolitoestratigráfico neto, debido a que el área presenta características de "melange" y el arco de Dabeiba según Duque - Caro (1989), tiene una procedencia alóctona con fauna centroamericana, de edad terciaria, y los terrenos alóctonos Cuna y Calima de Tussaint y Restrepo (1989), son básicos, pero no para establecer una columna estratigráfica confiable, debido a la relación espacial que guardan las diferentes unidades en el área.



COMPLEJO CAÑAS GORDAS. Con este nombre se agrupan de manera informal un conjunto de bloques tectónicos que afloran en gran parte del área. El sector norte de la Cordillera Occidental, el Grupo Cañasgordas integra las unidades constituidas por las formaciones Barroso, Urrao y Nutibara (Penderisco) (Alvarez & González, Geología y geoquímica del Cuadrángulo I-7 (Urrao), 1978), las cuales fueron denominadas en la Plancha 114 por Mejía & Salazar (1989) como Pizarras de Dabeiba, Diabasa de San José de Urama y Grupo Cañasgordas, este último constituido por las formaciones Barroso y Penderisco (Urrao y Nutibara).

1.4.6.1.1 Formación Barroso

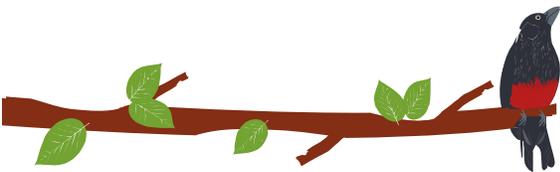
La Formación Barroso está constituida por derrames lávicos basálticos y andesíticos, intercalados con tobas, aglomerados, tufas y paquetes sedimentarios de chert, lodolitas, limolitas y grauwacas que por lo general reposan discordantes sobre las rocas volcánicas de la Formación Barroso (Rodríguez & Arango, Formación Barroso: Arco volcánico toleítico y Diabasas de San José de Urama: un prisma acrecionario T-MORB en el segmento norte de la Cordillera Occidental de Colombia, 2012). Los basaltos y andesitas de la Formación Barroso presentan textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno, en una matriz microcristalina a hialocristalina microlítica localmente con amígdalas. Las andesitas son porfídicas y están compuestas principalmente de plagioclasa y en menor proporción, anfíbol y piroxeno. Las tobas y aglomerados tienen fragmentos de vulcanitas máficas de diferente tamaño y textura, se han clasificado como tobas líticas y subordinadas litocristalinas y vitreocristalinas.

El vulcanismo representado por la Formación Barroso ocurrió en un ambiente marino, con intercalaciones delgadas de chert y limolitas silíceas (Alvarez & González, Geología y geoquímica del Cuadrángulo I-7 (Urrao), 1978), (Mejía & Salazar, Geología de la plancha 114 (Dabeiba) y parte W de la 115 (Toledo), 1989). Las sedimentitas ocurren como capas intercaladas con los basaltos y en paquetes de areniscas líticas, conglomerados con guijos de vulcanitas, limolitas, lodolitas silíceas y chert (Hall, Álvarez, & Rico, 1972); (Alvarez & González, Geología y geoquímica del Cuadrángulo I-7 (Urrao), 1978); (Mejía & Salazar, Geología de la plancha 114 (Dabeiba) y parte W de la 115 (Toledo), 1989)).

Unidad de comportamiento hidrogeológico variado, asociado a un cambio litológico a lo largo de la secuencia encontrada. Por un lado, paquetes permeables asociados a los estratos de areniscas y conglomerados, y por otro lado paquetes impermeables de basaltos y rocas sedimentarias de grano fino (lodolitas, limolitas y chert): adicionalmente y asociado al tectonismo ocurrido se tiene la presencia de gran cantidad de fracturas en la roca por las cuales se puede presentar un flujo de agua.

1.4.6.1.2 Chert y calizas de Nutibara (K2cn)

En esta unidad se agrupan una serie de bloques tectónicos, conformados por chert, calizas y diabasas que afloran al occidente y oriente del municipio de Dabeiba (Figura 12), afloran desde la entrada a Frontino hasta el occidente del municipio de Dabeiba siguiendo la vía Medellín-Turbo, y corresponden a franjas irregulares con dirección norte - sur y amplitudes variables, que oscilan entre decenas de metros y tres (3) km. Conforman bloques tectónicos alargados, continuos y discontinuos, limitados por fallas normales e inversas, con adelgazamientos y engrosamientos locales, generalmente plegados, que se intercalan con los bloques de diabasas y basaltos y menos frecuente



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

con bloques de litoarenitas y lodolitas grises, correlacionables con el Miembro Urrao en el sentido de Álvarez & González (1978). Los mejores afloramientos de esta unidad se encuentran sobre la vía Cañasgordas–Dabeiba en cuyo trayecto se cruzan franjas de paquetes conformados por chert, calizas y lodolitas, y sobre la vía que va bordeando el río Urama hacia Urama Grande.

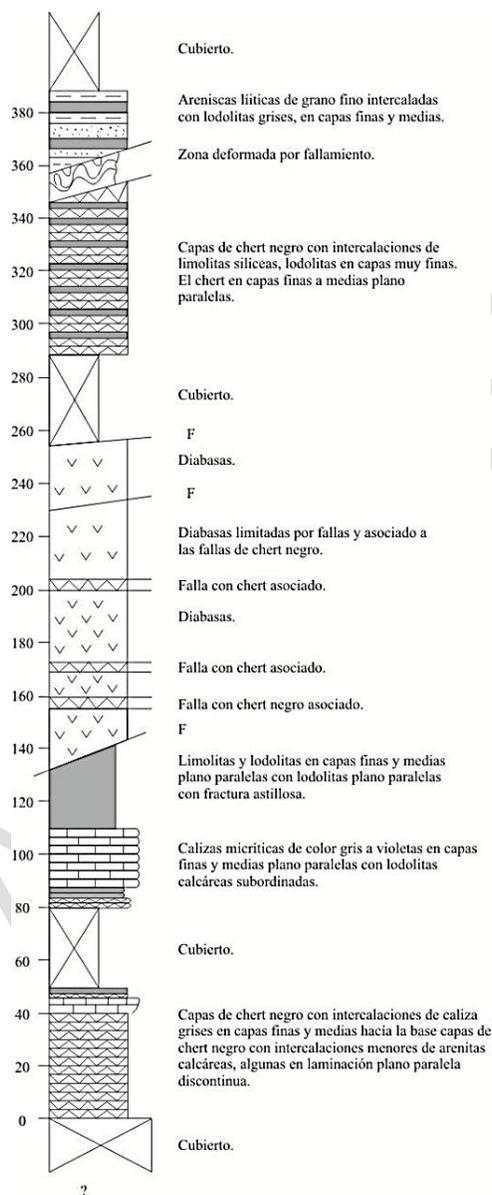
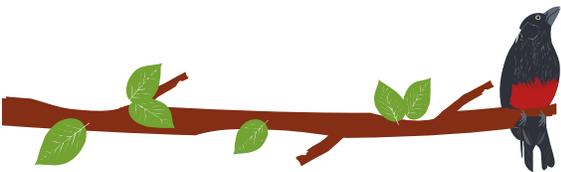


Figura 12. Segmento de columna estratigráfica de uno de los bloques de chert levantada en la entrada a Frontino sobre la vía Medellín – Urabá (Tomado de (IDEAM, 2015).

Unidad que por presentar rocas con poco o nula permeabilidad como chert, diabasas, limolitas y calizas, presenta un comportamiento hidrológico con poca movilización de flujo y el cual está limitado a las fracturas presentes, las cuales en la zona de estudio están asociadas a la presencia de fallas, que han dado origen a una serie de estructuras de dirección N-S sobre la parte central de la cuenca donde aflora esta unidad.



1.4.6.1.3 Litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (K2alu)

Como unidad de litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao se agrupa una serie de bloques tectónicos que afloran en el área, desde Cañasgordas hasta el occidente del municipio de Dabeiba.

Según algunos autores (Toussaint J. F., 1996) y (González H. , Mapa geológico generalizado del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000, 1997) el Miembro Urrao está conformado por sedimentos tipo "flysch" plegados y fallados que pueden interpretarse como turbiditas proximales, pero hacia el techo, cuando aparecen intercalados o transicionales a la secuencia de calizas y lidita, correspondería a turbiditas distales con más de 3.000 m de espesor.

Esta unidad es predominantemente areno-arcillosa, compuesta por arenitas líticas, grawacas, limolitas y lodolitas silíceas y conglomerados ocasionales, con bancos delgados de chert y caliza hacia el techo (Figura 13), localmente con silos y derrames diabásicos y basálticos. Las arcillolitas se encuentran en capas paralelas de 5 a 20 cm de espesor perturbadas por pliegues de orden centimétrico; interestratificadas con grauvaca y limolitas, en bancos gruesos a muy gruesos. Son rocas físilas, con laminación fina, de color gris verdoso a pardo oscuro por hidróxidos de hierro en los planos de estratificación.

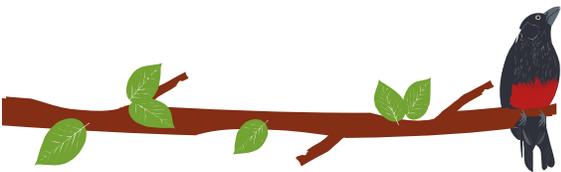
La variabilidad litológica a lo largo de la secuencia de la unidad, condiciona el carácter hidrológico de esta, teniendo un flujo de agua en paquetes de arenitas, pero en menor medida en estratos de lodolitas, pero directamente relacionado a lo largo de toda la unidad a la diaclasa y planos de estratificación por donde puede fluir el agua con mayor facilidad.



Figura 13. Aspecto de las litoarenitas y lodolitas de Urrao.

1.4.6.1.4 Lodolitas

Estas rocas se encuentran interestratificadas en bancos de espesor variable, 0,05 a 1 m. y están constituidas por láminas de minerales arcillosos y cuarzo, intercaladas con materia orgánica. Los fragmentos son subangulares a subredondeados de cuarzo, líticos, feldespatos, epidota y micas; localmente se encuentra cemento calcáreo. Por los efectos dinámicos se desarrollan clivajes y foliación, formando pizarras o filitas con intercalaciones arenosas.



Las limolitas se encuentran en bancos de espesor variable entre 0,05 a 1 m, intercalados en la secuencia de grauwacas. Son rocas macizas a finamente estratificadas, de color gris oscuro a negro, con alto contenido de materia orgánica.

1.4.6.1.5 Arenitas y grauwacas

En rocas frescas son de color gris verdoso a gris oscuro. Se presentan en capas de variado espesor de delgadas a muy gruesas con estratificación plana, paralela continua; a veces presentan estratificación cruzada a pequeña escala.

La selección de los fragmentos es de regular a mala, el tamaño varía de arena gruesa a muy fina, predominando arena media; los granos individuales son subredondeados a subangulares. Los clastos son de cuarzo (5-55%), feldespato (3-45%), micas (1-8%) y líticos (5-40%), con matriz arcillosa (5-25%). Los líticos son de rocas volcánicas basálticas, lodolitas silíceas y calcáreas, limolitas y chert.

El empaquetamiento de los granos es de flotante hasta lineal. Según la clasificación de Folk (1974), son litoarenitas, arcosas, arcosas líticas y wacas, a veces con matriz arcillosa y otras, en menor proporción, con cemento calcáreo. Localmente se presentan bancos de conglomerados; hacia la base de la secuencia conglomerados basales en el que predominan fragmentos de rocas volcánicas de composición basáltica, y otro intraformacional, interestratificado con las arenitas.

En él predominan los líticos de sedimentitas y su tamaño es menor. Esta secuencia de origen terrígeno corresponde a turbiditas de grano fino y grueso.

La interpretación de sensores remotos sobre el sector dentro del cual afloran las rocas correspondientes a la Formación Urrao, no permite definir la presencia de límites litológicos claros entre arenitas, limolitas y arcillolitas. La densidad del drenaje, tipo de drenaje utilizando claves fotogeológicas han permitido definir algunas actitudes por sectores los cuales nos indican una tendencia con orientación NE y NW y buzamientos variables entre 70° y 45° de inclinación principalmente hacia el NE (Gómez H. , 2018).

Hacia el Este el espesor de esta unidad es mayor, en una extensión continua hasta de 15 km de ancho, pero hacia el occidente, en la Cuchilla La Herradura, es cortada por una falla que la pone en contacto con un cuerpo de Chert y calizas de Nutibara, esa misma falla más al norte sirve de contacto con las Diabasas de San José de Urama.

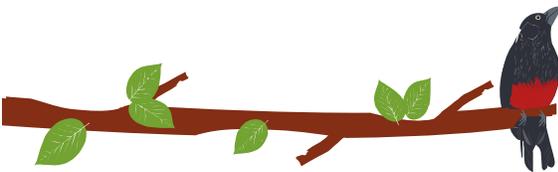
Luego se encuentra otra franja de 0,5-1,5 Km de ancho, que al sur cubre el Municipio de Frontino, también separada por fallas, norte-sur, de los cherts, calizas, y rocas volcánicas. Más al occidente, pasando por Dabeiba y también limitada por fallas se encuentra una secuencia de milonitas con protolito de las sedimentitas tipo "flysch"; que Mejía & Salazar, 1989 denominan con el nombre informal de Pizarras de Dabeiba con bajo metamorfismo y las correlacionan con la Formación Quebradagrande.

1.4.6.1.6 Diabasas de San José de Urama (JK1du)

Constituida por diabasas y pillow lavas con texturas ofíticas, subofíticas, intergranulares e intersectales. Se toman como sección tipo los afloramientos de los diversos bloques tectónicos que se encuentran en la vía a Urabá, desde la entrada a Frontino, hasta antes de la vereda El Botón.

Las Diabasas de San José de Urama que afloran en el flanco oriental y occidental de la Cordillera Occidental y al oriente de la Falla Dabeiba – Pueblo Rico, se presentan como bloques tectónicos lenticulares con un ancho menor de tres (3) km conformados por diabasas deformadas, orientados en dirección N-S y limitados por fallas de rumbo, con





componentes normal a inverso, de ángulo alto, con adelgazamientos y engrosamientos locales, intercalados tectónicamente con bloques de chert – calizas y litoarenitas – lodolíticas.

Las secuencias están constituidas por diabasas y basaltos con textura almohadillada, las cuales macroscópicamente son de color gris oscuro y gris verdoso, masivas, afaníticas a faneríticas muy finas, compuestas por plagioclasa cálcica en cristales menores de 1 mm de color verde claro y piroxeno; como accesorios se observa esfena y localmente sulfuros diseminados como piritita y pirrotina en contenidos menores al 1%.

Las diabasas están fuertemente tectonizadas y controladas estructuralmente, lo que origina en la roca una serie de fracturas, que da propiedades hidrológicas por donde se puede presentar un flujo de agua a lo largo de estas.

1.4.6.1.7 **Complejo Santa Cecilia-La Equis (E1csce)**

Está conformada por flujos de lava, aglomerados, brechas y tobas de composición básica, localmente lavas almohadilladas e intercalaciones de chert y calizas fosilíferas. La Formación La Equis la componen intercalaciones de aglomerados, brechas y flujos lávicos de composición intermedia-ácida, localmente con estructura columnar.

Se denomina Complejo Santa Cecilia-La Equis a las rocas volcánicas efusivas y piroclásticas localizadas al oeste de las sedimentitas de la Formación Guineales y al este del Batolito de Mandé y se incluye parcialmente las rocas volcánicas del Togoridó (Muñoz & Zapata, 1987).

Hidrológicamente la unidad esta condicionada a manera local por la litología, la cual se puede variar desde flujos leves de agua en las zonas con presencia de rocas piroclásticas, y poco flujo o nulo en rocas como lavas, chert y calizas.

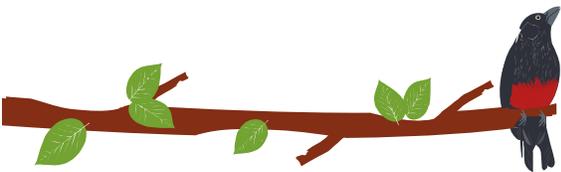
1.4.6.1.8 **Basalto de El Botón (N1n4n5bb)**

Litoestratigráficamente está constituida por basaltos porfídicos, andesitas porfídicas y rocas piroclásticas (Rodríguez & Zapata, Características del plutonismo Mioceno Superior en el segmento norte de la Cordillera Occidental e implicaciones tectónicas en el modelo geológico del noroccidente colombiano, 2012). Forma un bloque tectónico con dirección norte-sur que aflora en el flanco occidental de la Cordillera Occidental, al occidente del Complejo Cañasgordas y al oriente del Complejo Santa Cecilia – La Equis, el cual está encajado entre las fallas La Cerrazón-Murrí al occidente y la Falla Dabeiba-Pueblo Rico al oriente: tiene una amplitud variable entre 3 y 13 km. en la zona de sutura de ambos bloques y representa las facies eruptivas del Arco de El Botón (Rodríguez & Zapata, Características del plutonismo Mioceno Superior en el segmento norte de la Cordillera Occidental e implicaciones tectónicas en el modelo geológico del noroccidente colombiano, 2012).

Unidad caracterizada por ser impermeable, pero por el tectonismo que ha ido configurando la zona y los esfuerzos que han fracturado la roca y generado caminos por donde puede moverse el agua.

1.4.6.1.9 **Monzonita de Nudillales (N1n4n5mn)**

Esta unidad aflora al noroeste de Dabeiba, en una extensión de 20 km² para el cuerpo principal y unos 8 km² para la apófisis relacionada en el área, que inicialmente fue denominado como Granodiorita de Nudillales (González & Londoño, Edades K/Ar en algunos plutones del Graben del Cauca y norte de la Cordillera Occidental, 1998) y



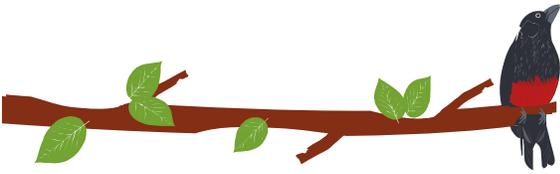
(González & Londoño, 2002) y diferenciado como Stock de Nudillales y Stock de La Virgen.

El stock de La Virgen se presenta como un cuerpo de forma alargada con una extensión de 7 km. en dirección este-oeste y 4 km en sentido norte-sur, transversal a las estructuras regionales. En los afloramientos alrededor de la mina La Virgen se puede observar la litología del cuerpo que varía de monzonita a diorita constituido por minerales félsicos (66-70%) y máficos (22-30%) con opacos <3% (Tabla 18). La roca es fanerítica equigranular de grano fino a medio, color gris claro a medio, moteado de negro y rosado; compuesta por cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, clinopiroxeno, anfíbol y biotita.

A nivel de hidrogeología esta unidad se comporta impermeable y solo presenta un flujo de agua a través de las diclasas, que se han generado por el tectonismo y el emplazamiento del cuerpo.

1.4.6.1.10 **Formación Guineales (N1N2g)**

La Formación Guineales en la cuenca, forma una franja irregular con dirección N-S, que aflora en el corte de la vía Dabeiba – Mutatá, entre las quebradas Choromandó y Guineales, (Botero, Bosquejo de la paleontología colombiana, 1936), le asigna este nombre a la unidad de conglomerados que aflora sobre la vía al mar entre la quebrada Guineales al occidente (base de la unidad) y la quebrada Choromandó al oriente (techo de la unidad)(Figura 14 y Figura 15).



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

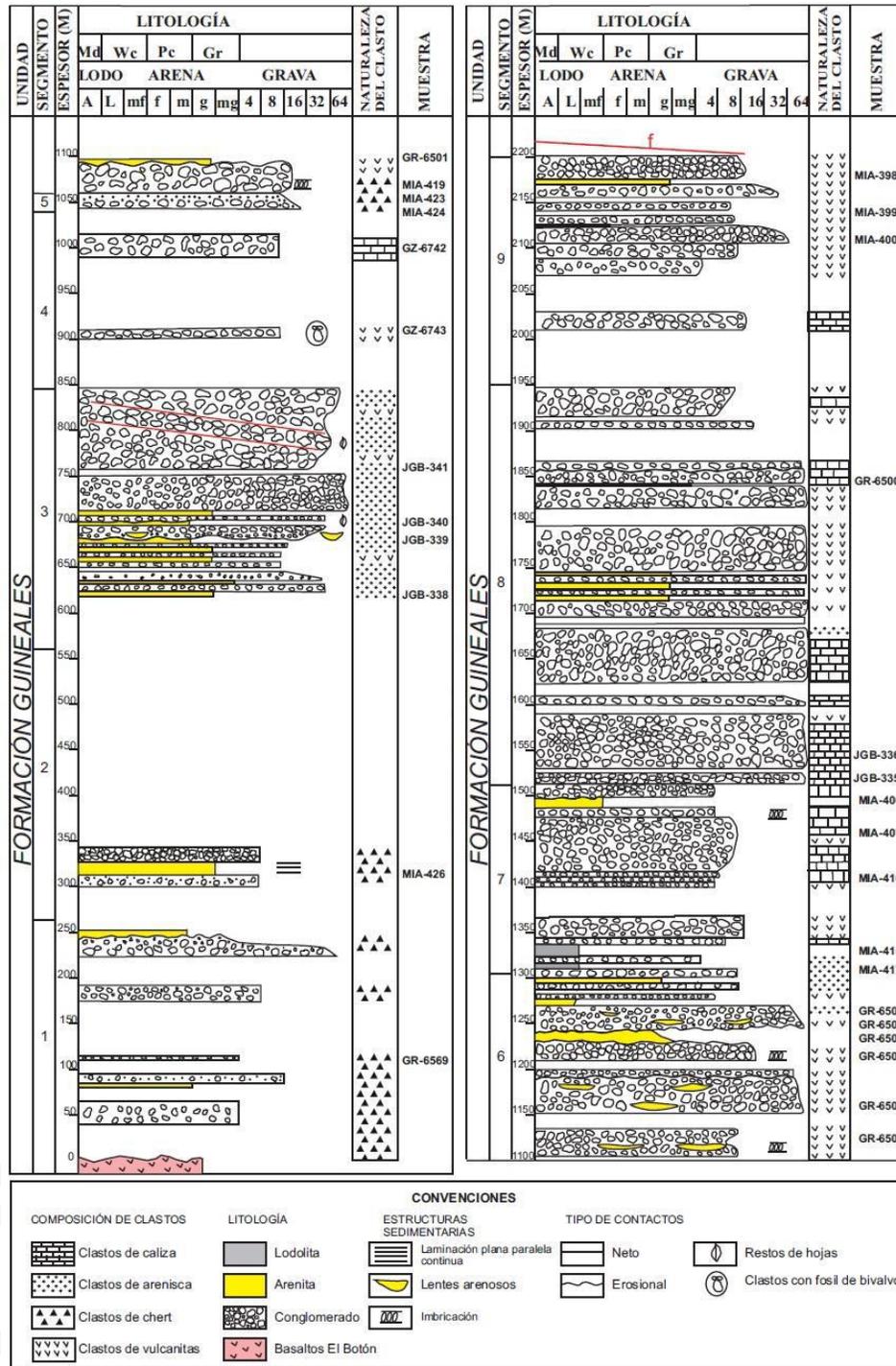


Figura 14. Columna estratigráfica de la Formación Guineales levantada en la vía Dabeiba - Mutatá (sección tipo) (IDEAM, 2015)

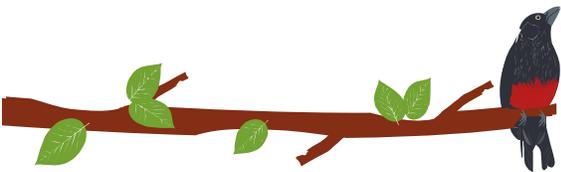


Figura 15. Intercalaciones de capas de arenitas con conglomerados y lentes arenosas, se muestra además el de detalle de los conglomerados.

En la vereda Alto Bonito, en las coordenadas y:1269357.646, x:1080754.039 se encuentra el contacto entre las formaciones Guineales y el Basalto El Botón (Figura 15), la Formación Guineales se presenta en bancos gruesos de conglomerados polimícticos clastosoportados, con regular a mala selección.

Unidad que a pesar de tener una mala selección donde los granos presentan una variedad de tamaños de grano, que disminuye la porosidad y por lo tanto de capacidad de transmitir o permitir el paso de agua, esta unidad presenta propiedades hidrológicas y carácter permeable y un posible comportamiento de acuífero.

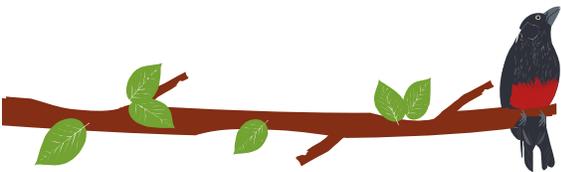
1.4.6.1.11 Sedimentitas de Beivaviejo (N1sb)

Compuesta por una secuencia de areniscas y tufitas de color gris claro a ocre, lodolitas grises, lignito y shales calcáreos con nódulos de caliza. Estas son rocas detríticas, grano soportadas de color gris oscuro a gris verdoso, compactas con predominio del tamaño arena media, pero con aporte de limo y conglomerado. Los granos son angulares a subangulares, alargados a subsféricos con mala a moderada selección.

Unidad que por sus características litológicas, en especial por la variación en el tamaño de grano, presenta diferencias en su comportamiento hidrogeológico, el tamaño del grano y su forma es uno de los factores que influye en este comportamiento, para la unidad se tienen una forma angular la cual propicia un mayor tamaño en los poros, pero con su mala selección (variación en el tamaño) hay una mejor acomodación de las partículas y disminución en los espacios vacíos que permiten el almacenamiento o tránsito de agua, por lo que puede presentar una media a baja permeabilidad.

1.4.6.1.12 Basaltos de La Clara – Río Calle (K2bcc)

Unidad de rocas volcánicas localizada en la parte suroccidental de la cuenca y cuyas mejores exposiciones se encuentran en la quebrada La Clara y nacimiento del río Calle de donde se ha tomado su nombre. En general, está constituida por derrames basálticos, silos y diques diabásicos que litológicamente son similares a los que constituyen la Formación Barroso en el flanco oriental de la Cordillera Occidental, pero se han separado de ésta por su localización geográfica y, además, porque marcan regionalmente, en el noroccidente, la separación entre sedimentitas areno arcillosas de origen turbidítico (Miembro Urrao) y sedimentitas calcáreas y silíceas de origen químico o bioquímico



(Miembro Nutibara) del Grupo Cañasgordas (González & Londoño, Geología de las Planchas 129 Cañasgordas y 145 Urrao Escala 1:100.000, 2003).

Las rocas predominantes son diabasas en flujos masivos que presentan, algunas veces, desarrollo de diaclasamiento columnar y, ocasionalmente, estructuras almohadilladas, son de coloración variable entre gris claro y verde oscuro debido a cambios composicionales y a la intensidad de la alteración. Son rocas afaníticas a microporfídicas, macizas, localmente con estructuras de flujo cuando están asociadas a niveles tobáceos. La textura predominante es ofítica a subofítica e intersertal con vidrio en proceso de palagonitización y vesículas rellenas con ceolitas o sílice amorfa. Los basaltos y diabasas son holocristalinos a hialinos, de grano medio a fino, donde a veces se observan abundantes amígdulas. Las variedades microporfídicas se caracterizan, localmente, por la presencia de microfenocristales de clinopiroxeno en una matriz intersertal constituida por clinopiroxeno y plagioclasa.

Las rocas de esta unidad se caracterizan por ser impermeables, y únicamente por presencia de fracturas como diaclasas permiten el flujo de agua, situación que se presenta a manera local en la zona de estudio debido a las fallas que la atraviesan.

1.4.6.1.13 **Monzonita del Cerro Frontino (Nmcf)**

La Monzonita del Cerro Frontino constituye un stock denominado Cerro Frontino (Álvarez & González, 1978), de forma trapezoidal, con un ancho de 2 km en su extremo norte y 7 km en su extremo sur con un área de 40 km² y considera las apófisis que afloran en la quebrada El Tambo, afluente del río Musinga; en la quebrada La Clarita, afluente del río Carauta; en el río Carauta; en la quebrada Horacio y en los cuerpos donde se encuentran localizadas las minas La Cumbre y El Cangrejo.

Excelentes afloramientos de roca relativamente fresca se encuentran en las quebradas El Carmen, San Pedro, La Blanquita, El Cerro y en los socavones de las numerosas minas que han sido explotadas sobre este cuerpo. Cerca de Frontino constituye el cerro Frontino, de donde recibe su nombre. El stock está emplazado al oriente en sedimentos areno arcillosos del Grupo Cañasgordas y al occidente en los basaltos de La Clara – Río Calle, aunque el contacto con esta unidad puede ser localmente fallado.

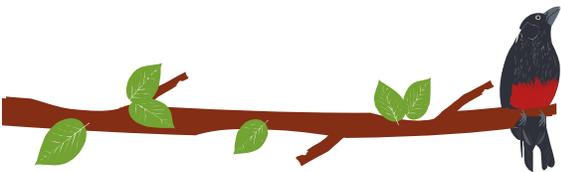
Son rocas faneríticas equigranulares, de grano medio, color moteado, con abundante piritita como relleno en microfracturas. El contenido de feldespatos potásicos varía considerablemente aun dentro de cada facies; por lo general, presenta textura peritítica y es intersticial entre plagioclasa. Hacia los contactos con los sedimentos, algunas muestras contienen cuarzo como accesorio, pero es escaso y falta en la mayoría de las muestras.

En sus características hidrogeológicas la unidad presenta un comportamiento de acuitado, donde el único paso de agua está asociado a la presencia de fracturas en la roca como diaclasas.

1.4.6.1.14 **Diorita de Morrogacho (Ndmg)**

La Diorita de Morrogacho constituye un stock de forma rectangular que conforma el cerro Morrogacho, de donde recibe el nombre, localizado a 8 km al SW de Cañasgordas tiene feldespatos potásicos, varía considerablemente aun dentro de cada facies; por lo general, presenta textura peritítica y es intersticial entre plagioclasa. Son rocas faneríticas equigranulares, de grano medio, de color moteado gris claro a blanco y negro, con índice color entre 10 y 20, localmente con piritita fina en venillas y en los planos de





diaclasamiento, constituidas por plagioclasa, clinopiroxeno y biotita y una composición predominantemente diorítica (Alvarez A. J., 1983).

A nivel hidrogeológico la unidad presenta un compamiento impermeable y por lo tanto no almacena ni permite el transporte de agua, y este solo se permite a través de las diaclasas que existen en la roca producto de los esfuerzos y emplazamiento del cuerpo.

1.4.6.1.15 **Depósitos no consolidados**

Depósitos sedimentarios no consolidados se encuentran a lo largo del área de estudio y se separan en: depósitos aluviales, depósitos de terrazas y depósitos coluviales

Estos depósitos corresponden a uno de las unidades de mayor importancia hidrogeológica de la zona de estudio, debido a su carácter de no consolidados, lo que permite mayores espacios vacíos disponibles en los que se puede almacenar y transmitir agua, proporcionando un comportamiento de acuífero. Sin embargo, sus características pueden variar en función de su granulometría, selección y forma de estos, que determinan sus propiedades y su comportamiento hidrológico.

Para depósitos aluviales y terrazas corresponden a la unidad de mayor almacenamiento de agua por sus características, formas redondeadas, buena selección, matriz (arenosa), pero de poca extensión ya que su ubicación se limita a los valles de los ríos, presentándose como franjas paralelas a su cauce.

Para depósitos coluviales el almacenamiento y tránsito de agua es un poco más limitado por sus características granulométricas, mala selección, formas angulosas, matriz (arcillosa) y grado de maduración, teniendo en cuenta que entre mayor grado de maduración mayor compactación y menor permeabilidad. Características que aplican tanto a los depósitos de vertiente, flujos torrenciales y terrazas formadas en la cuenca.

1.4.6.1.16 **Depósitos aluviales (Q2a)**

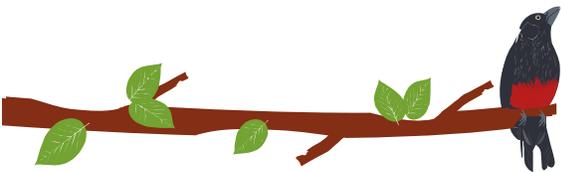
Los depósitos aluviales ocupan las llanuras de inundación de los cauces actuales; están conformados por material no consolidado como bloques y gravas de rocas volcánicas básicas, plutónicas y sedimentarias en diferentes proporciones en una matriz de tamaño arena. Se destacan los aluviones que se encuentran a lo largo de los ríos y forman depósitos que ocupan la zona de inundación y sectores aledaños a ésta, rellenando los valles estrechos.

1.4.6.1.17 **Depósitos de terrazas (Q2t) y Depósitos Coluviales (Q2c)**

Dentro del área se presentan depósitos de origen flujo torrencial originados por avenidas torrenciales, los cuales presentan características como: la estructura interna es matriz soportada, contienen clastos tanto angulares como redondeados, arrastrados de los lechos de las corrientes, tienen una mala selección que revela la sedimentación caótica y simultánea de bloques y finos, diferenciándose como flujos de escombros o flujos de lodo por el porcentaje de bloques. Adicionalmente, pueden tener acumulación superficial de bloques dispuestos paralelamente a la dirección de la corriente o mostrar pendientes mayores a 3 ó 4%, que no son normales en los depósitos aluviales propiamente dichos.

Según Mejía & Salazar (2007) el Abanico de Frontino es un grueso flujo de escombros asociado a un proceso de desglaciación del Páramo de Frontino. Este depósito está formado por grandes bloques de basaltos, diabasas y sedimentitas del Complejo Cañasgordas, envueltos en una matriz arcillosa abundante, tiene forma alargada en dirección N-S y una extensión aproximada de 1 km, se ensancha dentro de la cuenca unos 6 km, está atravesado por el río Frontino y algunas quebradas, este flujo está





disectado y ha generado varias terrazas donde se ha expandido la población de Frontino (IDEAM, 2015).

En el sector sur oriental de la cuenca sobre la Formación litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (K2alu) se encuentran depósitos de ladera y depósitos de origen fluvio-torrencial que cubren parcialmente los suelos residuales, presentan en general espesores entre 15 y 25 m, sin embargo, la presencia de depósitos cuaternarios originan capas que sumadas pueden alcanzar hasta 40 m de espesor (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.-HIDROGEOCOL S. A., 2016).

1.4.6.2 Estructuras geológicas

En la Cuenca Río Sucio Alto se presentan estructuras de falla formadas bajo condiciones frágiles y en niveles de deformación intermedios, estas últimas caracterizadas por el desarrollo de zonas amplias deformadas donde afloran principalmente milonitas. Dos direcciones de fallamiento predominan en esta área de la Cordillera Occidental: N-S y N45°W. Relacionadas a éstas se presentan fallas inversas, fallas de rumbo y fallas normales. Los tensores regionales del SW-NE producen los planos de falla con direcciones N-S a N55°E, siendo la mayoría de las fallas encontradas en el corte Dabeiba-Uramita de tipo inverso con componente sinextral, las cuales son generadas en ambientes compresivos (Figura 16).

Las fallas son fracturas en la secuencia de rocas en donde ocurre el desplazamiento de bloques debido a los esfuerzos de compresión y distensión. La longitud de las mismas varía desde algunos centímetros a kilómetros, y el desplazamiento de los bloques varía en magnitudes similares. Las fallas pueden actuar como barreras o como canales para el movimiento del agua a través de las rocas. Las fracturas que no presentan movimientos de bloques de rocas son de importancia para el desarrollo de la porosidad secundaria.

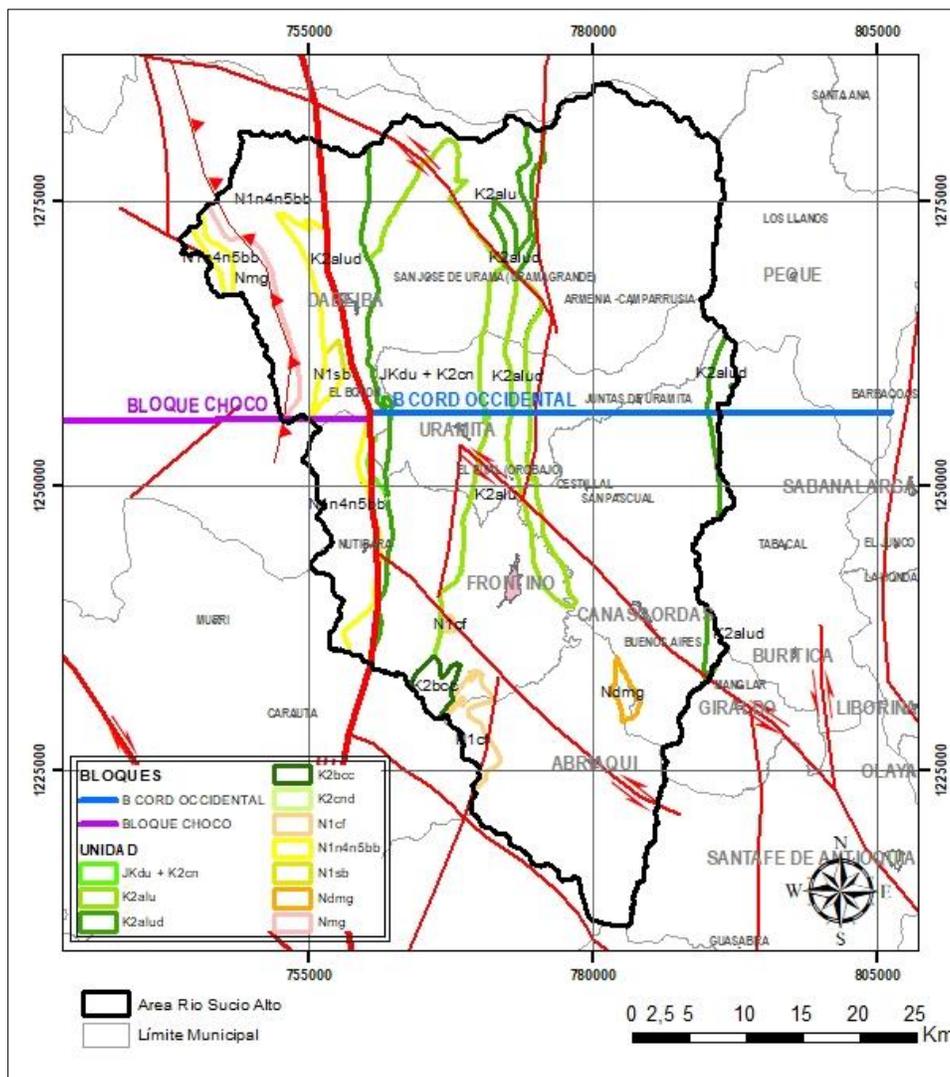
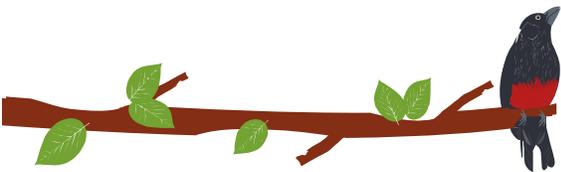
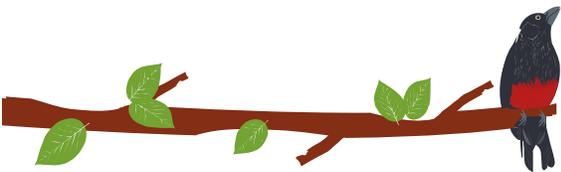


Figura 16. Esquema tectónico y evolutivo del área de la cuenca de Río Sucio Alto con su zona de influencia (Gómez, H. 2018).

