

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE
SUBDIRECCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO Y DEL SUELO

SISTEMA DE MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL DISTRITO CAPITAL
BOGOTÁ

JAIRO ALFREDO VELOZA FRANCO

OPS 723 DE 2012

Bogotá, D.C. 2013

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. GENERALIDADES	18
1.1 LOCALIZACIÓN	18
1.2 ANTECEDENTES HIDROGEOLÓGICOS	20
2. GEOLOGÍA	25
2.1 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DE LA SABANA DE BOGOTÁ	25
2.2 LITOLOGÍA	27
2.2.1. Unidades de Roca.....	27
2.2.1.1. Formación Chipaque (Ksch)	27
2.2.1.2. Grupo Guadalupe (Ksg)	29
2.2.1.3. Formación Guaduas (Tkg)	34
2.2.1.4. Formación Cacho (Tic).....	41
2.2.1.5. Formación Bogotá (Tib)	44
2.2.1.6. Formación Areniscas de la Regadera (Tir)	45
2.2.1.7. Formación Usme (Tiu)	47
2.2.2. Unidades de Suelos y Depósitos	48
2.2.2.1. Sedimentos No Relacionados con la Topografía Actual	48
2.2.2.2. Sedimentos Relacionados con Ambientes de Montaña	50
2.2.3. Otras Unidades	57
2.2.3.1. Depósitos de Pendiente (Qdp)	57
2.2.3.2. Restos de Meteorización de Areniscas del Guadalupe (Trm)	57
2.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	57
2.3.1. Marco Tectónico de la Cordillera Oriental	57

2.3.2.	Marco Tectónico de la Sabana De Bogotá.....	59
2.3.3.	Sistema Estructural	60
2.3.4.	Fallas Transversales y División de la Sabana en Bloques Tectónicos.....	65
3.	HIDROLOGÍA.....	75
3.1	INFORMACIÓN RECOPIADA	75
3.1.1.	Datos de temperatura, evaporación, brillo solar y humedad relativa.....	78
3.1.2.	Datos de lluvia.....	79
3.1.3.	Información cartográfica.....	80
3.2	ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LLUVIA EN LA CUENCA.....	80
3.2.1.	Consistencia de series	80
3.2.2.	Llenado de datos faltantes	81
3.2.3.	Análisis temporal de los datos de lluvia.....	81
3.2.4.	Análisis espacial y temporal.....	89
3.2.5.	Caracterización climatológica.....	91
3.2.5.1.	Temperatura	91
3.2.5.2.	Evaporación	94
3.2.5.3.	Humedad Relativa	95
3.3	BALANCE HÍDRICO.....	99
3.3.1.	Calculo de la Evapotranspiración	99
3.3.2.	Análisis de Datos de Caudales	109
3.3.2.1.	Cuenca del Río Fucha	109
3.3.2.2.	Cuenca del Río Tunjuelo.....	113
3.3.2.3.	Río Bogotá - Estación Las Huertas.....	115
3.4	BALANCE DE AGUA EN LA CUENCA.....	116
4.	GEOFÍSICA.....	121
4.1	GEOELÉCTRICA.....	121
4.1.1.	Interpretación Geoeléctrica	121
4.1.2.	Ubicación de los Sondeos Geoeléctricos	122

4.1.3.	Resultados de la Interpretación Geoelectrica.....	123
4.1.4.	Perfiles Geoelectricos	134
4.2	MÉTODO CSAMT EAAB JICA.....	136
4.3	GRAVIMETRÍA.....	137
4.4	SÍSMICA.....	141
5.	EVOLUCIÓN DE NIVELES Y DIRECCIÓN DE FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO CUATERNARIO	143
6.	HIDROGEOQUÍMICA	150
6.1	CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA	150
6.1.1.	Clasificación Geoquímica de las formaciones Arenisca Dura (Ksgd), Arenisca Labor – Tierna, Usme y Guaduas.	153
6.1.2.	Clasificación Geoquímica Formacion Chia (Qch1, Qch2)	154
6.1.3.	Clasificación Geoquímica Depósitos de piedemonte (Qdp) y Formación Río Tunjuelo (Qrtsa).....	155
6.1.4.	Clasificación Geoquímica Formación Sabana Arcillas y arenas finas (Qsa1)	156
6.1.5.	Clasificación Geoquímica Formación Sabana arenas, arcillas y turba (Qsa2)	157
6.1.6.	Clasificación Geoquímica de fuentes superficiales	158
6.2	EVALUACIÓN HIDROGEOQUÍMICA.....	159
6.2.1.	pH.....	159
6.2.2.	Conductividad Eléctrica.....	161
6.2.3.	Temperatura.....	163
6.2.4.	Isotopos.....	168
7.	HIDRÁULICA DE POZOS.....	174
7.1	FLUJO ESTABLE.....	174
7.2	FLUJO RADIAL NO EQUILIBRADO EN ACUÍFEROS CONFINADOS (TRANSIENT REGIME).....	175

7.3	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS	177
7.3.1.	Nivel estático (NE).....	177
7.3.2.	Nivel dinámico (ND)	177
7.3.3.	El abatimiento (s)	177
7.3.4.	Caudal (Q).....	178
7.3.5.	Transmisividad (T).....	181
7.3.6.	Conductividad Hidráulica (K).....	181
7.3.7.	Capacidad Específica (Ce).....	182
7.3.8.	El coeficiente de almacenamiento (s).....	182
8.	MAPA HIDROGEOLÓGICO	187
8.1	SEDIMENTOS Y ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE INTERGRANULAR	187
8.2	ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE A TRAVÉS DE FRACTURAS.....	188
8.3	ROCAS CON LIMITADOS RECURSOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	188
8.4	POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DE UNIDADES GEOLÓGICAS DE INTERÉS HIDROGEOLÓGICO DEL DISTRITO.....	190
8.4.1.	Acuífero Grupo Guadalupe (Arenisca Labor Tierna).....	190
8.4.2.	Formación Guaduas.....	191
8.4.3.	Formación Regadera.....	191
9.	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	193
9.1	MODELO HIDROGEOLÓGICO SECCIÓN A – A` NORTE DEL DISTRITO	193
9.2	RESERVAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN DISTRITO CAPITAL	198
9.2.1.	Reservas Distrito Capital.....	199
10.	VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA 200	
10.1	METODOLOGÍA GOD (FOSTER 1987).....	200
10.2	ANÁLISIS Y RESULTADOS DE METODOLOGÍA GOD	202

10.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA PARCIAL A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DEL DISTRITO CAPITAL POR LA METODOLOGÍA GOD.....	205
10.3.1. Zona de vulnerabilidad extrema.....	205
10.3.2. Zona de vulnerabilidad alta	205
10.3.3. Zona de vulnerabilidad media	206
10.3.4. Vulnerabilidad baja y despreciable	206
10.4 METODOLOGÍA DRACTIC	208
10.4.1. Capacidad de atenuación de la carga contaminante (2 variables).....	208
10.4.2. Resistencia o inaccesibilidad en sentido hidráulico (3 variables).....	208
10.4.3. Transporte de contaminantes (2 variables).....	209
10.4.4. Generación gráfica de variables	209
10.4.5. Desarrollo de la Metodología DRASTIC.....	214
10.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS POR LA METODOLOGÍA DRASTIC	216
10.5.1. Temporada de alta precipitación.....	216
10.5.2. Temporada de baja precipitación.....	218
11. DIAGNOSTICO DEL MODELO MATEMÁTICO COMPUTACIONAL	220
11.1 ÁREA DE ESTUDIO	220
11.2 ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO PARA LOS ACUÍFEROS DE SANTA FE DE BOGOTÁ, D.C. MODELO MATEMÁTICO PNUD DAMA.....	221
11.3 PROYECTO: BRINDAR APOYO TÉCNICO Y ACTUALIZAR HERRAMIENTAS PARA LA REGULACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN BOGOTÁ CONTRATO INTER-ADMINISTRATIVO UN-DAMA-190/2005.....	222
11.4 CONSIDERACIONES	223
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	225
BIBLIOGRAFÍA	229
ANEXOS	233

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos estaciones climatológicas	78
Tabla 2. Datos estaciones pluviométricas y pluviográficas	79
Tabla 3. Precipitación media mensual multianual	83
Tabla 4. Temperatura media mensual	94
Tabla 5. Evaporación de tanque media mensual	97
Tabla 6. Humedad relativa media mensual.....	98
Tabla 7. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Fontibón	100
Tabla 8. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Vitelma	101
Tabla 9. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Guaymaral.....	101
Tabla 10. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Muña	102
Tabla 11. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Doña Juana.....	103
Tabla 12. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Aeropuerto El Dorado	103
Tabla 13. Cálculo de la evapotranspiración - Estación ECI.....	104
Tabla 14. Cálculo de la evapotranspiración - Estación La Ramada	105
Tabla 15. Cálculo de la evapotranspiración - Estación El Dorado Didáctica ...	105
Tabla 16. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Flores Colombianas ...	106
Tabla 17. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Jardín Botánico	107
Tabla 18. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Universidad Nacional .	107
Tabla 19. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Vivero Venado de Oro	108
Tabla 20. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Universidad Pedagógica de Colombia.....	109
Tabla 21. Balance Hídrico en cada estación	117
Tabla 22. Coordenadas de los puntos de medición (Gauss Kruger)	122
Tabla 23. Perfiles de los Sondeos Eléctricos Verticales.....	124
Tabla 24. Clasificación Geoquímica de los puntos de agua	150