1.4.6.2.1 Fallas de dirección N-S

Las fallas de dirección N-S conforman la tendencia estructural regional dominante en la zona norte de la Cordillera Occidental y en la cuenca, es el límite o borde del Complejo Cañasgordas con el Complejo Santa Cecilia–La Equis está representado por numerosas fallas trenzadas dando origen a un mosaico de bloques deformados de diferente litología, el cual se denomina Sistema de Fallas de Dabeiba, compuesto por fallas dispuestas de manera anastomosada que limitan fajas y lentes de diabasas y basaltos con bloques de chert y calizas y bloques de litoarenitas, limolitas y lodolitas, así como también limitan bloques de tobas-aglomerados-basaltos del Complejo Santa Cecilia-La Equis, los Basaltos de El Botón y la Formación Guineales.



1.4.6.2.2 Sistema de fallas de Dabeiba

De esta manera se le denomina a un sistema de fallas de dirección N-S con una amplitud en sentido este-oeste de aproximadamente 20 Km. El sistema afecta las rocas denominadas en este trabajo como Complejo Cañasgordas, y limita bloques de diferente litología dentro del complejo como diabasas, chert, calizas, litoarenitas y lodolitas.

El sistema está representado aproximadamente por 13 a 15 fallas; el límite occidental del Sistema de fallas de Dabeiba es la Falla Dabeiba-Pueblo Rico, que corresponde al contacto fallado del Complejo Cañasgordas con el Basalto de El Botón; el límite oriental del sistema es la Falla de La Herradura que pone en contacto la zona de mayor deformación con rocas menos deformadas del Complejo Cañasgordas.

1.4.6.2.3 Falla la Herradura

La característica principal de esta falla es que controla el río Herradura entre la vereda Pontón Llano Grande y la desembocadura de éste al río Sucio, para continuar hacia el norte en dirección N-S hasta la vereda Llano Grande cerca de la Inspección de Urama Grande, donde es truncada parcialmente por una falla del sistema $N45^{\circ}W$, pero continúa hacia el norte de esta saliendo el área de estudio (SGC, 2013).

1.4.6.2.4 Falla Dabeiba – Pueblo Rico

El SGC (2013) considera la Falla Dabeiba–Pueblo Rico como el límite tectónico entre el Complejo Cañasgordas y el Complejo Santa Cecilia–La Equis, el cual en la cuenca no está representado por una falla única y continua, sino por varias fallas que limitan bloques de ambos complejos espacialmente truncados por fallas NW y NE que desplazan los bloques en sentido E-W y que involucra no solo al bloque Cañasgordas y al arco de Chocó-Panamá sino también al Arco de El Botón.

1.4.6.2.5 Falla de la Cerrazón

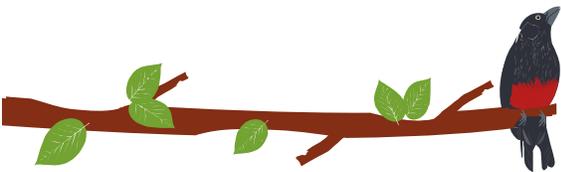
La Falla de La Cerrazón en la cuenca se toma como una falla de cabalgamiento con vergencia al oriente, que corresponde al contacto oriental de la Formación Guineales con el Basalto de El Botón, poniendo a cabalgar rocas volcánicas y piroclásticas sobre conglomerados de la Formación Guineales, con un plano de falla sinuoso con buzamiento menor a 55 grados.

1.4.6.2.6 Falla Cañasgordas

La Falla Cañasgordas es conocida también como Falla de Tonusco (SGC, 2003) o como Falla de Guasabra (Álvarez & González, 1978); recibe su nombre de la población de Cañasgordas, donde tiene una dirección $N50^{\circ}W$ y se extiende por unos 50 km desde Giraldo hasta Dabeiba.

1.4.6.2.7 Falla Abriaquí

La Falla Abriaquí está situada 10 km al sur de Abriaquí con rumbo $N50^{\circ}W$ y buzamiento subvertical, con una traza moderadamente recta. Se extiende por 35 km desde Abriaquí al sur hasta Dabeiba al norte. Al norte de Abriaquí tiene una expresión morfológica clara definida por el alineamiento de corrientes, boquerones, cambios bruscos de pendiente y ríos desplazados en sentido lateral izquierdo (González & Londoño, Geología de las Planchas 129 Cañasgordas y 145 Urrao Escala 1:100.000. Memoria explicativa, 2003).



1.4.6.2.8 **Falla San Ruperto**

La Falla San Ruperto recibe el nombre del río San Ruperto (SGC, 2003), el cual controla desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Herradura, con dirección predominante norte-sur y se prolonga hacia el sur en donde Page (1986) la considera como parte del sistema de fallas de Urrao y la denomina Falla Urrao Este.

1.4.6.2.9 **Falla Rio Verde – Fue mía**

Las dos fallas de tendencia norte sur a N25°E, han sido cartografiadas, en una longitud de 80 km, entre los municipios de Urrao (Plancha 145) al sur y Dabeiba (Plancha 114 Dabeiba) al norte; marcan el contacto entre el Basalto de El Botón y las sedimentitas del Grupo Cañasgordas.

1.4.6.2.10 **Fallas y lineamientos de dirección N-W**

Fue definido por Mejía & Salazar (2007) en SGC (2013) como un conjunto de estructuras que afecta las fallas y lineamientos de dirección Norte-Sur, pero que aparentemente es truncado por el sistema de fallas Noreste. En la cuenca se presentan fallas de dirección NW en la vereda El Águila, entre la Aguada y la quebrada La Esperanza y en un segmento del río Sucio afectando el contacto de la Formación Guineales. Se caracteriza porque trunca las fallas y bloques litológicos de dirección N-S, indicando que corresponde a fallas más recientes que las del rumbo regional N-S.

1.4.6.2.11 **Fallas y lineamientos de dirección NE**

Este sistema de fallas está representado por fallas de poca longitud que truncan los bloques litológicos y las fallas del sistema N-S y desplazan al sistema de fallas NW, considerando por tal razón que corresponden a las fallas más jóvenes que afectan la zona de estudio.

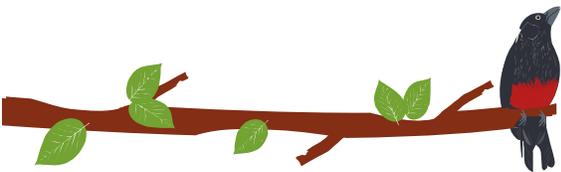
Este sistema presenta una estructura importante en el sector entre la vereda El Botón y el río Togoridó, limita un bloque de rocas sedimentarias de la Formación Guineales, el cual está en contacto fallado con rocas volcánicas y desplaza el límite tectónico entre los complejos Cañasgordas y el Basalto de El Botón, que se ha denominado regionalmente como Falla Dabeiba – Pueblo Rico. Al sur de esta falla se presentan fallas cortas de este sistema que limitan la Formación Guineales y fraccionan el Basalto de El Botón en bloques.

1.4.6.2.12 **Pliegues**

Los pliegues están relacionados a fallas dentro de bloques de rocas sedimentarias, donde el eje axial en los pliegues mayores, es paralelo a la tendencia regional N-S. Los bloques litológicos constituidos por paquetes de chert y caliza (Chert y calizas del Nutibara) presentan como respuesta a la deformación el desarrollo de pliegues complejos y localmente en chevrón en los bordes de las fallas y al interior de los bloques.

1.4.6.2.13 **Sinclinal Rio Verde**

Con este nombre se denomina a una estructura en sinclinal que aflora a lo largo de la vía Medellín–Apartadó, desde el sitio denominado partidas de Amurrapal hasta el río Verde. La estructura tiene una amplitud de 1,5 km y una extensión de 7 km en sentido



norte-sur, con desarrollo en los flancos de numerosos pliegues de orden métrico que dificultan la definición del pliegue.

El eje del pliegue es apretado y localmente fallado, tiene dirección N-S y cabeceo hacia el occidente luego de cruzar el río Sucio, para unirse al norte a una falla del sistema Norte-Sur que afecta el bloque de chert y calizas. El sinclinal topográficamente forma una colina alargada con la cuchilla alineada que corresponde al eje del pliegue (SGC, 2013).

1.4.6.3 Bloques Tectónicos

Durante el proceso de actualización geológica se tuvo en cuenta dos factores básicos e importantes, como son: la conformación de las unidades y secuencias litológicas, y la afectación por factores tectónicos; estos parámetros permitieron dividir el área en tres bloques estructurales representativos, tal como se aprecia en la Figura 17, en donde la proyección interpretativa está superpuesta a un modelo de elevación con el propósito de resaltar regionalmente las características morfoestructurales que presenta cada uno de estos bloques.

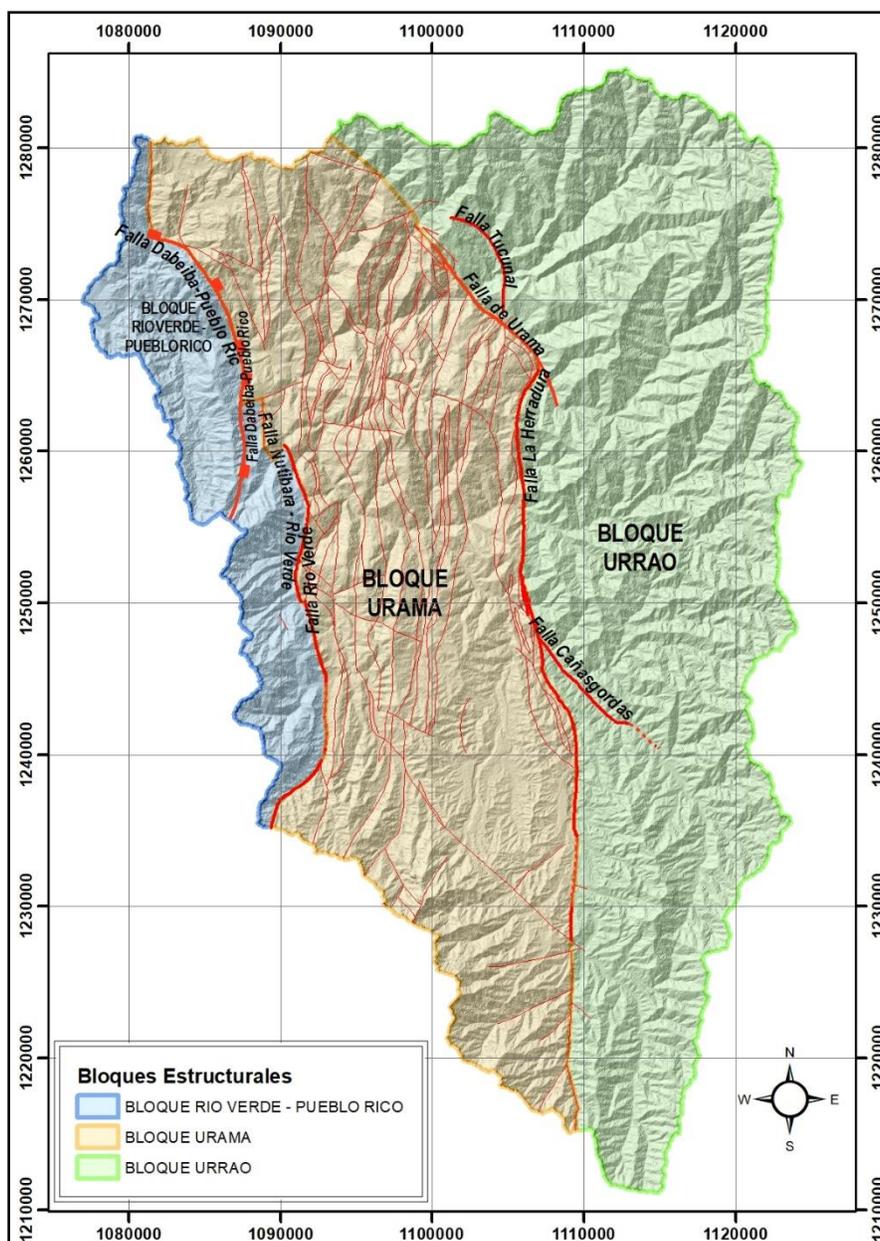
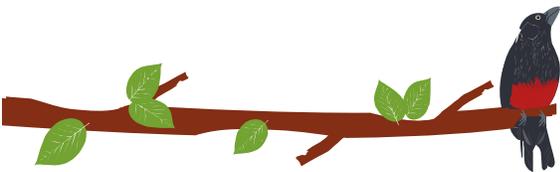
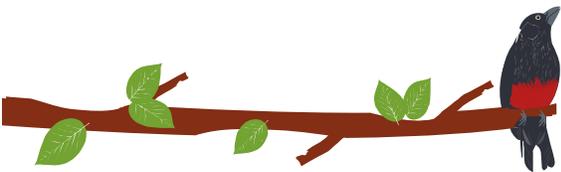


Figura 17. Sectorización estructural del área de la cuenca del Río Sucio Alto. Fuente: Capítulo de geología.

1.4.6.3.1 BLOQUE URRAO

Al oriente del área de la cuenca del Río Sucio Alto se presenta una secuencia detrítica cuya granulometría variable se expresa diferencialmente desde el este hacia el oeste en la parte norte, sobre un relieve morfoestructural conformado por arenitas conglomeráticas a arenitas de grano medio que varían transicionalmente en dirección oeste y sur; el grado de disectación generado por el drenaje subdendrítico principalmente, de densidad baja a media presente en el norte, se incrementa a medida que la secuencia se torna más fina allí en donde predominan las limolitas y arcillolitas.



Este sector se encuentra estructuralmente limitado al este por el sistema de fallas de Romeral, siendo la Formación Barroso la expresión litológica más antigua anexa a este sistema; al occidente por la Falla de la Herradura que lo separa del bloque Urama, sobre el cual se conforma un sector de transferencia estructural hacia la falla de Uramita, localizada hacia el noroeste del área.

1.4.6.3.2 BLOQUE URAMA

Ocupa la parte central de la cuenca y está conformado por una secuencia de cherts y calizas provenientes de un ambiente distal de la antigua cuenca de sedimentación, anómalamente intercalados con segmentos alargados de diabasas provenientes del basamento, muy afectadas tectónicamente puesto que corresponde a una secuencia alóctona que conforma el denominado Arco de Dabeiba. Este bloque característicamente interdigitado presenta espacialmente una alta compresión en el sector norte con efectos de flexión hacia el noroeste, mientras que, hacia el sur, se notan efectos distensivos separados por fallas secuencialmente paralelas orientadas sentido NS.

1.4.6.3.3 BLOQUE RIO VERDE – PUEBLO RICO

Ocupa la parte occidental de la cuenca, lo delimita las dos fallas de tendencia norte sur a N25°E y marcan el contacto entre el Basalto de El Botón y las sedimentitas del Grupo Cañasgordas.

1.4.6.4 Grado de fracturamiento y su relación con la porosidad secundaria

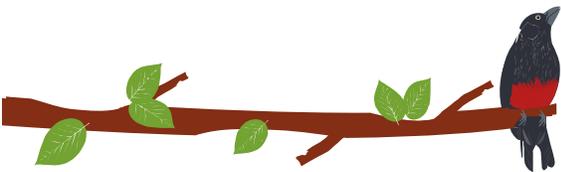
Las fallas producen una zona de debilidad por varios metros al lado y lado en el macizo rocoso. En el caso de la cuenca Río Sucio Alto, las múltiples familias de fallas producen grandes diaclasamiento (Figura 18 a la Figura 25).



Figura 18. Discontinuidades presentes en el macizo rocoso de las diabasas y basaltos de San José de Urama (JK1du), estación JAM-02 vía Nacional Medellín – Turbo, municipio de Cañasgordas, vereda Cirigüan Río Verde, municipio de Uramita coordenadas (1092031.5E - 1253328.3N).



Figura 19. Discontinuidades presentes en el macizo rocoso de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (K2alu), sin alterar, entrabadas, estación JAM-03, vía Nacional Medellín – Turbo, municipio de Cañasgordas, vereda Cirigüan, coordenadas (1232728.4E - 1121853.7N)



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO



Figura 20. Macizo de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (K2alu), parcialmente alterado, entrabado, con bloques de varias caras angulares, estación JAM-07, vereda Cestillal, municipio de Cañasgordas, (1110663.9E - 1250219.8N).



Figura 21. Macizo rocoso de los Chert y calizas de Nutibara (K2cn), estación JAM-09 C2, vía Nacional Medellín - Turbo, municipio de Cañasgordas, vereda Botija Bajo, coordenadas (1106696.4E - 1247825.4N)



Figura 22. Macizo rocoso de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (K2alu), muy fracturado, plegado, con bloques pequeños angulosos formados por intersecciones de familias de discontinuidades, persistencia de esquistosidad, estación JAM-19, vía Nacional Medellín - Turbo, municipio de Dabeiba, vereda El Pital, coordenadas (1105758.5E - 1248007.7N).



Figura 23. Disposición del macizo rocoso de las litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao (K2alu), muy fracturado presente en la estación JAM-19, vía Nacional Medellín - Turbo, municipio de Dabeiba, vereda El Pital, coordenadas (1105758.5E - 1248007.7N).

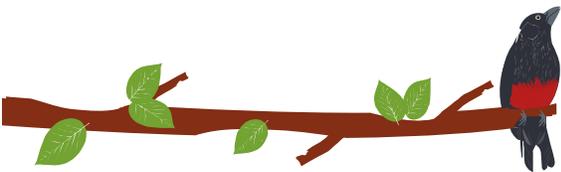


Figura 24. Macizo rocoso de los Basaltos de El Botón, muy fracturado, con bloques pequeños angulosos formados por intersecciones de familias de discontinuidades, parcialmente alterado, estación JAM-28, vía Nacional Medellín – Turbo, municipio de Frontino, vereda El Llano, coordenadas (1092264.9E - 1242571.3N).



Figura 25. Macizo rocoso de los derrames diabásicos y basálticos de los Basaltos de El Botón, muy fracturado, con bloques angulosos formados por intersecciones de familias de discontinuidades, estación JAM-28, vía Nacional Medellín – Turbo, municipio de Frontino, vereda El Llano, coordenadas (1092264.9E - 1242571.3N).

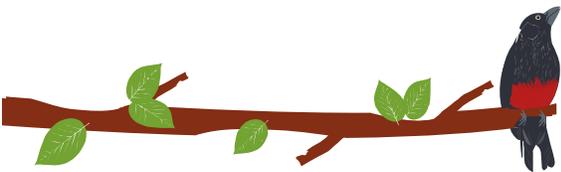
Las rocas fracturadas desarrollan una permeabilidad secundaria a lo largo de las aberturas de las fracturas y son capaces de albergar agua en cantidad dependiendo de la frecuencia del grado de fracturamiento. Las fracturas tienden a desarrollarse con mayor facilidad en los primeros 300-600 metros de profundidad (Espinoza, 2010), lo que hace que la permeabilidad que se desarrolla disminuye fuertemente con la profundidad, donde las fracturas tienden a cerrarse debido a la carga de origen vertical y horizontal impuesta por las rocas que sobreyacen. Algunas transformaciones que provocan un aumento en la permeabilidad de las rocas incluyen los movimientos en masa, meteorización química, acuñamiento por raíces o congelamiento y algunas actividades humanas.

1.4.7 EVALUACIÓN GEOFÍSICA

A través de la combinación de los datos geofísicos y geológicos, se puede determinar la presencia y la geometría de los acuíferos en la cuenca. Los métodos de exploración geofísica se aplican con el fin de obtener información del subsuelo de una forma indirecta y determinar con una buena aproximación los espesores y profundidades de los depósitos asociados con capas potencialmente acuíferas.

El método más utilizado en la exploración de aguas subterráneas es el de resistividad eléctrica, el cual permite distinguir capas permeables como arenas e impermeables como arcillas. El método de resistividad eléctrica consiste fundamentalmente en estudiar las variaciones en el subsuelo, de la propiedad física denominada resistividad eléctrica. La resistividad eléctrica es la propiedad que poseen los diferentes tipos de materiales, artificiales o naturales, de oponerse al flujo de la corriente eléctrica en presencia de un campo eléctrico. A través de los contrastes de los valores obtenidos de resistividad es posible diferenciar distintas clases de materiales existentes en el subsuelo como arcillas de arenas.

En el sector sur oriental de la cuenca, se realizó una prospección geoelectrica (geoelectrica continua) de carácter local, en el área de influencia del Proyecto Túnel del



Toyo y sus vías de acceso, en los municipios de Giraldo y Cañasgordas fuente (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016), este estudio proporciona una información valiosa para el análisis hidrogeológico de la cuenca Río Sucio Alto, ya que el mismo se realiza sobre la Formación Penderisco, la cual corresponde a la Formación Urrao (K2alu) nombrada así atendiendo el análisis geológico y la nomenclatura estratigráfica para la escala de trabajo (1:25.000).

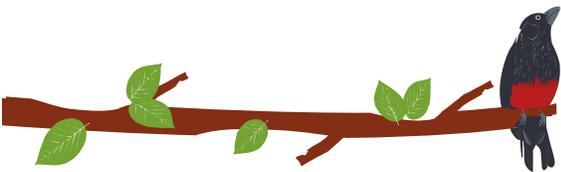
En el área de la cuenca, la Formación Urrao (K2alu) aflora en más del 70% del área, si tenemos en cuenta el muestreo y análisis realizado sobre esta formación, el comportamiento hidrogeológico es casi homogéneo en toda su extensión.

Esta situación no ocurre en los manantiales de la Formación Penderisco, debido a que su fracturamiento en cuanto a longitud y amplitud es más heterogéneo por el tipo de litología (zona central de la cuenca).

La ubicación de las Líneas de Geoelectrica Continua (Figura 27), (Tabla 6. Datos generales de las Líneas de Prospección Geoelectrica Continua levantadas en el área del Túnel El Toyo entre las Localidades de Cañasgordas y Giraldo. Departamento de Antioquia. Tabla 6), se realiza tomando en cuenta un arreglo geométrico y espacial (Schlumberger) que permite cubrir la mayor parte del perfil y que a su vez admite establecer la correlación de las unidades geológica-geoelectricas presentes, obtenidos en cada uno de ellos, en el área de la cuenca se ubicaron dos (2) sobre rocas de la Formación Penderisco (K2alu), y una sobre un Depósito Fluvio-Torrencial (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Adicionalmente se acudió al estudio AUTOPISTA AL MAR 2. CAPÍTULO 9. ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS DE TÚNELES (Consortio TYPASA-CRA, 2014), en el cual se pueden observar los resultados de tres líneas geoelectricas realizadas, en la parte centro y noroeste de la cuenca, localizadas en las unidades del Complejo volcánico "Santa Cecilia - La Equis", Formación Penderisco - Miembro Nutivara (Ksn) y Volcánico Uramita (Ksvu) en el informe consultado, y sobre Basaltos de El Botón (N1n4n5bb) y Chert y calizas de Nutibara (K2cn) en el presente estudio.

Unidades encontradas a lo largo de los túneles proyectados de La Llorona en la parte noroeste, y de Fuemia y de Uramita en la parte central. Zonas de importancia debido a la configuración en cuerpos alargados en sentido norte-sur, y a la alta presencia de fallas que atraviesan y ponen en contacto estas unidades. Ubicación de las líneas geoelectricas que se observa a continuación (Figura 26. Ubicación de las Líneas de Geoelectricas en la cuenca Río Sucio Alto. Fuente , .Figura 26):



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

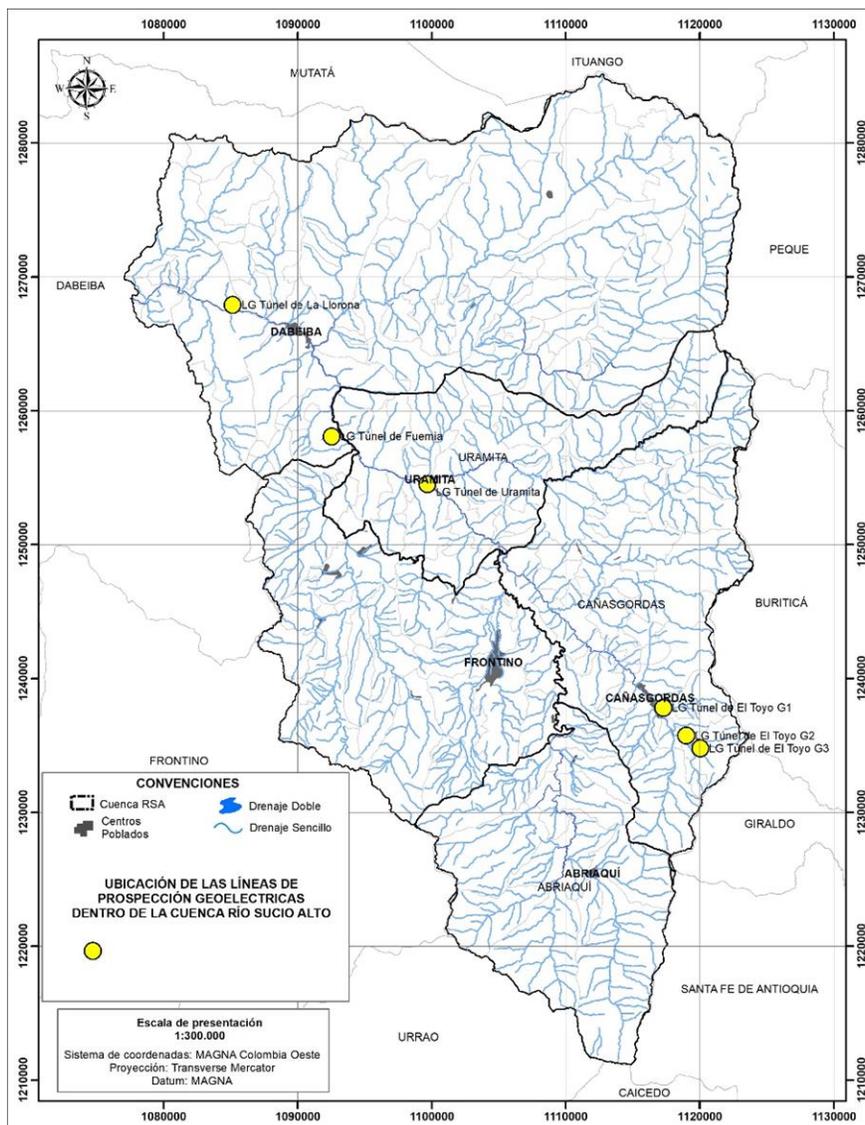


Figura 26. Ubicación de las Líneas de Geoelectricas en la cuenca Río Sucio Alto. Fuente (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016), (Consortio TYPASA-CRA, 2014).

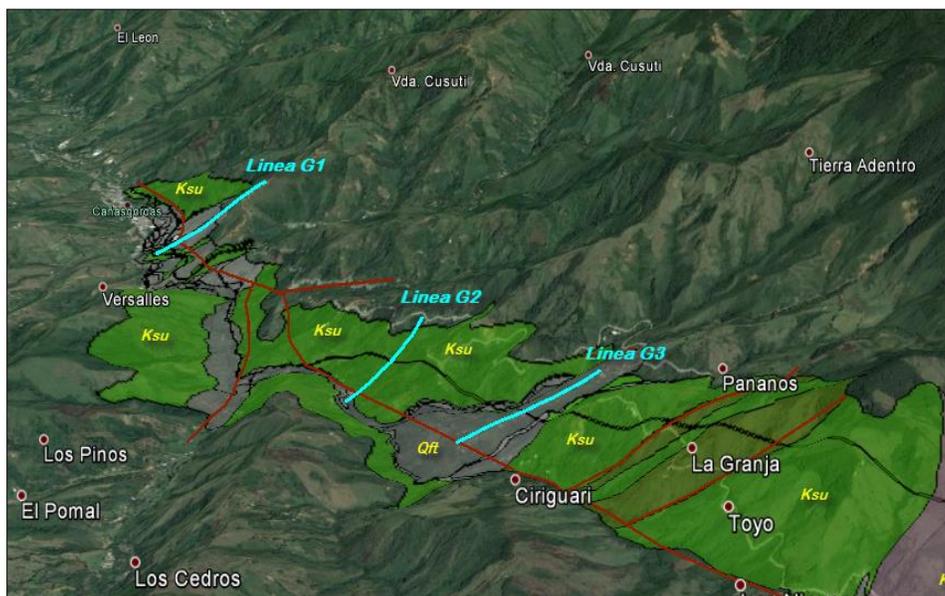
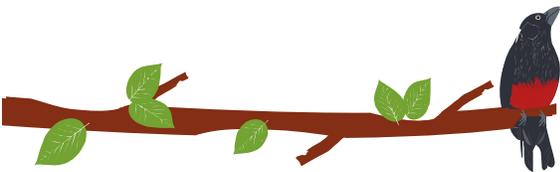


Figura 27. Ubicación de la Líneas de Geoelectrica Continua en el Área del Túnel El Toyo, entre las Localidades de Cañasgordas y Giraldo en el Departamento de Antioquia (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Tabla 6. Datos generales de las Líneas de Prospección Geoelectrica Continua levantadas en el área del Túnel El Toyo entre las Localidades de Cañasgordas y Giraldo. Departamento de Antioquia (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Perfil Formación	P.K. (kmz)	Longitud (m)	Separación de Electrodos (m)	Electrodo Inicial		Electrodo Final		Rumbo	Prof. (m)
				OESTE	NORTE	OESTE	NORTE		
LG-1. Formación Penderisco (K2alu)	39+800	910	16.25	76° 1'17.50"	6°44'37.43"	76° 0'53.69"	6°44'52.21"	N32°E	150.0
LG-2. Formación Penderisco (K2alu)	36+250	790	14.1	76° 0'9.00"	6°43'22.17"	75°59'58.4"	6°43'45.09"	N65°E	130.0
LG-3. Dep Fluvio Torrencial (Qft)	34+900	930	16.6	75°59'40.4"	6°42'59.26"	75°59'15.4"	6°43'15.07"	N33°E	155.0

1.4.7.1 Línea geoelectrica continua G-1 – Túnel 18

La Línea Geoelectrica Continua G-1, con una pendiente del 2.03% en dirección SW-NE, extiende su trazado al costado derecho del borde de la vía en dirección NW al municipio de Cañasgordas, hacia la parte alta de la montaña alcanzando una longitud de exploración en la horizontal de 910.0 m. y en profundidad de 150 m., con 56 electrodos y espaciamiento entre estos de 16.25 m., con una diferencia de altura de 306.0 m atravesando superficialmente desde el electrodo No.1 con una distancia de 111 m. en la horizontal y vertical de 56 m. por los electrodos 8 y 9, al eje del proyectado túnel 18, y a 70 m., costado izquierdo de la Falla Cañasgordas (Figura 28) (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

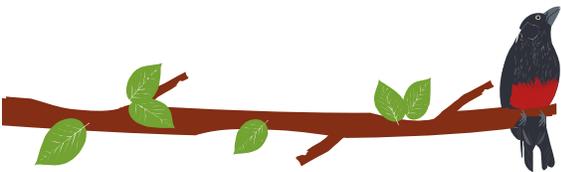


Figura 28. Localización de la Línea de Geoeléctrica Continua. G-1, Túnel 18, tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

El perfil obtenido corresponde desde el electrodo No. 1 con una cota de 1348.20 m.s.n.m. hasta el No. 33 con cota de 1497.88 m.s.n.m. con una distancia en superficie de 492 m y espesores de hasta 20 m aproximadamente se encuentran los depósitos cuaternarios de (Qca) hasta el electrodo No. 56 con una cota final de 1654.36 m.s.n.m. en su totalidad, estos depósitos se encuentran infrayaciendo a la secuencia de rocas conformadas por la Formación Urrao (K2alu), hasta la profundidad de investigación alcanzada (150.0 m).

La Figura 29, muestra las imágenes resultantes de la interpretación del Línea G-1 Túnel 18. En el modelo geológico-geoeléctrico (parte inferior de las imágenes) se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real.

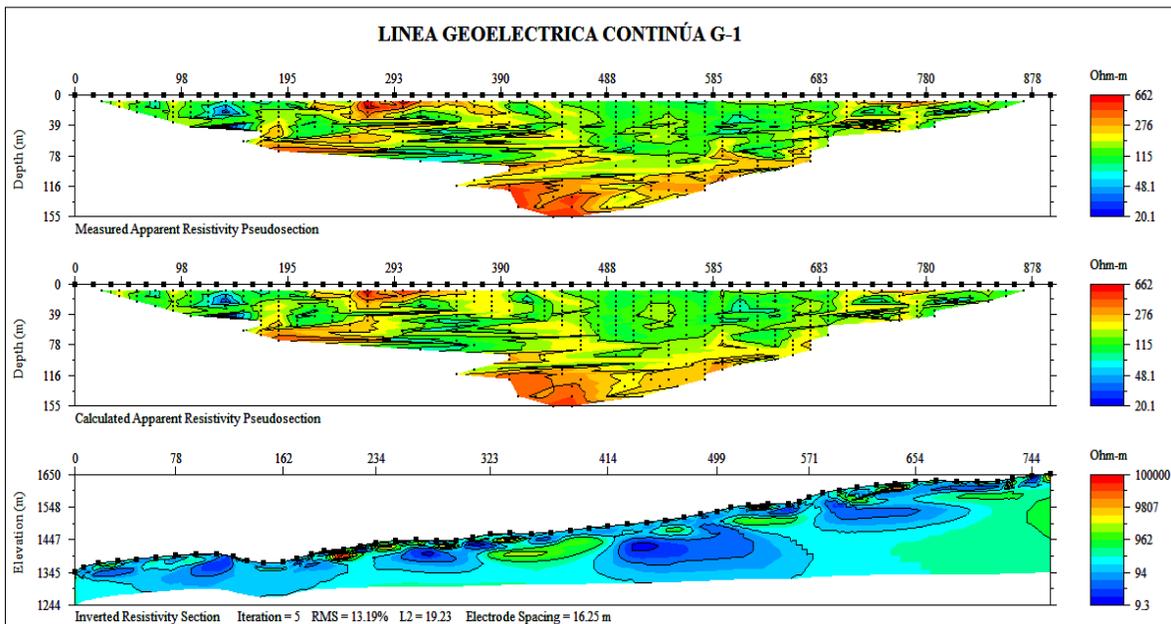
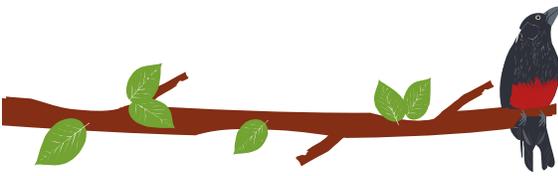


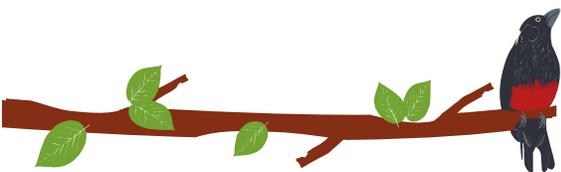
Figura 29. Interpretación del Perfil de Geoelectrica Continua G-1 - Túnel 18 tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Los resultados del análisis y la interpretación del modelo señalan que la unidad geológica-geoelectrica más antigua, aparece hacia la parte inferior de la imagen y corresponde a capas de areniscas de grano fino intercaladas con limolitas y liditas silíceas, fracturadas y con bajo a moderado grado de meteorización. Ésta capa en el perfil se encuentra representada por las tonalidades azul celeste a verde pálido que reflejan valores de resistividad entre 250 y 428 Ohm-m. la segunda unidad geológica-geoelectrica que cubre a la primera, está constituida por una secuencia de granulometría muy fina formada por arcillolitas, limolitas y lutitas poco compactas y fracturadas, simbolizadas por los colores azul oscuro a claro que reflejan valores de resistividad desde 9.3 hasta 94 Ohm-m, secuencia que además aparece desplazada por efectos de fallas (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

La anterior secuencia de granulometría muy fina aparece suprayacida por capas de areniscas y liditas silíceas compactas, también afectadas por fallas que en la imagen están representadas por el color verde a verde pálido, reflejando altos valores de resistividad, entre 787 y 4422 Ohm-m, como respuesta a su fuerte compactación y bajo grado de meteorización. Por último, se encuentran en forma asilada fragmentos tamaño bloques y cantos que se asocian a rocas volcánicas basálticas y liditas silíceas con un alto grado de compactación en el núcleo y meteorización esferoidal hacia la superficie, caracterizados por el color rojo intenso con halos de color amarillo intenso a pálido que reflejan resistividades muy altas, desde 4830 hasta 100000 Ohm-m. La ocurrencia de estos fragmentos es más común hacia la pendiente media del terreno, mientras en la parte más baja aparece el color azul tenue cerca de la superficie del terreno, indicando la presencia de materiales de derrumbe (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

A lo largo de la Línea G-1 Túnel 18, se observan varias discontinuidades estructurales en las diferentes unidades geológica-geoelectricas que allí ocurren, las cuales según la interpretación realizada corresponden a fallas en la secuencia litológica de la Formación





Urrao (K2au), y suprayaciendo a esta los depósitos cuaternarios (Qca), y los antrópicos (QII) con espesores de hasta 25 m (Figura 30).

En la Tabla 7, se muestran los rangos de valores de resistividad reflejados por las unidades geológica-geoeléctrica que conforman la Formación Urrao a lo largo del perfil.

Tabla 7. Datos generales Rangos de Resistividad Obtenidos en la Línea G-1 Túnel 18. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

COLOR REPRESENTATIVO	RANGO DE RESISTIVIDAD (Ohm-m)	TIPO DE MATERIAL	GRADO DE METEORIZACIÓN
	4422 - 100000	Bloques y cantos de arenisca y liditas silíceas, compactas.	Bajo a muy Bajo
	787 - 4422	Capas de Areniscas y liditas silíceas, compactas y fracturadas de la Formación Urrao.	Bajo
	250 - 428	Capas de arenisca fina, limolitas y liditas silíceas, fracturadas de la Formación Penderisco.	Moderado
	9.3 - 94	Capas de suelos superficiales residuales compuestas de limos arcillosos, en profundidad arcillolitas, limolitas y lutitas poco compactas y muy fracturadas de la Formación Penderisco.	Alto a Moderado

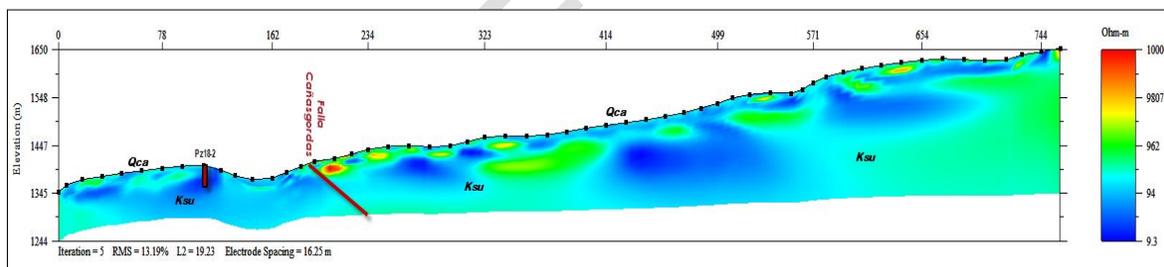


Figura 30. Análisis e Interpretación del Perfil de Geoelectrónica Continua G1 - Túnel 18 en Rocas de la Formación Urrao (K2alu) y los depósitos (Qca y QII) (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

1.4.7.2 Línea geoelectrónica continua G-2 - Túnel 17 (El Toyo)

La Línea Geoelectrónica Continua G-2, ubicada en una fuerte ladera con una pendiente del 53.59% en dirección SW-NE, extiende su trazado al costado derecho Valle de la Quebrada NN, en dirección NW al sur de la vía al municipio de Cañasgordas, hacia la parte alta de la montaña alcanzando una longitud de exploración de 790 m. y en profundidad de 130.0 m., con 56 electrodos y espaciamento entre estos de 14.10 m., con una diferencia de altura de 172.85 m., atravesando superficialmente desde el electrodo No.1 con una distancia de 115 m., la Falla Cañasgordas y en la misma proyección en la horizontal a 445 m., y en la vertical de 56 m. por los electrodos 33 y 34, al eje del proyectado túnel 17 (El Toyo), (Figura 31) (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

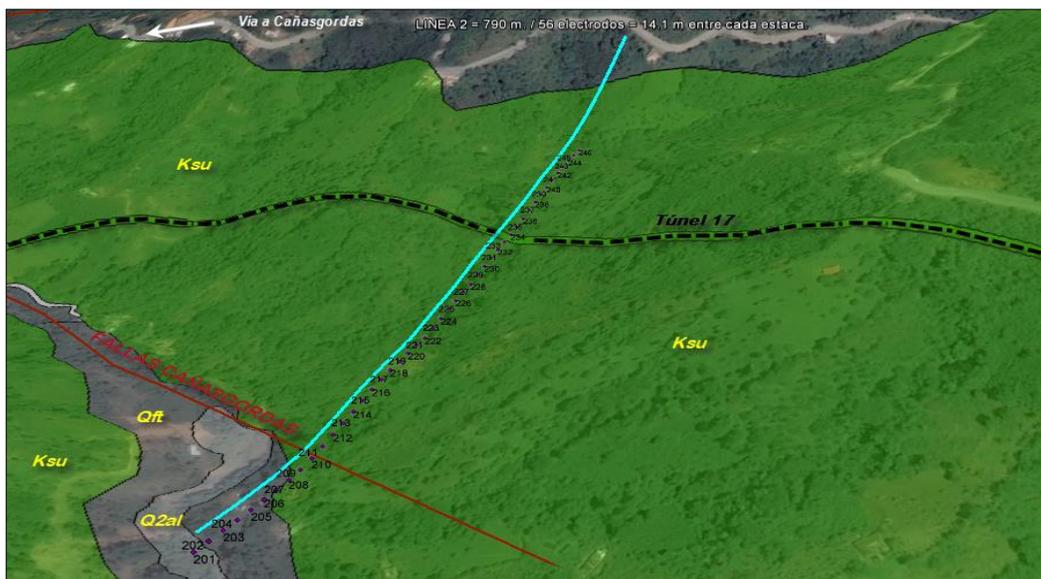
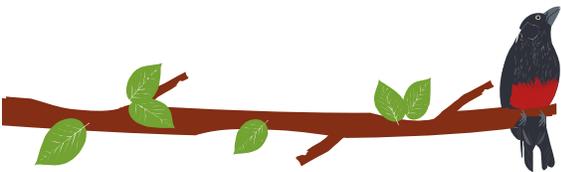


Figura 31. Localización de la Línea de Geoeléctrica Continua. G-2, Túnel 17 (El Toyo). Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

El perfil obtenido corresponde desde el electrodo No. 1 con una cota de 1541.87 m.s.n.m. hasta el No. 10 con cota de 1562.39 m.s.n.m. con una distancia en superficie de 97 m se encuentran los depósitos cuaternarios fluvio-torrenciales (Qft), infrayace a este depósito y hasta el electrodo No. 56 con una cota final de 1714.72 m.s.n.m. en su totalidad, a la secuencia de rocas conformadas por la Formación Urrao (K2alu), hasta la profundidad de investigación alcanzada (155.0 m) (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Después de ajustada la topografía, el modelo geológico-geoeléctrico correspondiente que se muestra en la parte inferior de la imagen en la Figura 32, señala la presencia de tres (3) unidades geológicas-geoeléctricas que representa a la misma secuencia sedimentaria silíceo de la Formación Urrao (K2alu), que se muestra en el anterior Línea G-1, diferenciándose por una mayor evidencia tectónica.

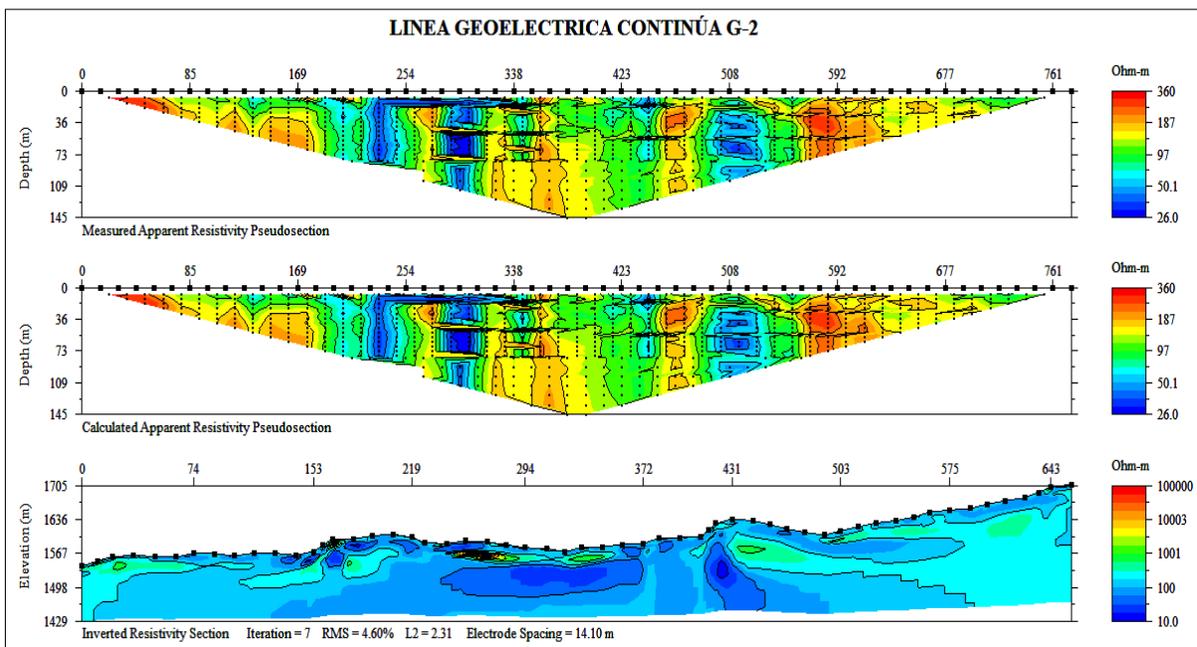
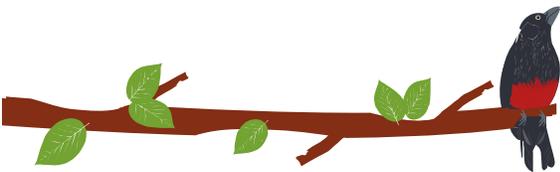


Figura 32. Interpretación del Perfil de Geoelectrica Continua G-2 - Túnel 17 (El Toyo), tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

En el análisis e interpretación de la línea G-2 en la Figura 33, se observa la unidad geológica-geoelectrica más antigua situada en la base del perfil, corresponde a capas de granulometría muy fina constituida por arcillolitas, limolitas y lutitas poco compactas y fracturadas, con un grado moderado de meteorización, caracterizadas por los colores azul oscuro a claro que reflejan valores de resistividad desde 10 hasta 100 Ohm-m, secuencia que además aparece desplazada por efectos de fallas, en esta zona se encuentra atravesando el túnel 17 (el Toyo).

Encima ocurren capas constituidas por areniscas y liditas silíceas muy compactas y fracturadas que alcanzan la superficie del terreno, también afectadas por fallas, representadas en la imagen por el color verde a verde pálido que indican muy altos valores de resistividad, entre 1000 y 5500 Ohm-m, como respuesta a su fuerte compactación y bajo grado de meteorización. Esta unidad se puede observar hacia los bordes de la imagen en donde se perfila su mayor potencia.

Finalmente, la tercera unidad geológica-geoelectrica está representada por algunos fragmentos de rocas volcánicas, principalmente basaltos muy compactos que reflejan de resistividad muy altos (5500 y 100000 Ohm-m), caracterizados por su color rojo intenso con aureola amarilla.

A lo largo de la Línea G-2 Túnel 17 (El Toyo), en la se observa un fuerte efecto tectónico originado por una serie de fallas paralelas de corta longitud, las cuales según la interpretación realizada corresponden a la secuencia litológica de la Formación Urrao (K2alu), y suprayandose a esta los depósitos cuaternarios (Qft), y los aluviales (Q2al) que conforma el valle de la quebrada NN., al costado izquierdo se observa el piezómetro inclinado Pz-17-9 con una profundidad de 90 m, como se observa en la Figura 33.

En la Tabla 8, se muestra los resultados de la interpretación de la Línea G-2.

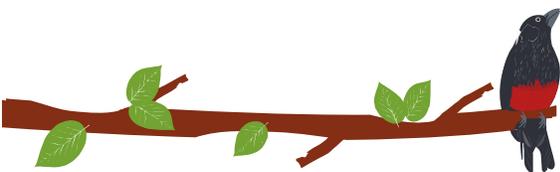


Tabla 8. Datos generales Rangos de Resistividad Obtenidos en la Línea G-2 Túnel 17 (El Toyo). Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

COLOR REPRESENTATIVO	RANGO DE RESISTIVIDAD (Ohm-m)	TIPO DE MATERIAL	GRADO DE METEORIZACIÓN
	5500 - 100000	Bloques y cantos de arenisca y liditas silíceas, compactas.	Bajo a muy bajo
	1000 - 5500	Capas de Areniscas y liditas silíceas, muy compactas y fracturadas de la Formación Penderisco (Ksu).	Bajo
	10 - 100	Capas de Arcillolitas, limolitas y lutitas poco compactas y fracturadas de la Formación Penderisco (Ksu).	Alto a Moderado

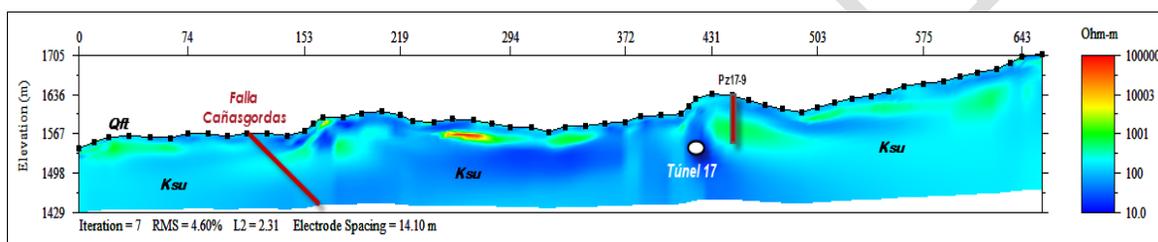


Figura 33. Análisis e Interpretación del Perfil de Geoelectrica Continua G2 - Túnel 17 (El Toyo) en Rocas de la Formación Penderisco (Ksu) y los depósitos fluviotorrenciales (Qft), tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

1.4.7.3 Línea geoelectrica continua G-3 Túnel 17 - El Toyo

La Línea Geoelectrica Continua G-3, que forma un angosto valle longitudinal con una pendiente del 20.44% en dirección SW-NE, extiende su trazado en dirección NW al sur de la vía al municipio de Cañasgordas, hacia la parte alta de la montaña alcanzando una longitud de exploración de 930 m. y en profundidad de 155.0 m., con 56 electrodos y espaciamiento entre estos de 16.6 m., con una diferencia de altura de 157.64 m., atravesando superficialmente desde el electrodo No.1 con una distancia de 43 m., a la Falla Cañasgordas y en la misma proyección en la horizontal a 430 m., y en la vertical de 317 m. por los electrodos 27 y 28, al eje del proyectado túnel 17 (El Toyo). (Figura 34) (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

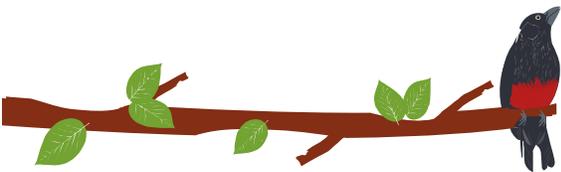
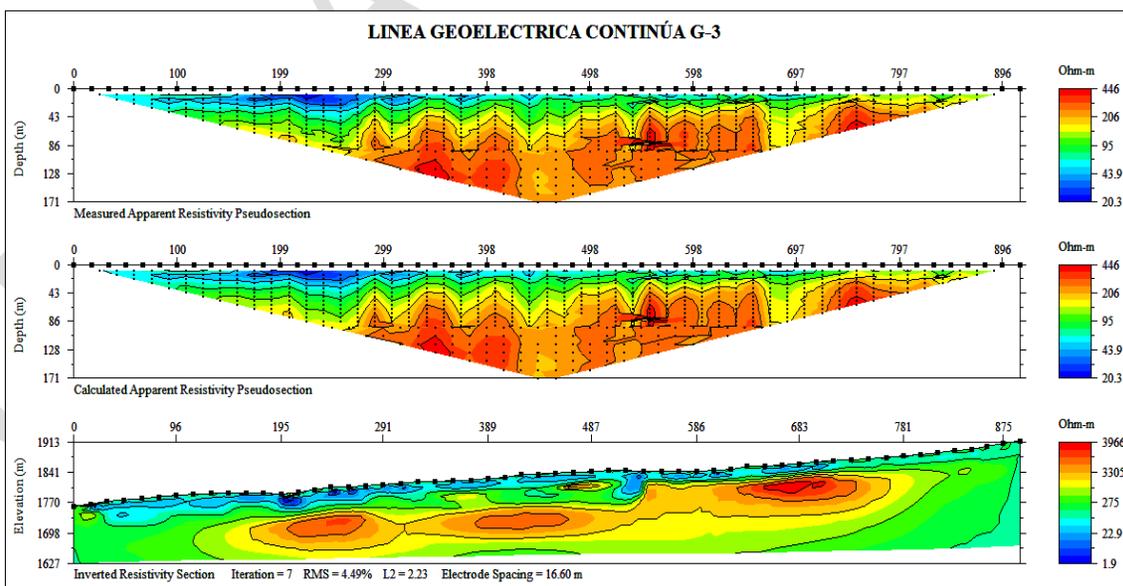


Figura 34. Localización de la Línea de Geoeléctrica Continua. G-3, Túnel 17 (El Toyo).

Esta Línea es levantada sobre un depósito Fluvio-Torrencial Cuaternario (Qft) con espesores aproximados de 60 m., el perfil obtenido corresponde desde el electrodo No. 1 con una cota de 1761.54 m.s.n.m. hasta el No. 56 con cota de 1919.19 m.s.n.m., la profundidad de investigación alcanzada (155.0 m).

El modelo de interpretación que se presenta en la parte inferior de la imagen de la Figura 35, se caracteriza por presentar dos tipos de rocas que ocurren en ambientes diferentes. Estos tipos de rocas aparecen asociadas a la morfología que ocurre a lo largo del trazo de la línea, donde en el angosto valle prevalece el depósito Cuaternario de origen fluviotorrencial (Qft) que cubre discordantemente una muy gruesa capa constituida por rocas volcánicas de la Formación Barroso (Kvb). Esta roca volcánica aparece intercalada en la secuencia sedimentaria silícea de la Formación Urrao (K2alu). A lo largo del perfil se pueden diferenciar cuatro (4) unidades geológica-geoeléctricas.



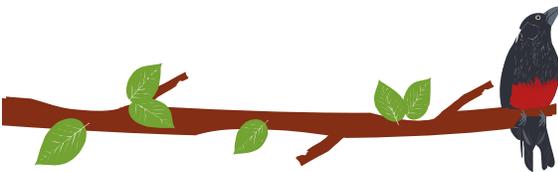


Figura 35. Interpretación del Perfil de Geoelectrica Continua G-3 - Túnel 17 (El Toyo), tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

La unidad más antigua corresponde a rocas volcánicas de la Formación Barroso (Kvb) con un moderado grado de meteorización de tipo esferoidal, que aparece envolviendo a la roca fresca. Está simbolizada por tonos de color verde amarillento que reflejan valores de resistividad desde 275 hasta 1790 Ohm-m, los cuales se encuentra afectadas por fallas, con fracturas y diaclasa de menor longitud.

La segunda unidad geológica-geoelectrica se encuentra representada por basalto y diabasa fresca, compacta y fracturada con bajo grado de meteorización, simbolizada por los colores amarillos intenso y rojo intenso que reflejan valores de resistividad entre 1790 y 39662 Ohm-m, también afectada por fallas.

Cubriendo discordantemente a esta unidad, aparece el depósito Fluvio-Torrencial (Qft), representado en el perfil por la gama que va del azul oscuro al azul claro, reflejando resistividades con valores muy bajos que oscilan desde 2.0 hasta 150 Ohm-m, correspondiente a material arcilloso, limosos y arenoso con fragmentos de rocas volcánicas y sedimentarias. Su espesor varía entre 15.0 y 40.0 m.

La última unidad geológica-geoelectrica aparece representada por pocos bloques y cantos de rocas volcánicas compactos y con bajo grado de meteorización, que ocurren hacia la parte basal del Depósito Fluvio-Torrencial (Qft).

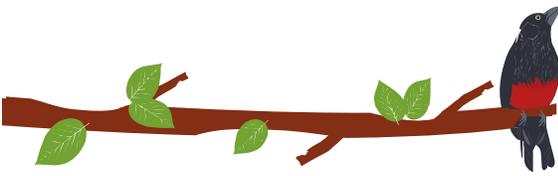
A lo largo del perfil, la franja de rocas volcánicas de la Formación Barroso (Kvb), está afectada por fallas paralelas longitudinales, siendo el contacto entre esta franja y la Formación Urrao (K2alu), de tipo fallado. Hidrogeológicamente el flujo de agua subterránea almacenada en las rocas silíceas y fracturadas de la Formación Urrao (K2alu), tiende a represarse a presión al encontrar la barrera formada por el citado contacto fallado con la Formación Barroso (Kvb). Estas zonas pueden generar altos caudales instantáneos por efectos de despresurización (Figura 36) (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

En la Tabla 9, se muestran los rangos de valores de resistividad reflejados por las rocas volcánicas y el material meteorizado a ellas asociadas, como también por el depósito Cuaternario, que conforman el subsuelo de la ladera en el sector donde se levanta el Perfil-G 3.

Tabla 9. Datos generales Rangos de Resistividad Obtenidos en la Línea G-3 Túnel 17 (El Toyo).

COLOR REPRESENTATIVO	RANGO DE RESISTIVIDAD (Ohm-m)	TIPO DE MATERIAL	GRADO DE METEORIZACIÓN
	1790 - 39662	Bloques y cantos de basalto y diabasa, compactas	Bajo a Muy Bajo
	1790 - 39662	Capas de rocas volcánicas basálticas y diabásicas, compactas y fracturadas. Formación. Barroso (Kvb)	Bajo a Muy Bajo
	275 - 1790	Basalto y diabasa poco compactas, fracturadas y meteorizadas. Form Barroso	Moderado





	2 - 150	Arcilla, limos y arenas finas a media, inconsolidadas, con fragmentos de rocas volcánicas y sedimentarias. Fluvio-Terrencial	Alto a Moderado
--	---------	--	-----------------

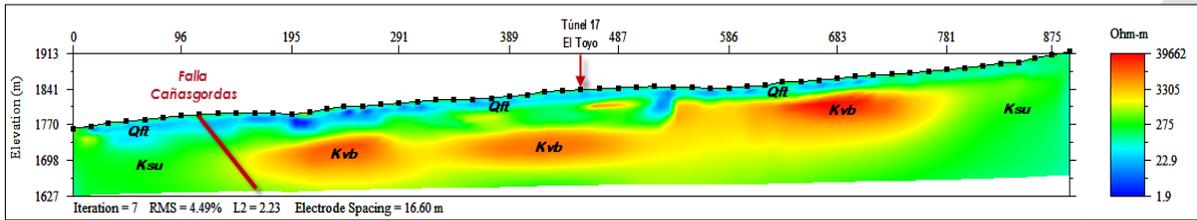


Figura 36. Análisis e Interpretación del Perfil de Geoelectrica Continua G1 - Túnel 18 en Rocas de la Formación Penderisco (K2alu) y el depósito fluvio-torrencial (Qft), tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Otros estudios realizados en el área de la cuenca corresponden al proyecto AUTOPISTA AL MAR 2. CAPÍTULO 9. ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS DE TÚNELES, donde se llevaron a cabo estudios de exploración geofísica en diferentes puntos donde se tiene la construcción de túneles, un primer lugar en inmediaciones del centro poblado de Uramita en la ladera opuesta cruzando el río Sucio; otro lugar avanzando en dirección noroeste sobre laderas el margen izquierdo del río Sucio en el sector conocido como Alto del Botón, y finalmente en la misma dirección avanzando desde el municipio de Dabeiba en el sector de La Llorona, lugares donde se localizan cada una de las líneas sísmicas.

1.4.7.4 Línea geoelectrica del tunel de Uramita

Línea que corresponde al túnel de Uramita, con una longitud de aproximadamente 1000 m, localizado en la ladera opuesta al casco urbano del municipio, laderas en el margen izquierdo del río Sucio, lugar en el que desembocan el río Uramia y la quebrada Encalichada. El túnel se encuentra sobre las unidades de la Formación Penderisco formada por material volcanico y denominada Volcanico Uramita (Ksvu), rocas no reportadas en el estudio, encontrándose únicamente rocas sedimentarias, formadas por una secuencia de areniscas y lutitas (argilita o limolita), intercaladas en capas centimétricas a decimétricas, las cuales evidencian un comportamiento inestable con malas características geotecnicas, pero que por su caracter impermeable producido por las argilitas reducen considerablemente la presencia de agua, sin embargo algunas zonas con presencia de fallas la permeabilidad aumenta.

La localización del túnel y la línea sísmica con la topografía se pueden observar a continuación (Figura 37):

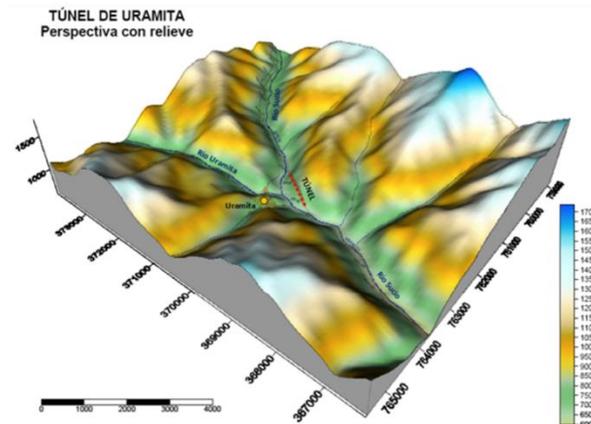
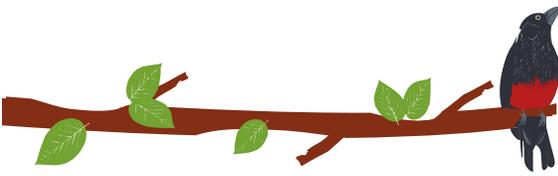


Figura 37. Localización del túnel de Uramita en inmediaciones del centro poblado, tomado de (Consortio TYPASA-CRA, 2014).

La línea sísmica realizada (Figura 38) muestra una sección central caracterizada por una roca compacta y baja humedad, y para las zonas extremas cerca a los portales se observa una roca mas permeable y con mayor contenido de agua, adicionalmente una zona de iguales condiciones producto de la presencia de fallas.

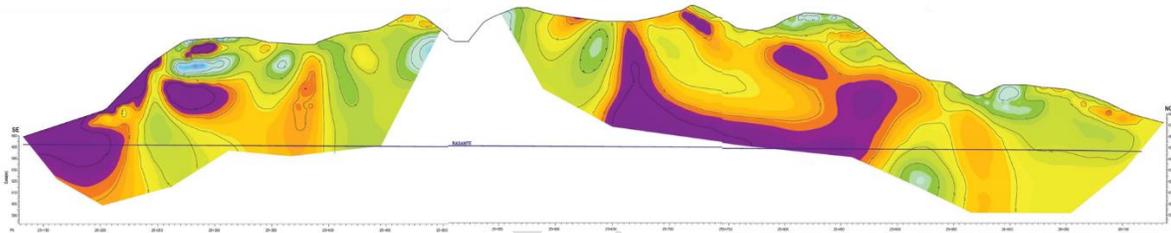


Figura 38. Tomografía eléctrica longitudinal del Túnel de Uramita, tomado de (Consortio TYPASA-CRA, 2014).

1.4.7.5 Línea geoelectrica del túnel de Fuemia

Línea realizada para el estudio del túnel localizado en la ladera del magen izquierdo del río Sucio, en el sector conocido como el Alto de El Botón, con una longitud de 2180 m, que atraviesa una secuencia de areniscas y lutitas, con la presencia en menor medida de chert, grauwacas y calizas, pertenecientes a a la Formación Penderisco en su Miembro Nutivara (Ksn), materiales de poca resistencia y pobres caracterisiticas geotecnicas, con una alta probabilidad a los movimientos en masa, evidenciados en delizamientos rotacionaesl encontrados a lo largo de la vía. Localización del túnel y de la línea sísmica se obervada a continuación (Figura 39) (Consortio TYPASA-CRA, 2014).

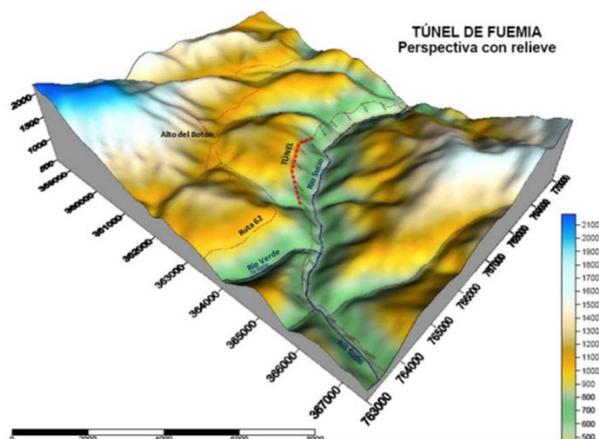
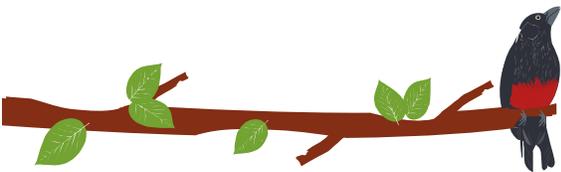


Figura 39. Localización del túnel de Fuemia, tomado de (Consortio TYPASA-CRA, 2014).

Se realiza una línea geoelectrica en dirección NW (Figura 40), en el cual se aprecia una roca compacta con poco contenido de agua en la mayor parte del túnel, a excepción del tramo intermedio donde se tiene una mayor permeabilidad y humedad.

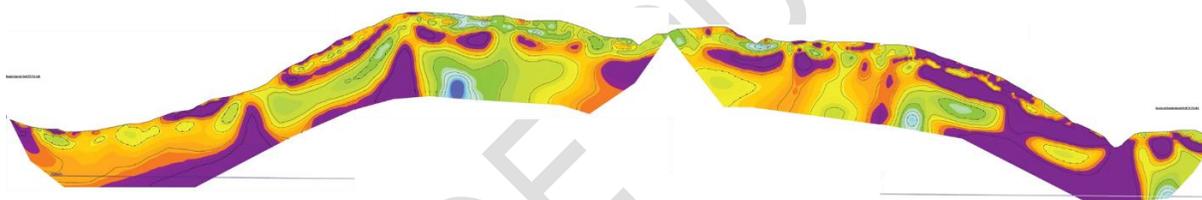


Figura 40. Tomografía eléctrica longitudinal del Túnel de Fuemia, tomado de (Consortio TYPASA-CRA, 2014).

1.4.7.6 Línea geoelectrica del túnel de La Llorona

Línea que corresponde al tunel proyectado de longitud de 1335 m, localizado hacia el noroeste del casco urbano del municipio de Dabeiba, sobre el costado derecho del río Sucio, lugar en el que atraviesa materiales de edad Eocena, pertenecientes al complejo volcanico Santa Cecilia – La Equis (Ksvx), fomados por basaltos masivos y competentes, intercalados con niveles menos competentes de brechas volcánicos y material sedimentario. Y que por evidencias en un túnel aledaño en funcionamiento se estima que en este nuevo lugar predomina igualmente las rocas basálticas. Localización del túnel y de la línea geoelectrica con topografía se observana continuación (Figura 41):

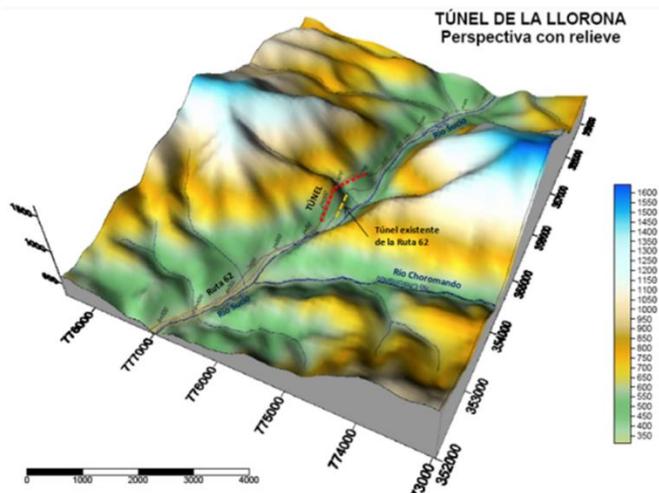
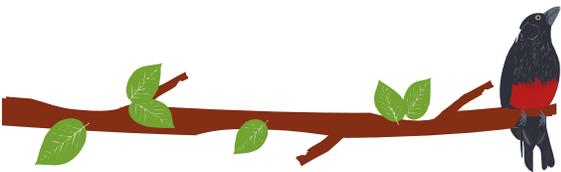


Figura 41. Localización del túnel de La Llorona en inmediaciones del centro poblado, tomado de (Consortio TYPASA-CRA, 2014).

Línea eléctrica (Figura 42) a lo largo del eje del túnel en inmediaciones del portal sur, que evidencia a lo largo de todo el tramo una roca compacta y con poca humedad que corresponde a basaltos masivos, se encuentra un sector en la parte más norte con un mayor contenido de humedad y alta permeabilidad.

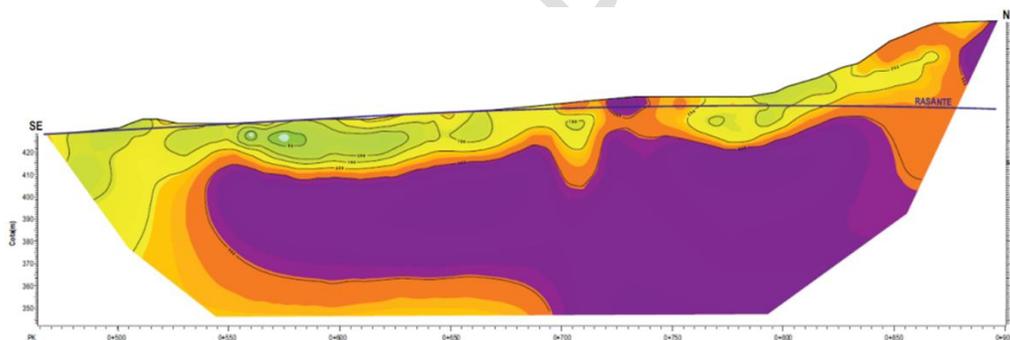
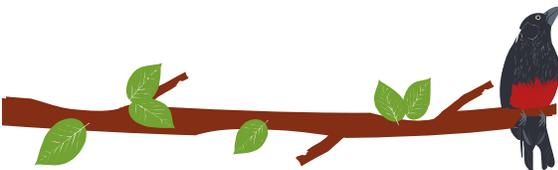


Figura 42. Tomografía eléctrica longitudinal del Túnel de La Llorona (portal sur), tomado de (Consortio TYPASA-CRA, 2014).

1.4.8 CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

La calidad del agua se refiere a la concentración de determinados parámetros para un uso específico y de acuerdo a las normas; en Colombia las características del agua aptas para el uso doméstico están descritas en el decreto 1594 de 1984, el decreto 475 de 1998 y la resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Protección Social y el MAVDT, en los cuales se reglamenta la calidad del agua para consumo humano, presenta las concentraciones y valores admisibles de los diferentes parámetros físicos, químicos y organolépticos para el agua de consumo humano. Además de los valores máximos permisibles, se presentan indicadores de calidad, procedimientos y equipos de medición y monitoreo del agua potable para consumo humano que deben cumplirse.

La interpretación de los resultados de un análisis de aguas debe partir del conocimiento del origen y del destino que se le va a dar al recurso. Los requisitos de un análisis, así



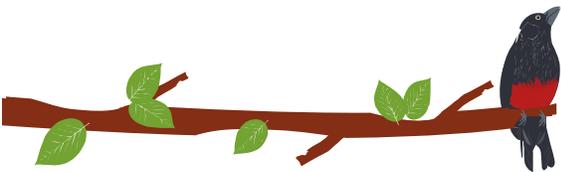
como los parámetros interpretativos dependen en gran parte de estos aspectos básicos. Las aguas subterráneas no son tan susceptibles a la contaminación como las aguas superficiales, aunque una vez contaminadas, su restauración es difícil y de largo plazo. Casi todos los organismos patógenos y muchas sustancias indeseables se eliminan por la acción filtrante de las partículas del suelo.

La calidad del agua obedece a un proceso fisicoquímico al interior de la roca, las relaciones entre la geología regional y el tipo de agua presente en los acuíferos junto con la conductividad y su evaluación obedece a un proceso investigativo en el que se emplean los resultados de estudios previos a la hidrogeoquímica; estudios geológicos, hidráulicos e hidrodinámicos.