Tabla 25.	Relación de Altitud de Recarga con Deuterio	171
Tabla 26.	Caracterización Estructural de los Cerros Orientales	195
Tabla 27.	Caracterización Estructural Sinclinal Usme flanco oriental.....	196
Tabla 28.	Caracterización Estructural Sinclinal Usme flanco occidental	197
Tabla 29.	Caracterización Estructural Noroccidente Ciudad Bolivar	198
Tabla 30.	Valores de Rendimiento específico para diferentes materiales de la corteza terrestre.....	199
Tabla 31.	Reservas en el Distrito Capital.....	199
Tabla 32.	Tipo de acuífero.....	201
Tabla 33.	Litología de la cobertura (No Consolidado)	201
Tabla 34.	Litología de la cobertura (Consolidado)	201
Tabla 35.	Profundidad del agua subterránea.....	201
Tabla 36.	Grados de vulnerabilidad GOD.....	202
Tabla 37.	Factor de valoración de la variable profundidad	210
Tabla 38.	Factor de valoración de la variable recarga potencial.....	211
Tabla 39.	Factor de valoración de la variable litología del acuífero	211
Tabla 40.	Factor de valoración de la variable tipo de suelo.....	212
Tabla 41.	Factor de valoración de la variable tipo de suelo.....	212
Tabla 42.	Factor de valoración de la variable naturaleza de la zona no saturada	213
Tabla 43.	Factor de valoración de la variable conductividad hidráulica.....	213
Tabla 44.	Factores de ponderación para el método DRASTIC.....	214
Tabla 45.	Estadísticas de la variable profundidad por temporada de precipitación	215
Tabla 46.	Grados de Vulnerabilidad - Método DRASTIC.....	215

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mapa de localización y modelo de elevación	19
Figura 2. Mapa Mundial de Esfuerzos y los resultados para Colombia.....	61
Figura 3. Mapa de Anomalías Magnéticas para una altura de 20 Km.....	63
Figura 4. Compilado de datos de fallas medidas por los geólogos del grupo Terra a Mayo de 2008.	65
Figura 5. Bloques propuestos a partir de los principales rasgos transversales.	66
Figura 6. Soluciones de planos de falla para las fallas mesoscópicas registradas en la zona del río San Cristóbal.....	73
Figura 7. Localización de estaciones hidroclimatológicas	77
Figura 8. Precipitación media mensual multianual	85
Figura 9. Isoyetas de precipitación total anual	90
Figura 10. Temperatura media mensual multianual Vs. Precipitación media mensual	92
Figura 11. Evaporación media mensual multianual Vs. Precipitación media mensual	95
Figura 12. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Fontibón	100
Figura 13. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Vitelma	101
Figura 14. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Guaymaral	102
Figura 15. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Muña	102
Figura 16. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Doña Juana.....	103

Figura 17. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Aeropuerto El Dorado	104
Figura 18. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación ECI	104
Figura 19. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación La Ramada	105
Figura 20. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación El Dorado Didáctica	106
Figura 21. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Flores Colombianas	106
Figura 22. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Jardín Botánico	107
Figura 23. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Universidad Nacional	108
Figura 24. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Vivero Venado de Oro.....	108
Figura 25. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Universidad Pedagógica de Colombia	109
Figura 26. Promedio de caudales mensuales multianuales río Fucha (1990-2001)	110
Figura 27. Promedio de caudales mensuales multianuales río Fucha Estación Fontibón.....	111
Figura 28. Serie de datos mensuales en la estación Fucha - Fontibón.....	112
Figura 29. Curva de duración de caudales estación Fucha – Fontibón.....	112
Figura 30. Promedio de caudales mensuales multianuales río Tunjuelo	113
Figura 31. Serie de datos mensuales en la estación Puente Bosa	114
Figura 32. Curva de duración de caudales estación Puente Bosa.	115
Figura 33. Serie de datos mensuales en la estación Las Huertas – Río Bogotá.	116
Figura 34. Recarga Potencial en la zona de estudio	120
Figura 35. Mapa de anomalía residual, con efectos de sombra (gravimetría)*. ..	138
Figura 36. Mapa de anomalía Gravimétrica Bouguer Total Residual Sabana de Bogotá Subdirección de Geología*.....	139
Figura 37. Mapa de espesor de sedimentos*.....	140

Figura 38. Mapa de isopiezas temporada de baja precipitación 1999 – 2010.....	145
Figura 39. Mapa de isopiezas temporada de alta precipitación 1999 – 2010.....	146
Figura 40. Mapa de isopiezas total 1999 – 2010.....	147
Figura 41. Mapa de isopiezas zonas de Puente Aranda, Kennedy y Fontibón ..	149
Figura 42. Diagrama de Piper por unidad geológica	153
Figura 43. Diagrama de Piper Formaciones Arenisca Labor–Tierna, Usme y Guaduas.	154
Figura 44. Diagrama de Piper de la formación Chía	155
Figura 45. Diagrama de Piper Depósitos de piedemonte y Formación Río Tunjuelo	156
Figura 46. Diagrama de Piper Formación Sabana arcillas y arenas finas.....	157
Figura 47. Diagrama de Piper Formación Sabana arenas, arcillas y turba	158
Figura 48. Diagrama de Piper fuentes superficiales.....	159
Figura 49. Distribución Espacial de pH	160
Figura 50. Secuencia de Chevotarev	161
Figura 51. Distribución Espacial de la Conductividad Eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$).....	162
Figura 52. Distribución Espacial de Temperatura.....	164
Figura 53. Distribución Espacial del Sodio	165
Figura 54. Distribución Espacial de Cloruros	166
Figura 55. Diagrama de cajas de los iones de las unidades geológicas área del Distrito Capital	168
Figura 56. Línea Meteórica.....	170
Figura 57. Bombeo a caudal constante método Cooper and Jacob. Pozo Clara Fey 1.....	178
Figura 58. Bombeo a caudal constante método Theis. Pozo Clara Fey 1.....	179
Figura 59. Recuperación de niveles. Pozo Clara Fey 1.	179
Figura 60. Bombeo a caudal constante método Cooper and Jacob. Pozo Clara Fey 2.....	180
Figura 61. Recuperación de niveles. Pozo Clara Fey 2.	180
Figura 62. Pozo de observación Clara Fey 1.	181
Figura 63. Mapa Hidrogeológico	189

Figura 64. Cerros Orientales secciones de recarga 1 a 7	195
Figura 65. Cerros Orientales secciones de recarga 8 y 9	196
Figura 66. Sinclinal de Usme secciones de recarga.....	197
Figura 67. Noroccidente de Ciudad Bolívar secciones de recarga.....	198
Figura 68. Esquema para la vulnerabilidad por el método GOD	204
Figura 69. Mapa de Vulnerabilidad método GOD.....	207

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Exposición de las lutitas de la formación Chipaque sector El Buitre en la vía Pacho-Subachoque	28
Fotografía 2. Formación Arenisca Dura sector cantera Zuque Al SE del casco urbano de Bogotá.	30
Fotografía 3. Afloramiento de la formación Plaeners en el sector de la cantera el Zuque, al sureste de la sabana de Bogotá.	32
Fotografía 4. Formación Arenisca de Labor-Tierna sector vereda Canavita municipio de Sibaté.	33
Fotografía 5. Exposiciones de la Formación Guaduas en la parte alta de la loma La Conejera (Anexo A y Anexo B).	37
Fotografía 6. Exposiciones de la Formación Guaduas al lado oriental de Tanque Suba – EAAB (Anexo A y Anexo B).....	38
Fotografía 7. Exposiciones de la Formación Guaduas en una cantera al oriente del Tanque Casablanca – EAAB (Anexo A y Anexo B).	39
Fotografía 8. Exposición del Miembro Medio de la formación Guaduas.	40
Fotografía 9. Vista general al talud conformado por areniscas de la Formación Guaduas (Anexo A y Anexo B).	41
Fotografía 10. Areniscas de la formación Cacho sector Nemocón	42
Fotografía 11. Aspectos de la secuencia sedimentaria que aflora sobre el cauce de una quebrada en el barrio El Paraíso.	43
Fotografía 12. Depósito de arcillolitas de la formación Bogotá sector relleno de Doña Juana, Ciudad Bolívar, Bogotá.....	45
Fotografía 13. Aspectos de las areniscas de la formación Areniscas de La Regadera	46
Fotografía 14. Nivel lodoso de la formación Usme sector Barrio El Yopal, Localidad de Usme	47
Fotografía 15. Depósitos de origen fluviotorrencial de la formación Marichuela sector Santa Librada.....	49

Fotografía 16. Depósito de suelos negros de la formación Mondoñedo Sector vía a la Pradera.	52
Fotografía 17. Depósito fluvial formación Chía sector mina Gravicol municipio de Tabio.	53
Fotografía 18. Depósitos fluviales de la formación Río Tunjuelo Sector Parque Bavaria en el Centro Internacional de Bogotá.	55

INTRODUCCIÓN

El presente estudio se realiza con el fin de actualizar el Sistema de modelamiento hidrogeológico de Bogotá en la jurisdicción de la SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE - SDA, mediante el conocimiento básico geológico e hidrogeológico para la evaluación del potencial del agua subterránea. En el área de interés se presentan las cuencas de Tunjuelo, Fucha y Salitre-Torca y en donde se presentan rocas sedimentarias del cretácico terciario y depósitos recientes.