Los valores de los parámetros *in situ* de los manantiales encontrados con agua en campo (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016), se comparan con los presentados en la Resolución No 2115 de 2007 por medio de la cual los Ministerios de Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), señalan las características físico-químicas para la calidad del agua potable. Los valores de los parámetros analizados, se exponen en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros *in situ* de los Manantiales inventariadas en la Formación Penderisco (K2alu) (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

IDENTIFICACIÓN HIDROGEOCOL	ALTURA (m)	CAUDAL (l/s)	TEMP. (°C)	Ph	PÁRAMETROS IN SITU TOMADOS EN CAMPO					
					COND. (µmhos/cm)	TDS (mg/l)	SALINIDAD (mg/l)	ORP (mg/l)	O. D. (%)	O.D. (mg/l)
M 01	1723,06	0,15	19,53	6,68	322	160	0,15	94,6	0	0,15
M 02	1623,98	0,02	20,56	6,61	129	65	0,06	34,3	0	0,02
M 04	1485,24	0,03	21,16	6,25	66	33	0,03	74,7	45	0,03
M 05	1552,03	0,07	20,07	6	33	17	0,01	43,3	40,8	0,07
M 06	1378,29	0,02	22,7	6,21	69	35	0,05	39,8	69,4	0,02
M 07	1382,44	0,07	24,13	6,26	66	33	0,02	30	48,1	0,07
M 08	1382,22	0,03	26,29	5,77	84	42	0,04	44	44,1	0,03
M 09	1317,06	0,55	20,82	5,74	215	108	0,1	42,9	19,9	0,55
M 10	1597,33	0,038	20,99	5,75	130	65	0,06	64,9	42,2	0,038
M 11	1561,21	0,03	19,84	5,81	96	48	0,04	63,6	33,4	0,03
M 12	1577,35	0,02	22,76	5,87	159	79	0,07	59,6	17	0,02
M 13	1626,75	0,02	19,63	5,66	125	63	0,06	74,6	23,4	0,02
M 14	1607,27	0,38	20,99	6,36	158	79	0,07	34	39,5	0,38
M 15	1663,91	0,17	19,7	6,94	329	165	0,16	50,4	28,6	0,17
M 16	1650,08	0,01	20,35	6,5	224	112	0,11	45,2	0	0,01
M 17	1313,72	0,035	21,22	5,7	212	106	0,1	44,5	0	0,035
M 18	1323,32	0,31	20,61	5,71	245	122	0,12	0,12	42,4	0,31
M 19	2084,54	0,037	16,72	6,39	139	70	0,07	50,3	10	0,037
M 20	2085,36	0,076	19,32	6,52	114	57	0,05	25,9	22,6	0,076
M 21	1968,67	0,1	22,87	6,57	95	48	0,04	24,7	27,2	0,1
M 22	1985,06	0,98	20,07	5,99	91	45	0,04	62,5	19,5	0,98
M 23	1937,33	0,054	19,14	5,95	78	39	0,04	37,9	24	0,054
M 24	1894,17	0,061	18,35	5,71	123	61	0,06	52,5	16,1	0,061
M 25	1766,87	0,07	17,7	6,43	107	53	0,05	153,1	38,3	0,07
M 26	1558,91	0,18	19,72	6,42	101	51	0,05	48,1	64,5	0,18



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

IDENTIFICACIÓN HIDROGEOCOL	ALTURA (m)	CAUDAL (l/s)	TEMP. (°c)	Ph	PÁRAMETROS IN SITU TOMADOS EN CAMPO					
					COND. (µmhos/cm)	TDS (mg/l)	SALINIDAD (mg/l)	ORP (mg/l)	O. D. (%)	O.D. (mg/l)
M 27	1527,57	0,45	21,31	5,56	122	61	0,06	78,9	18,3	0,45
M 28	1522,25	0,03	24,22	5,59	183	92	0,09	417	0	0,03
M 29	1537,10	0,11	21,28	6,31	150	55	0,07	37,7	25,1	0,11
M 30	1598,29	0,026	20,77	5,72	204	102	0,1	87	49,2	0,026
M 31	1560,18	0,03	21,56	6,2	499	244	0,24	39,8	15,5	0,03
M 32	1552,10	0,034	20,02	5,94	101	51	0,05	73,2	58,2	0,034
M 33	1556,82	0,04	20,29	5,62	135	67	0,06	29,5	4,7	0,04
M 34	1553,14	0,03	22,92	6,12	116	58	0,05	48,5	30,2	0,03
M 35	1481,55	0,086	23,14	5,63	165	82	0,08	105,1	24,1	0,086
M 36	1514,46	0,024	20,87	5,95	196	98	0,09	102,5	36	0,024
M 37	1373,65	0,1	23,86	5,24	235	118	0,1	54,5	0	0,1
M 38	1506,49	0,16	19,86	6,53	199	99	0,09	25,9	28,7	0,16
M 40	1710,55	0,01	19,76	5,85	173	87	0,08	-116,5	0	0,01
M 41	1821,78	0,11	19	7,56	405	203	0,03	5,4	42,4	0,11
M 42	1802,15	0,03	21,15	6,5	161	81	0,08	17,5	21,9	0,03
M 43	1758,79	0,14	20,99	5,9	254	127	0,12	22,5	36,5	0,14
M 44	1743,99	0,04	24,12	7,03	293	146	0,14	13,4	42,5	0,04
M 45	1812,64	1	18,67	6,91	171	81	0,08	40,2	39,2	1
M 46	1823,49	0,03	20,32	7,37	324	162	0,15	38	36,8	0,03
M 47	1787,97	0,03	19,94	6,42	289	144	0,14	-18,2	9	0,03
M 48	1804,33	0,04	19,64	5,9	242	121	0,12	-142,4	0	0,04
M 49	1985,56	1	17,69	7,17	165	83	0,08	71,1	61,4	1
M 50	1951,88	0,43	18,94	7,7	327	163	0,16	40,5	77	0,43
M 72	1441,26	1	20,68	6,21	177	88	0,02	71,3	11,3	1
M 74	1660,15	0,18	21,86	6,98	55	28	0,02	114,4	68,7	0,18
M 75	1657,80	0,05	20,72	7,07	65	33	0,03	18,4	66,5	0,05
M 76	1654,03	0,025	21,34	7,14	232	116	0,11	46,2	66,2	0,025

Para la interpretación de los Parámetros in situ se organizan gráficas que muestran la relación pH vs Conductividad, pH vs Sólidos Disueltos y Altura vs Temperatura. Los parámetros restantes también son interpretados.

1.4.8.1 pH vs Conductividad Eléctrica

En la Figura 43, se presenta la relación entre la Conductividad Eléctrica y el pH del agua de los manantiales de la Formación Urrao. Esta relación presenta una tendencia a ser proporcionalmente directa. En general el agua de la Formación Urrao mantiene un pH que varía desde 5.24 (M37) hasta 7.7 (M50) con un promedio de 6.29, señalando la ocurrencia de aguas ligeramente ácidas a neutras. Las aguas ligeramente ácidas en esta unidad geológica, posiblemente se deban a la presencia de minerales secundarios que ocurren por procesos hidrotermales en las rocas fracturadas sedimentarias y volcánicas.

Los valores de conductividad son relativamente bajos, oscilando desde 33.0 (M05) hasta 499.0 umhos/cm (M31), indicando la presencia de aguas subterráneas dulces. Esto se debe a una baja concentración iónica por el predominio de la litología de carácter silíceo que predomina en esta Formación y por consiguiente son más bajos que los obtenidos en la Formación Barroso (Ksvb, K1vb y K1lb) (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.-HIDROGEOCOL S. A., 2016).



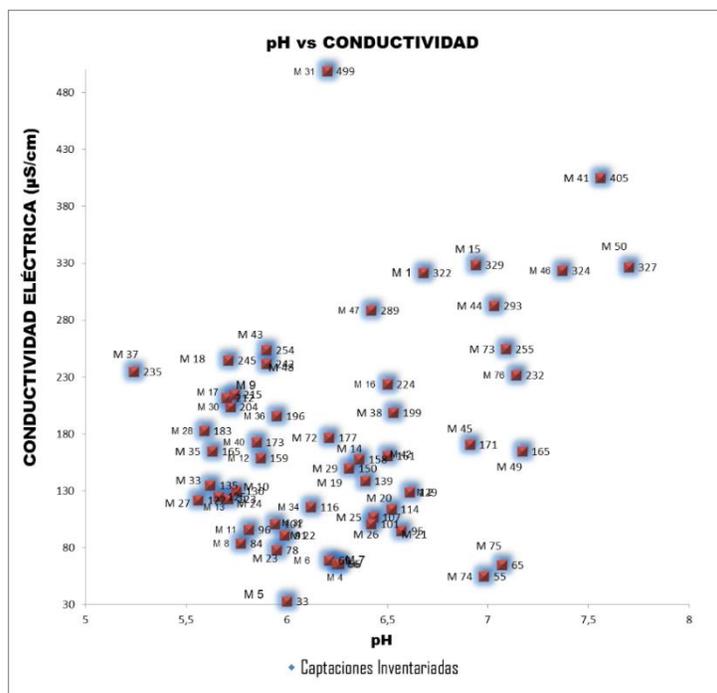
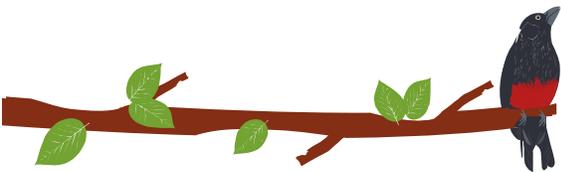


Figura 43. Relación pH vs Conductividad Eléctrica de los Datos de Parámetros Físico-Químicos in situ Tomados en Cada manantial Inventariado en la Formación Penderisco (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

1.4.8.2 pH vs Sólidos Disueltos Totales

En la Figura 44, se presenta la relación existente entre el pH y los valores de Sólidos Disueltos Totales en mg/l, del agua inventariada.

Esta relación presenta similar comportamiento a la relación anteriormente expuesta. Los SDT oscilan desde 17.0 hasta 244.0 mg/l, con un promedio de 88.17 mg/l. Los bajos valores promedios de SDT, indican que el agua subterránea almacenada es dulce con muy baja concentración iónica, en general producto del predominio de sílice que contiene su secuencia litológica (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

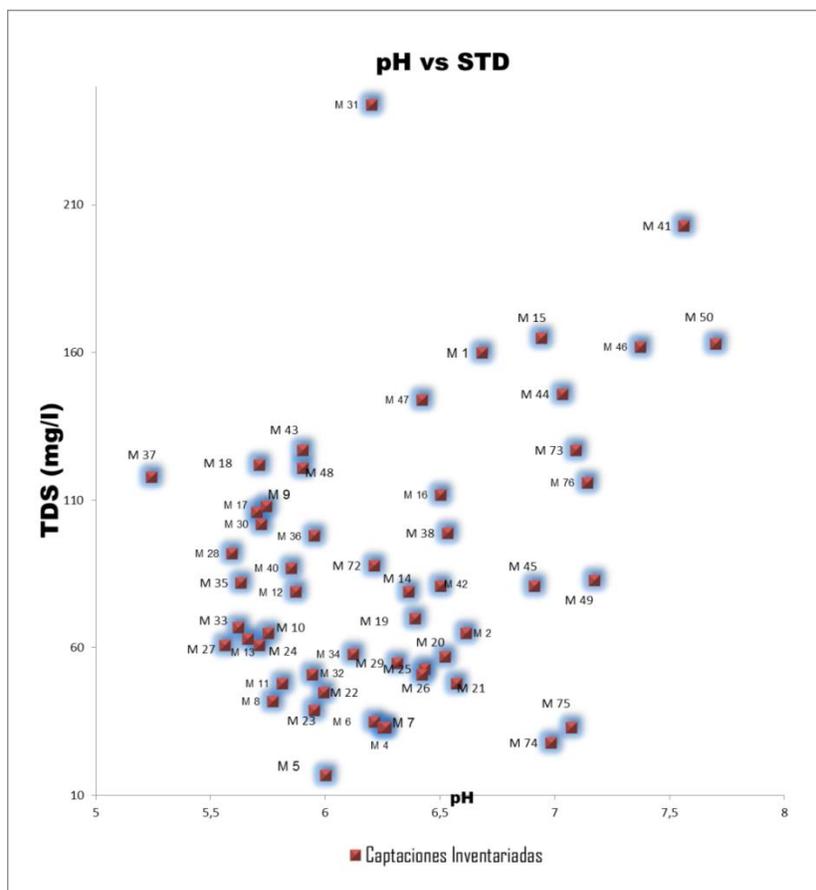
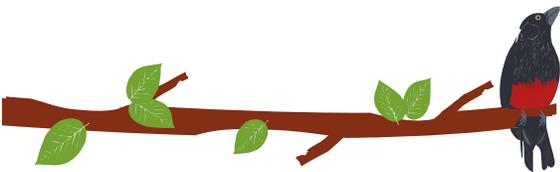


Figura 44. Relación pH vs Sólidos Disueltos Totales de los Datos de Parámetros Físico-Químicos in situ Tomados en Cada Manantial Inventariado en la Formación Penderisco (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

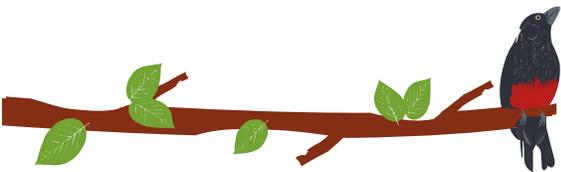
1.4.8.3 ORP, Oxígeno Disuelto y Salinidad

Para los valores de Oxígeno Disuelto en porcentaje y partes por millón, se presenta un rango entre 0 y 77.0 % y de 0 y 5.82 ppm, en los puntos M1, M02, M16, M17, M28, M37, M40, M48 y M50, respectivamente. Los valores de ORP varían entre -142.4 (M48) y 417 mV (M28). Estos valores están indicando en general un ambiente oxidante y un nivel de agua subterráneo cerca de la superficie del terreno (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Los valores de salinidad son muy bajos, oscilan entre 0.01 (M5) y 0.24 mg/l (M31), confirmando la presencia de agua dulce producto de una infiltración directa de agua lluvia.

1.4.9 HIDROGEOLOGÍA

Para un óptimo aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo es indispensable conocer el comportamiento hidrogeológico del área mediante la estructuración de un



modelo conceptual en el que se integren los diferentes aspectos que determinan la presencia, el flujo y la calidad del agua subterránea, para ello se debe establecer tanto los componentes físicos, químicos y geométricos, así como el comportamiento y las acciones externas que condicionan los acuíferos (Cossío, U. *et. al.*, 1995) (Cossio, Evaluación del agua subterránea en la región del Urabá, departamento de Antioquia, 1995).

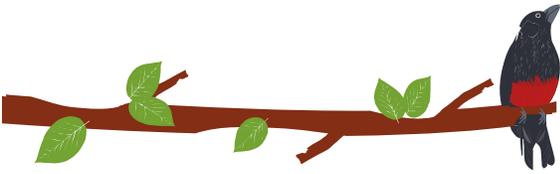
1.4.9.1 Inventario de Puntos de Agua Subterránea

Un punto de agua subterránea, es un lugar u obra civil que permite el acceso al agua subterránea, incluyendo pozos, aljibes, surgencias naturales o manantiales que corresponden a descargas de acuíferos; y lagos o lagunas cuando son salidas o afloramientos de acuíferos someros.

En el inventario se integra información de la ubicación geográfica de los puntos (Tabla 11) (coordenadas y cota).

Para la cuenca Río Sucio Alto, no existe un inventario de puntos de agua subterránea elaborado con las directrices de las metodologías diseñadas para tal fin, como lo es el "Formulario Único Nacional Para el Inventario de Puntos de Agua Subterránea" (IDEAM), donde se describen las principales características físicas e hidrogeológicas de las captaciones referidas a manantiales o nacederos, pozos, piezómetros y aljibes.

Los puntos de agua registrados para la cuenca se toman a partir de las observaciones en la etapa de campo del componente geológico y del inventario realizado por Hidrogeocol S.A. (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016) en el área sur oriental de la cuenca y de los registros realizados en la fase de campo de geología, solo se realizó registros en aquellos predios donde los propietarios conceden permiso y donde hay facilidad de acceso (Figura 45).



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

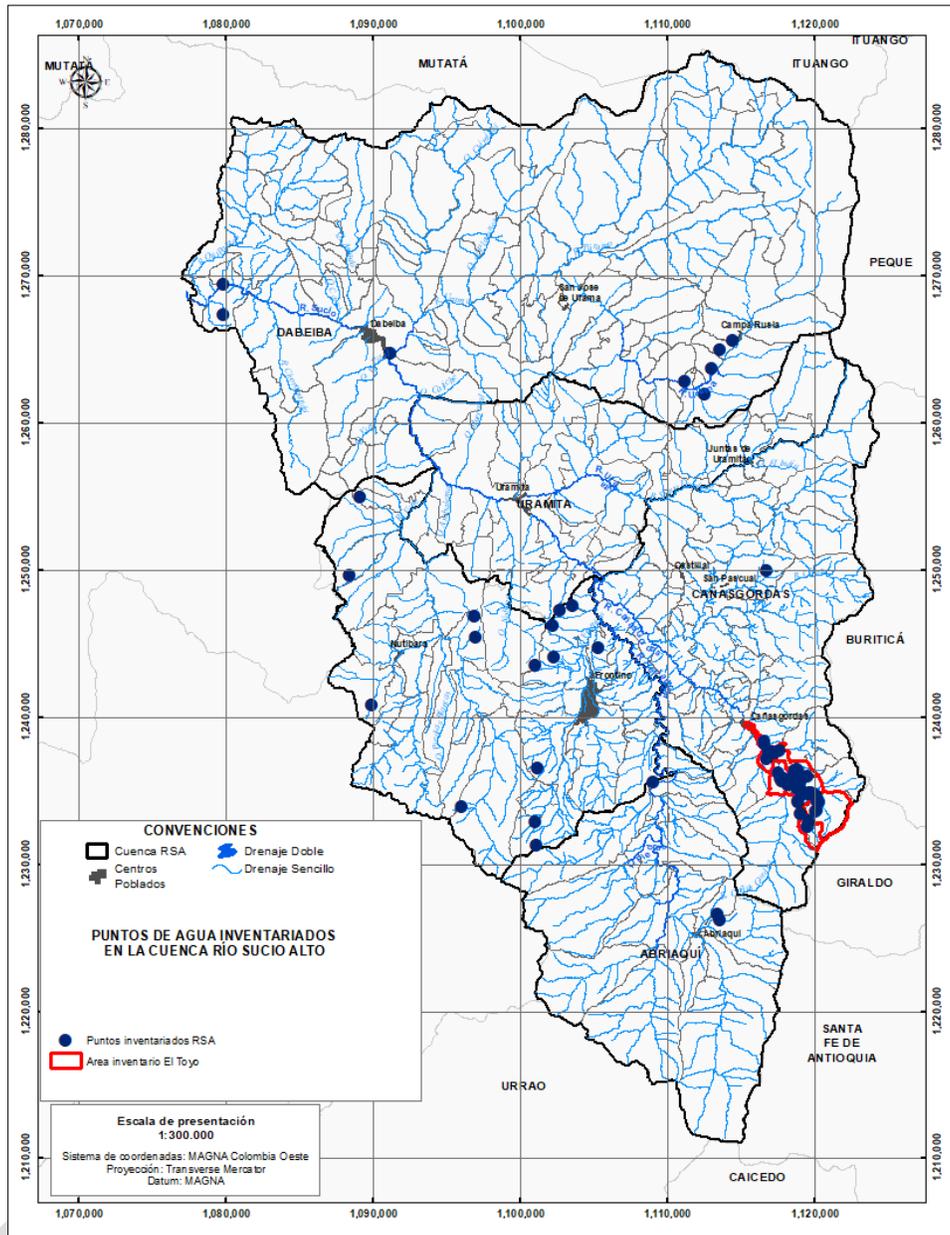


Figura 45. Puntos de agua registrados para la cuenca Río Sucio Alto, los datos de la zona sur oriental son tomados de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Durante los recorridos de campo del componente geológico, se pudo evidenciar zonas con alto contenido de agua que llamaron la atención y fueron registrados, por ser agua que fluía libremente en cantidad aparentemente inagotable, cuyo origen debe ser la zona de saturación creada por un excedente de las precipitaciones, en un estrato permeable con una barrera impermeable (acuicludo), creando un nivel freático colgado (Figura 46).

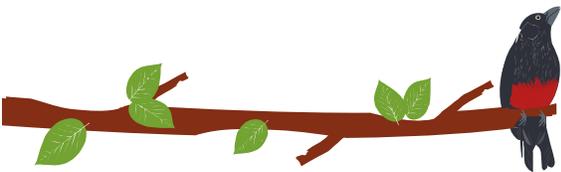


Figura 46. Manantial colgado en terrazas aluviales antiguas, desembocadura río Urama sobre el río Sucio, estación GJAM-04.



Figura 47. Manantial en una zona de contacto entre los conglomerados de la Formación Guineales y los basaltos de El Botón, vereda Chovar, municipio de Dabeiba, departamento de Antioquía

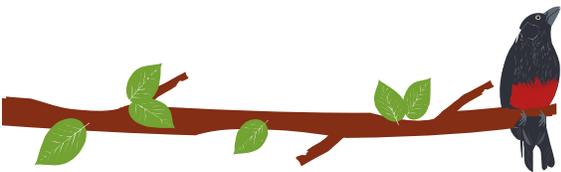


Figura 48. Manantial en una zona de contacto entre los conglomerados de la Formación Guineales y los basaltos de El Botón, vereda Guineales, municipio de Dabeiba, departamento de Antioquía.

Llamó la atención los manantiales que brotan en las partes altas de las rocas cristalinas de la Monzonita del Cerro Frontino Figura 49 y Figura 50, en donde existen zonas permeables en forma de fracturas, que se llenan con agua y hacen una intersección con la superficie del terreno a lo largo de la pendiente produciendo un manantial, zonas de saturación por encima del nivel freático, donde el nivel freático colgado hace intersección con la ladera del valle.

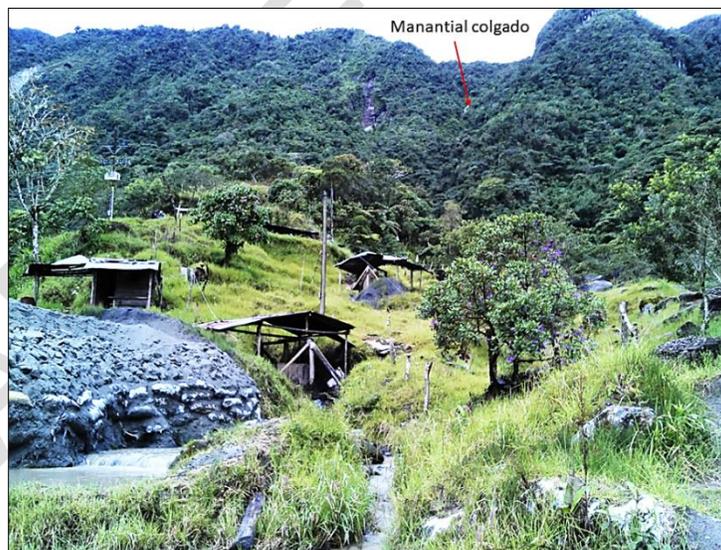


Figura 49. Manantial colgado en rocas cristalinas de la Monzonita del Cerro Frontino, estación JAM-34.

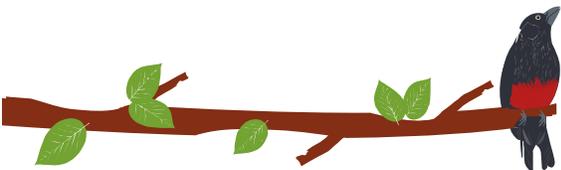
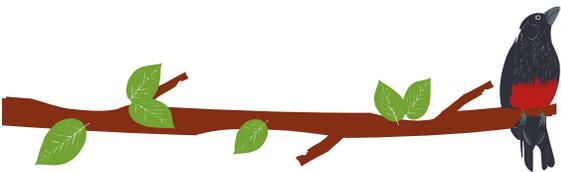


Figura 50. Manantial surgente en una zona de contacto entre la Monzonita del Cerro Frontino y los basaltos de La Clara - Río Calle, estación JAM-38.

Estos manantiales, en algunos casos forman o alimentan los cursos de las quebradas los nacimientos de las diferentes quebradas presentes en la cuenca, algunos de ellos utilizados como bocatomas de acueductos veredales o de abastecimiento doméstico en fincas.

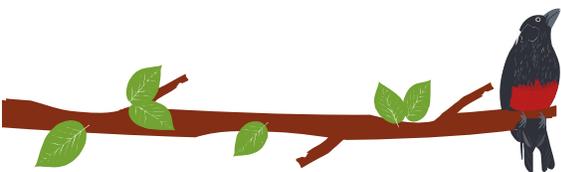
Tabla 11. Inventario de puntos de agua presentes en la cuenca (datos tomados de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016) y del recorrido de campo de geología).

MUNICIPIO	VEREDA	SITIO	COTA	COOR_X	COOR_Y	TIPO
Frontino	EL CERRO	La Mina	2703.00	1231321.91	1231321.91	Manantial colgado
Dabeiba	DABEIBA	R. Urama	475.00	1264792.16	1264792.16	Manantial colgado
Dabeiba	CHOVAR	Chovar	563.00	1267409.21	1267409.21	Manantial
Dabeiba	GUINEALES	Guineales	302.00	1269406.64	1269406.64	Manantial
Frontino	EL EDEN	Monos	2125.00	1226671.10	1226671.10	Nacimiento
Frontino	SAN PASCUAL	San Pascual	1650.00	1249970.47	1249970.47	Nacimiento
Frontino	SAN ANDRES	San Andrés	1790.00	1255008.75	1255008.75	Nacimiento
Frontino	SAN LAZARO	San Lázaro	1720.00	1236568.38	1236568.38	Nacimiento
Frontino	MONOS	Monos	2100.00	1226250.19	1226250.19	Nacimiento
Dabeiba	EL JORDAN	El Jordán	1350.00	1262878.16	1262878.16	Nacimiento
Dabeiba	LA ARMENIA	La Armenia	1440.00	1261981.31	1261981.31	Nacimiento
Dabeiba	EL CALICHE	El Caliche	1400.00	1263699.38	1263699.38	Nacimiento
Dabeiba	AGUALINDA	Agualinda	1530.00	1264970.55	1264970.55	Nacimiento
Dabeiba	EL TIGRE	El Tigre	1530.00	1265607.88	1265607.88	Nacimiento
Frontino	EL TAMBO	El Tambo	1925.00	1240844.96	1240844.96	Nacimiento
Frontino	NOBOGA	Nobogá	1720.00	1243545.90	1243545.90	Nacimiento
Frontino	LAS CRUCES	Las Cruces	1195.00	1244736.34	1244736.34	Nacimiento
Frontino	MONTAÑON	Montañón	1700.00	1249688.77	1249688.77	Nacimiento
Frontino	NOBOGACITA	Nobogacita	1550.00	1245498.67	1245498.67	Nacimiento
Frontino	CHONTADURO	Chontaduro	1790.00	1246860.56	1246860.56	Nacimiento
Frontino	LOMA DE LOS INDIOS	Madero	1580.00	1247284.42	1247284.42	Nacimiento



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

MUNICIPIO	VEREDA	SITIO	COTA	COOR_X	COOR_Y	TIPO
Frontino	LOMA DE LOS INDIOS	Loma de Los Indios	1495.00	1246242.18	1246242.18	Nacimiento
Frontino	LA CABAÑA	La Cabaña	1280.00	1247594.67	1247594.67	Nacimiento
Frontino	CABRITAS	Cabritas	1400.00	1244116.46	1244116.46	Nacimiento
Frontino	LA ANTIGUA	La Antigua	0.00	1235618.29	1235618.29	Nacimiento
Cañasgordas	LOS NARANJOS	Los Naranjos	1723.0645	1235983.83	1235983.83	M 01
Cañasgordas	LOS NARANJOS	Los Naranjos	1623.9792	1236062.27	1236062.27	M 02
Cañasgordas	LOS NARANJOS	Los Naranjos	1629.6400	1236476.79	1236476.79	M 03
Cañasgordas	LA CAMPAÑINA	La Campaïna	1485.2450	1237777.81	1237777.81	M 04
Cañasgordas	LA CAMPAÑINA	La Campaïna	1552.0326	1237603.62	1237603.62	M 05
Cañasgordas	LA CAMPAÑINA	La Campaïna	1378.2877	1237740.31	1237740.31	M 06
Cañasgordas	LA CAMPAÑINA	La Campaïna	1382.4352	1237713.56	1237713.56	M 07
Cañasgordas	LA CAMPAÑINA	La Campaïna	1382.2235	1237667.22	1237667.22	M 08
Cañasgordas	LA CAMPAÑINA	La Campaïna	1317.0642	1237664.46	1237664.46	M 09
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1597.3324	1235246.51	1235246.51	M 10
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1561.2076	1235222.93	1235222.93	M 11
Cañasgordas	EL MADERO	El Madero	1577.3458	1235394.78	1235394.78	M 12
Cañasgordas	EL MADERO	El Madero	1626.7520	1235101.69	1235101.69	M 13
Cañasgordas	EL MADERO	El Madero	1607.2678	1235152.58	1235152.58	M 14
Cañasgordas	EL MADERO	El Madero	1663.9109	1235495.30	1235495.30	M 15
Cañasgordas	EL MADERO	El Madero	1650.0784	1235592.87	1235592.87	M 16
Cañasgordas	EL MADERO	El Madero	1313.7186	1238270.52	1238270.52	M 17
Cañasgordas	MACANAL	Macanal	1323.3221	1238392.56	1238392.56	M 18
Cañasgordas	MACANAL	Macanal	2084.5391	1232592.85	1232592.85	M 19
Cañasgordas	MACANAL	Macanal	2085.3635	1232639.35	1232639.35	M 20
Cañasgordas	MACANAL	Macanal	1968.6727	1232992.09	1232992.09	M 21
Cañasgordas	MACANAL	Macanal	1985.0584	1233455.37	1233455.37	M 22
Cañasgordas	MACANAL	Macanal	1937.3345	1234306.57	1234306.57	M 23
Cañasgordas	MACANAL	Macanal	1894.1691	1234310.34	1234310.34	M 24
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1766.8715	1234725.58	1234725.58	M 25
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1558.9146	1235489.25	1235489.25	M 26
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1527.5706	1235445.25	1235445.25	M 27
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1522.2487	1235612.20	1235612.20	M 28
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1537.1024	1235672.52	1235672.52	M 29
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1598.2889	1235794.51	1235794.51	M 30
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1560.1809	1235736.88	1235736.88	M 31
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1552.1050	1235736.18	1235736.18	M 32
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1556.8160	1235739.01	1235739.01	M 33
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1553.1395	1235724.28	1235724.28	M 34
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1481.5459	1235706.13	1235706.13	M 35
Cañasgordas	VERSALLES	Versalles	1514.4586	1235686.77	1235686.77	M 36
Cañasgordas	VERSALLES	Versalles	1373.6469	1237233.48	1237233.48	M 37



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

MUNICIPIO	VEREDA	SITIO	COTA	COOR_X	COOR_Y	TIPO
Cañasgordas	VERSALLES	Versalles	1506.4921	1235670.18	1235670.18	M 38
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1509.6409	1235877.03	1235877.03	M 39
Cañasgordas	EL MADERO	El Madero	1710.5526	1234810.76	1234810.76	M 40
Cañasgordas	EL MADERO	El Madero	1821.7750	1234819.59	1234819.59	M 41
Cañasgordas	EL MADERO	El Madero	1802.1545	1234813.81	1234813.81	M 42
Cañasgordas	EL MADERO	El Madero	1758.7908	1234900.64	1234900.64	M 43
Cañasgordas	EL MADERO	El Madero	1743.9856	1234879.49	1234879.49	M 44
Cañasgordas	CIRIGUAN	Cirigüan	1812.6392	1234560.39	1234560.39	M 45
Cañasgordas	CIRIGUAN	Cirigüan	1823.4856	1234400.74	1234400.74	M 46
Cañasgordas	CIRIGUAN	Cirigüan	1787.9718	1234294.78	1234294.78	M 47
Cañasgordas	CIRIGUAN	Cirigüan	1804.3296	1234425.96	1234425.96	M 48
Cañasgordas	CIRIGUAN	Cirigüan	1985.5598	1233598.00	1233598.00	M 49
Cañasgordas	CIRIGUAN	Cirigüan	1951.8761	1233734.34	1233734.34	M 50
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1441.2584	1236271.61	1236271.61	M 72
Cañasgordas	LOS NARANJOS	Los Naranjos	1660.1459	1236380.79	1236380.79	M 74
Cañasgordas	LOS NARANJOS	Los Naranjos	1657.7968	1236395.19	1236395.19	M 75
Cañasgordas	LOS NARANJOS	Los Naranjos	1654.0336	1236436.66	1236436.66	M 76
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1654.0336	1235429.39	1235429.39	MS1
Cañasgordas	BUENOS AIRES ALTO	Buenos Aires Alto	1654.0336	1235845.83	1235845.83	MS2
Cañasgordas	CIRIGÜAN	Cirigüan	1654.0336	1234362.57	1234362.57	MS3
Frontino	CARAUTA	Vía Carauta	1860.00	1233978.37	1233978.37	Carauta
Frontino	EL CERRO	La Mina	1945.00	1232958.48	1232958.48	El Hoyo

El inventario de puntos realizado por Hidrogeocol S. A. (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016), registra en total cincuenta y siete (57) manantiales para la cuenca Río Sucio Alto en su zona suroriental. La Figura 51 muestra los puntos inventariados en campo de agua subterránea en el área de influencia del Proyecto Túnel del Toyo, en los municipios de Giraldo y Cañasgordas. Las zonas de alta densidad de manantiales están coligadas a zonas de fallas y diaclasas (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

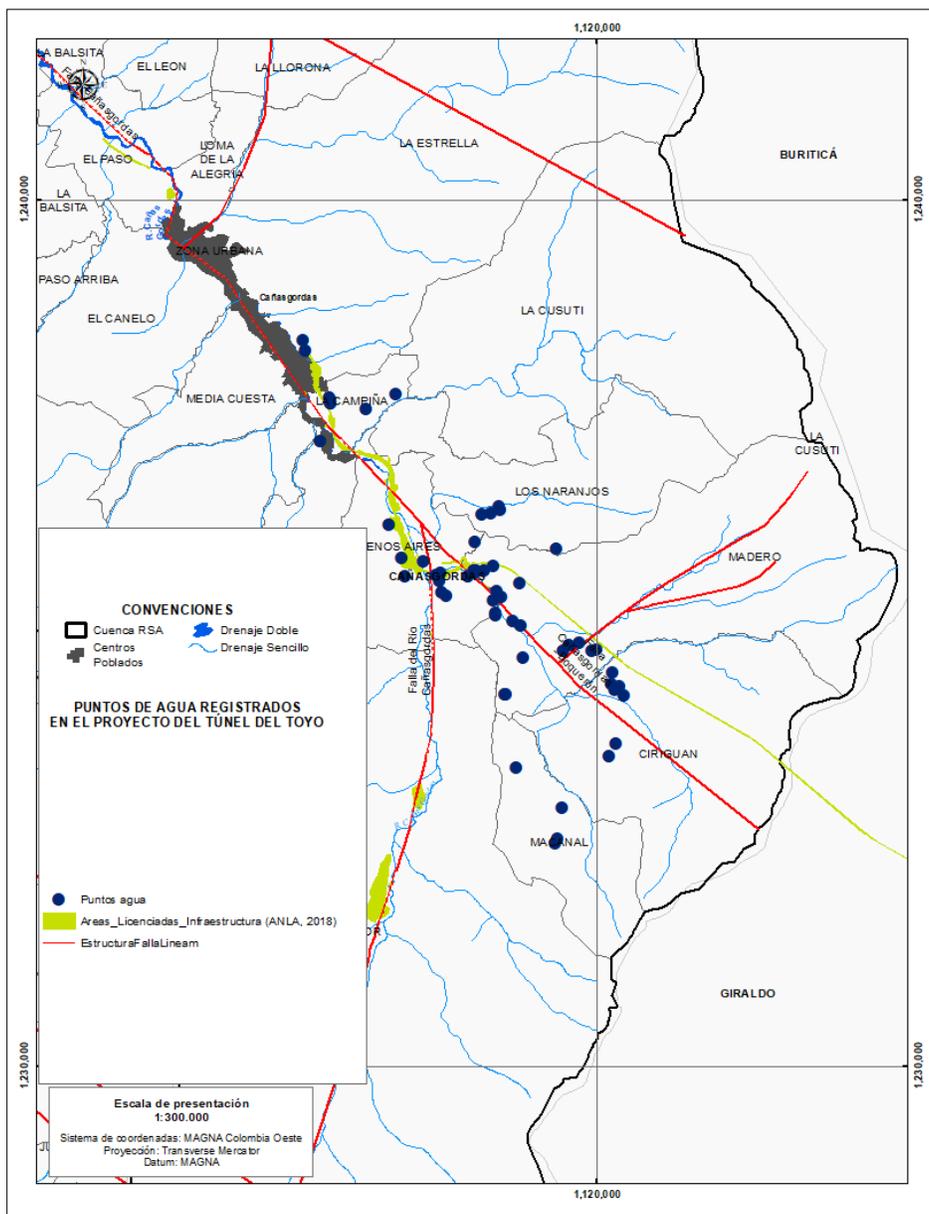
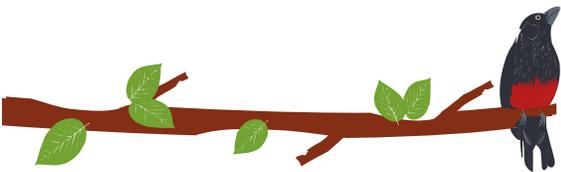
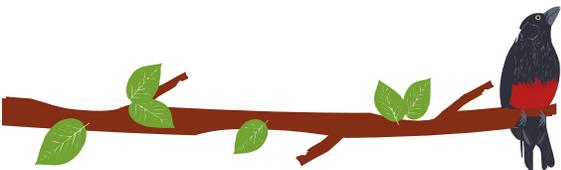


Figura 51. Ubicación de los puntos inventariados en el área de influencia del Proyecto Túnel del Toyo y sus vías de acceso, en los municipios de Giraldo y Cañasgordas fuente (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Los manantiales se clasifican de acuerdo a su tiempo de permanencia en perennes, efímeros o intermitentes; a la relación litología-estructura del acuífero, es decir si brotan por el contacto entre dos unidades litológicas o por el fracturamiento de algunas de ellas. De acuerdo al caudal siguiendo la clasificación de Meinzer (1923), en manantiales de primer a octavo orden, como se muestra en la Tabla 12 (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Tabla 12. Clasificación de Meinzer, 1923 (Modificada) fuente (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).