Bogotá, capital de la República de Colombia, cuenta con más de siete millones de habitantes y está situada en la cordillera oriental de Los Andes a 2.550 metros de altura sobre el nivel del mar y a 4° 36' Norte de la línea ecuatorial. El área de investigación, objeto de este trabajo cubre una extensión de 540 km² aproximadamente y comprende una parte de la cuenca hidrográfica de la Cuenca del Río Bogotá.

El desarrollo de las aguas subterráneas en la región hasta el presente ha dependido de acuíferos comparativamente poco profundos, todos de origen cuaternario. Hay aproximadamente 7.000 pozos profundos en la Sabana de Bogotá y la tasa de utilización del agua subterránea es de 3.7 m³/seg. Una gran porción es utilizada en irrigación agrícola y en la industria. De acuerdo al inventario de pozos realizado por entidades como INGEOMINAS, CAR y SDA, el principal acuífero explotado pertenece al Cuaternario, soporta el 93% de todos los pozos profundos y el 78% del volumen total de agua extraída. El Cretáceo también es un acuífero prometedor, pero esta unidad no ha sido totalmente utilizada (5% del número total de pozos y 20% del volumen total de agua extraída)¹.

¹ AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN – JICA Y EAAB. Estudio del Desarrollo Sostenible del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá. Febrero de 2003.

El agua subterránea se ha considerado parte de los recursos naturales renovables, esta calificación en algunas cuencas, como es el caso de la Sabana de Bogotá, no es tan contundente. Pues tal como lo han demostrado las acciones de seguimiento de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, los niveles en la Sabana han presentado importantes descensos en los últimos años, debido a las altas tasas de explotación pero por otro lado en la Secretaría Distrital de Ambiente - SDA, se han verificado niveles estables e incluso algunos en ascenso. Por lo tanto es claro que este recurso presenta un alto grado de incertidumbre en su conocimiento por su naturaleza “oculta” y de difícil acceso y estudio, es por esta razón que se ha planteado la generación del modelo hidrogeológico del Distrito Capital, para la correcta planeación y gestión de tan importante recurso hídrico.

Para la actualización del *Sistema de Modelamiento Hidrogeológico de Bogotá*, se realizó un levantamiento de la cartografía geológica a escala 1:25.000, con apoyo de fotografías aéreas, imágenes de satélite y salidas al campo; se han integrado sondeos eléctricos verticales para verificar las condiciones geológicas e hidrogeológicas del área de estudio; de igual forma se reevaluó el balance hídrico para el cálculo de la recarga potencial mediante metodología y parámetros climatológicos.

Por medio de herramientas hidrogeoquímicas e isotópicas se ha investigado las condiciones de movimiento, origen y dirección del agua subterránea con ayuda de los mapas de isopiezas en diferentes épocas del año y en un contexto a nivel multianual. Se identificaron las zonas de Puente Aranda, Kennedy y Fontibón como aras de protección debido a los descensos de niveles en los últimos años.

La evaluación de las características hidráulicas del acuífero son de gran importancia para la definición del modelo matemático por lo tanto se ha realizado un mapa con las condiciones hidráulicas como la transmisividad y conductividad hidráulica, principalmente.

Se ha realizado la caracterización hidrogeológica del Distrito Capital para la generación del modelo hidrogeológico conceptual según los intereses de la Secretaria Distrital de Ambiente.

El objetivo final del presente estudio es: “La consecución de la gestión integrada del agua que comprende aspectos de calidad y de cantidad, se concentra en las

funciones y usos del agua y se relaciona con la ecología y la planificación del medio físico”. La evaluación vinculada a estos fines comprende un seguimiento integrado que proporciona información sobre una amplia variedad de temas, aspectos, usos, funciones, hidrogeología, regímenes del flujo para el avance hacia la consecución de objetivos.

El análisis, la planificación y la gestión integrados de los recursos hídricos en un ámbito urbano comprenden muchas disciplinas, factores y actores. Para los acuíferos y las cuencas urbanas, con sus dinámicas y sus sistemas de flujo interrelacionados, este enfoque es y será cada vez más importante, ya que el agua es uno de los factores claves para el desarrollo sostenible. La gestión sostenible de los recursos hídricos deberá conectar el desarrollo social y económico con la protección de ecosistemas naturales y una gestión eficaz vincula los usos del suelo y del agua a lo largo de toda una cuenca fluvial o un acuífero subterráneo.

1. GENERALIDADES

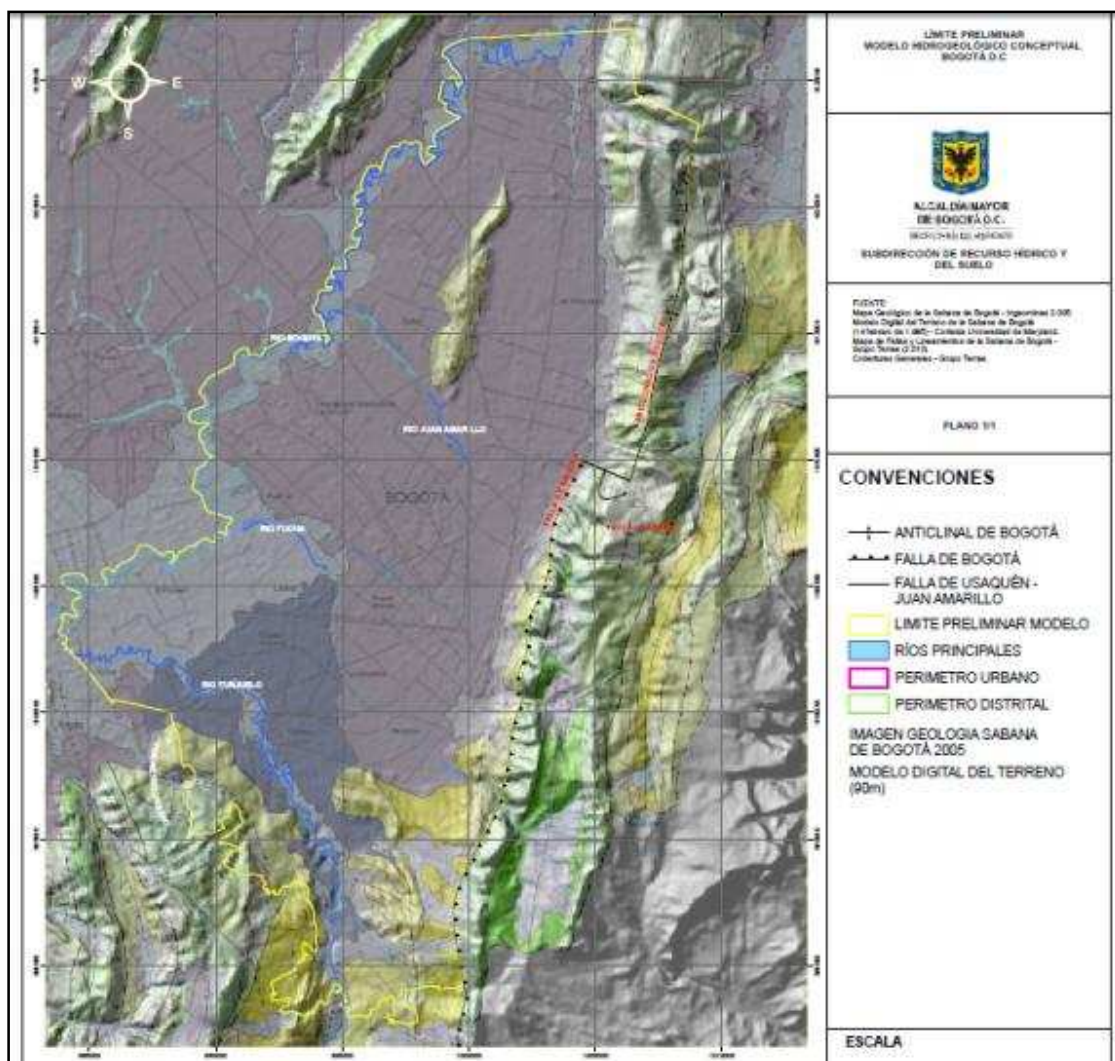
1.1 LOCALIZACIÓN

Ubicada en el Centro del país, en la cordillera oriental, ramal de los Andes americanos y pertenecientes al altiplano cundiboyacense, la capital del país, tiene una extensión aproximada de 33 kilómetros de sur a norte y 16 kilómetros de oriente a occidente; se encuentra situada en las siguientes coordenadas:

Latitud Norte: 4° 35' 56" y Longitud Oeste de Greenwich: 74° 04' 51"

Bogotá se encuentra inmersa en la zona de confluencia intertropical, produciendo dos épocas de lluvia, una en la primera mitad del año en los meses de marzo, abril y mayo y la segunda en los meses de septiembre, octubre y noviembre. Descansa sobre la extensión noroccidental de la cordillera de Los Andes en una sabana con gran variedad de climas, tipos de suelos, cuerpos de aguas y otras formaciones naturales. Como Bogotá está ubicada entre montañas, estas sirven como barrera natural que restringe el flujo de humedad, influyendo en el régimen de lluvias; la temperatura varía de acuerdo con los meses del año, en diciembre, enero y marzo son altas, al contrario de abril y octubre meses en los cuales son más bajas. La orientación general de la ciudad, está determinada porque sus carreras son orientadas de sur a norte y sus calles de oriente a occidente. Su altura media está en los 2.550 metros sobre el nivel del mar.

Figura 1. Mapa de localización y modelo de elevación



1.2 ANTECEDENTES HIDROGEOLÓGICOS

La cuenca Alta del río Bogotá cuenta con varios estudios hidrogeológicos básicos, entre ellos, el estudio más completo sobre el tema, tanto por su metodología y alcances como por su cubrimiento total del área, fue elaborado por INGEOMINAS (1989 – 1993) para dotar a la CAR de herramientas técnicas suficientes para conocer y manejar adecuadamente las aguas subterráneas. Adicionalmente existen estudios hidrogeológicos parciales, realizados por el mismo instituto en los años 1969, 1975, 1982, 1987 y finalmente en 1996.²

Aunque los estudios mencionados aportaron bastante información hidrogeológica, aún existen incógnitas sobre el funcionamiento del sistema hídrico subterráneo en la región, especialmente en lo referente al sistema de recarga de los acuíferos:

Entre los investigadores existen opiniones bien diferentes, que llegan hasta los extremos acerca de la hidrogeología de la cuenca Alta del río Bogotá. Algunos consideran que es una cuenca hidrogeológicamente “cerrada”, completamente saturada y por consiguiente los acuíferos no reciben la recarga, en particular el del Grupo Guadalupe (Rodríguez, 1994). Otros hablan de que se está sacando más agua de la que se está recargando llevando la cuenca a una sobreexplotación y que hay desconocimiento inaceptable de la hidrogeología (Álvarez, 1997 y Van der Hammen, 1998).³

Debido a la complejidad geológica y estructural de la cuenca, para disminuir el impacto ambiental y garantizar el uso de las aguas subterráneas por un largo tiempo, es necesario ampliar el conocimiento hidrogeológico del área mediante estudios que permitan conocer el funcionamiento de los acuíferos utilizando un enfoque diferente, haciendo una evaluación hidrogeológica regional. Las técnicas no convencionales como las isotópicas, pueden ser muy útiles en este tipo de investigaciones.⁴

² INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA - INGEOMINAS. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá. 2000 – 2002.

³ Ibid.

⁴ Ibid.

- **INVENTARIO DE DATOS HIDROGEOLÓGICOS EN LA ZONA DE BOSA, SOACHA Y SIBATE. INFORME 2011. INGEOMINAS 1987:** Se inventariaron 165 pozos, 255 aljibes y 134 manantiales para un total de 554 puntos, 5 pozos producían un caudal mayor a 20 l/seg y la mayor parte explotaba un caudal entre 1 y 5 l/s, se realizó una cartografía geológica escala 1:100.000, se efectuó el análisis fisicoquímico de 150 puntos para su respectiva evaluación hidrogeoquímica, de igual forma se realizó la interpretación y análisis hidráulico de 8 pozos: ICOLLANTAS, PAVCO, APOGEO 1 y 2, SOACHA COMPARTIR 1 y 2, HACIENDA TEQUENDAMA y LA GRANJA.
- **ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LAS ZONAS DE SOACHA Y CIUDAD BOLÍVAR. INFORME 2085. INGEOMINAS 1988:** Equivalente al estudio anterior con la diferencia que se realizaron 20 SEV y el inventario posee columnas litoestratigráficas y diseño de pozos.
- **INGEOMINAS y la CAR realizaron el “Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá” 1989,** donde se realizó un reconocimiento geológico e hidrogeológico regional a escala 1:25.000, que arrojó como resultado una aproximación de las características hidrogeológicas de la Sabana de Bogotá (CAR).
- **HIDROGEOLOGÍA DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS MUÑA, SOACHA Y TUNJUELO. EMIRO ROBLES. INGEOMINAS 1992:** Geología, Inventario puntos de agua, geofísica, hidrogeoquímica, unidades hidrogeológicas e hidrología.
- **HIDROGEOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RIO TEUSACA, SABANA DE BOGOTÁ. INFORME 2220 B. INGEOMINAS 1993:** Se realizó una evaluación fotogeología y de campo para levantamiento geológico a escala 1:25.000, geofísica, hidrológica, hidrogeológica, inventario de 148 puntos de agua, hidráulica, hidrogeoquímica a 139 puntos; se efectúa una caracterización de la conductividad de diferentes unidades geológicas. Se anexan diseños de los pozos, análisis fisicoquímico y curvas de los SEV

- **PERFORACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE POZOS EN SIBATE, MUÑA Y SOACHA. INFORME 2267. INGEOMINAS 1996:** Se presentan perforaciones que contienen, localización, geología, sondeos eléctricos verticales, registros eléctricos, diseños, pruebas de bombeo, análisis físico-químicos, características del acuífero y del pozo y finalmente plan de monitoreo.
- **ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO EN LA PERIFERIA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ Y EN ALGUNAS POBLACIONES CERCANAS PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA. INFORME 2275. INGEOMINAS 1996:** Estudios de diferentes municipios (Sopo, Madrid, Mosquera, Soacha, Cajica, Cota, Chía, Facatativa, Funza, Tocancipa, Gachancipa y Zipaquirá) a nivel de perfectibilidad como suministro de agua potable para definir áreas de interés hidrogeológico con información geológica, inventario de puntos de agua, hidroquímica, geoeléctrica, y mapa de zonas de interés hidrogeológico. (Mapas en físico)
- **INFORME TÉCNICO DE PERFORACIÓN POZO ESCUELA GENERAL SANTANDER. PROYECTO C98F03. INGEOMINAS 1999:** Perforación de un pozo profundo a 110 m, se presenta columna diseño y perfiles eléctricos
- **ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO PARA LOS ACUÍFEROS DE SANTA FE DE BOGOTÁ, D.C. HIDROGEOCOL - DAMA - PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO (PNUD/COL/96/023) 1999:** Se presenta este informe final del proyecto PNUD/COL/96/023 “Elaboración del Modelo Hidrogeológico de los Acuíferos de Santa Fe de Bogotá”, el cual contiene la “Recopilación y Análisis de la Información”, “Estudios Hidrogeológicos”, “Modelo Hidrogeológico Matemático” y “Simulaciones y Predicciones” con el objetivo específico del Estudio es la Elaboración del Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico de los Acuíferos de Santa fe de Bogotá.
- **APLICACIÓN DE TÉCNICAS ISOTÓPICAS EN LOS ESTUDIOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS INFORME DE CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA E ISOTÓPICA DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO BOGOTÁ – COL 8019 INGEOMINAS - CAR 2001:** Con el

fin de entender la relación entre los diferentes componentes del ciclo hidrológico en la cuenca se caracterizaron aguas lluvias, manantiales, corrientes superficiales, lagunas y acuíferos. En forma específica, se estudio la evolución geoquímica de las aguas separadamente por acuíferos en las diferentes cuencas o sectores a lo largo de trayectorias de flujo, luego se evaluaron las principales reacciones químicas que podrían explicar dicha evolución. Estos conceptos serían la base para modelación geoquímica usando NETPATH sobre la cual se basarán los cálculos de la edad del agua subterránea, que se discutirán en la sección de isótopos ambientales.