ORDEN	CLASIFICACIÓN DE MANANTIALES (MEINZER, 1923)		CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN
	Q (m3/día)	Q (l/s)	
1°	Q > 241.9 m3/día	Q > 2800 l/s	Muy Alta
2°	24.19 m3/día < Q ≤ 241.9 m3/día	280 l/s < Q ≤ 2800 l/s	Alta
3°	2.419 m3/día < Q ≤ 24.19 m3/día	28 l/s < Q ≤ 280 l/s	Moderadamente Alta
4°	544.3 m3/día < Q ≤ 2.419 m3/día	6,3 l/s < Q ≤ 28 l/s	Moderada
5°	54.43 m3/día < Q ≤ 544.3 m3/día	0.63 l/s < Q ≤ 6.3 l/s	Moderadamente Baja
6°	5.443 m3/día < Q ≤ 54.43 m3/día	0.063 l/s < Q ≤ 0.63 l/s	Baja
7°	0.5443 m3/día < Q ≤ 5.443 m3/día	0.0063 l/s < Q ≤ 0.063 l/s	Muy Baja
8°	Q ≤ 0.05443 l/s	Q ≤ 0.0063 l/s	Despreciable/ insignificante

El inventario se ejecutó consignando la información en el "Formulario Único Nacional Para el Inventario de Puntos de Agua Subterránea" (IDEAM), donde se describen las principales características físicas e hidrogeológicas de las captaciones referidas a manantiales o nacederos, pozos, piezómetros y aljibes. La nomenclatura usada para referenciar cada punto inventariado sigue las directrices que se plantean en este Formulario.

En los puntos inventariados con presencia de agua, se midieron los parámetros físico-químicos *in situ* como Oxígeno Disuelto, pH, Temperatura, Conductividad, Sólidos Totales Disueltos, Salinidad y ORP. Estos parámetros indican de manera preliminar la calidad del agua subterránea, donde se refleja los aportes desde la atmósfera, el suelo y las reacciones agua-roca, así como también de fuentes de contaminación (Hoyos, Restrepo, & Salazar, 1990) (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016). Los manantiales fueron aforados mediante el método volumétrico, obteniendo el caudal promedio en cada uno de ellos.

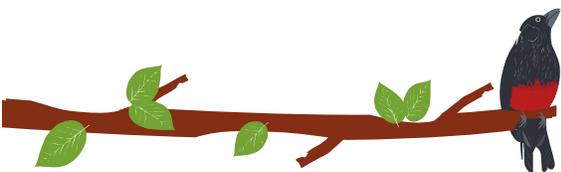
En el área se exponen en superficie tres (3) unidades geológicas, de las cuales se encuentran captaciones de agua subterránea únicamente en: Formación Urrao (K2alu), Depósitos Coluviales (Q2d) y Depósitos Fluvio-torrenciales (Qft).

En la Tabla 13, se encuentran las principales características de las captaciones inventariadas agrupadas por formación geológica, a manera de resumen.

Tabla 13. Cuadro resumen comparativo de las características básicas de las captaciones inventariadas por el PROYECTO TÚNEL DEL TOYO Y SUS VÍAS DE ACCESO, EN LOS MUNICIPIOS DE GIRALDO Y CAÑASGORDAS, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA por Unidad Geológica (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

UNIDAD GEOLÓGICA	NÚM. MANANTIALES	NÚM. MANANTIALES SECOS	PROM. PH	PROM. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (umhos/cm)	PROM. SDT (mg/l)	DENSIDAD MANANTIALES (Manantiales/Km ²)	CAUDAL TOTAL MEDIDO (l/s)





Formación Penderisco (K2alu)	53	3	6.28	177.41	88.17	3.1	8.85
Depósitos Fluvioaluviales (Qft)	1	0	6.91	239	119	-	0.16
Depósitos Coluviales (Q2d)	2	0	7.08	295	147.5	-	0.076

Los bajos valores de caudal son el reflejo del periodo de sequía que iniciaba en el momento en que se realiza el Inventario de Captaciones de Agua Subterránea. En general, todos los manantiales son utilizados para consumo humano, doméstico, de riego y para el abrevadero de animales de las familias que viven en las fincas en que se localizan y sus alrededores (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

FORMACIÓN URAO (K2alu): en esta unidad geológica se inventariaron cincuenta y seis (56) manantiales, todos ellos clasificados como de fracturas. En cuanto a su permanencia 53 son perennes y 3 son intermitentes. Adicionalmente, estos manantiales intermitentes actualmente se encuentran secos. La densidad de manantiales que se tiene corresponde a 3.1 Manantiales/km² (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

De acuerdo al caudal generado en esta unidad litológica, según la clasificación de Meinzer (1923) (Figura 52) se cataloga de moderadamente bajo a muy bajo (de Quinto a Séptimo orden). El valor mínimo registrado es de 0.01 l/s en los manantiales M16 y M40 y el máximo de 1.0 l/s en los manantiales M45, M49 y M72. El caudal total medido corresponde a un valor de 8.85 l/s (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

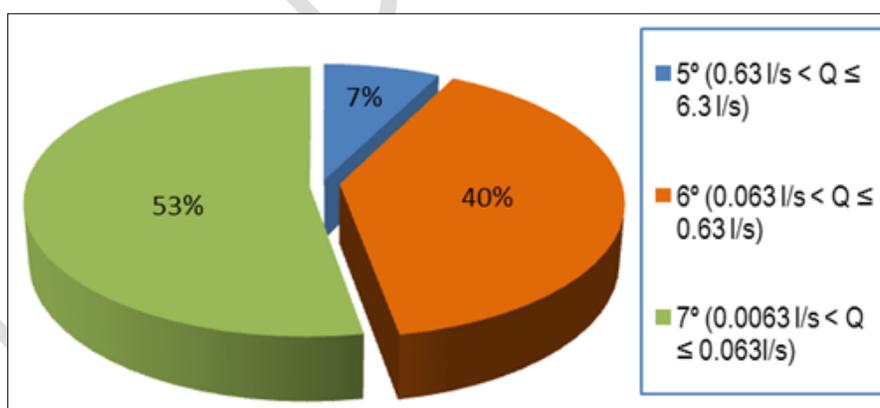
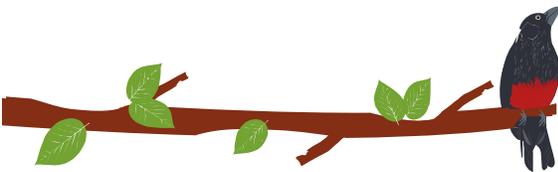


Figura 52. Clasificación de los Manantiales Inventariados en la Formación Penderisco (K2alu) Según Meinzer (1923) tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

En cuanto al uso, la zona se caracteriza por presentar potreros extensos de ganadería que albergan en promedio entre 10 y 50 animales (M19, M20, M21, M24, M25, M29, M30, M41, M42, M44, M48, M72). Para piscicultura (M27, M28, M35, M36) donde usan entre 1 y 5 piscinas. Estos manantiales, también en algunos casos forman o alimentan



cursos de agua que desembocan en la Quebrada La Moladora (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Algunos de los manantiales presentan gran importancia para el sustento de la población que habita en sus cercanías. Los manantiales M1, M14, M15, M22, M23, M25, M32, M36, M38, M41, M45, M50, M72 los utilizan entre 1 y 13 familias (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

1.4.9.2 Nivel freático

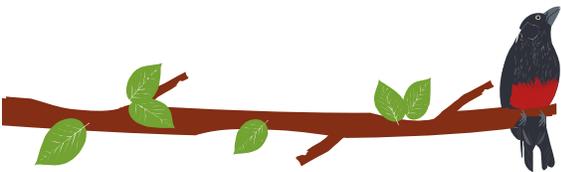
El comportamiento de los niveles de agua y flujos subterráneos, del sector suroriental de la cuenca, se tomaron a partir de mediciones de niveles de agua en los piezómetros construidos y monitoreados por EL CONSORCIO ANTIOQUIA AL MAR (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016). En el interior de los suelos residuales, predominan los flujos locales procedentes de la infiltración cercana dirigida hacia las redes de drenaje más próximas.

En la Tabla 14 y Figura 53, se presenta la localización de los piezómetros construidos en la zona del túnel 17, con profundidades desde los 21 m., hasta los 230 m., con el fin de monitorearlos en etapas de pre y pos construcción de la obra.

Tabla 14. Características de los piezómetros y datos de niveles de agua registrados en la zona del túnel 17, construidos por el CONSORCIO AL MAR, para el monitoreo de aguas subterránea. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

ID	INCLINACION	Unidad Geológica	NORTE	ESTE	Profundidad (m)	Cota (m.s.n.m)	Nivel Estático (m) Noviembre 2016	Cota Nivel de Agua (m.s.n.m.)
Pz 17-1	90°	K1vb	1230229.00	1126138.00	21.00	1517.00	18.09	1498.91
Pz 17-2	70°	K1vb	1230784.00	1125879.00	72.00	1641.00	32.94	1608.06
Pz 17-3A	65°	K1vb	1231920.00	1124397.00	70.00	1830.00	22.00	1808.00
Pz 17-4B	40°	K1vb	1231809.00	1124594.00	45.00	2115.00	21.29	2093.71
Pz 17-5	90°	K1vb	1232872.00	1122220.00	15.00	2150.00	6.78	2143.22
Pz 17-6	45°	K1vb	1233828.44	1121037.25	63.00	2074.00	49.30	2024.70
Pz 17-7	60°	K1vb	1234244.00	1121017.00	69.00	2074.00	57.13	2016.87
Pz 17-8	70°	K1vb	1235167.00	1119699.00	230.00	1726.00	56.26	1669.74
Pz 17-9	67°	K1vb	1235707.81	1119034.48	63.00	1594.00	55.70	1538.30
Pz 17-10	90°	K1vb	1235789.00	1118482.00	40.00	1531.00	18.74	1512.26





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

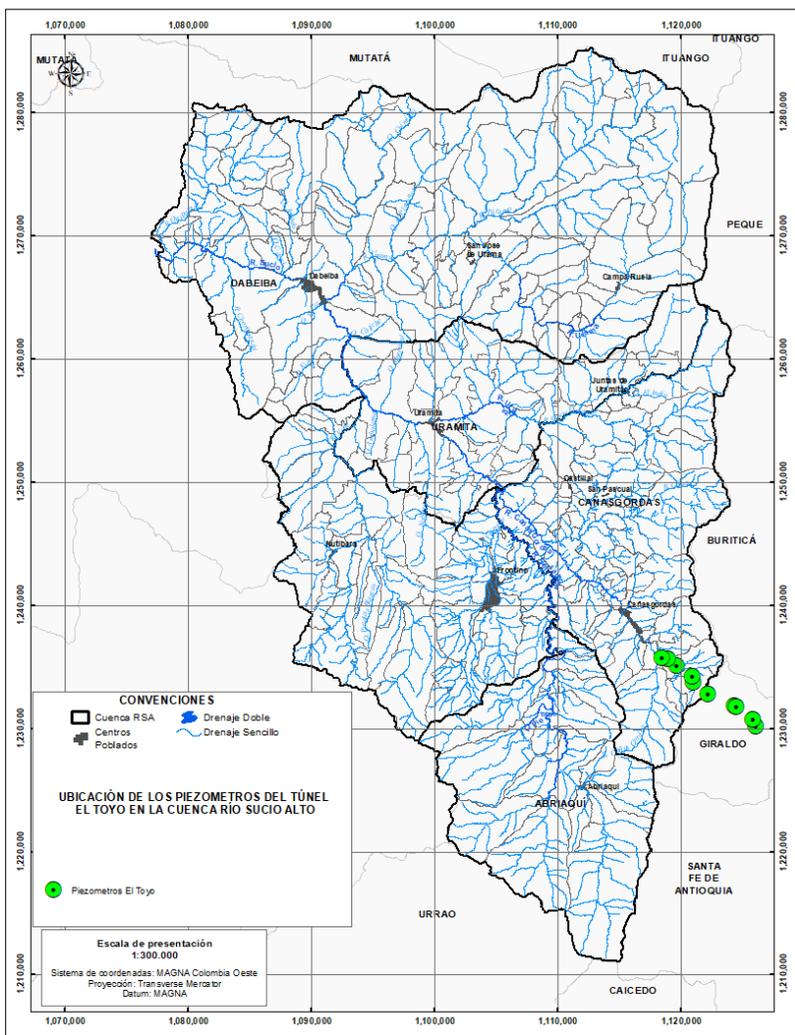
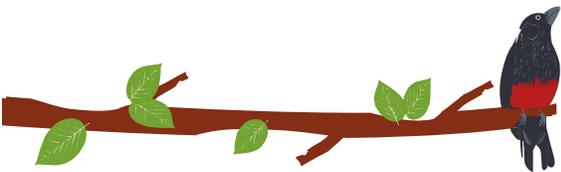


Figura 53. Ubicación de los piezómetros construidos en la zona del túnel 17 construidos por el CONSORCIO AL MAR, para el monitoreo de aguas subterráneas. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

La mayor parte del flujo subterráneo se verifica a través de los suelos residuales, ya que por contraste de permeabilidades el agua no penetra demasiado hacia el fondo de la roca y fluye lateralmente de manera subterránea, a favor de la pendiente topográfica. Los niveles poco profundos medidos en los piezómetros suelen corresponder a esta capa superior. El agua que ha llegado al macizo mediante recarga, que fluye también en su mayor parte de manera lateral para salir por la parte baja de las laderas a través de los suelos residuales. La permeabilidad muy inferior del basamento sano reduce en gran medida los flujos profundos.

De acuerdo a los niveles de agua medidos en los piezómetros, el comportamiento es de campana (Figura 34) siguiendo la topografía, en la parte alta que corresponde al centro del túnel, en el cerro la Aurora con alturas de hasta 2150.0 m., se manejan espesores de casi 800.0 m., con respecto a la cobertura del techo del túnel, se observa que los niveles se acercan más hacia la superficie, valores que van disminuyendo en forma progresiva en los portales de entrada y salida, confirmando la presencia de niveles





superficiales debido a que la roca se encuentra más fracturada, y a medida se profundiza estas fracturas se cierran debido a la carga hidrostática y el peso del macizo, comportándose como acuitardos con la presencia de saturación y poco tránsito de agua, situación que se ve reflejada en la figuras a continuación:

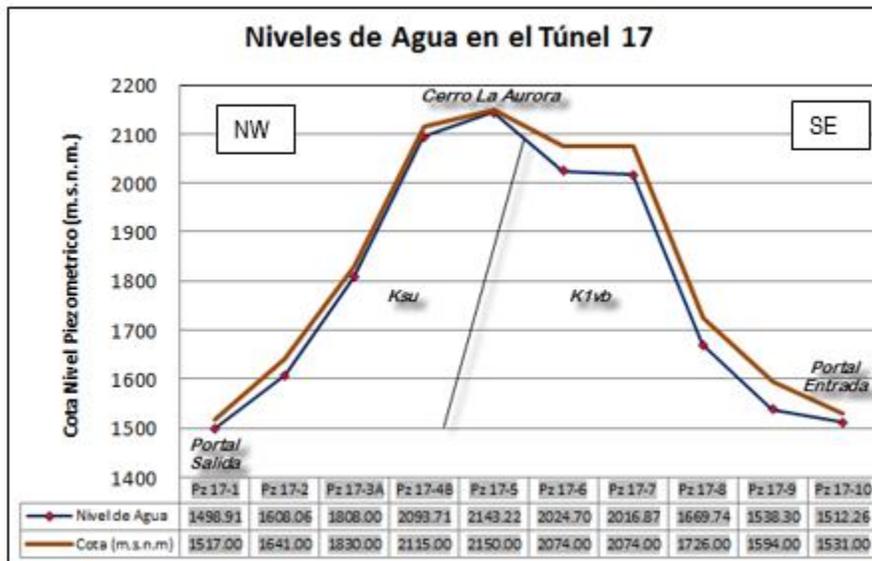
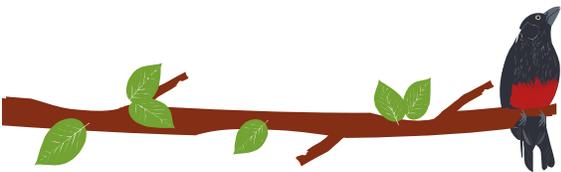


Figura 54. Comportamiento de los niveles tomados en piezómetros en la zona del túnel 17. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

La posición del nivel freático se estableció a partir de las mediciones de los niveles piezométricos, el cual fue identificado por encima de la rasante del túnel. En el contacto saprolito-roca se localizará un freático colgado o superficial, asociado a la circulación de agua freática por los suelos superficiales y la roca alterada superficial (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Adicionalmente se tiene una estimación de los niveles freáticos en zonas de la parte centro y noroeste de la cuenca las cuales corresponden los túneles proyectados de La Llorona, Uramita y Fuemia, niveles que se pueden observar a continuación (Figura 55, Figura 56 y Figura 57):



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

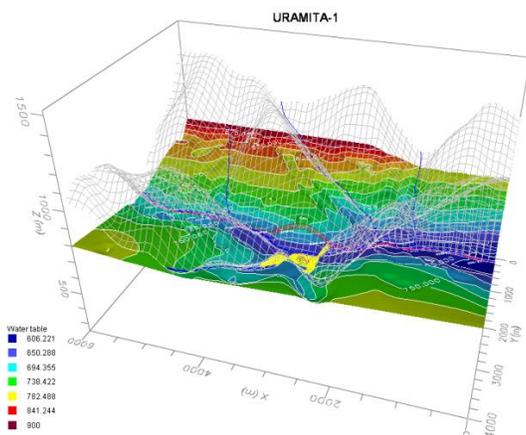


Figura 55. Nivel freático observado y utilizado en la modelación hidrológica del Tunel de Uramita.

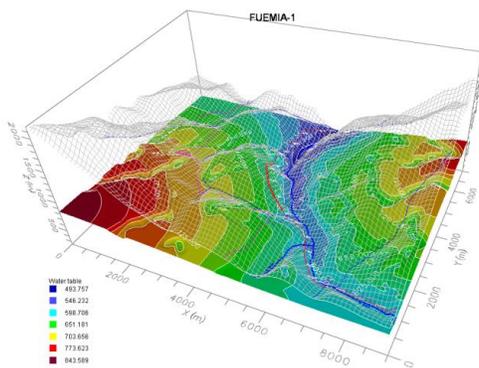


Figura 56. Nivel freático observado y utilizado en la modelación hidrológica del Tunel de Fuemia.

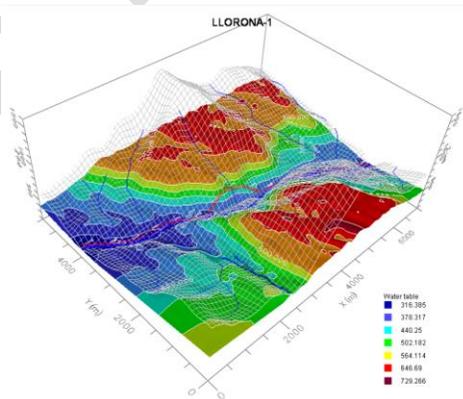
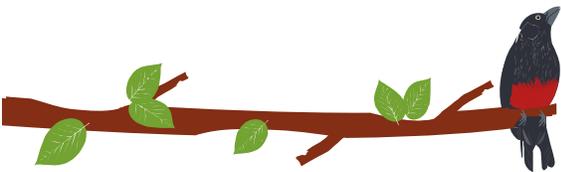


Figura 57. Nivel freático observado y utilizado en la modelación hidrológica del Tunel de La Llorona.

Los niveles freáticos observados en la modelación como una representación suavizada de la topografía en profundidad, con niveles bases relacionados a pequeños drenajes que recorren la zona y su principal afluente el río Sucio.



Adicionalmente se habla de niveles freáticos encontrados en los piezómetros instalados para el proyecto, pero se concluye que estos se encuentran asociados a niveles de agua colgados, y corresponden a los niveles de recarga que hay en la zona, por lo que finalmente no se tienen en cuenta para el modelo construido y se toman como reales los observados a continuación (Figura 58, Figura 59 y Figura 60):



Figura 58. Nivel freático en un corte transversal en la localización del túnel de Fuemia.

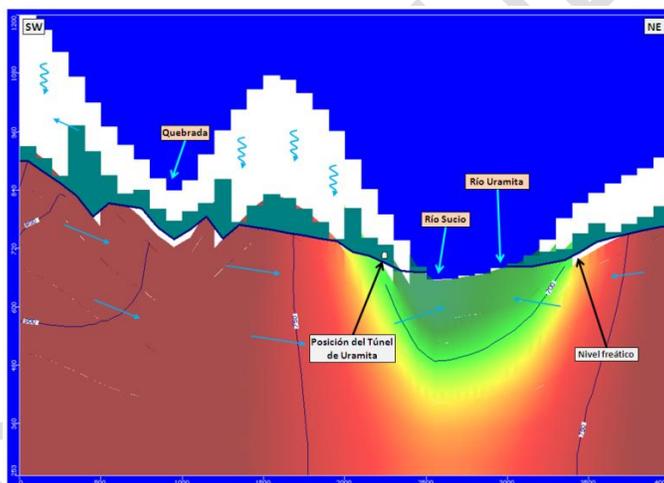


Figura 59. Nivel freático en un corte transversal en la localización del túnel de Uramita.

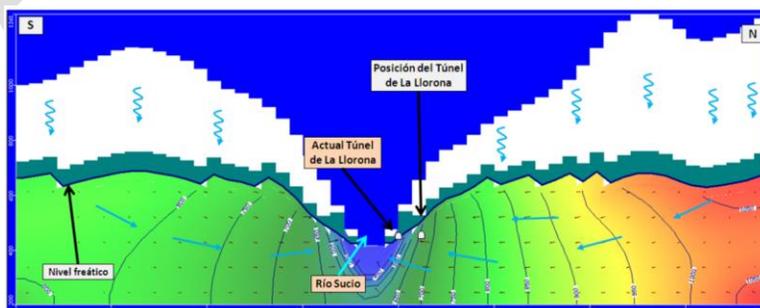
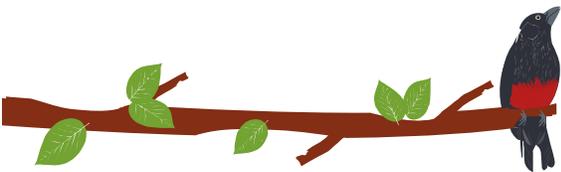


Figura 60. Nivel freático en un corte transversal en la localización del túnel de La Llorona.



En su mayoría los niveles freáticos se encuentran al nivel de la roca en profundidad, en el cual los túneles de Uramita y Fuemia se localizan por encima de dicho nivel, pero el túnel de la Llorona sí se encuentra por debajo, situación relacionada con la presencia de un drenaje en superficie.

Respecto a los valores de niveles freáticos obtenidos en la información arrojada por los piezómetros en el estudio hidrogeológico del proyecto AUTOPISTA AL MAR 2 ejecutado por el Consorcio TYPASA-CRA, no se tuvo en cuenta en la modelación realizada, debido a un análisis en un contexto geológico, que permite asociar estos valores con niveles de agua colgados, correspondiendo a niveles de recarga del acuífero profundo localizado en el macizo rocoso a nivel del río.

1.4.9.3 Parámetros Hidráulicos

En la determinación del caudal óptimo de explotación para los posibles pozos que se ubiquen dentro de la cuenca y de los parámetros hidráulicos del acuífero alrededor de los mismos, se tuvo en cuenta los datos obtenidos en las pruebas EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE LOS PIEZÓMETROS CONSTRUIDOS EN EL ÁREA DE TÚNEL-11, TÚNEL-12, TÚNEL-14 TÚNEL 17 (TÚNEL EL TOYO9 Y TÚNEL -18 UBICADOS ENTRE LOS MUNICIPIOS DE SANTA FE DE ANTIOQUIA, GIRALDO Y CAÑASGORDA. DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA, a través de la cual, se construyen cuatro (4) piezómetros sobre la Formación Urrao (Figura 61), de los cuales tres (3) captan la secuencia sedimentaria silicificada constituida por lutitas, lutitas, limolitas y lodolitas.

La interpretación de las pruebas de bombeo es básica para determinar los valores de los principales parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas en una determinada área, y fundamentales para conocer el comportamiento del flujo del agua subterránea.

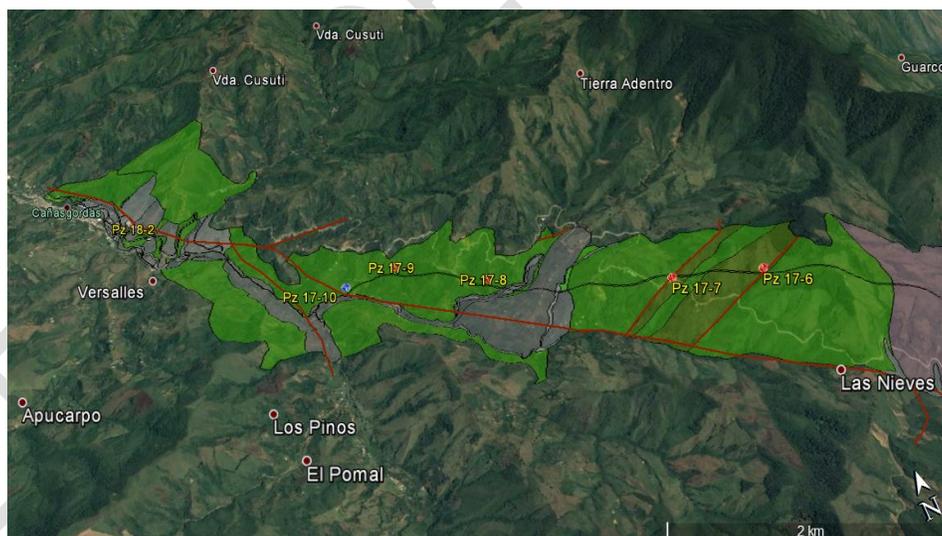


Figura 61. Localización de los Piezómetros con Pruebas de Slug en el Tramo-1 (Túnel El Toyo), entre los Municipios de Cañas Gordas y Giraldo, tomado de (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

En la Tabla 15, se listan las principales características físicas de los piezómetros construidos en el trazado del túnel de El Toyo.

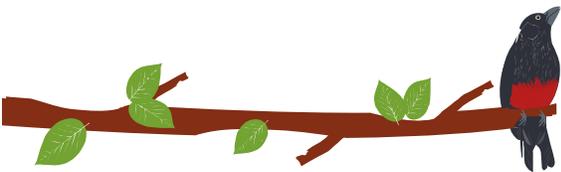


Tabla 15. Localización de los Piezómetros con Ejecución de Pruebas de Slug de Llenado en Rocas Asociadas a la Formación Urrao, en el Trazado del Túnel El Toyo (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

IDENTIFICACIÓN DEL PIEZÓMETRO	PROF. (m)	DIÁMETRO (Pulg)	INCLINACIÓN	UNIDAD HIDROGEOLOGICA
PTNL 17-7 (TÚNEL EL TOYO)	69.0	1½	60°	Basalto (K2alu) y Diabasa
PTNL 17-8 (TÚNEL EL TOYO)	230.0	1½	70°	Liditas (K2alu) y Limolitas
PTNL 17-10 (TÚNEL EL TOYO)	21.0	1½	40°	Liditas (K2alu) y Limolitas
PTNL 18-3 (TÚNEL-18)	16.0	1½	60°	Liditas (K2alu) y Limolitas

Los parámetros de mayor relevancia, calculados mediante la interpretación de las pruebas de Slug, para las unidades captadas, se describen a continuación:

1.4.9.3.1 Conductividad hidráulica kf

El cálculo de la Conductividad Hidráulica en las unidades hidrogeológicas del área, se determina mediante las denominadas pruebas Slug de Llenado o de Vacío, en piezómetros revestidos con tubería PVC de 1½ pulgadas de diámetro construidos por el Consorcio Antioquia al Mar, en un total de quince (15) piezómetros que tienen profundidades entre 15.0 y 72.0 m y diámetros de 1½ pulg e inclinados desde 40° hasta 90°, de los cuales once (11) captan rocas pertenecientes a la Formación Barroso y cuatro (4) a la Formación Penderisco, incluyendo sus diferentes intercalaciones.

De acuerdo con Bear (1979) citado por Jiménez Reyes & Rodríguez Cuenca "la conductividad hidráulica Kf es una medida de la permeabilidad del medio rocoso al agua y está relacionada con la velocidad de filtración Vf y el gradiente hidráulico por la Ley de Darcy" (2013, pág. 5)

$$vf = kf i$$

Utilizando la teoría del flujo radial en régimen estacionario en un pozo que explota un acuífero heterogéneo durante una prueba de bombeo y considerando descensos pequeños D_s , es válida la siguiente ecuación entre la conductividad hidráulica kf, el caudal afluente Q y el espesor del acuífero m

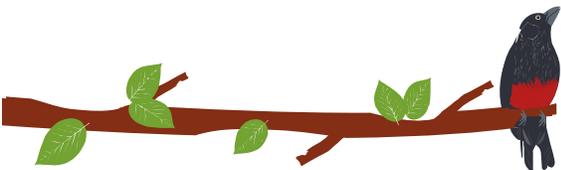
$$kf = Q.A/mDs$$

Donde A es una función del radio del pozo r y del radio de influencia del cono de bombeo R. El valor de A puede considerarse en una primera aproximación equivalente a 1. El caudal afluente del acuífero Q y su espesor m pueden obtenerse a partir del diagrama de flujos volumétricos Qφ.

La ecuación de producción del pozo se obtiene a partir de los parámetros hidráulicos calculados de la prueba de bombeo.

MD= NE+ BQ +CQ², es decir que la Conductividad Hidráulica (m/d) = 0.000000828 m/día, considerando un espesor saturado de las fracturas, estimado en 4.0 m (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).





1.4.9.3.2 Trasmisividad T

La transmisibilidad (T): Expresa la capacidad de una formación para transmitir agua subterránea. Se define como la rata de flujo de aguas subterráneas bajo un gradiente hidráulico unitario, y a la viscosidad cinemática de campo a través de una faja vertical del acuífero de ancho unitario y de altura igual al espesor saturado.

La trasmisividad T se relaciona con la conductividad hidráulica k_f y con el espesor m por medio de $T = k_f m$, $m = QA/Ds$. Todos los datos de entrada pueden obtenerse partir del diagrama de distribución del flujo volumétrico vertical.

Cuando la transmisibilidad $T > 100 \text{ m}^3/\text{día.m}$, el acuífero es muy bueno (producción de 2787.264 $\text{m}^3/\text{día}$). Trasmisividad (T) (m^2/d) = 0.00000331 $\text{m}^2/\text{día}$, considerando un espesor saturado de las fracturas, estimado en 4.0 m (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

En la Figura 62, Figura 63, Figura 64 y Figura 65, se muestra las curvas de abatimiento de la prueba de bombeo.

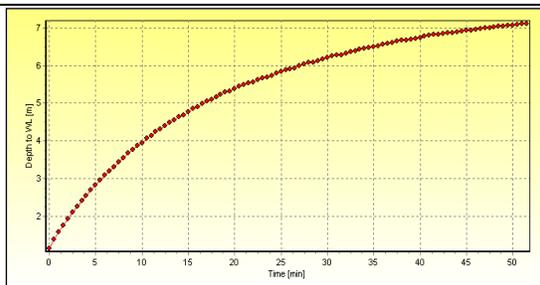


Figura 62. Comportamiento de la curva de los datos tomados de la Prueba de Slug de llenado (falling head) en el piezómetro PTNI 17-7. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016)

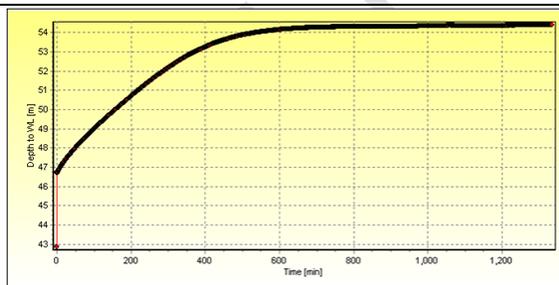


Figura 63. Comportamiento de la curva de los datos tomados de la Prueba de Slug de llenado (falling head) en el piezómetro PTNI 17-8. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016)

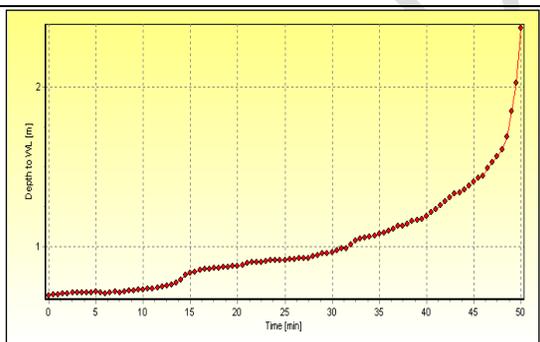


Figura 64. Comportamiento de la curva de los datos tomados de la Prueba de Slug de llenado (falling head) en el piezómetro PTNI 17-10. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016)

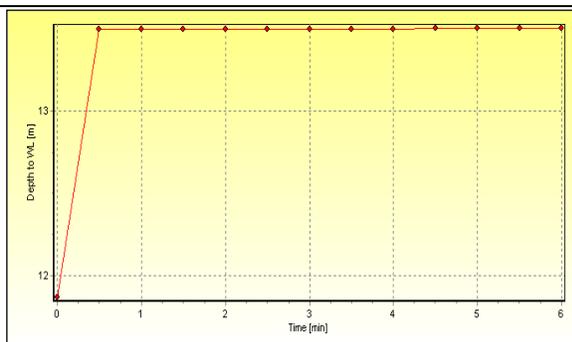
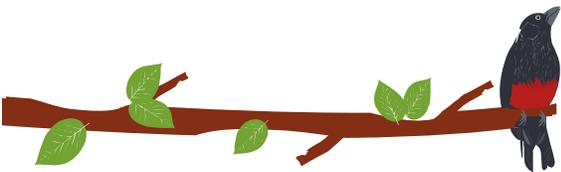


Figura 65. Comportamiento de la curva de los datos tomados de la Prueba de Slug de llenado (falling head) en el piezómetro PTNI 18-3. Fuente: (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016)

El piezómetro PTNL-17-7 con una inclinación de 60° capta a una intercalación de rocas basálticas en la secuencia sedimentaria de la Formación Urrao y a pesar de estar ubicado muy cerca al contacto, refleja muy bajos valores de Conductividad Hidráulica (8.28 E-07 $\text{m}/\text{día}$) como producto de la muy baja porosidad secundaria por fracturas y por ende



su escaso almacenamiento de agua. Ésta situación puede estar señalando que hacia el lado de la roca sedimentaria puede ocurrir agua a presión, al comportarse el basalto como capa sello (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

El piezómetro 17-8 con inclinación de 70° capta la secuencia sedimentaria de la Formación Penderisco, la cual en éste sector refleja bajos valores de Conductividad (1.0 E-05 m/día) como producto de una baja densidad de fracturas y por ello con bajo almacenamiento de agua, mientras que el piezómetro PTNL 17-10 construido en cercanías al Portal de Salida del Túnel El Toyo nuestra una Conductividad Hidráulica moderada (7.64 E-02 m/día) muy seguramente como producto de una mayor densidad de fracturas que permiten un mayor almacenamiento de agua subterránea en éste sector. Por último, el piezómetro PTNL 18-3 construido sobre el trazo del Túnel-18 e inclinado 60° también muestra una baja Conductividad Hidráulica, del orden de 1.20 E-04 m/día donde el tiempo de infiltración es muy corto, de tan solo 6.0 minutos, lo que estar relacionado con fracturas de corta longitud y angostas (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

1.4.9.3.3 Temperatura

Este parámetro es muy importante para el análisis del acuífero desde el punto de vista térmico y sus efectos sobre las propiedades del agua y la incidencia en los cálculos hidráulicos.