- **RESULTADOS DE LA PERFORACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DEL PIEZÓMETRO 227-IV D-104. INGEOMINAS 2002:** Columna y diseño del piezómetro de 50 m de profundidad.
- **MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA SABANA DE BOGOTÁ. INGEOMINAS 2000 – 2002:** Con un objetivo general, el cual era precisar el modelo hidrogeológico regional de los acuíferos de la Sabana de Bogotá basándose en la utilización de técnicas isotópicas.
- **ESTUDIO DEL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA SABANA DE BOGOTÁ JICA EAAB 2003:** Tenía por objetivos evaluar el potencial de agua subterránea en la Sabana de Bogotá, investigar la situación actual del medio ambiente y su relación con el agua subterránea, formular un plan de desarrollo sostenible de aguas subterráneas y conducir programas técnicos acerca de la transferencia de tecnología al personal de la contraparte en el curso del Estudio.
- **BRINDAR APOYO TÉCNICO Y ACTUALIZAR HERRAMIENTAS PARA LA REGULACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN BOGOTÁ. UNIVERSIDAD NACIONAL - DAMA. Contrato Inter-administrativo No. 190/2005:** El modelo hidrogeológico conceptual desarrollado por la Universidad Nacional, para los acuíferos cuaternarios, señala que la formación Sabana se halla integrada, en su mayor parte, por capas horizontales poco consolidadas de arcillas y en menor proporción por lentes y capas de limos y arenas finas hasta gruesas.

Los lentes de arenas y gravas tienen diferentes espesores, su continuidad lateral no está claramente confirmada, las profundidades de localización varían ampliamente y el sistema de infiltración y recarga debe ser materia de investigación.

- **INCLUSIÓN DEL BALANCE HÍDRICO, IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO Y CAPACITACIÓN EN MODFLOW SIAM – CAR 2006:** Dentro del programa de investigación del recurso hídrico subterráneo la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR planteó la contratación del ingreso de información, inclusión del balance hídrico, implementación del modelo hidrogeológico en el área de la Sabana de Bogotá y capacitación a funcionarios en el manejo del software Visual Model Flow; para esto realizó la convocatoria pública No. 107 de 2005, siendo adjudicado el contrato a la firma consultora SIAM SA, en Febrero de 2006
- **ESTUDIO SOBRE EL SUMINISTRO DE AGUA SOSTENIBLE PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ Y LAS ÁREAS VECINAS BASADAS EN EL MANEJO DE LOS RECURSOS DE AGUA INTEGRADOS, EN LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. PERIODO DE ESTUDIO: NOVIEMBRE DE 2007 - FEBRERO 2009 AGENCIA CONTRAPARTE: EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ - EAAB:** El propósito de este estudio es: Formular un Plan Maestro para el abastecimiento de agua (plan de abastecimiento para el área metropolitana de Bogotá), a través del uso de agua subterránea, con miras al año 2020.
- **ADQUIRIR LOS SERVICIOS DE UN ESPECIALISTA PARA APOYAR LA FORMULACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO Y LA RED DEL MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO. Luis E. Restrepo M. Contrato 761- 2009:** Define como objetivos realizar un “Modelo Hidrogeológico Conceptual para el Acuífero Cuaternario yacente en el subsuelo de Bogotá, describir los parámetros hidrogeológicos característicos del Acuífero Cuaternario, identificar las zonas de recarga para el agua subterránea en Bogotá, definir la relación humedales agua subterránea e identificar las direcciones del flujo subterránea en el área de Bogotá”.

2. GEOLOGÍA

2.1 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DE LA SABANA DE BOGOTÁ

Durante el Cretáceo, período de la tierra que duró desde 120 hasta 60 millones de años aproximadamente, no existía todavía la Cordillera Colombiana. En el mar se depositaron capas de arcilla y de arena, con un espesor total de varios miles de metros. Las gruesas capas de arena depositadas especialmente hacia el final del Cretáceo originaron las areniscas de la parte superior del Grupo Guadalupe, que actualmente se encuentran entre otras, en los cerros de Guadalupe y Monserrate y también en la región del Salto de Tequendama.

Poco antes del final del Cretáceo, hace unos 66 millones de años, el mar se retiró de grandes partes del territorio colombiano, que se transformaron en tierra firme, de escasa elevación. Se formaron ríos, lagunas, ciénagas y pantanos y empezó la depositación de sedimentos de agua dulce encima de los sedimentos marinos; así se acumularon arcillas, arenas y carbón que constituyen la serie de sedimentos llamados formación Guaduas.

Durante la primera parte del Terciario (desde 60 hasta aproximadamente 2 millones de años), especialmente durante el Paleoceno, Eoceno y Oligoceno, sedimentos de agua dulce y a veces salobre-marino fueron depositados aún en la región que actualmente ocupa la Cordillera Oriental, pero a principio del Oligoceno Superior, se levantó algo de esta Cordillera y se terminó el ciclo de sedimentación. Durante el Terciario Superior, el Mioceno, y especialmente a principio del Plioceno, los sedimentos se plegaron fuertemente y finalmente se levantó la Cordillera Oriental hasta su altura actual. Desde el momento en que la Cordillera se empezó a levantar, los ríos empezaron a atacar los sedimentos endurecidos y plegados; las rocas duras como areniscas, resistían más a esta erosión que las

rocas blandas, como las arcillas y las lutitas. Así se formaron partes altas y bajas, montañas y valles. La forma actual de la Cordillera Oriental es entonces un producto de sedimentación, plegamiento, levantamiento y erosión.

Por estos procesos se formó también en la actual región de la Sabana de Bogotá una serie de valles paralelos anchos y relativamente profundos, formando en conjunto una cuenca cerrada, sin drenaje hacia afuera. El fondo de estos valles estaba hasta 500 metros debajo del nivel actual de la parte plana de la Sabana. Esta cuenca por falta de drenaje, se llenó de agua así se formó durante la última parte del Terciario, el Plioceno, la laguna de la sabana de Bogotá que existió durante una gran parte del período siguiente, el Cuaternario, que duró desde hace aproximadamente un millón de años hasta el presente.

En esta laguna y también en sus orillas y valles vecinos, se depositaron sedimentos de laguna, de pantano y de ríos, rellenando así, poco a poco, los valles que se hallaban debajo del nivel de agua. Durante el Cuaternario hubo épocas frías y húmedas, períodos glaciales y fluviales y épocas secas y relativamente calientes (como la actual): los períodos interglaciales. Junto a la alternancia entre períodos húmedos y secos (entre 20.000 y 40.000 años cada uno), el nivel de la laguna de la Sabana también fluctuaba, estando unas veces completamente llena y otras convirtiéndose en parte en una región pantanosa. Por esta razón, encontramos en los sedimentos de la laguna de la Sabana capas de turba (formación de plantas de pantano), intercaladas entre arcillas lagunares.

El nivel de la laguna tuvo su límite superior en la parte más baja de los cerros que la rodeaban, así una de estas partes debe haber sido los cerros cerca de Alicachín, por ahí empezó a salir el agua de esta laguna, que en su camino llegó al sitio actual en "Charquito". Hacia abajo este río de desagüe, encontró aproximadamente a 1 km al NW del actual Salto, la bajada casi vertical del nivel de la Sabana hacia abajo, producto del plegamiento y erosión regresiva. Allí se formó entonces un salto, el primitivo Salto de Tequendama.

Condensado del Informe 1301 "El Salto de Tequendama" por Thomas Van der Hammen, Servicio Geológico Nacional, Julio de 1958.

2.2 LITOLOGÍA

En éste capítulo se describen los materiales rocosos y depósitos distribuidos en el área del proyecto, indicando el origen del nombre, ubicación del área tipo y límites, edad y características físicas en el área de estudio y el área tipo.

2.2.1. Unidades de Roca

Se toma como referencia información del Léxico Estratigráfico Internacional (Julivert, 1968 y Da Porta, 1974). Se escogió la nomenclatura que cumpliera los requerimientos mínimos de la Guía Estratigráfica Internacional (1994). Para las unidades litoestratigráficas, paleógenas y neógenas, la nomenclatura que se adopta ha sido ampliamente utilizada en la Sabana de Bogotá y alrededores, como son las formaciones Guaduas, Cacho, Bogotá, Regadera y Usme.

2.2.1.1. Formación Chipaque (Ksch)

Nombre:

Nombre designado por Hubach (1931) a la parte superior del Grupo Villeta que aflora al oriente de la sabana de Bogotá, Renzoni 1962 agrupa el conjunto definido por Hubach y el nivel inferior esquistoso del Grupo Guadalupe y los denomina formación Chipaque.



Fotografía 1. *Exposición de las lutitas de la formación Chipaque sector El Buitre en la vía Pacho-Subachoque*

Área tipo y límites

Esta unidad conforma el núcleo de los anticlinales del Río Blanco Machetá, San José, Sopó-Sesquilé y Bogotá. Se localiza sobre la formación Une en contacto neto y concordante y debajo de la formación Arenisca Dura del Grupo Guadalupe en contacto gradual y concordante.

Edad

Con base en reportes de fauna de amonitas (Hubach 1931 y 1957, Montoya y Reyes 2003) y en palinología (Guerrero & Sarmiento 1996) se define una edad Cenomaniano Superior-Santoniano.

Características físicas en el área de estudio

Se encuentra conformado por niveles arcillosos arenosos y arcillosos carbonosos con intercalaciones limolíticas y niveles de lutitas donde es común encontrar amonitas, se presentan intercalaciones ocasionales de areniscas cuarzosas de grano fino y muy fino glauconíticas y fosfáticas, con laminación flaser, lenticular y plano paralela, hacia el tope de la unidad se observan concreciones ferruginosas. El espesor se calcula aproximadamente en 1.000 metros.

2.2.1.2. Grupo Guadalupe (Ksg)

Nombre

Propuesto por Hettner (1892) como Guadalupe-Schichten y redefinido por Hubach (1957) y Renzoni (1968), Pérez y Salazar (1978) definieron formalmente el Grupo Guadalupe y lo subdividieron en las formaciones Arenisca Dura (Ksgd), Plaeners (Ksgp), Arenisca de Labor y Arenisca Tierna (Ksglt).

Edad

Campaniano - Maastrichtiano Tardío.

Área tipo y límites

El Grupo Guadalupe se reconoce por encima de la formación Chipaque al oriente de la Sabana de Bogotá y sobre la formación Conejo al occidente y es suprayacida en toda la Sabana por el miembro inferior arcilloso de la formación Guaduas. La localidad tipo para la formación Guadalupe se encuentra en los cerros orientales de Bogotá.

Distribución en el área de estudio

Las rocas resistentes del Grupo Guadalupe conforman las laderas de cerca del 60% de la zona minera de Mochuelo (la totalidad de la cuenca de la quebrada Limas), al sur-occidente de la zona minera del Tunjuelo. Es importante anotar que la secuencia se encuentra afectada por procesos de tectonismo intenso.

Características físicas de la roca en el área tipo:

➤ FORMACIÓN ARENISCA DURA (Ksgd)

Al oriente de la Sabana forma parte de los anticlinales de Bogotá, Machetá, San José, Sopó-Sesquilé y en alrededores de la Calera; al occidente forma parte de los anticlinales de Tabio, Cota-Zipacquirá, Caldas, Nemocón, Canadá y al sur de la Sabana en los anticlinales de Soacha, Mochuelo, San Miguel y aflora en los alrededores de Facatativá y embalse del Muña.

En general, se encuentra conformada por areniscas cuarzosas, blancas a amarillentas por alteración, grano fino a muy fino, con estratificación muy delgada a gruesa, intercalada esporádicamente con limolitas silíceas y arcillolitas de color gris claro, al occidente de la Sabana las areniscas son más lodosas y se reporta un espesor de 320 m, mientras que al oriente tiene un espesor de 407 m. En el área de Bogotá se reporta un espesor de 450 metros en el cerro del Alto del Cable.

El contacto superior es neto con la formación Plaeners, mientras que el contacto inferior varía, al oriente de la Sabana es concordante y transicional con la formación Chipaque y al occidente descansa concordantemente en contacto neto con la formación Conejo. Se le asigna edad Santoniano - Campaniano.



Fotografía 2. **Formación Arenisca Dura sector cantera Zuque Al SE del casco urbano de Bogotá.**

Distribución en el área de estudio

Aflora en la parte media de la cuenca de la quebrada Limas y en la zona alta de las cuencas del río Soacha y los cursos de agua que desembocan en la represa de Terreros. Conforman en general la parte alta escarpada de los cerros orientales.

Espesor en el área de Bogotá

Se reporta un espesor de 450 metros en el cerro del Alto del Cable.

➤ FORMACIÓN PLAENERS (Ksgp)

Aflora al oriente de la Sabana de Bogotá formando parte los anticlinales de Bogotá, Machetá, San José, Sopó-Sesquilé, al occidente en los anticlinales de Tabio, Cota-Zipacquirá, Nemocón, Canadá y al sur en los anticlinales de Soacha, Mochuelo y San Miguel, Sinclinal de Granillas, embalse de Muña, localidades de Facatativá y La Calera.

En general se encuentra conformada por secuencias monótonas de arcillolitas, limolitas silíceas, chert fosfático con intercalaciones de capas delgadas de areniscas de grano muy fino, areniscas fosfáticas y fosforitas con abundantes foraminíferos bentónicos, es típica la partición ortogonal prismática a manera de panelitas y el fracturamiento concoideo de las limolitas silíceas.

En los sectores centro y norte de la Sabana de Bogotá descansa sobre la formación Lidita Superior en contacto neto y concordante, en el sector central y sur de la Sabana está sobre la formación Arenisca Dura y en toda la Sabana está por debajo de la formación Arenisca Labor-Tierna en contacto gradual rápido.

Follmi (1992) en (Vergara y Rodríguez 1997) le asignan edad Campaniano Temprano a Maastrichtiano temprano. La sección tipo en el cerro del Alto del Cable define un espesor de 73 m aunque al norte de la Sabana (Sector el Boquerón de Tausa) se asigna un espesor de 187m.



Fotografía 3. Afloramiento de la formación Plaeners en el sector de la cantera el Zuque, al sureste de la sabana de Bogotá.

Distribución en el área de estudio

Aflora como una cobertura delgada en la mayor parte de las zonas altas de la zona minera Mochuelo en su sector occidental, hacia la salida a Arborizadora alta y en el sector adyacente al Barrio Los Alpes. Aflora en general a media ladera en los cerros orientales.

Espesor en el área de Bogotá

La sección tipo en el cerro del Alto del Cable define un espesor de 73 m

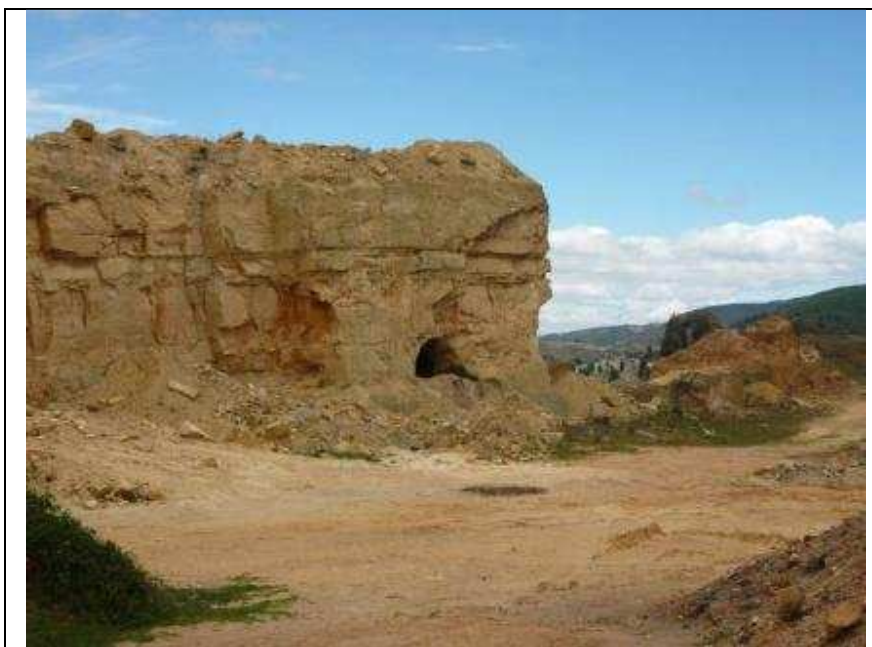
➤ FORMACIÓN ARENISCA LABOR-TIerna (Ksglt)

Está conformada por secuencias en capas muy gruesas de areniscas cuarzosas y feldespáticas blancas a grises claras de grano fino a grueso y en ocasiones

conglomeráticas, intercaladas con capas delgadas de arcillolitas grises claras, se identifican estructuras sedimentarias internas como estratificación cruzada.

Se establece desde el techo de la formación Plaeners en contacto rápido y concordante hasta la base de la formación Guaduas en contacto neto y concordante. Las formaciones Arenisca de Labor, Arenisca Tierna y el segmento que los separa, se agrupan como una sola unidad cartográfica dada la similitud litológica y su expresión morfológica-

La formación Arenisca de Labor se diferencia de la Tierna por presentar capas muy gruesas de areniscas de grano fino. En el sentido de Pérez & Salazar (1978), la formación Arenisca de Labor tiene un espesor de 177 m y está separada de la formación Arenisca Tierna de 49 m espesor, por una secuencia de 20 m de lodolitas y arcillolitas en el cerro del Alto del Cable y en el páramo de Rajadero. La formación Arenisca de Labor reduce su espesor hacia el norte de la Sabana (Tausa y Guachetá) donde se reduce hasta 66 m hasta desaparecer en Villa de Leyva (Etayo 1968), mientras que la formación Arenisca Tierna aumenta su espesor hasta 65 m. Pérez & Salazar (1978) y Martínez (1989 en Sarmiento 1992) asignan edad Maastrichtiano a la formación Arenisca Labor-Tierna.



Fotografía 4. *Formación Arenisca de Labor-Tierna sector vereda Canavita municipio de Sibaté.*

Distribución en el área de estudio

La Formación Labor conforma la mayor parte de los lomos de la parte occidental de la zona minera Mochuelo.

Espesor en el área de Bogotá

La formación Arenisca de Labor se diferencia de la Tierna por presentar capas muy gruesas de areniscas de grano fino. En el sentido de Pérez & Salazar (1973), la formación Arenisca de Labor tiene un espesor de 177 m y está separada de la formación Arenisca Tierna de 49 m espesor, por una secuencia de 20 m de lodolitas y arcillolitas en el cerro del Alto del Cable y en el páramo de Rajadero.