La temperatura de los pozos profundos, está en función del gradiente geotérmico, caudal de bombeo, geometría del hueco, trayectoria y tiempo de bombeo. El gradiente geotérmico fue estimado a partir del Mapa de Gradientes Geotérmicos en Colombia, en el cual se reportan gradientes de 14,4- 25,6 °C/km para el área (INGEOMINAS, 2009). La temperatura del agua subterránea presentes en el sector oriental de la cuenca Río Sucio Alto oscila entre 16.72 y 28.29 oC de los puntos inventariados oscila desde (M19) hasta °C (M08), para un promedio de 20.71 °C (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

En la Figura 66, se muestra la relación entre la temperatura con la altura topográfica del terreno sobre el nivel del mar (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Se observa además que la mayoría de los manantiales ocurren en las menores alturas, pero sus valores de Conductividad Eléctrica y SDT no son correlacionables con la diferencia topográfica, lo que puede indicar que las fracturas de la Formación Urrao son más heterogéneas en cuanto a su longitud y amplitud, siendo por ello disímil los valores de concentración iónica (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

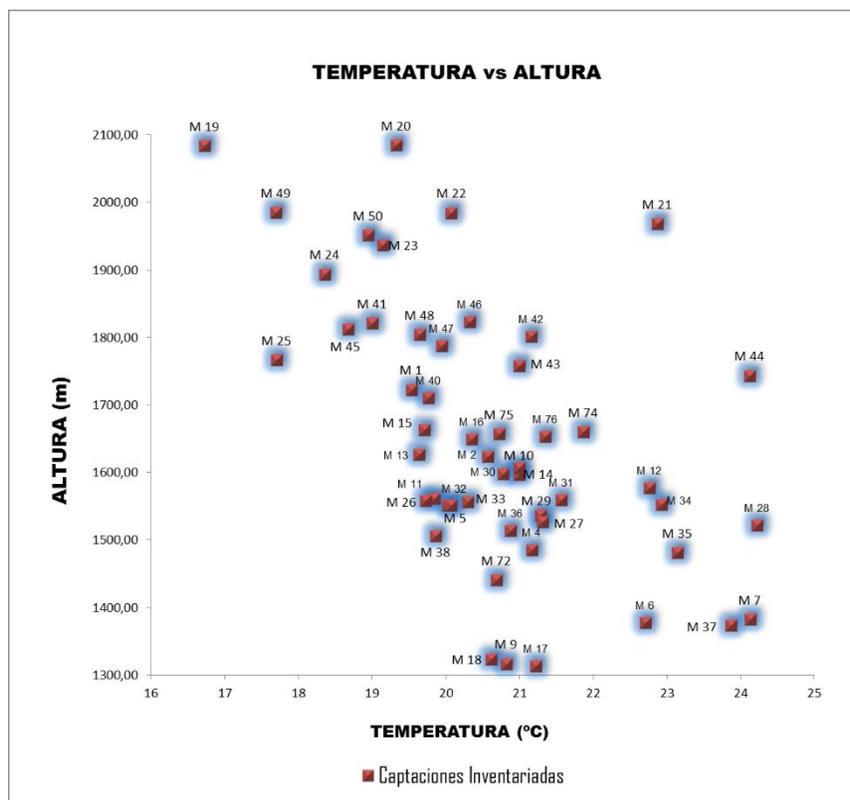
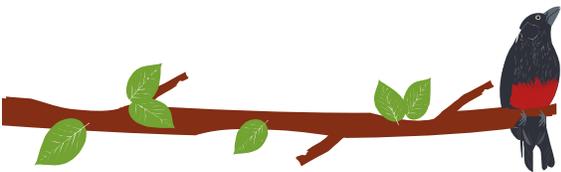


Figura 66. Relación Temperatura vs Altura de los Datos de Parámetros Físico-Químicos in situ Tomados en Cada Manantial Inventariado en la Formación Urrao (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

1.4.9.4 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LAS DIFERENTES FORMACIONES PRESENTES EN LA CUENCA.

Para su estudio y comprensión, se clasifican los diferentes tipos de rocas en unidades hidrogeológicas de acuerdo a su capacidad de almacenar y transmitir agua, así como su calidad físico-química. Esta clasificación se realizó siguiendo las normas propuestas por la UNESCO para la elaboración de mapas hidrogeológicos (OMM, 1998), (ROSTLAC, 1982).

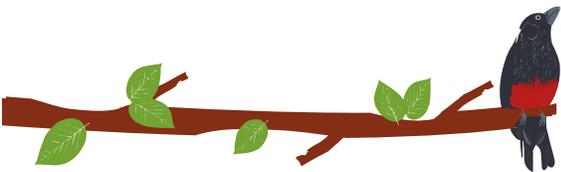
En hidrogeología el grado de importancia de un sistema acuífero, está establecido a partir de las características geológicas, composición litológica, hidráulicas (porosidad y permeabilidad), hidroquímicas, tipología que presenta el acuífero.

La clasificación hidrogeológica de las diferentes unidades hidrogeológicas se hizo con base en los siguientes aspectos:

Características geológicas (litología, aspectos estructurales, geomorfología, espesores, etc.) de las diferentes formaciones presentes en la cuenca.

Distribución espacial de las rocas tanto en superficie como en profundidad.

A continuación, se presenta la evaluación hidrogeológica de las unidades geológicas que afloran en la cuenca teniendo en cuenta la cartografía geológica a escala 1:25.000, la



estratigrafía. Se destaca el Miembro Urrao (K2alu) como el de mayor potencial por el fracturamiento del mismo.

Los diferentes tipos de rocas presentes en la cuenca, se clasifican en dos grupos:

1.4.9.4.1 Rocas porosas con importancia hidrogeológica relativa grande y pequeña

Son todos aquellos materiales que presentan una porosidad media a alta, es decir los poros que pueden existir entre los granos que las conforman generalmente están conectados entre ellos, por lo tanto, en términos hidrogeológicos, la porosidad de estos materiales se considera buena. En estos materiales las propiedades hidrológicas de porosidad, permeabilidad y productividad son buenas. Dentro de este grupo se encuentran las unidades geológicas Depósitos Aluviales (Q2al) Depósitos de Formación Guineales (N1N2g), Sedimentitas de Beivaviejo (N1sb).

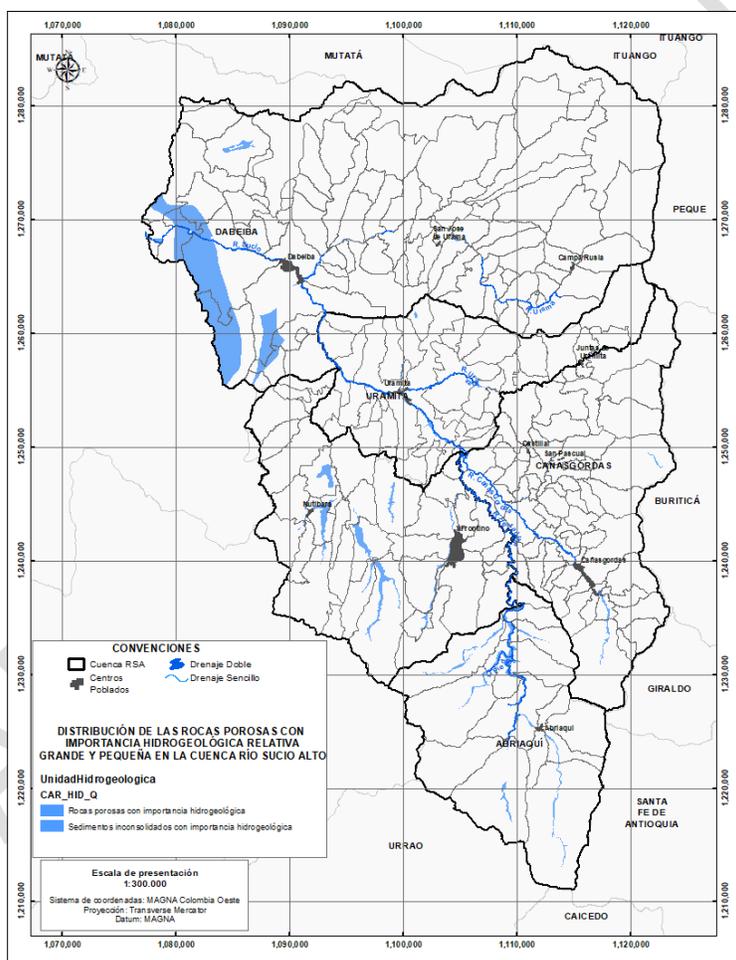
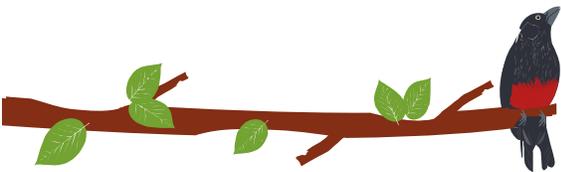


Figura 67. Espacialización de las rocas porosas con importancia hidrogeológica relativa grande y pequeña en la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: Elaboración propia.

1.4.9.4.2 Rocas porosas con importancia hidrogeológica relativa muy pequeña o nula

Se consideran como unidades con interés hidrogeológico pequeño debido a su baja porosidad y permeabilidad.



En este grupo se encuentran las unidades geológicas Terrazas (Q2t) y las LITOARENITAS, LIMOLITAS Y LODOLITAS DE URAAO (K2alu).

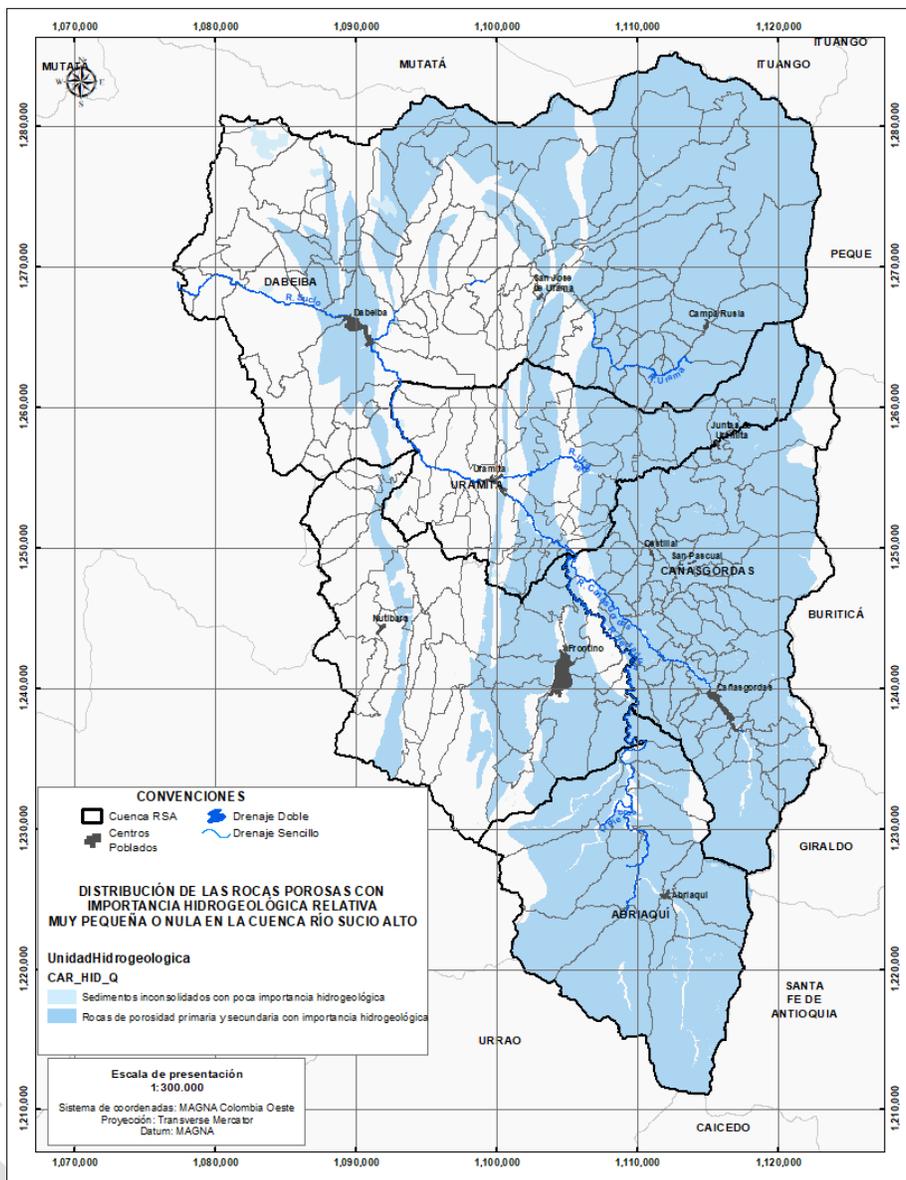
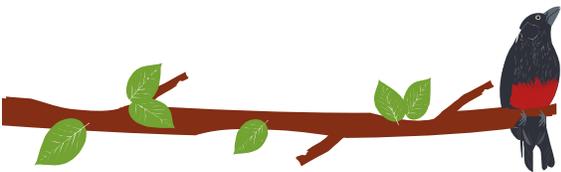


Figura 68. Espacialización de las rocas porosas con importancia hidrológica relativa grande y pequeña en la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: Elaboración propia.

1.4.9.4.3 Rocas con porosidad secundaria con importancia hidrológica relativa muy pequeña o nula

Son rocas fracturadas que desarrollan permeabilidad secundaria a lo largo de las aberturas de las fracturas y son capaces de albergar agua en cantidad dependiendo de la frecuencia del grado de fracturamiento. Dentro de este grupo se encuentran las unidades geológicas del Grupo Cañasgordas CHERT Y CALIZAS DE NUTIBARA (K2cn),





LITOARENITAS, LIMOLITAS Y LODOLITAS DE URAO (K2alu), DIABASAS DE SAN JOSÉ DE URAMA (JK1du) FORMACIÓN BARROSO, COMPLEJO SANTA CECILIA-LA EQUIS (E1csc) BASALTO DE EL BOTÓN (N1n4n5bb).

1.4.9.4.4 Rocas cristalinas con importancia hidrogeológica relativa muy pequeña o nula

Son las rocas formadas en ambiente ígneo intrusivo y metamórfico que afloran en la cuenca. En este grupo se encuentran las unidades geológicas Monzonita del Cerro Frontino (Nmcf) Monzonita de Nudillales (N1n4n5mn) Diorita de Morrogacho (Ndmg).

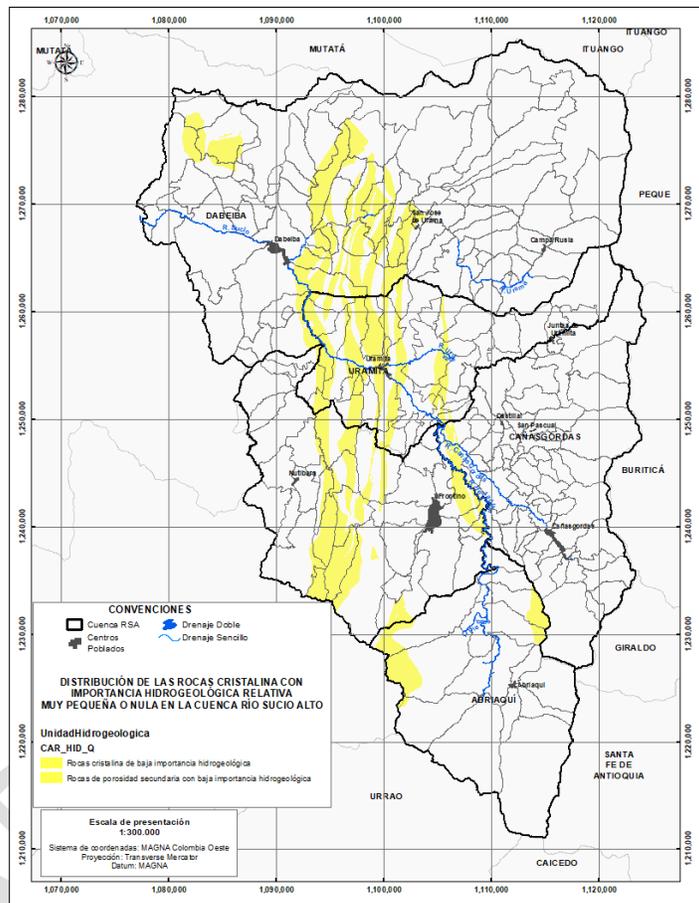
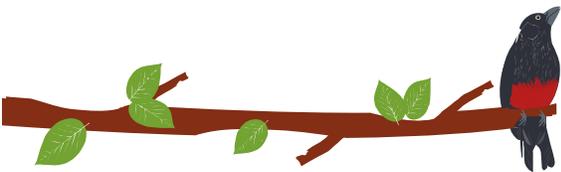


Figura 69. Rocas cristalinas con importancia hidrogeológica relativa muy pequeña o nula en la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: Elaboración propia.

1.4.9.5 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS ROCAS TANTO EN SUPERFICIE COMO EN PROFUNDIDAD.

En el área de la cuenca Río Sucio Alto, se pueden diferenciar diferentes tipos de acuíferos. Estratos de materiales no consolidados (suelos residuales de arenas, limos, arcillas) de unos 45 m de espesor máximo, una capa de roca alterada y fracturada en las partes superficiales y el basamento de roca sana, un macizo rocoso fracturado con porosidad secundaria.



La porosidad de los suelos residuales es variable, la cual depende del material parental, en general es moderada, si tenemos en cuenta los resultados de la granulometría realizados para la cuenca, en donde se encuentran materiales arenosos compuesto principalmente por arenas limosas y arcillosas (SC y SM) y en segunda proporción están las arenas con mezclas menores de materiales finos. Los materiales transportados están conformados principalmente por gravas, los cuales están localizados en los sectores de depósito fluvio-torrenciales, especialmente en los abanicos aluviales. El basamento tiene porosidades muy pequeñas.

En la Figura 70, se presenta la delimitación de las unidades hidrogeológicas presentes en la cuenca Río Sucio Alto:

Las unidades hidrogeológicas de importancia relativa buena o moderada, son:

1.4.9.5.1 Acuíferos libres

Son todos aquellos formados por capas geológicas que poseen una superficie libre y real del agua almacenada que está en contacto con el aire y a la presión atmosférica. La zona saturada se encuentra entre la superficie del terreno y el nivel freático. Este tipo de acuíferos se encuentran distribuido en toda la cuenca, y están formados por los depósitos de materiales transportados, suelos residuales de las unidades geológicas presentes en el área y las formaciones geológicas de baja resistencia, rocas sedimentarias del Terciario, de baja consolidación diagenética o pobremente litificadas, con estratificación laminar o de capas delgadas, o rocas intensamente fracturadas, de moderada a altamente descompuestas.

Depósitos fluvio-torrenciales (Qal)

Acuíferos libres de extensión variable, constituido por bloques y gravas de rocas volcánicas básicas, plutónicas y sedimentarias en diferentes proporciones en una matriz de tamaño arena.

Suelos residuales

Conforman acuíferos los suelos residuales de las unidades geológicas presentes en la cuenca, en especial la Formación Urrao (aflora en el 74% del área), cuyos espesores varían de 15 a 45 m, es considerado un acuífero libre de carácter local de porosidad primaria, recargado por la precipitación y el flujo lateral de las corrientes superficiales, a los cuales poseen una conductividad hidráulica de 0.01 m/d (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

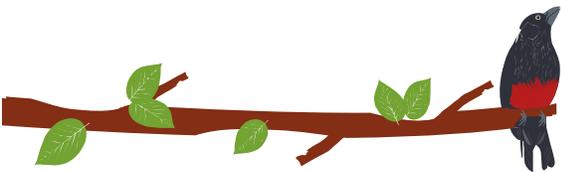
El acuífero, constituido por intercalaciones de arenitas con conglomerados y lentes arenosos de la Formación Guineales (N1N2g), actúan como acuíferos libres a semiconfinados, dado su porosidad primaria.

El acuífero, constituido por las areniscas, tufitas, lodolitas, lignito y shales calcáreos con nódulos de calizas de la Formación Sedimentitas de Beivaviejo (N1sb), actúan como acuíferos libres a semiconfinados, dado su porosidad primaria.

1.4.9.5.2 Acuíferos confinados

En los suelos residuales producto de la meteorización rocas volcánicas, los espesores varían entre 13 m a 35 m y están constituido por suelos arcillolimosos, se le considera un acuitardo continuo de extensión local y tipo confinado, con desarrollo de una porosidad primaria recargado mediante una infiltración lenta por el agua lluvia y las





corrientes superficiales, donde el flujo superficial se comporta horizontalmente hasta las capas impermeables profundas, las cuales no permiten flujos verticales a las unidades que la infrayacen, los parámetros hidráulicos asignados para esta capa se maneja una conductividad hidráulica de 0.005 m/d calculado para la Formación Barroso (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016), en la cuenca también encontramos los suelos residuales de las Diabasas de San José de Urama (JK1du), Complejo Santa Cecilia-La equis (E1csce) y Basalto de El Botón (N1n4n5bb).

Infrayaciendo los suelos residuales con un espesor de aproximadamente 200.0 m, con un alto a medio grado de fracturamiento masiva y compacta, generando una porosidad secundaria por fracturas y diaclasas, siendo las fracturas angostas de corta longitud y algunas veces rellenas con material secundario, recargado por los flujos laterales y verticales de la capas superiores, en algunas zonas se presentan intercalaciones por su masividad y compactación en las que se puede hallar agua subterránea a presión, con valores de conductividad del orden de 0.004 m/d, para las litoarenitas, limolitas y lodolitas de la Formación Urrao (K2alu) (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

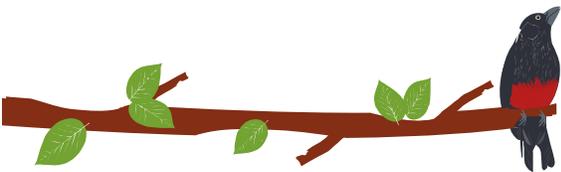
Para las areniscas arcillosas de la Formación Urrao (K2alu), en función del grado de cementación, los conglomerados pueden tener también una permeabilidad muy variable; pueden ser estancos si están muy cementados, semipermeables si lo están parcialmente, y muy permeables si están poco cementados, alterados y fracturados, como parámetros hidráulicos las conductividades aproximadas para estas zonas profundas son del orden de 0.0008815 m/d (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Las rocas volcánicas de la Formación Barroso (K1vb), considerada un acuífero en esta parte superficial debido a la densidad de las fracturas y diaclasas con moderada capacidad de almacenamiento de agua lo que indica que el agua lluvia y superficial infiltrada en esas fracturas, permanece poco tiempo ya que fluye rápidamente, por lo que se infiere que son poco profundas y con zonas de recarga cercana, considerándolo de poca importancia hidrogeológica que corresponde a rocas poco fracturada de baja infiltración, rocas moderadamente fracturadas y abiertas que permiten una buena infiltración, con valores de conductividad del orden de 0.0008 m/d (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

Infrayaciendo las capas anteriores encontramos un conjunto de ROCAS MODERADAMENTE DURAS o INTERMEDIAS (Resistencia Intermedia a alta), rocas bien litificadas o de alta consolidación diagenética, con estratificación delgada a gruesa, o rocas cristalinas en general, débil a moderadamente descompuestas y poco fracturadas. Comprende rocas como calizas, areniscas y conglomerados bien cementados, limolitas silíceas; lutitas; esquistos y otras rocas foliadas y las rocas ígneas en general. Igualmente comprenden las secuencias sedimentarias donde alternan rocas duras y blandas en capas delgadas. Las rocas con un espesor de más de 900.0 m., es de suponer que la permeabilidad en general disminuye con la profundidad acorde la compactación de los materiales arcillosos por el peso de los de arriba, la desaparición de las capas alteradas superiores que siempre hay y el cerramiento de las fracturas; en este sentido, la disminución de la permeabilidad en profundidad y más en la zona que corresponde al conjunto del macizo que corresponde a las rocas volcánicas de la formación Barroso (K1vb).

Estas permeabilidades pueden ser mucho mayores ya que está afectado por una tectónica de fallas inversas importantes que han podido desarrollar fracturas menores en su entorno que pueden permanecer abiertas seguramente hasta profundidades





considerables. No solo hay que considerar permeabilidades altas en las zonas de fallas, sino también en su entorno más o menos alejado. Por lo que es posible aplicar también aquí la estimación de permeabilidades en función de las aperturas de las juntas y sus espaciamentos, considerando que su litología conserva su composición, pero cambia es el porcentaje asignado de acuerdo a la clasificación geotécnica, como parámetros hidráulicos las conductividades aproximadas para estas zonas donde la roca presenta una característica más sana son del orden de 0.000959168 m/d (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

1.4.9.5.3 Acuitardos

Otras unidades acuíferas presentes en la cuenca son las rocas ígneas intrusivas, constituida por plagioclasas, hornblendas y biotitas con textura porfirítica, como son las Monzonita de Nudillales (N1n4n5mn), Diorita de Morrogacho (Ndmg) y Monzonita del Cerro Frontino (Nmcf), cuerpos intrusivos masivos y compactos con poca importancia hidrogeológica relativa muy pequeña o nula considerados como acuitardos, es decir almacena poca cantidad de agua subterránea y la transmite lentamente, debido posiblemente a que sus fracturas generalmente son angostas y poca profundas, hallándose además rellenas con material secundario y por contener una porosidad secundaria con desarrollo de una baja densidad de fracturas y diaclasas.

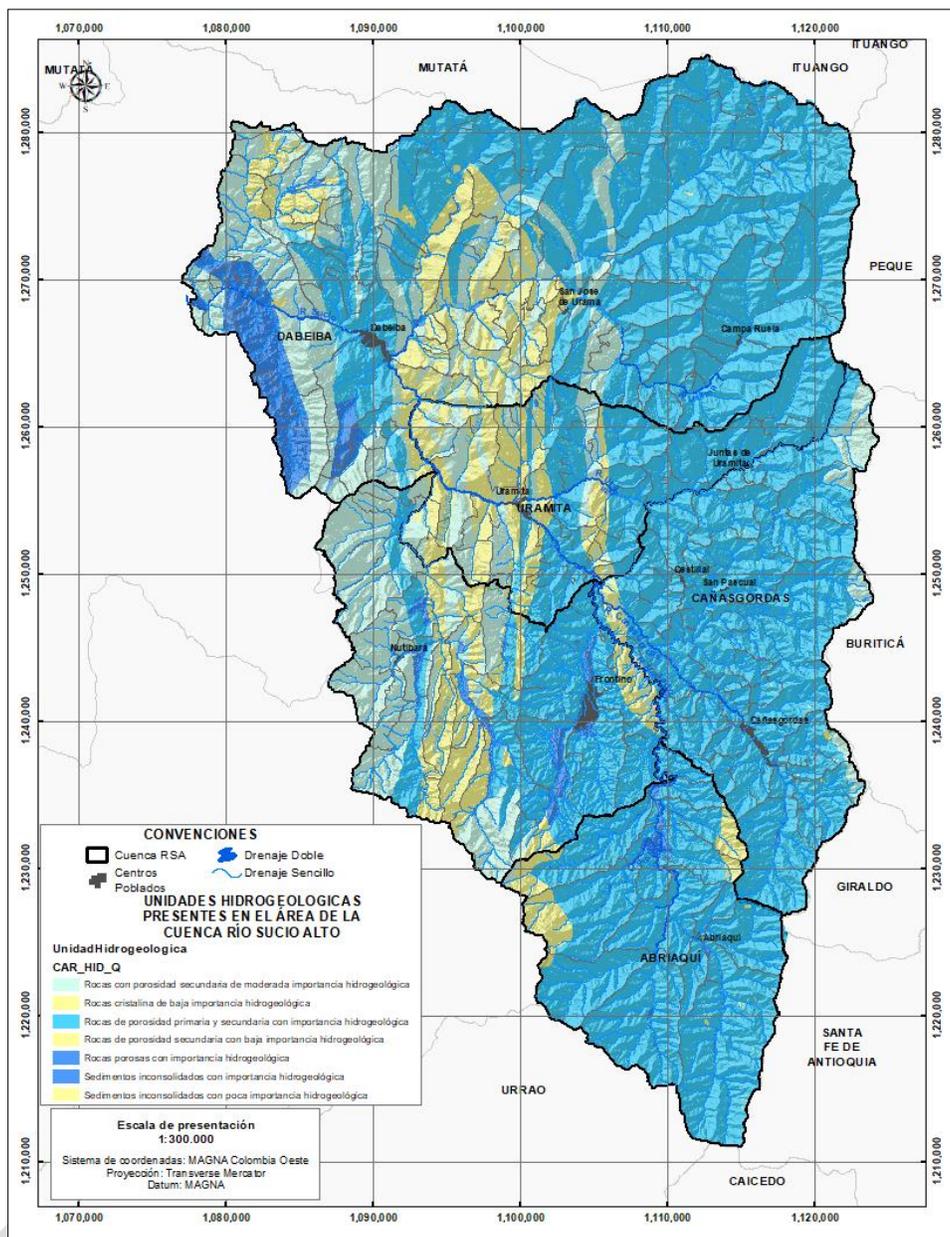
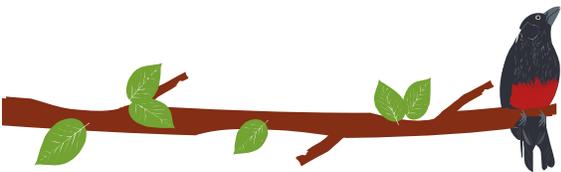
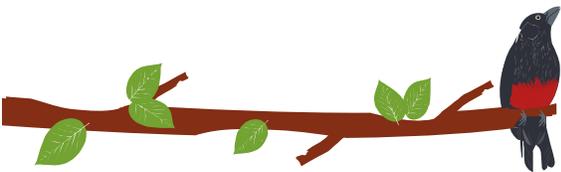


Figura 70. Unidades hidrogeológicas identificadas para la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: propia a partir del análisis geológico escala 1:25000.

1.4.9.6 Modelo Hidrogeológico Conceptual

La construcción de los modelos hidrogeológicos corresponde a uno de los objetivos de estudio de aguas subterráneas, en el cual tiene en cuenta cada uno de los elementos descritos en el informe, pero se sintetiza en un bloque-diagrama donde de manera gráfica se incluyen dichos elementos, desarrollados en el contexto de la cuenca. Para la zona de estudio, en el modelo tectonoestratigráfico, se identifica una serie de bloques tectónicos que pueden significar importancia hidrogeológica, en ellos se entremezclan rocas calizas con los flujos Diabásicos, creando un típico "melange" o múltiples bloques delgados y alargados en sentido N-S. Hacia el W, predominan rocas intrusivas y



volcánico-sedimentarias que contrastan morfoestructuralmente, con las sedimentitas que predominan hacia el E del área (Gómez H. , 2018) (Figura 71).

En la Figura 71, muestra el predominio de un intenso tectonismo, el cual oscurece la relación tectónico-estructural y estratigráfica de un área en donde la acreción secuencial deforma la relación espacial que existe entre las rocas sedimentarias e ígneas intrusivas y extrusivas mostrando que en la cuenca no existe una secuencia estratigráfica típica y continua que sea correlacionable con otras zonas aledañas (Gómez H. , 2018).

Las principales unidades hidrogeológicas corresponden a bloques tectónicos de sedimentitas que predominan hacia el E, diabasas y basaltos intercalados con sedimentitas en la parte central, y hacia el W predominio de plutones y stocks distribuidos irregularmente.

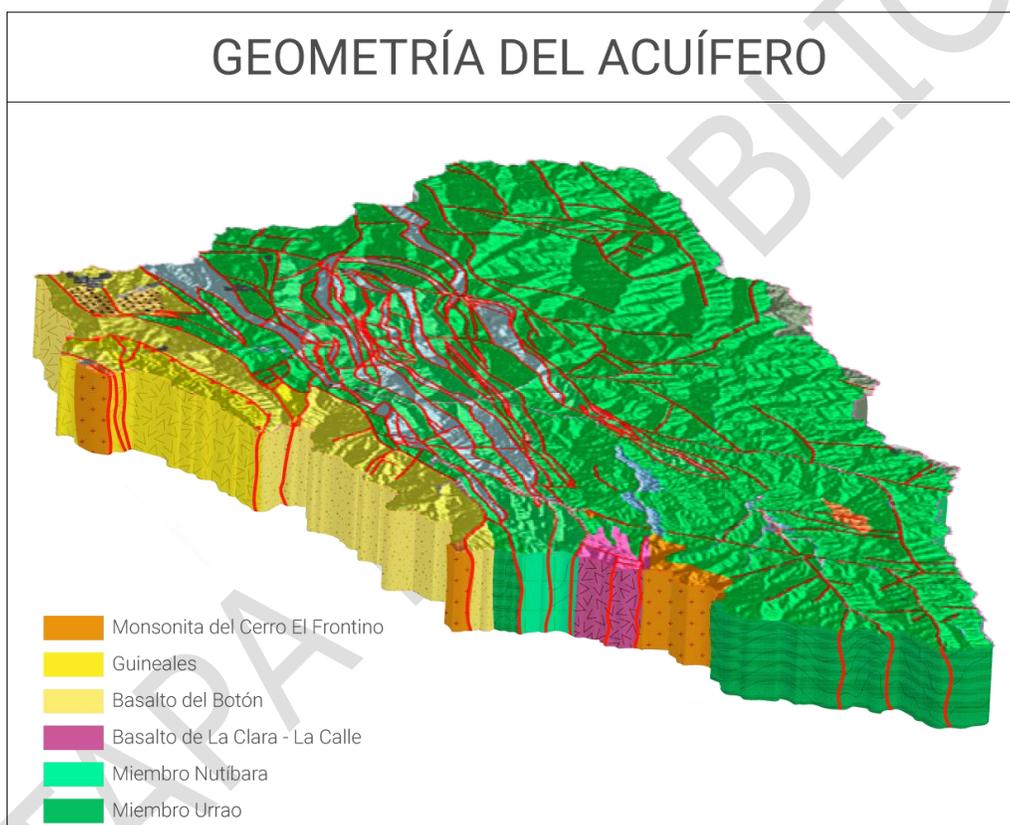
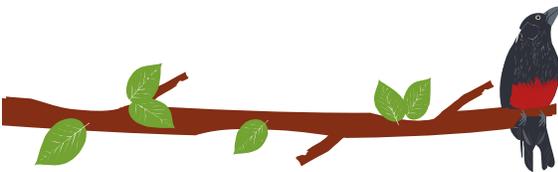


Figura 71. Geometría preliminar de las unidades hidrogeológicas de la cuenca Río Sucio Alto.

Las fallas presentes suelen tener una permeabilidad equivalente de gravas limpias, y pueden concentrar y orientar el flujo desde distancias considerables. Las fallas suelen afectar a toda la serie litológica, desde la superficie hasta la roca fresca, poniendo en conexión hidráulica todas las capas del regolito. La permeabilidad de estas fracturas está en el rango de $K = 10^{-4}$ m/s, tal como se ha visto en el estudio realizado por el CONSORCIO ANTIOQUÍA DEL MAR-HIDROGEOCOL. Las fallas importantes funcionan como verdaderos conductos entre las zonas de recarga y las partes inferiores de la ladera (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).



1.4.9.7 Red De Flujo

Las características hidrogeológicas, ligadas esencialmente a las propiedades físicas de la roca almacén, determinan junto con la porosidad y el coeficiente de almacenamiento, el volumen de agua gravífica que puede ser liberado por los medios normales de captación, y con la permeabilidad o transmisibilidad, el caudal útil que se puede obtener. La productividad de un manto acuífero es función, además de sus características geológicas, también de las hidrogeológicas y de los factores del flujo de aguas subterráneas.

Otro factor a tener en cuenta es el sistema de flujo regional, el cual se describe como aquél que su zona de recarga ocupa la divisoria subterránea y su zona de descarga se sitúa en la parte más baja de la cuenca. Estos sistemas de flujo tienen las vías de flujo más profundo y más largo (superior a 50 km), con sistemas intermedios que operan entre estos.

No se puede establecer con exactitud el sistema de flujo de aguas subterráneas en la cuenca Río Sucio Alto, ya que no se cuenta información primaria de puntos de agua que reporte:

- Acuífero captado (ubicación de filtros, profundidad total).
- La nivelación topográfica a cabeza de pozo, o a nivel del terreno que permita determinar la cota del agua subterránea (cota del terreno menos profundidad del nivel freático).
- Distribución espacial apropiada para poder correlacionar la información y construir líneas piezométricas.
- Reporte de niveles.
- Reporte de niveles estáticos (sin bombeo y sin interferencia de pozos cercanos en aprovechamiento).

Sin embargo, de acuerdo a los diferentes sistemas de flujo del agua subterránea propuestos por Toth (1963), en la cuenca Río Sucio Alto podemos encontrar las siguientes características:

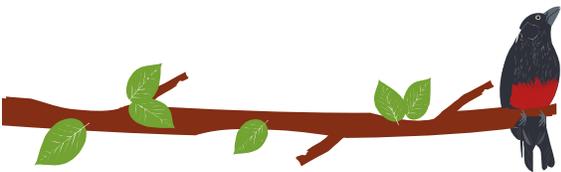
Sistema de flujo local (L): son sistemas de flujo que tienen su área de recarga en un alto topográfico (alto de Corcovado) y el área de descarga en un bajo topográfico adyacente, es decir, el sistema de drenaje que conforma la cuenca.

Sistema de flujo intermedio (I): es el sistema de flujo en el que sus zonas de recarga y descarga, no son adyacentes, ni tampoco ocupan las elevaciones más altas y bajas de una cuenca; pero sí existe una separación entre sus zonas de recarga y descarga de uno a más altos y bajos topográficos (altiplanicie frontino-urrao).

Sistema de flujo regional (R): se considera sistema de flujo regional, aquél en el que su zona de recarga ocupa la divisoria subterránea y su zona de descarga se sitúa en la parte más baja de la cuenca. Estos sistemas tienen las vías de flujo más profundas y de mayor longitud (por lo general superior a 50 km), con sistemas intermedios que operan entre estos.

El flujo natural del agua subterránea de la cuenca Río Sucio Alto, se esquematiza mediante redes de flujo. En la Figura 72, se esboza el flujo subterráneo suponiendo el suelo homogéneo e isótropo. La forma de la superficie freática es la que gobierna toda la red, en donde los límites están dados por la divisoria de aguas y las zonas de descargas





son las corrientes hídricas presentes en el área, los cuales guardan una relación directa con los sistemas acuíferos, especialmente con los acuíferos someros y, por tanto, con el flujo de agua subterránea.

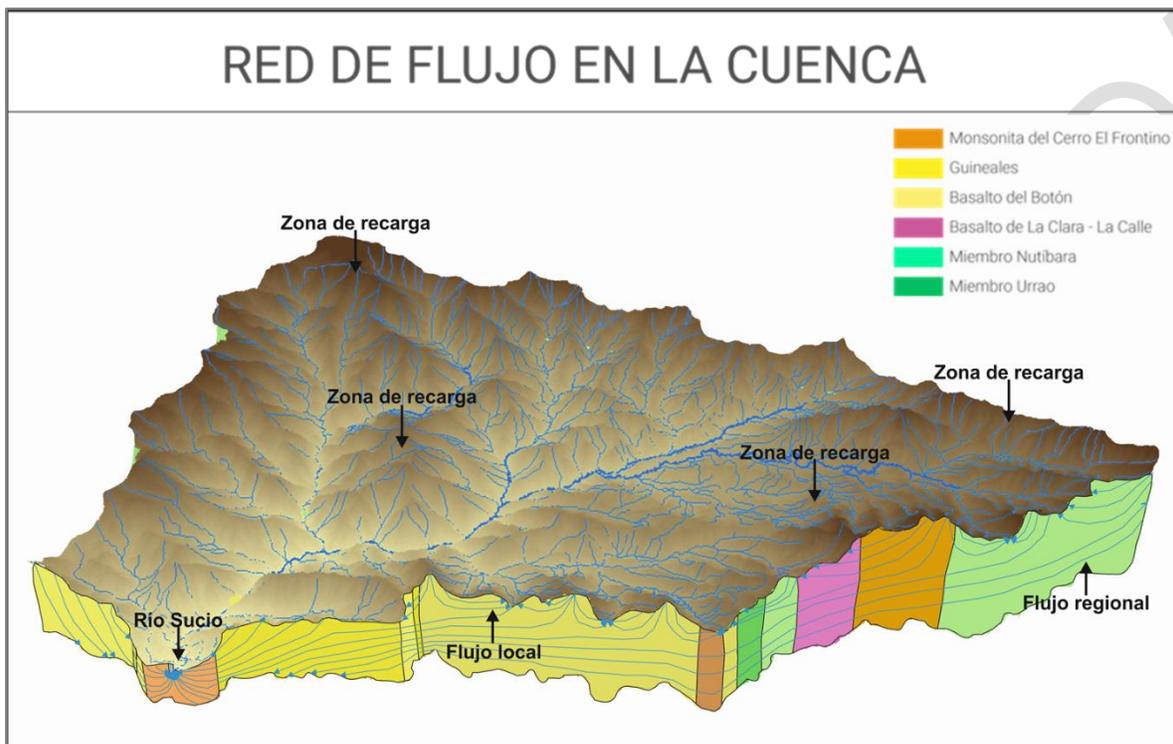


Figura 72. Red de flujo que esquematiza el flujo subterráneo natural en la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: Elaboración propia.

Debido a la complejidad geológica presente en el área de la cuenca, se presenta una simplificación de la realidad, veamos cómo afectan los cambios de conductividad hidráulica.

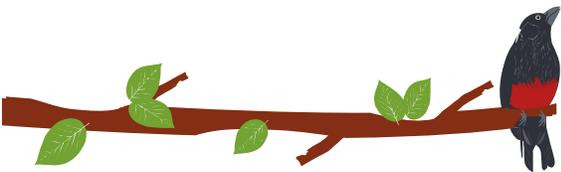
Áreas de recarga y de descarga: Las áreas de recarga (zonas altas de la cuenca) son aquellas en que el flujo subterráneo presenta una componente vertical descendente, y las áreas de descarga, ascendente (ríos). Aunque en este esquema tienen poca presencia, también existen áreas intermedias en las que el flujo es prácticamente horizontal.

Flujos locales y regionales. Los flujos locales normalmente están asociados a valles menores (Herradura, Cañasgordas, Urama, etc) y los flujos regionales a los valles regionales.

En general se puede observar tres redes de flujos para la cuenca: un flujo del agua desde los límites de la cuenca hacia el Golfo de Urabá siguiendo una tendencia sur-norte, noroeste, este-oeste (Figura 72).

De acuerdo al modelo conceptual, las unidades hidrogeológicas de la cuenca Río Sucio Alto corresponden a bloques tectónicos de rocas sedimentarias y volcánicas, en donde los perfiles de meteorización crean capas superficiales con un comportamiento hidrogeológico distinto al de las rocas moderadamente intermedias a duras ubicadas en





profundidad, en donde existirán acuíferos asociados a las fracturas presentes, de escasos recursos y con permeabilidad baja.

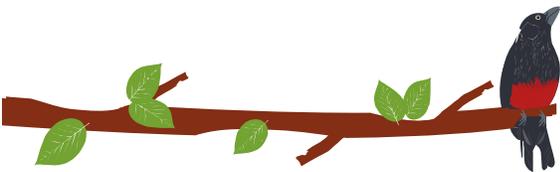
Los suelos residuales permiten la circulación de las aguas superficiales producto de la recarga por precipitación de las aguas lluvias, en consecuencia, a posición del nivel freático debe estar en el contacto saprolito-roca, ya sea colgado o superficial.

1.4.10 VULNERABILIDAD DE LOS ACUIFEROS A LA CONTAMINACIÓN

A pesar de que no existen problemáticas reportadas asociadas al recurso hídrico subterráneo, en la cuenca Río Sucio Alto pueden llegar a ser de tipo socioeconómico, especialmente los relacionados con la deforestación de las zonas de recarga, la contaminación por el uso de agroquímicos y por la actividad minera.

La vulnerabilidad se define como: "las características propias de un acuífero que determinan la facilidad con que un contaminante derivado de actividades antrópicas o fenómenos naturales pueda llegar a afectarlo" (Decreto 1640 de 2012).

La vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación se ha considerado una medida cualitativa de la facilidad o dificultad que tiene un contaminante dispuesto sobre la superficie del terreno para llegar al acuífero mediante infiltración a través de la zona no saturada (Ingeominas, 1997). Para evaluarlo el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) ha expuesto una "Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación" (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). El Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010, establece cuatro enfoques (metodologías) de evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a contaminación, el uso de uno u otro radica en la información disponible para su elaboración. Entre los métodos disponibles se encuentran: i) Modelos de simulación, ii) Métodos estadísticos, iii) Métodos de superposición e índices (o paramétricos) y iv) ambientes hidrogeológicos. Dentro de los métodos de superposición e índices (o paramétricos), (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010) sintetiza las metodologías disponibles en la literatura y los clasifica en cuatro: (1) los métodos de matriz, que utilizan parámetros muy seleccionados y sólo tienen aplicabilidad local. (2) Los métodos de puntuación (RS), en los que cada parámetro está dividido en clases a las que se atribuye una puntuación. La metodología más destacada es el GOD (5). (3) Los métodos de puntuación y ponderación (PCSM), en los que además de asignar una puntuación cada parámetro es multiplicado por un factor ponderador. Las metodologías más destacadas son DRASTIC (6), SINTACS (7), EPIK (8) y GALDIT. (4) Los métodos de relaciones analógicas (AR), como el AVI. En la Figura 73, se puede apreciar su síntesis.



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

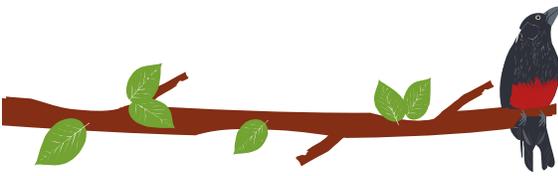
MÉTODOS	FACTORES	ÍNDICE DE VULNERABILIDAD
**DRASTIC ⁽⁷⁾	D: Profundidad del agua subterránea R: Recarga neta A: Litología del acuífero S: Tipo de suelo T: Topografía I: Impacto en el acuífero. Naturaleza de la zona no saturada C: Conductividad hidráulica del acuífero	$iV = (D_r \times D_w) + (R_r \times R_w) + (A_r \times A_w) + (S_r \times S_w) + (T_r \times T_w) + (I_r \times I_w) + (C_r \times C_w)$ r: Factor de clasificación o valoración w: Factor de ponderación
*GOD ⁽⁸⁾	G: Grado de confinamiento hidráulico. Hace referencia al tipo de acuífero o modo de confinamiento u ocurrencia del agua subterránea O: Litología de la zona no saturada. Se evalúa teniendo en cuenta el grado de consolidación y las características litológicas y como consecuencia, de forma indirecta y relativa, la porosidad, permeabilidad y contenido o retención específica de humedad de la zona no saturada. D: Profundidad del agua subterránea o del techo del acuífero confinado.	$iV = G \times O \times D$ Los parámetros G y O, pueden considerarse estables a lo largo del tiempo, mientras que el parámetro "D" es variable.
**SINTACS ⁽⁹⁾	S: Profundidad del agua I: Recarga neta N: Zona no saturada T: Topografía A: Medio acuífero C: Conductividad hidráulica S: Suelo	$iV = (S_r \times S_w) + (I_r \times I_w) + (N_r \times N_w) + (T_r \times T_w) + (A_r \times A_w) + (C_r \times C_w) + (S_r \times S_w)$ r: Puntuación (1 – 10) w: Peso (1 – 5)
**EPIK ⁽¹⁰⁾	E: Zona de intensa karstificación. P: Cobertura de protección I: Condiciones de infiltración K: Red kárstica.	$iV = (a \times E) + (b \times P) + (g \times I) + (d \times K)$ iV: factor de protección o índice de vulnerabilidad. E, P, I, K: puntuaciones de los parámetros a, b, g, d: factores de ponderación
**GALDIT ⁽²⁾	G: Tipo de acuífero A: Conductividad hidráulica del acuífero L: Nivel del agua subterránea sobre el mar D: Distancia tierra adentro perpendicular a la línea de costa I: Impacto existente de la intrusión marina T: Espesor del acuífero	$iV = (W1 \times G) + (W2 \times A) + (W3 \times L) + (W4 \times D) + (W5 \times I) + (W6 \times T)$ W ₁ a W ₆ son pesos relativos asignados a los 6 factores.
¹ Método para estimar la vulnerabilidad de acuíferos kársticos ² Método aplicado para vulnerabilidad a la intrusión marina ⁷ Método de puntuación –RS. ⁸ Método de puntuación y ponderación –PSCM..		iV = Índice de Vulnerabilidad

Figura 73. Métodos paramétricos para determinar la vulnerabilidad intrínseca, fuente (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010).

El análisis de vulnerabilidad de los acuíferos de la cuenca, se hizo mediante el uso de la metodología GOD, la cual califica la vulnerabilidad a la contaminación mediante una escala cualitativa que generalmente va desde una vulnerabilidad muy baja o despreciable, hasta vulnerabilidad extrema Tabla 16.

Tabla 16. Clases de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014)

CLASE DE VULNERABILIDAD	DEFINICIÓN
EXTREMA	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación
ALTA	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados en muchos escenarios de contaminación.
MODERADA	Vulnerable a algunos contaminantes sólo cuando son continuamente descargados o lixiviados.



BAJA	Sólo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo.
DESPRECIABLE	Presencia de capas confinantes en el flujo vertical (percolación)

En Colombia según el nivel de información hidrogeológica se ha empleado el método GOD (Foster, 1987), recomendado para áreas con escasa información, con irregular distribución de datos o con incertidumbre de los mismos. Éste método considera tres parámetros de evaluación: "G" para la ocurrencia del agua subterránea, "O" para la condición del substrato litológico y "D" para la profundidad del agua subterránea.

La metodología GOD da un puntaje a cada variable de acuerdo con la capacidad de atenuación del suelo. Una vez valorado cada parámetro se calcula el índice de vulnerabilidad total multiplicando los valores asignados a cada parámetro, obteniéndose valores de 0 a 1, donde un índice cero "0" indica una vulnerabilidad despreciable y el índice "1" revela vulnerabilidad extrema a la contaminación (Figura 74).

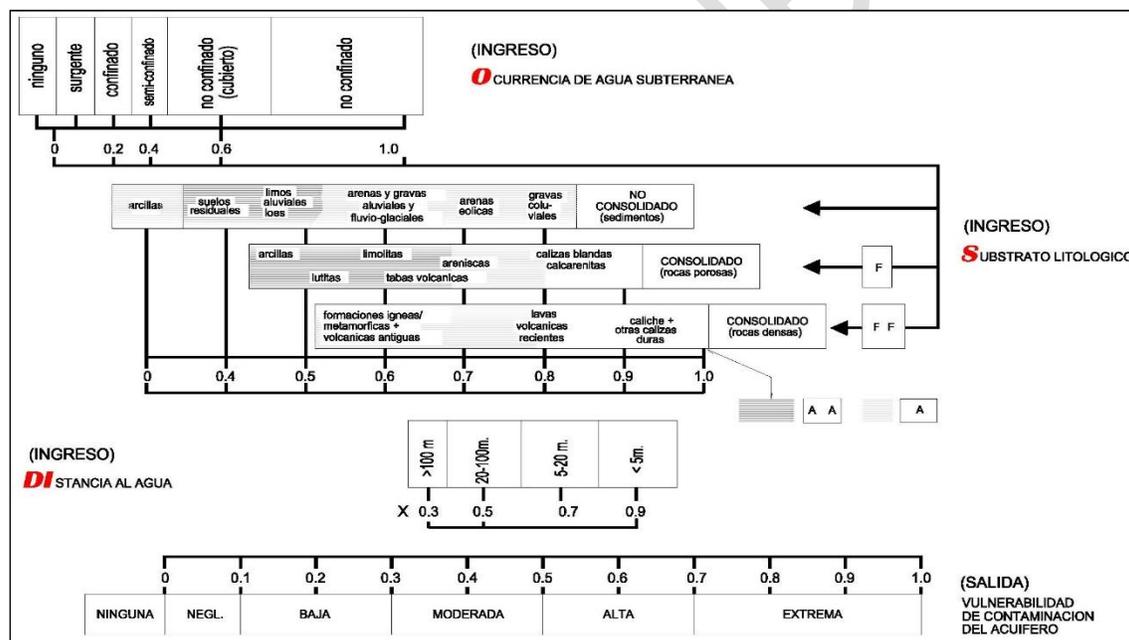
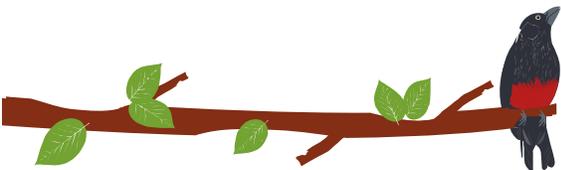


Figura 74. Metodología GOD, desarrollada por Foster (1987).

La vulnerabilidad intrínseca se representa mediante un mapa temático que muestra cualitativa o cuantitativamente ciertas características de un ambiente sub-superficial, que hace susceptible de contaminación al agua subterránea. Un Mapa de Vulnerabilidad representa un escenario estático de los riesgos ambientales para la previsión y degradación de la calidad del agua de los acuíferos, pero las variables G (ocurrencia del agua subterránea) y D (profundidad del agua subterránea) pueden variar con el tiempo, razón por la cual la evaluación de la vulnerabilidad debe ser sistemática.





Los mapas de vulnerabilidad son útiles como herramienta de planificación, de ordenamiento territorial, de gestión del presupuesto y de educación a la comunidad. Además, permiten identificar áreas susceptibles de transporte de contaminantes, definir zonas de protección, diseñar redes de monitoreo y definir acciones en caso de emergencia hídrica. Sin embargo, los mapas de vulnerabilidad tienen ciertas limitaciones cuando la información es insuficiente y poco representativa de la escala del mapa, la descripción del sistema es inadecuada, falta verificación y control de la evaluación de vulnerabilidad. A continuación, se muestra la Metodología GOD desarrollada por Foster (1987) para evaluar el Índice de Vulnerabilidad de Contaminación de los acuíferos.

La metodología de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las unidades hidrogeológicas del área, consiste en el análisis y procesamiento de los datos para la valoración de los parámetros GOD con información hidrogeológica existente empleando sistemas de información geográfica.

1.4.10.1.1 Parámetro G (Ocurrencia del Agua Subterránea)

En la zona de estudio se determinaron varios grados de productividad de los acuíferos, de acuerdo a las características hidrogeológicas, cada uno de los diferentes valores se asignaron de acuerdo al análisis realizado, los valores oscilan entre 0 y 1 (Tabla 17).

Tabla 17. Valores asignados al parámetro G de acuerdo al Tipo de Acuífero

NOM_UNIDAD_HIDROGEOLÓGICA	TIPO DE ACUÍFERO	FACTOR DE PONDERACIÓN (G)
Acuífero de materiales transportados Fluviotorrenciales	Libre	1
Acuífero ígneo extrusivo de las Diabasas y basaltos de San José de Urama.	Acuitardo confinado	0.2
Acuífero ígneo extrusivo de la Formación Barroso.	Acuitardo confinado	0
Acuífero ígneo extrusivo de los Basaltos de La Clara - Rio Calle.	Acuitardo confinado	0
Acuífero ígneo extrusivo del Basalto de El Botón.	Acuitardo confinado	0
Acuífero ígneo extrusivo del Complejo Santa Cecilia la Equis.	Acuitardo confinado	0
Acuífero ígneo intrusivo de la Diorita de Morrogacho.	Acuitardo	0
Acuífero ígneo de la Monzonita del Cerro Frontino.	Acuitardo	0
Acuitardo ígneo intrusivo de la Monzonita de Nudillales.	Acuitardo	0
Acuífero sedimentario de los Chert y calizas de Nutibara.	Acuífero confinado	0.2
Acuífero de las Litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao.	Acuífero confinado	0.2
Acuífero gravo arenoso de la Formación Guineales.	Libre	1
Acuífero sedimentario de las Sedimentitas de Beibaviejo.	Libre	1

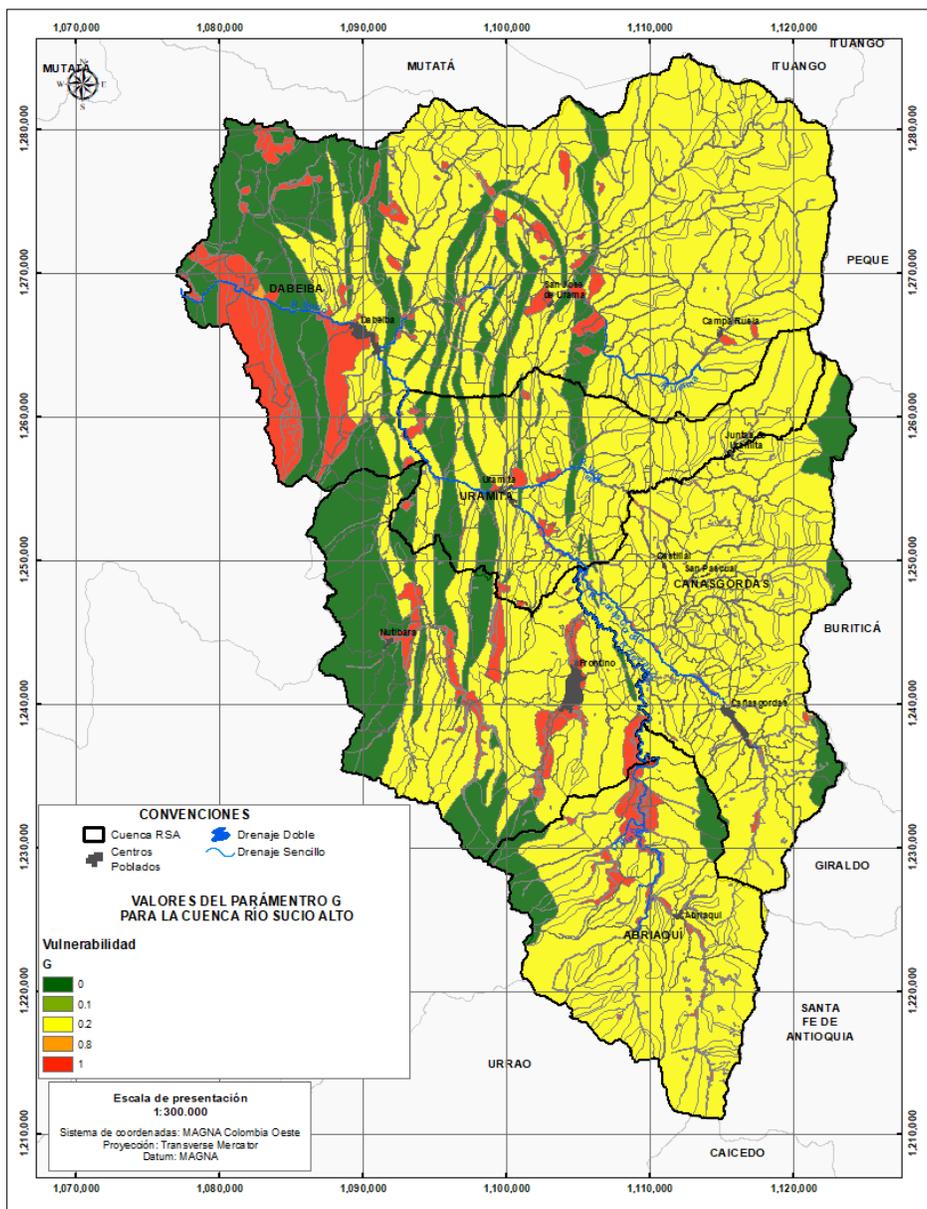
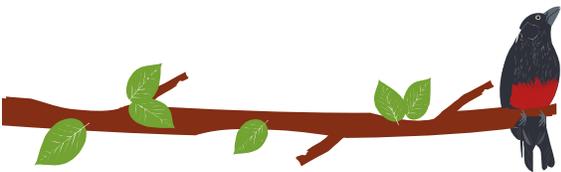


Figura 75. Parámetro G (Ocurrencia del Agua Subterránea) calculado para la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: elaboración propia.

1.4.10.1.2 Parámetro O (Sustrato Litológico de la Zona No Saturada)

Del mapa de predominio litológico de la zona no saturada se traza la distribución superficial de las diferentes clases litológicas determinadas, como se describe a continuación en la Tabla 18.

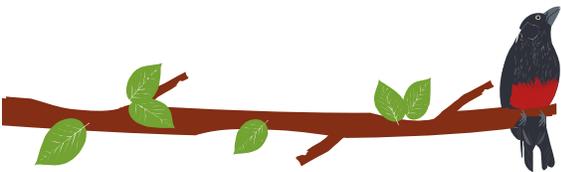


Tabla 18. Valores asignados al Sustrato Litológico de la Zona No Saturada

NOM_UNIDAD_HIDROGEOLOGICA	ZONA NO SATURADA	FACTOR DE PONDERACIÓN (O)
	Fragmentos tamaño bloques hasta grava gruesa de composición heterogénea, angulares a sub-angulares con poco transporte, los cuales están embebidos en una matriz arenosa o limo-arcillosa.	0.8
Acuífero de materiales transportados Fluviotorrenciales		
Acuífero ígneo extrusivo de las Diabasas y basaltos de San José de Urama.	Suelo residual	0.4
Acuífero ígneo extrusivo de la Formación Barroso.	Suelo residual	0.4
Acuífero ígneo extrusivo de los Basaltos de La Clara - Rio Calle.	Suelo residual	0.4
Acuífero ígneo extrusivo del Basalto de El Botón.	Suelo residual	0.4
Acuífero ígneo extrusivo del Complejo Santa Cecilia la Equis.	Suelo residual	0.4
Acuífero ígneo intrusivo de la Diorita de Morrogacho.	Suelo residual	0.6
Acuífero ígneo de la Monzonita del Cerro Frontino.	Suelo residual	0.6
Acuífero ígneo intrusivo de la Monzonita de Nudillales.	Suelo residual	0.6
Acuífero sedimentario de los Chert y calizas de Nutibara.	Suelo residual	0.4
Acuífero de las Litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao.	Suelo residual	0.4
Acuífero gravo arenoso de la Formación Guineales.	Suelo residual	0.8
Acuífero sedimentario de las Sedimentitas de Beibaviejo.	Suelo residual	0.8

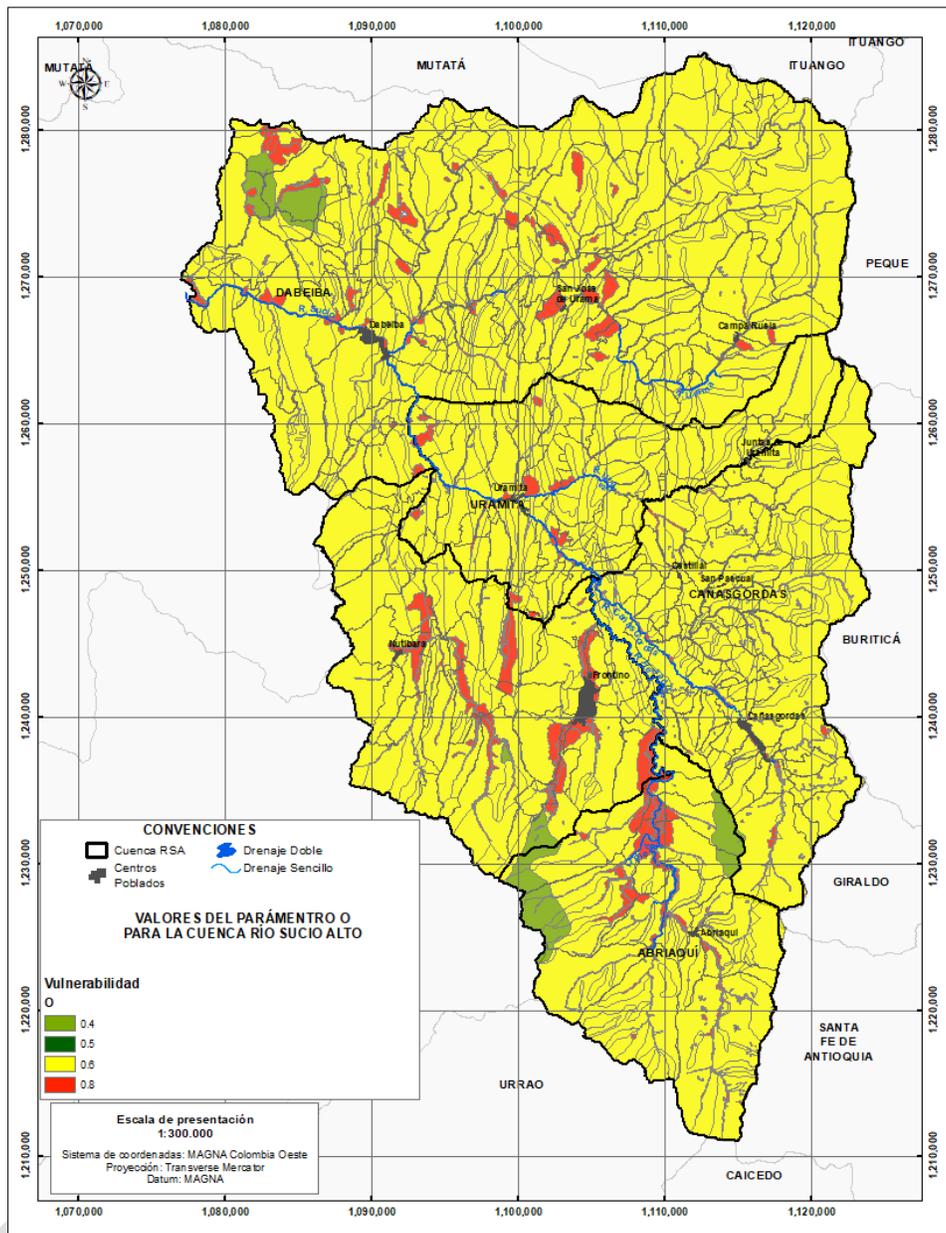
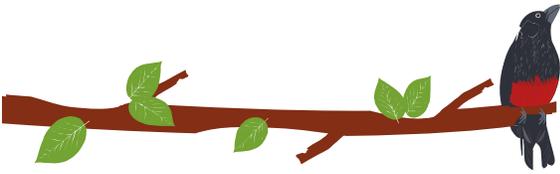
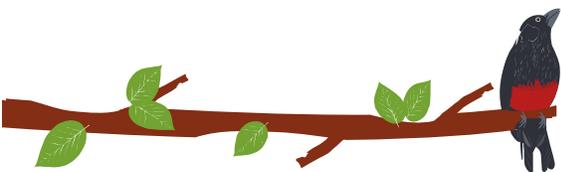


Figura 76. Parámetro O (Sustrato Litológico de la Zona No Saturada) calculado para la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: elaboración propia.

1.4.10.1.3 Parámetro D (Sustrato Litológico de la Zona no Saturada)

Para la evaluación de la vulnerabilidad se utilizaron datos de niveles, con el objeto de evaluar el parámetro en la condición más crítica del sistema para el acceso del contaminante del acuífero (Tabla 19). En la zona se tomaron 22 niveles freáticos medidos en los diferentes puntos de los piezómetros del área (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

Tabla 19. Valores de nivel estático en los piezómetros del área

ID	ESTE	NORTE	NIVEL ESTÁTICO (m)
Pz 11-1	1128942.09	1227827.32	16.24
Pz 12-2	1128626.00	1227933.00	18.00
Pz 13-1	1128473.00	1227947.00	30.00
Pz 13-2	1128328.00	1227989.00	24.00
Pz 14-1	1127906.00	1228570.00	27.00
Pz 14-2	1127818.00	1228758.00	48.60
Pz 14-3	1127271.60	1228951.64	56.22
Pz 1516-2	1126402.00	1229428.00	14.80
Pz 1516-3	1126326.00	1229588.00	9.80
Pz 1516-4	1126210.00	1229905.00	21.78
Pz 17-1	1126138.00	1230229.00	18.09
Pz 17-2	1125879.00	1230784.00	32.94
Pz 17-3A	1124397.00	1231920.00	22.00
Pz 17-4B	1124594.00	1231809.00	21.29
Pz 17-5	1122220.00	1232872.00	6.78
Pz 17-6	1121037.25	1233828.44	49.30
Pz 17-7	1121017.00	1234244.00	57.13
Pz 17-8	1119699.00	1235167.00	56.26
Pz 17-9	1119034.48	1235707.81	55.70
Pz 17-10	1118482.00	1235789.00	18.74
Pz 18-2	1116851.00	1237637.00	26.50
Pz 18-3	1116820.00	1237735.00	16.00

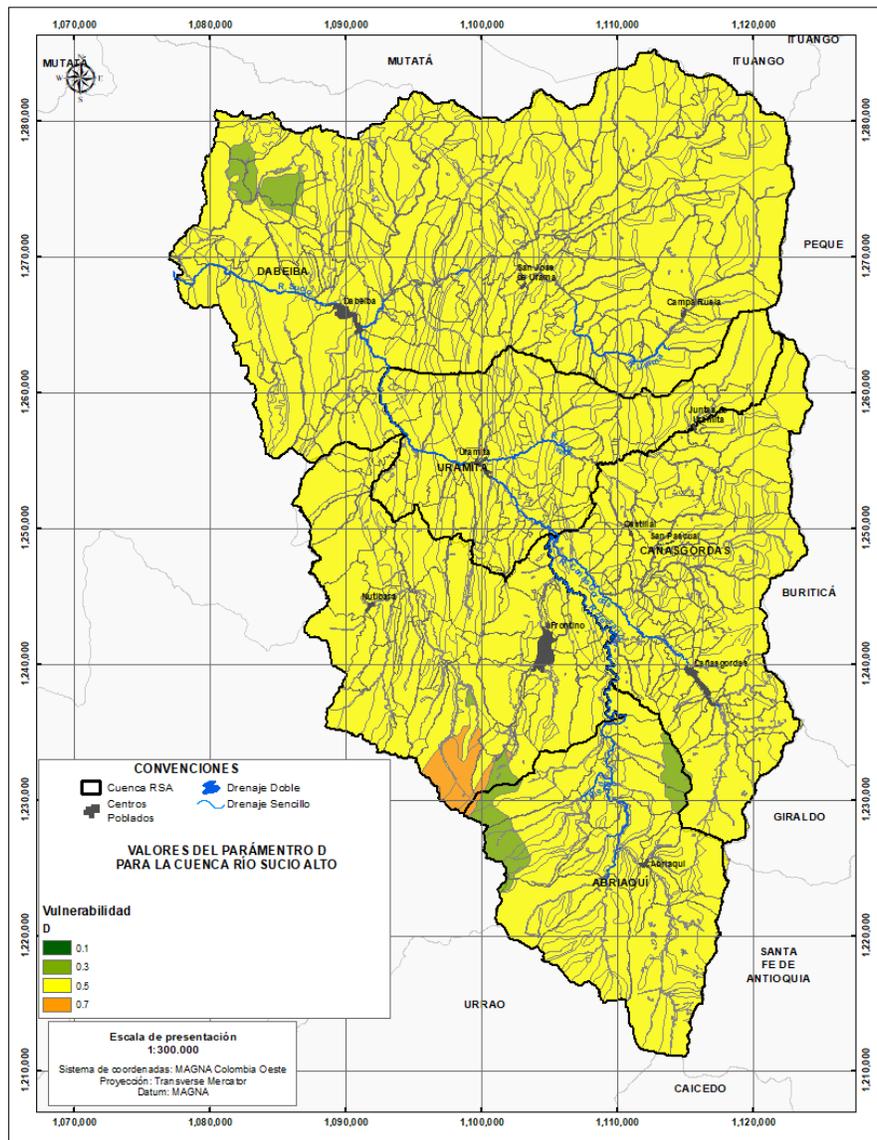
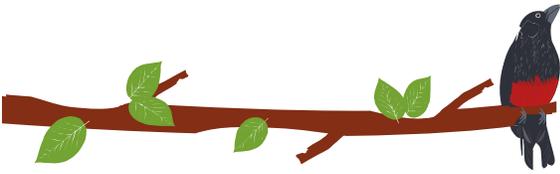
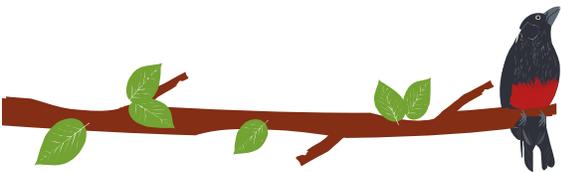


Figura 77. Parámetro D (Sustrato Litológico de la Zona no Saturada) calculado para la cuenca Río Sucio Alto.
Fuente: elaboración propia.

1.4.10.1.4 Resultados del análisis GOD

Empleando el Sistema de Información Geográfica se procede al álgebra de mapas, importado los mapas de cada uno de los Parámetros empleados para la metodología GOD al SIG a través de su módulo de importación y simplificando la operación matemática:

$$\text{MAPA GOD} = G * O * D$$



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

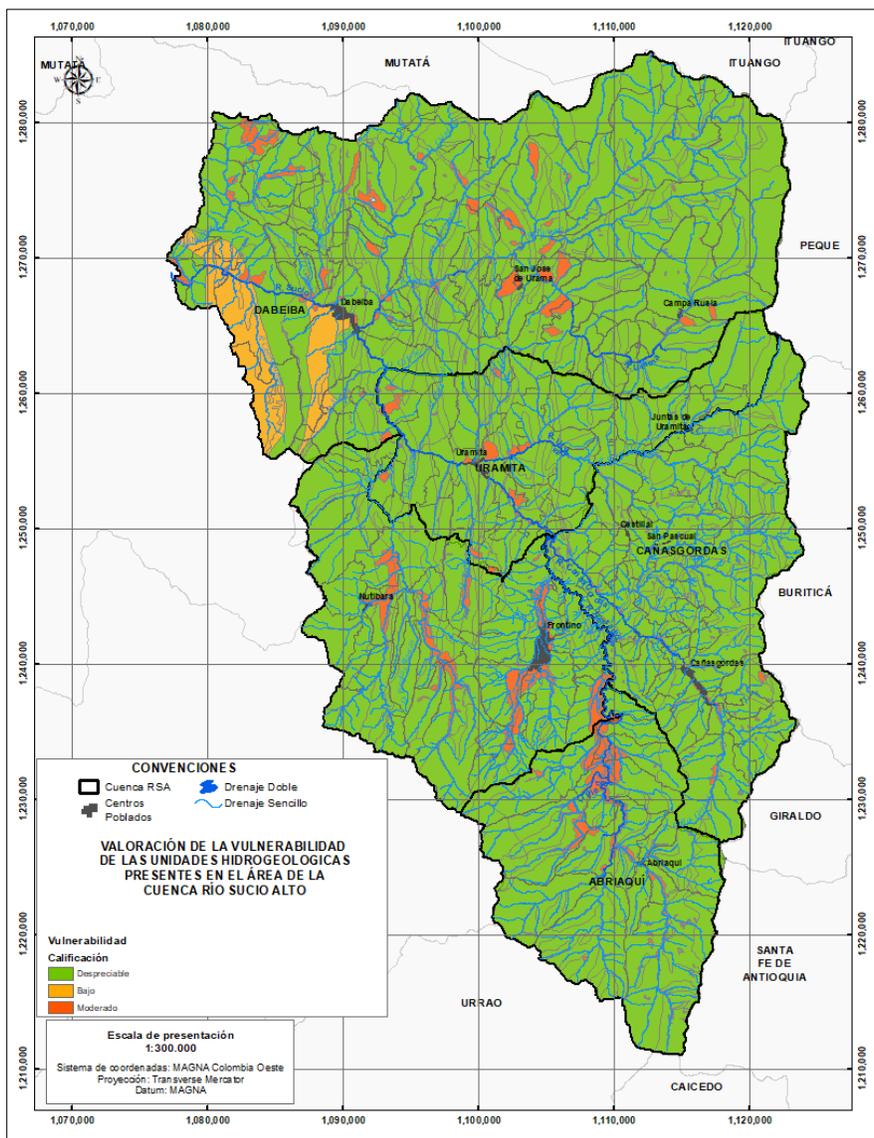
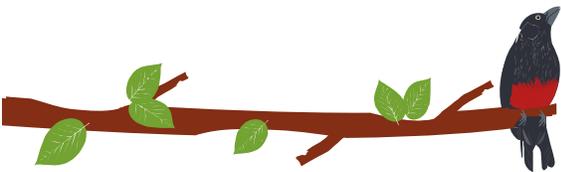


Figura 78. Mapa de índices de vulnerabilidad GOD del área de la cuenca Río Sucio Alto. Fuente: elaboración propia.