2.2.1.3. Formación Guaduas (Tkg)

Nombre

Propuesto por Hettner (1892) como Guaduas-Schichten y redefinido por Hubach (1957) como formación Guaduas, su nombre procede de la localidad de Guaduas (Cundinamarca) situada en el borde occidental de la Cordillera Oriental.

Hubach define la localidad tipo para la formación Guaduas en la Sabana de Bogotá en Guatavita: La mejor exposición del Guaduas de la Sabana se halla en Guatavita: "Entre la Arenisca Tierna del Guadalupe que forma el domo del Montecillo y el filo prominente al Sur constituido de la Arenisca del Cacho".

Van der Hammen (1957) da como localidad tipo la secuencia que se encuentra entre el Boquerón de Lenguazaque y el Boquerón de Guachetá. Aflora en los sinclinales de Río Frío, Neusa, Zipaquirá, Checua–Lenguazaque, Sesquilé, Subachoque, en el sinclinal de Teusacá y en la Calera y al sur en los sinclinales de Usme y Soacha.

Edad

Maestrichtiano Tardío a Paleoceno Temprano.

Área tipo y límites

En el sentido de Hubach (1957) la formación Guaduas queda comprendida entre la Arenisca Tierna del Guadalupe superior hacia la base en un contacto neto y concordante, y hacia el techo con la Arenisca del Cacho en contacto neto. Se definen tres segmentos diferenciables.

Distribución en el área de estudio

Conforma la parte occidental de la cuenca de la quebrada La Trompeta, las estribaciones bajas de la Serranía de Encenillales del Mochuelo y fuera de la zona minera de Mochuelo, hacia el norte, conforma la parte media-baja de las laderas de Ciudad Bolívar (barrios Juan Pablo II y Juan José Rondón). Aflora también en las lomas de Suba.

Características físicas de la roca en el área tipo

- a) Conjunto Inferior (Tkgi): Conformado esencialmente por arcillolitas gris oscuras hasta fosilíferas hacia la base y hasta 130 m limonitizadas, presentan intercalaciones de lodolitas y capas delgadas de areniscas de grano fino con estratificación ondulosa, se considera un espesor de 220 m, hacia el techo, se presenta una secuencia de 90 m con mantos de carbón explotable intercalados con capas delgadas de lodolitas, limolitas con laminación lenticular y areniscas.

Espesor en el área de Bogotá: En el flanco occidental del sinclinal de Usme –Tunjuelito se presenta un espesor máximo de 70 metros (INGEOMINAS, 1988)

- b) Conjunto Medio (Tkgm): Está determinado por dos niveles de areniscas. En la base una secuencia de 30 m de areniscas de grano fino a medio en capas delgadas a medias de geometría cuneiforme las cuales se encuentran intercaladas con limolitas y lodolitas de laminación plano paralela, este segmento es conocido como Arenisca La Guía.

Sobre este segmento se encuentran 620 m de intercalaciones de mantos de carbón hasta de 3 m de espesor con secuencias de lodolitas laminadas, limolitas y esporádicas capas de arenisca de grano muy fino y nódulos de siderita, este conjunto conforma la parte productiva de la formación

Guaduas; la parte superior de este segmento constituye un conjunto de areniscas de grano fino con estratificación plano paralela y conglomerados de intraclastos, la cual conforma el nivel de Arenisca Lajosa que compone el conjunto arenoso más destacado de la formación.

Espesor en el área de Bogotá: En el sector del río San Cristóbal presenta un espesor de unos 280 metros (INGEOMINAS, 1988).

- c) Conjunto Superior (Tkgs): Consta de 220 m de limolitas y arcillolitas en capas gruesas y muy gruesas de colores rojizos, verdosos y azulosos intercalados con areniscas de grano medio dispuestas en capas medias cuneiformes.

Espesor en el área de Bogotá: En el flanco occidental del Anticlinal de Bogotá presenta un espesor de 324 metros (INGEOMINAS, 1988).

Características físicas de la roca en el área del proyecto

➤ LOMA LA CONEJERA

En la parte alta de la loma La Conejera, a lo largo de la vía y al lado de los senderos peatonales del Club La Montaña, aflora una secuencia sedimentaria conformada por areniscas cuarzosas de grano fino estratificadas en capas gruesas, tabulares a cuneiformes intercaladas con capas centimétricas de lodolitas y areniscas de grano fino.

Las capas gruesas de arenisca están generalmente bien cementadas (muy duras) y tienen espesor máximo de 80 cm, promedio entre 10 y 30 cm. Los granos son de tamaño fino a medio, mal seleccionados, de bordes angulosos. Hacia el techo de las capas más gruesas se presentan niveles fino granulares de lodo, de pocos milímetros generalmente de color marrón por oxidación, aspecto que ocurre de base a techo en algunas de las capas más delgadas (Fotografía 5, Anexo A). Ocasionalmente presentan oquedades y fragmentos centimétricos de lodolitas de forma ovalada aplanada (Fotografía 5, Anexo B).

De acuerdo a las características litológicas observadas en campo, las rocas encontradas en la parte alta de la ladera de La Conejera pertenecerían a niveles arenosos al tope del Miembro Inferior de la Formación Guaduas.



En afloramiento las capas se observan muy fracturadas, y se pueden desprender bloques de caras planas, con lados más o menos ortogonales, patrón de fracturamiento debido a dos orientaciones preferenciales de diaclasas (Fotografía 5).

Con respecto a la disposición estructural de las capas sobre la parte alta de La Conejera, estas se encuentran sub-horizontales. Se midieron los siguientes acimut de buzamiento: 244/7, 65/4, 222/7, 247/5, 5/7 y 358/8, que indican una tendencia del buzamiento hacia el SW.

➤ TANQUE SUBA DE LA EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ - EAAB

En el lado oriental del “Tanque Suba” de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB, aflora un segmento de intercalaciones de areniscas y lodolitas de la formación Guaduas.

El segmento corresponde a intercalaciones de capas delgadas de areniscas de hasta 2 cm de espesor con lodolitas en capas milimétricas. Las areniscas son de grano fino, en capas onduladas paralelas (longitud de onda $\lambda=10-15$ cm, amplitud $A=1,5$ cm).



El afloramiento es de calidad muy regular de apenas unos 3 metros cuadrados de área. En conjunto se observa intensamente fracturado y muy alterado por intemperismo. Se midió un acimut de buzamiento de 143/8.

➤ **TANQUE CASABLANCA DE LA EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ - EAAB (CIUDAD BOLIVAR)**

En una cantera antigua (Fotografía 7, Anexo A) a aproximadamente 200 metros al oriente del “Tanque Casablanca” de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB, aflora una secuencia sedimentaria conformada por un banco espeso (15 m aproximadamente) de cuarzo areniscas duras de grano fino a medio con matriz arcillosa, estratificadas en capas gruesas, cuneiformes de 1m de espesor promedio, intercaladas con capas centimétricas de lodolitas y areniscas de grano fino.



Sobre la quebrada que bordea el lado nor-occidental del tanque (Fotografía 7, Anexo B), afloran intercalaciones delgadas de areniscas de grano fino muy duras, con capas delgadas de arcillolitas y lodolitas de colores crema y rosado. Las capas de arenisca son tabulares y tienen entre 20 cm y 1 m de espesor.



Fotografía 8. Exposición del Miembro Medio de la formación Guaduas.

Imagen sobre la margen derecha de la quebrada dentro del predio del Acueducto (lado NW del tanque Casablanca). Longitud de la escala 1 metro.

Se realizaron mediciones de estratificación en afloramientos sobre las márgenes de la quebrada que bordea el tanque, con las que se calculó un centroide representativo de 50/15, que indica una inclinación de las capas hacia el NE en este sector.

➤ ALTOS DE CAZUCA (CIUDAD BOLÍVAR)

En la parte alta del barrio, en la zona no afectada por el deslizamiento aflora una secuencia sedimentaria de entre 15 y 20 metros de espesor conformada por cuarzo areniscas grises bien cementadas de grano fino, ocasionalmente con líticos, en capas lenticulares a cuneiformes, de espesor variable entre 5 cm a 2 metros con intercalaciones delgadas de lodolitas en capas de pocos milímetros a 15 cm. Como rasgos sedimentarios destacables se observa laminación interna inclinada y oquedades dejadas por lavado de fragmentos de forma ovalada de arcilla.

	
<p>Fotografía 9. Vista general al talud conformado por areniscas de la Formación Guaduas (Anexo A y Anexo B).</p> <p>ANEXO A: Izquierda parte alta del sector de Altos de Cazuca, ladera sur-occidental.</p> <p>ANEXO B: Derecha se muestra un detalle de la estratificación interna inclinada y marcas dejadas por el lavado de fragmentos de arcilla.</p>	

2.2.1.4. Formación Cacho (Tic)

Nombre

Propuesto por Scheibe (1918) como Arenisca del Cacho y adoptado por Julivert (1963) de la CSPG, el nombre de esta unidad procede del Pico del Cacho, ubicado al SW de Zipaquirá (Cundinamarca).