El resultado para el Mapa de Vulnerabilidad mediante los índices GOD, se presenta en la Figura 78, reconociendo tres zonas principales: vulnerabilidad despreciable, en la mayor parte de la cuenca, evidenciando la presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante, vulnerabilidad baja, se presenta en zonas que por su porosidad primaria pueden ser susceptibles a la contaminación (Formación Guineales y Beibaviejo), vulnerabilidad moderada, en áreas sensible a algunos contaminantes sólo cuando son continuamente descargados o lixiviados, describiéndose como zona vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados en muchos escenarios de contaminación, en esta categoría encontramos todos aquellos depósitos aluviales.



1.4.11 ASPECTOS DE ESPECIAL IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA

Como resultado de la fase de diagnóstico se determinaron las áreas que revisten una especial importancia hidrogeológica y que, por tanto, serán objeto de establecimiento de medidas de manejo específicas o de estrategias de protección diferenciales. Entre las áreas de especial importancia hidrogeológica se encuentran las zonas de recarga prioritaria, las áreas con mayor vulnerabilidad a la contaminación. A continuación, se abordarán aspectos generales que servirán de insumo para la determinación de zonas o condiciones de especial importancia hidrogeológica.

1.4.11.1 Zonas Potenciales de Recarga Hídrica

Parte de la precipitación que se infiltra en los acuíferos de porosidad secundaria y fluye controlada por el fracturamiento. Una pequeña parte de ella se percola en profundidad y otra fracción fluye hacia el drenaje superficial, convirtiéndose en flujo base.

Aunque no se dispone de toda la información necesarias para delimitar las zonas de recarga a escala detallada, nos ayudamos de la cartográfica temática existente (topografía, suelos, vegetación, geología, e información climática) para establecer el área de recarga potencial por precipitación (Figura 84), con objeto de priorizar las zonas de conservación para la regulación hídrica y de fuentes abastecedoras de la población (Artículo 1o de la Ley 99 de 1993).

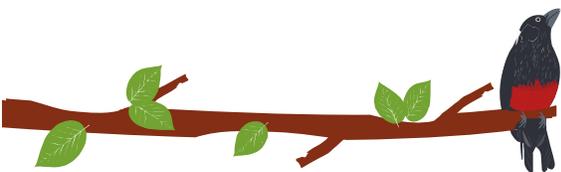
En las áreas de pendientes mayores, la vegetación natural previene la escorrentía y favorece la infiltración y por lo mismo, la deforestación incrementa la escorrentía, por lo tanto, existirá un decremento del agua disponible para la recarga. En zonas bajo cobertura boscosa, al reducirse la escorrentía, hay más agua disponible para la recarga debido a la función de "captura de agua" inherente a esas coberturas. En consecuencia, la protección de dichas áreas debe contemplar el mantenimiento de la capacidad de infiltración de la superficie del terreno mediante la prohibición su intervención (aumento de la frontera agrícola) y mediante la reforestación con especies nativas con bajas necesidades de agua (Figura 84).

Por otra parte, la conservación y/o mejoramiento de la calidad del agua subterránea demanda normas especiales sobre el uso del suelo en las zonas de recarga, como son el prohibir el desarrollo de actividades que se puedan erigir en focos contaminantes para el agua subterránea como lo son las zonas de explotación minera, mataderos, porquerizas y galpones, pozos sépticos.

Las zonas potenciales de recarga se determinaron según la metodología desarrollada por (Matus, Faustino, & Jiménez, 2009), en la cual se toma en cuenta una serie de variables utilizados en el modelo, el cual se realiza con ayuda de los sistemas de información geográfica y de herramientas como ArcGIS. Donde cada una de estas variables son reclasificadas y asignado un peso a cada una de las categorías, arrojando valores que van del 1 al 5, con valores cercanos a 1 en zonas menos favorables para la recarga hídrica y 5 con una mayor favorabilidad.

Los elementos utilizados en el modelo propuesto son:

- Pendiente (Pend)
- Suelo (Ts)
- Geología (Tr)
- Cobertura vegetal (Cve)



- Usos del suelo (Us)

Una vez se tiene cada uno de los elementos identificados y con su peso debidamente asignado, se procede a reemplazar cada variable en la siguiente ecuación:

$$ZR = [0.27*(Pend)+0.23*(Ts)+0.12*(Tr)+0.25*(Cve)+(0.13*(Us))]$$

Los pesos asignados dependen de las características evaluadas y del criterio de cada uno de los integrantes del equipo técnico en cada una de las áreas, adicionalmente se tiene como base los parámetros establecidos en la guía metodológica, con valores establecidos para cada elemento, y cuyos resultados para la cuenca del Río Sucio Alto se muestra a continuación.

• **Pendiente (Pend)**

Uno de los elementos utilizados corresponde a las pendientes, los cuales son un indicador de movilización del agua sobre la superficie del terreno, donde algunas condiciones hacen más factible un escurrimiento de las aguas o la estancia y posterior infiltración a profundidad, por ejemplo en zonas de altas pendientes se tiene una mayor velocidad en la escorrentía y un menor tiempo de contacto con el suelo, caso contrario en zonas planas, así, por lo tanto el peso asignado a cada uno de los rangos de pendiente se observa en la siguiente tabla (Tabla 20):

Tabla 20. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según tipo de pendiente.

Pendiente	Pendiente (%)	Posibilidad de recarga	Ponderación
Plana a ligeramente inclinada	0 - 7	Muy alta	5
Moderada a fuertemente inclinada	7 - 25	Alta	4
Ligeramente escarpada	25 - 50	Moderada	3
Moderadamente escarpada	50 - 75	Baja	2
Fuertemente a totalmente escarpada	Mayor a 75	Muy baja	1

El resultado cartográfico una vez se realiza la reclasificación es el siguiente (Figura 79):

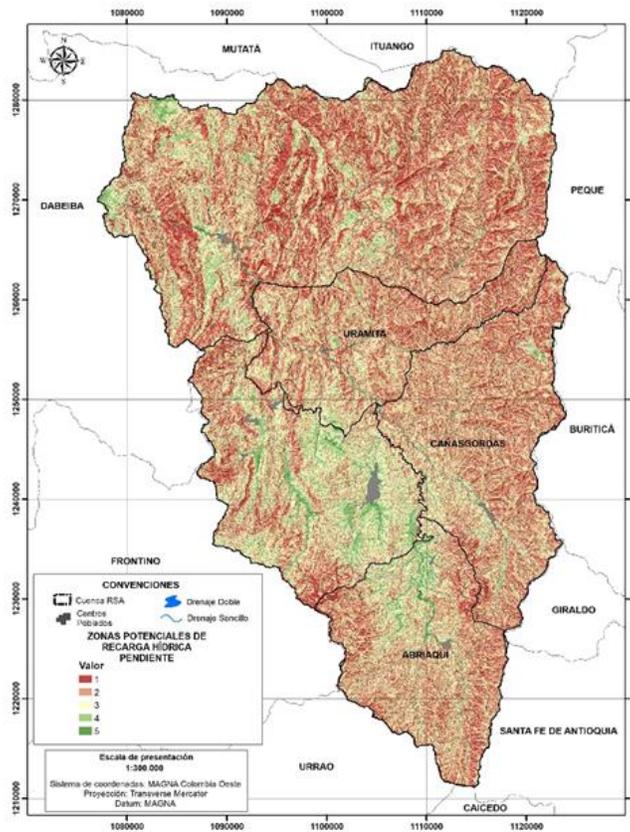
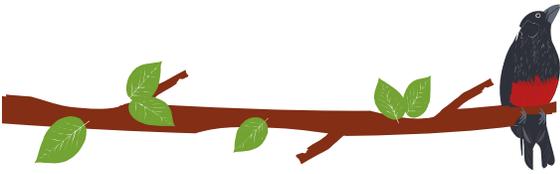


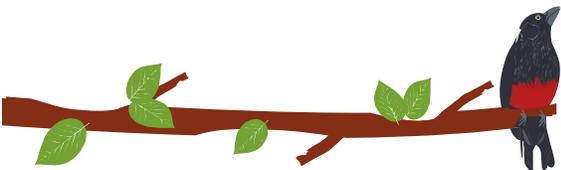
Figura 79. Mapa de pendientes utilizado para determinar las zonas potenciales de recarga hídrica.

- **Suelo (Ts)**

Otro elemento considerado en el modelo corresponde al suelo, y se encuentra relacionado con su capacidad de almacenar y transmitir agua, según algunas propiedades como la textura, porosidad, permeabilidad y compactación, definido su capacidad de infiltración, donde suelos formados por partículas gruesas permiten con mayor facilidad el paso del agua a través de su estructura, contrario a suelos de grano fino que presentan un comportamiento impermeable. Para la cuenca en específico se utiliza la clasificación en el grupo de manejo que describe en detalle las características de cada uno de los tipos de suelo presentes, y cuyo valor asignado se observa a continuación (Tabla 21):

Tabla 21. Ponderación de la capacidad de recarga hídrica del suelo según su textura.

Textura (Grupo Manejo)	Posibilidad de recarga	Ponderación
3hs-2, 4s-2, 4es-2, 4hs-2, 4hs-3, 6s-3, 7s-3, 4s-5, 4s-3, 3s-5, 4es-8,	Muy alta	5
4pes-2, 5hs-2, 5hs-3, 6s-2, 7s-2, 7es-3, 7es-4, 6es-8, 6es-2, 7es-2, 4es-5, 6es-5,	Alta	4
6p-1, 6ps-2, 6pe-2, 6pe-3, 6pes-3, 6peh-3, 6p-3	Moderada	3



7p-1, 7ps-1, 7pes-1, 7p-2, 7pe-2, 7ps-2, 7pes-2, 7p-3, 7pe-3, 7pes-3, 7ps-3, 7,	Baja	2
4ps-1, 8p-2, 8pe-3, 8,	Muy baja	1

El resultado cartográfico una vez se realiza la reclasificación es el siguiente (Figura 80):

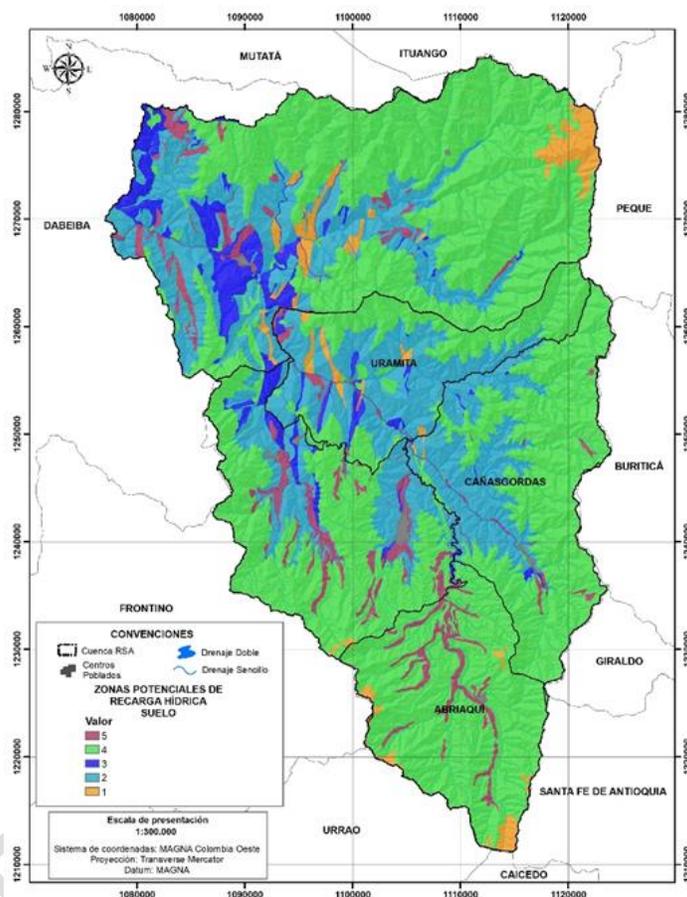


Figura 80. Mapa de suelos utilizado para determinar las zonas potenciales de recarga hídrica.

- **Geología (Tr)**

El tipo de roca también demarca algunas zonas las cuales pueden presentar un potencial de recarga hídrica especialmente a niveles profundos y su relación con los acuíferos presentes, donde las características de la roca influyen directamente en su comportamiento hidrogeológico, y me determinan propiedades como porosidad y permeabilidad, las cuales favoreces o no la recarga hídrica. Por ejemplo, rocas masivas ígneas o metamórficas presenta un comportamiento impermeable, por el contrario, rocas sedimentarias detríticas por sus características pueden presentar estratos propicios para la circulación del agua, incluso la formación de acuíferos, como caso específico en la cuenca las unidades se clasificaron de la siguiente manera (Tabla 22).

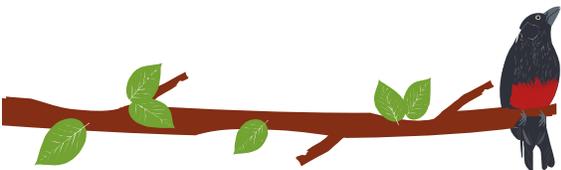


Tabla 22. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según unidad geológica.

Unidad Geológica	Posibilidad de recarga	Ponderación
Depósitos aluviales, Terrazas aluviales, Depósitos coluviales,	Muy alta	5
Sedimentitas de Beivaviejo, Formación Guineales	Alta	4
Litoarenitas, limolitas y lodolitas de Urrao	Moderada	3
Formación Barroso, Chert y calizas de Nutibara, Complejo Santa Cecilia la Equis,	Baja	2
Diabasas y basaltos de San José, Basaltos de El Botón, Monzonita de Nudillales, Basaltos de La Clara – Río Calle, Monzonita del Cerro Frontino, Diorita de Morrogacho,	Muy baja	1

El resultado cartográfico una vez se realiza la reclasificación es el siguiente (Figura 81):

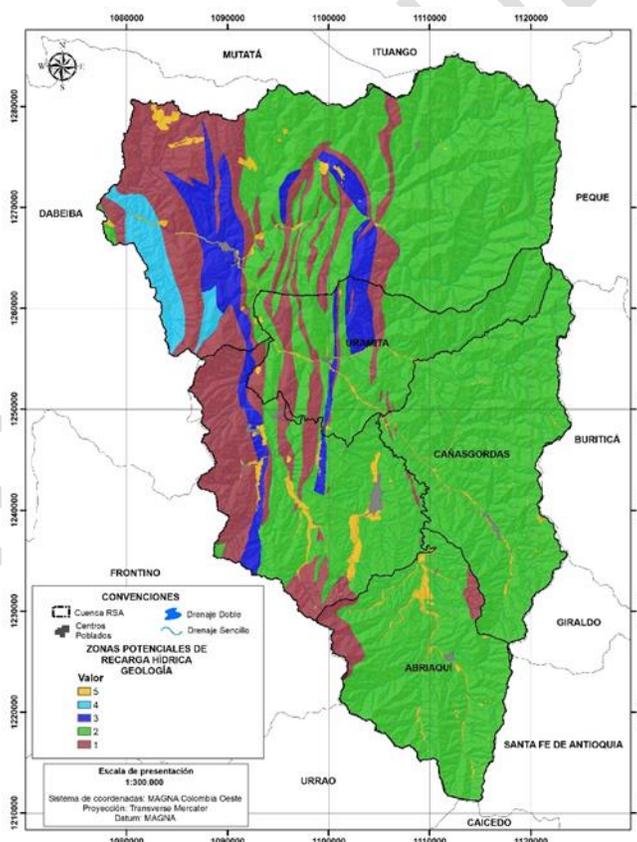
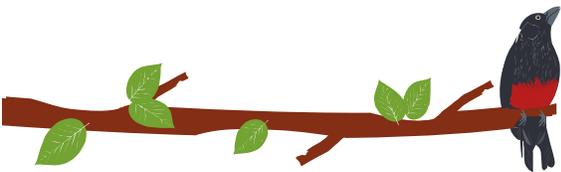


Figura 81. Mapa de unidades geológicas utilizado para determinar las zonas potenciales de recarga hídrica.



- **Cobertura vegetal (Cve)**

La vegetación corresponde a otro de los elementos que influyen en la recarga hídrica, donde su presencia permite un mayor contacto de las aguas con el suelo, se tiene una menor velocidad de escorrentía, disminuye la erosión, el impacto de las gotas de lluvia y la sequedad causada por los rayos del sol; condiciones que pueden facilitar la infiltración de las aguas, caso específico de la cuenca donde la presencia de vegetación alta o bosques pueden favorecer la recarga hídrica, y a medida que esta cubierta vegetal disminuye o se pierde en su totalidad las aguas circularían rápidamente en superficie y no habría lugar para infiltración, valores asignados a cada categoría que se observan a continuación (Tabla 23).

Tabla 23. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según cobertura vegetal.

Cobertura vegetal	Posibilidad de recarga	Ponderación
Áreas húmedas, Superficies de agua	Muy alta	5
Bosques y áreas seminaturales	Alta	4
Territorios agrícolas	Moderada	3
	Baja	2
Territorios artificializados	Muy baja	1

El resultado cartográfico una vez se realiza la reclasificación es el siguiente (Figura 82):

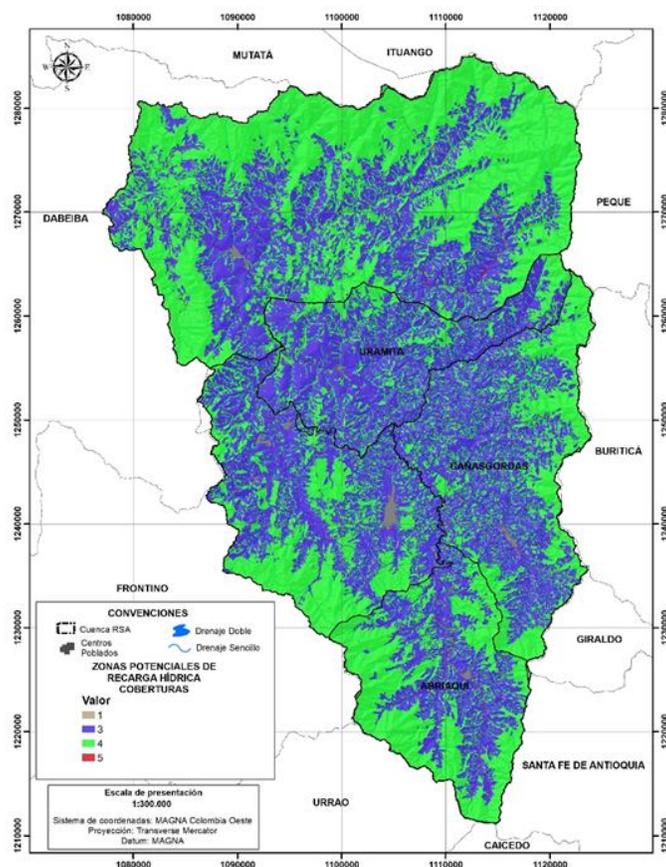
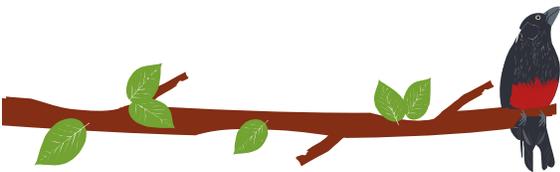


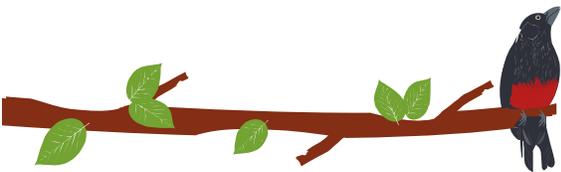
Figura 82. Mapa de coberturas vegetales utilizado para determinar las zonas potenciales de recarga hídrica.

- **Usos del suelo (Us)**

Finalmente, se incluye la acción antropica representada en el uso del suelo, donde el manejo inadecuado de ciertas áreas puede influir directamente sobre la recarga hídrica, por ello es necesario determinar un grado de afectación por ciertas actividades agrícolas sobre el suelo y su nivel actual de infiltración. En la cuenca se pueden encontrar usos como sistemas silvopastoriles y forestales protectores y productores que favorecen las condiciones del suelo y permiten un mayor grado de infiltración de las aguas, caso contrario con el pastoreo extensivo que modifica notablemente las condiciones del suelo, con una mayor compactación, ocasionando una pérdida de la cobertura vegetal y por lo tanto un mayor escurrimiento, y aumento en los niveles de evaporación de las aguas. Valores asignados a cada categoría de usos del suelo que se observa a continuación (Tabla 24):

Tabla 24. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el uso del suelo.

Uso del suelo	Posibilidad de recarga	Ponderación
Áreas para la conservación y/o recuperación de la naturaleza, recreación (CRE)	Muy alta	5



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

Sistemas silvopastoriles (SPA), Sistemas forestales protectores (FPR), Sistema forestal productor (FPD)	Alta	4
Sistemas agrosilvícolas (AGS), Sistemas agrosilvopastoriles (ASP)	Regular	3
Cultivos transitorios semi-intensivos (CTS), Cultivos permanentes semi-intensivos (CPS)	Baja	2
Pastoreo extensivo (PEX)	Muy baja	1

El resultado cartográfico una vez se realiza la reclasificación es el siguiente (Figura 83):

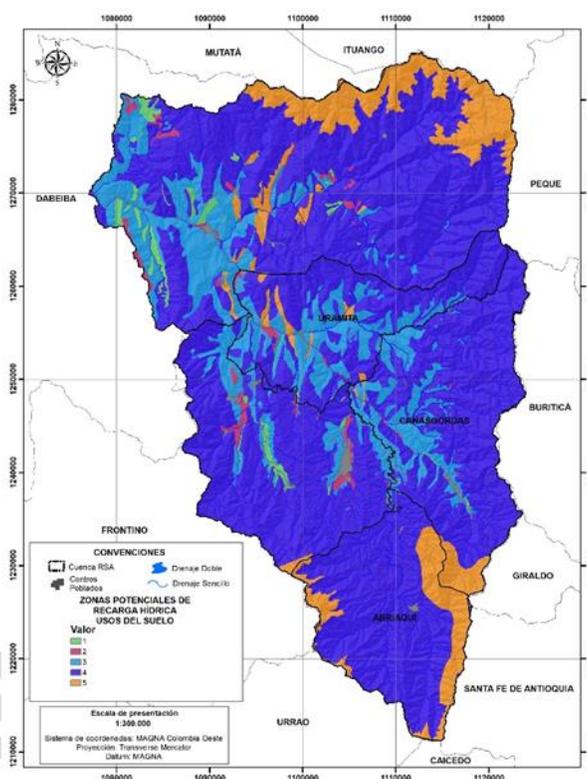
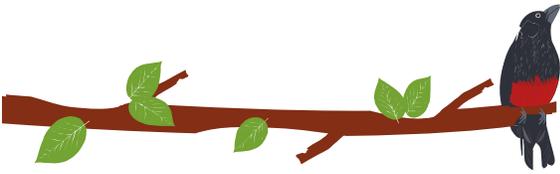


Figura 83. Mapa de usos del suelo utilizado para determinar las zonas potenciales de recarga hídrica.

El resultado final obtenido para las zonas potenciales de recarga hídrica es el siguiente (Figura 84):



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

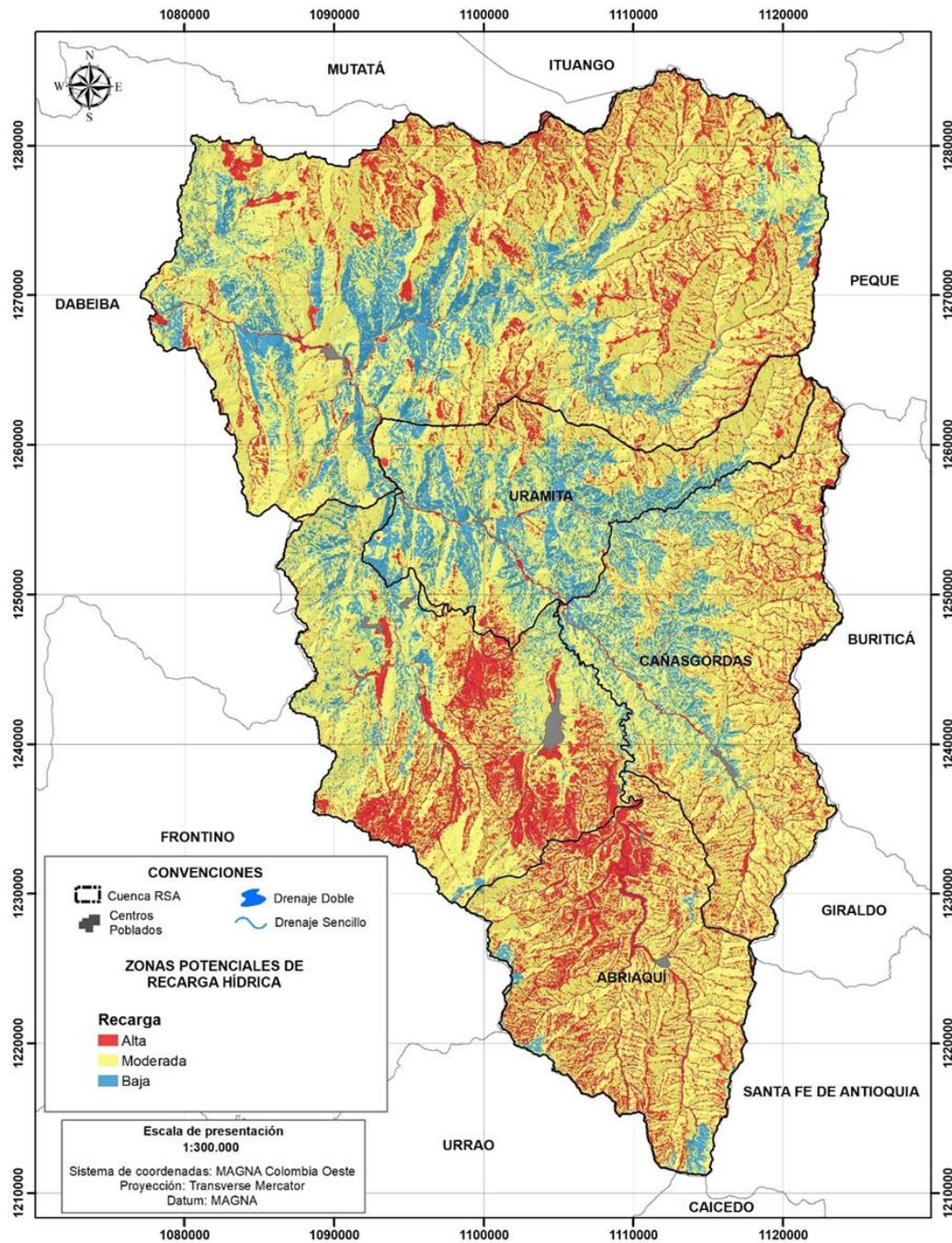
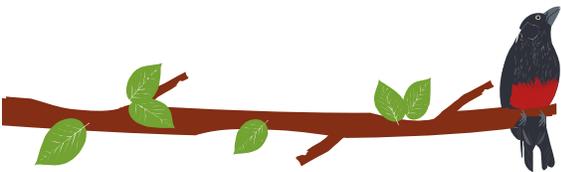


Figura 84. Zonas potenciales de recarga hídrica para la cuenca Río Sucio Alto.

El proceso de infiltración que sucede en la cuenca Río Sucio Alto, se da fácilmente en las capas de suelo residual de las unidades geológicas presentes en la cuenca, el agua lluvia se infiltra fácilmente y de manera rápida en este horizonte superior donde se manejan espesores de hasta 45 m., con porosidad primaria y permeabilidad, en los suelos residuales, principalmente los de la Formación Urrao (K2alu), esta capa suele ser un nivel con materia orgánica y macroporos, el agua percolada fluye verticalmente hacia



abajo, hasta llegar al horizonte mineral menos permeable de la roca, que actúa como una primera base semipermeable; da lugar a un nivel freático de carácter temporal y colgado, donde en el horizonte superior se produce un flujo subsuperficial según la pendiente de la ladera (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

El mapa obtenido de las zonas potenciales de recarga hídrica, arroja una serie de lugares donde se presentan diferentes niveles de recarga, distribuidos a lo largo de toda la cuenca, los valores altos se localizan en las partes más elevadas a lo largo de cada uno de los municipios, con una mayor concentración en los municipios de Abiquí y Frontino. Por su parte los valores bajos se localizan hacia las partes medias y bajas de los valles de los drenajes que cruzan los municipios de Cañasgordas, Uramita y Dabeiba, incluyendo zonas alrededor del río Sucio.

1.4.12 DEFICIENCIAS DE INFORMACIÓN

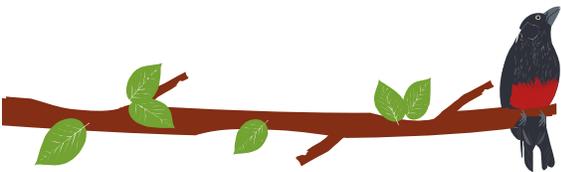
Como se puede notar en el desarrollo de este capítulo, para el tema hidrogeológico, en el área de la cuenca Río Sucio Alto, sólo se encuentra registrado el ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA EL PROYECTO TÚNEL DEL TOYO Y SUS VÍAS DE ACCESO, EN LOS MUNICIPIOS DE GIRALDO Y CAÑASGORDAS, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016), y el estudio AUTOPISTA AL MAR 2. CAPÍTULO 9. ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS DE TÚNELES (Consortio TYPASA-CRA, 2014), los cuales cubren un área de 20 Km² para la cuenca, lo que representa el 0,9 % del área total de la cuenca, lo que significa que existen grandes vacíos y deficiencia en la información, particularmente en la prospección de agua subterránea que proporcione información geofísica e hidrogeológica para toda el área de la cuenca que permita generar un modelo hidrogeológico conceptual definitivo, si valoramos en términos porcentuales la información consultada, se puede decir que alcanza a cubrir un 50% para el análisis del recurso hídrico subterráneo.

Por consiguiente, en este capítulo, se presenta una evaluación hidrogeológica preliminar de las formaciones litoestratigráficas que afloran en la cuenca con base en la cartografía geológica, estratigrafía y geomorfología, análisis del balance hídrico obtenido para la cuenca Río Sucio Alto y el ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA EL PROYECTO TÚNEL DEL TOYO Y SUS VÍAS DE ACCESO, EN LOS MUNICIPIOS DE GIRALDO Y CAÑASGORDAS, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

1.4.13 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como el objetivo de este capítulo, es efectuar una caracterización hidrogeológica para la cuenca desde un marco regional a partir de la geología, geomorfología básica, balance hídrico generados para el POMCA, además del análisis de la información secundaria disponible con el fin de desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual que ayude establecer medidas de manejo ambiental para los acuíferos presentes en la cuenca, se concluye que los resultados del trabajo son coherentes con la necesidad de delimitar unidades hidrogeológicas con base en un modelo geológico básico del subsuelo reconociendo la geometría y las fronteras tectono-estratigráficas de las unidades acuíferas regionales, haciendo posible a través del conocimiento geológico determinar la posibilidad de ocurrencia de aguas subterráneas a partir de la geometría y el tipo de roca presente en el subsuelo con la aplicación de técnicas directas de observación en afloramientos, sin perder de vista que la zona presenta una complejidad tectónica





determinada por los esfuerzos que ha sido sometida, influenciada por el conjunto de fallas regionales y locales que actúan como barrera para el flujo de aguas subterráneas.

Las unidades acuíferas delimitadas están directamente relacionadas con las condiciones geológicas de la roca o sedimento, que por almacenar y transmitir el agua se denominan acuíferos o por su carácter semipermeable o permeable pueden ser acuitardos o acuífugos, de acuerdo con la capacidad de las rocas para almacenar y transmitir el agua. En el área de la cuenca Río Sucio Alto, se pueden diferenciar diferentes tipos de acuíferos. Estratos de materiales no consolidados (suelos residuales de arenas, limos, arcillas) de unos 45 m de espesor máximo, una capa de roca alterada y fracturada en las partes superficiales y el basamento de roca sana, un macizo rocoso fracturado con porosidad secundaria.

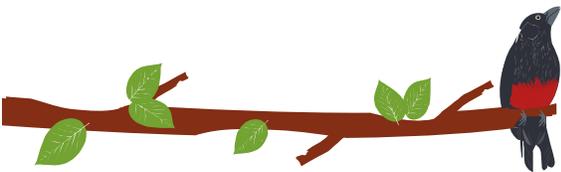
Teniendo en cuenta la conformación de las unidades geológicas y la afectación por factores tectónicos; el área de la cuenca se dividió en tres bloques hidrogeológicos estructurales representativos.

El BLOQUE URRAO, al oriente se presenta como una secuencia detrítica conformado por arenitas conglomeráticas a arenitas de grano medio, es un bloque con importancia hidrogeológica relativa muy pequeña dada su porosidad primaria y secundaria, las fallas de la Herradura y Uramita que lo separan del bloque Urama, puede actuar como barrera impermeable, este bloque representa el 75% del área de la cuenca. La porosidad de los suelos residuales, en general es moderada, si tenemos en cuenta los resultados de la granulometría realizados para la cuenca, en donde se encuentran materiales arenosos compuesto principalmente por arenas limosas y arcillosas (SC y SM), cuyos espesores varían de 15 a 45 m, es considerado un acuífero libre de carácter local de porosidad primaria, recargado por la precipitación y el flujo lateral de las corrientes superficiales, a los cuales poseen una conductividad hidráulica de 0.01 m/d (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.- HIDROGEOCOL S. A., 2016).

El BLOQUE URAMA, ocupa la parte central de la cuenca y está conformado por una secuencia de cherts y calizas, anómalamente intercalados con segmentos alargados de diabasas provenientes del basamento, muy afectadas tectónicamente, rocas con porosidad secundaria con importancia hidrogeológica relativa muy pequeña o nula. Rocas fracturadas que desarrollan permeabilidad secundaria a lo largo de las aberturas de las fracturas y son capaces de albergar agua en cantidad dependiendo de la frecuencia del grado de fracturamiento. Dentro de este grupo se encuentran las unidades geológicas del Grupo Cañasgordas CHERT Y CALIZAS DE NUTIBARA (K2cn), DIABASAS DE SAN JOSÉ DE URAMA (JK1du) FORMACIÓN BARROSO, COMPLEJO SANTA CECILIA-LA EQUIS (E1csce) BASALTO DE EL BOTÓN (N1n4n5bb). También se encuentran en este bloque rocas cristalinas formadas en ambiente ígneo intrusivo y metamórfico con importancia hidrogeológica relativa muy pequeña o nula, en este grupo se encuentran las unidades geológicas Monzonita del Cerro Frontino (Nmcf) Monzonita de Nudillales (N1n4n5mn) Diorita de Morrogacho (Ndmg).

El BLOQUE RIO VERDE – PUEBLO RICO, ocupa la parte occidental de la cuenca, albergando las rocas con importancia hidrogeológica relativa grande para la cuenca dada su porosidad primaria, formaciones geológicas de baja resistencia, rocas sedimentarias del Terciario, de baja consolidación diagenética o pobremente litificadas, con estratificación laminar o de capas delgadas, o rocas intensamente fracturadas, de moderada a altamente descompuestas, representadas por las intercalaciones de arenitas con conglomerados y lentes arenosos de la Formación Guineales (N1N2g) y las areniscas, tufitas, lodolitas, lignito y shales calcáreos con nódulos de calizas de la





Formación Sedimentitas de Beivaviejo (N1sb), actúan como acuíferos libres a semiconfinados, dado su porosidad primaria.

En total se identificaron 6 unidades hidrogeológicas con posibilidades de agua subterráneas y 2 unidades hidrogeológicas con recursos limitados a nulos. Estas últimas corresponden a macizos y unidades tectónicas igneometamórficas que por su litología constituyen límites impermeables para el flujo de las aguas subterráneas.

Se recomienda adelantar estudios de exploración hidrogeológicas para la cuenca Río Sucio Alto con el fin de obtener el conocimiento suficiente para poder generar el Modelo Hidrogeológico Conceptual de la misma y de esta forma establecer las medidas para el manejo del recurso hídrico subterráneo, en relación a la oferta, demanda, calidad hídrica, riesgo y gobernabilidad, teniendo en cuenta que:

- El agua subterránea puede llegar a ser la principal fuente de abastecimiento para consumo humano.
- De acuerdo a las características hidrogeológicas los acuíferos presentes en la cuenca pueden ser estratégicos para el desarrollo socio-económico de la región.
- Porque estos acuíferos son la fuente alterna por desabastecimiento de agua superficial, debido a riesgos antrópicos o naturales (cambio climático).
- Se recomienda considerar como preliminares los resultados obtenidos, los cuales serán complementados con los resultados obtenidos en los estudios geofísicos e hidráulicos como de sondeos eléctricos verticales, pruebas de bombeo y pozos exploratorios para definir con mejores parámetros el potencial hidrogeológico de las unidades geológicas presentes en la cuenca.

El sector suroriental de la cuenca, específicamente en el área de influencia de la obra Túnel del Toyo cuenta con un análisis hidrogeológico detallado de carácter local, que detalla las propiedades hidrogeológicas de las unidades geológicas presentes en el área, en donde la Formación Urrao es la más relevante (CONSORCIO ANTIOQUIA DEL MAR.-HIDROGEOCOL S. A., 2016), información que ha sido tenida en cuenta en este análisis.