Edad

Paleoceno Medio a Superior.

Área tipo y límites

En el sentido de Hubach (1957) la formación Cacho queda comprendida entre las arcillolitas del miembro superior de la formación Guaduas hacia la base en contacto neto erosivo e inconforme progresivo de Oeste a Este, y las arcillolitas de la formación Bogotá en la parte superior en contacto neto y concordante; aflora a lo largo de los sinclinales de Sisga, Siecha, Sesquilé, Teusacá, Usme, Checua-Lenguazaque, Río Frío, Subachoque y anticlinal de Guatavita. Se define un espesor de 172 m.



Fotografía 10. Areniscas de la formación Cacho sector Nemocón

Distribución en el área de estudio

Aflora a manera de crestones (lomerío estructural) al occidente del sector de Aguasclaras y constituye la zona de separación entre este barrio y San Jerónimo del Yuste, hacia el piedemonte de los cerros orientales (zona sur). Desde este sector se distribuye hacia el norte hasta el sector de la quebrada La Vieja.

Espesor en el área de Bogotá

El espesor en la quebrada de San Cristóbal según Hubach (1957) es de 50-100 m.

Características físicas de la roca en el área tipo

En general la formación se compone de areniscas de grano fino a grueso de color pardo a blanco y rosado, son friables con textura ripiosa, hacia la base de la unidad presentan estratificación cruzada, presentan intercalaciones con capas delgadas a medias de arcillas abigarradas. Esta unidad arenosa se destaca por expresiones de relieve formando crestones.

Características físicas de la roca en el área del estudio

Las descripciones de la formación Cacho que se presenta se refieren a exposiciones del macizo rocoso en un cauce localizado sobre la Cra 1E que divide al Barrio El Paraíso de los predios actuales de la Universidad Javeriana al norte de la quebrada Arzobispo.

A lo largo del cauce se observan capas tabulares de lodolitas de colores abigarrados, en capas de entre 10 y 15 cm de espesor que alternan con capas de areniscas entre 20 y 30 cm de espesor. Las areniscas presenta grano decrecimiento hacia el tope, son cuarzosas de color claro, con tamaño de grano variable entre medio y muy grueso. Se identifican fragmentos líticos angulares entre 2 y 5 mm que forman parte de la armazón. Es común encontrar estratificación inclinada y superficies erosivas a nivel de capa. El armazón (fracción granular gruesa de la roca) se encuentra moderadamente cementado y en ocasiones se desagrega con los dedos. En los niveles más alterados del afloramiento sobre la quebrada se observan capas centimétricas de arcillolitas. De acuerdo a la localización del afloramiento se puede establecer que la exposición descrita anteriormente corresponde al contacto entre las areniscas de la formación Cacho y las arcillolitas de la formación Bogotá.



Fotografía 11. Aspectos de la secuencia sedimentaria que aflora sobre el cauce de una quebrada en el barrio El Paraíso.

ANEXO A: A izquierda se muestra arcillolitas de colores abigarrados, moderadamente duras con intercalaciones.

ANEXO B: A derecha se muestra en capas de hasta 30 cm de espesor.

2.2.1.5. Formación Bogotá (Tib)

Nombre

Propuesto por Hubach (1933) y definida la sección tipo por Julivert (1963) en la quebrada Zo Grande, flanco occidental del Sinclinal de Usme (valle del Tunjuelo).

Edad

Fauna analizada por Van der Hammen (en Hubach 1957) y Hoorn (1988) definen edad Paleoceno tardío - Eoceno temprano.

Área tipo y límites

Aflora en los núcleos de los sinclinales de Río Frío, Checua-Lenguazaque, Subachoque, Teusacá, Sesquilé y Sisga, estructuras donde no aflora el techo, en el sinclinal de Sisga se encuentra debajo de la formación La Regadera en contacto neto concordante, la base de la formación limita con la formación Cacho en contacto neto concordante.

Características físicas de la roca en el área tipo

Predominio de arcillolitas abigarradas, predominantemente rojas, con intercalaciones de areniscas verdosas friables de grano fino que gradan a limolitas y arcillolitas limosas, El espesor de la unidad es 1095 m.

Espesor en el área de Bogotá: En el flanco oriental del Sinclinal de Usme es de algo más de 1600 m.



2.2.1.6. Formación Areniscas de la Regadera (Tir)

Nombre

En el sentido de Hubach (1957), Julivert (1963) define al conjunto de areniscas de grano grueso y capas de conglomerados que aflora en el Sinclinal de Usme (valle del Tunjuelo).

El nombre de esta unidad procede del Embalse de La Regadera ubicado al sur de Usme (Cundinamarca).

Edad

Hoornt al (1987) con base en palinología asignan edad Eoceno Medio

Área tipo y límites

Las únicas exposiciones de la formación se restringen solo a los sinclinales de Usme y Sisga cuya expresión morfológica se caracteriza por colinas alineadas redondeadas. El contacto inferior de la unidad se presume concordante con la formación Bogotá, (Hoornt al 1987) lo considera discordante, el contacto

superior se da con la formación Usme en contacto discordante, en el sinclinal de Sisga el contacto superior es discordante con la formación Tilatá.

Características físicas de la roca en el área tipo

En general la secuencia se compone de capas medias a gruesas de areniscas de tamaño medio a grueso y capas de conglomerados a manera de bancos detríticos que alternan con capas de arcillas abigarradas y lodolitas arenosas varicoloreadas, composicionalmente son litoarenitas con cuarzo y líticos de chert, volcánicos y metamórficos de cuarcitas y pizarras.

Espesor en el área de Bogotá: Aflora en los flancos del Sinclinal de Usme con espesor estimado de 320 metros.



2.2.1.7. Formación Usme (Tiu)

Nombre

Propuesto por Hubach (1957) para designar las lodolitas que afloran en la parte superior del Sinclinal de Usme, Julivert (1963) distingue un nivel de lutitas en la base y uno arenoso al tope. El nombre proviene de la población de Usme (Cundinamarca).

Edad

Con base en datos palinológicos se le asigna una edad de Eoceno Superior a Oligoceno Inferior.

Área tipo y límites

Su ubicación se restringe al sinclinal de Usme donde se define la sección tipo, descansa sobre la formación Regadera en contacto discordante y al tope se encuentra cubierta por depósitos no litificados de las formaciones Tilatá, Marichuela y Sabana.



Fotografía 14. Nivel lodoso de la formación Usme sector Barrio El Yopal, Localidad de Usme

Características físicas de la roca en el área tipo

En general la secuencia se compone por lodolitas grises claras, con esporádicas intercalaciones de areniscas de cuarzo y feldespato, finas, en capas medias

paralelas, se definen dos niveles, el inferior de 100 m compuesto por arcillolitas cafés y grises y el miembro superior de 200 m compuesto por arcillolitas limosas varicoloreadas con intercalaciones de areniscas de grano fino a medio, al tope de la formación aparecen capas de lignito y restos de materia orgánica.

Espesor en el área de Bogotá: En el núcleo del Sinclinal de Usme se calcula un espesor de algo más de 300 metros, no aflora el tope.

2.2.2. Unidades de Suelos y Depósitos

Para las unidades del Neógeno al Cuaternario se usan denominaciones que tienen que ver con el tipo de depósito y con los ambientes depositacionales en donde se acumularon esos sedimentos. Para tal efecto se adoptó la nomenclatura de Helmens y Van der Hammen (1995).

En esta parte de la Cordillera Oriental, en la Sabana de Bogotá, se encuentra presente una secuencia casi continua de sedimentos principalmente fluviales y lacustrinos que representan al menos los últimos 6 millones de años. Tales unidades litoestratigráficas representan cuatro ambientes de deposición: *ambiente fluvial*, el cual no está relacionado con la topografía actual; un *ambiente fluvio-lacustrino*, que está relacionado con la gran cuenca tectono-sedimentaria de Bogotá; un *ambiente aluvial* con depósitos de flujo gravitacional y deposición fluvio-glacial y un cuarto *ambiente de montaña* con depósitos de pendiente y glaciares.

En la cuenca sedimentaria de la Sabana de Bogotá se pueden distinguir tres grupos litológicos principales, trece formaciones y tres miembros. A continuación se presentan únicamente las formaciones que se encuentran dentro de los límites del modelo hidrogeológico.

2.2.2.1. Sedimentos No Relacionados con la Topografía Actual

➤ GRUPO TILATÁ

Formación Marichuela (Tma)

Nombre

La formación Marichuela (Helmens, 1990)...” incluye (parte de) los “conos del Valle Tunjuelito” descritos por Julivert (1961). Con este nombre se designan los depósitos de carácter fluvio-torrencial y gravitacionales desarrollados durante el último pulso del levantamiento de la Cordillera Oriental y que provienen de un sistema de abanicos que se originan a alturas desde los 3.100 a 3.600 m.s.n.m. y “que se esparcen dentro de un paisaje de llanuras de inundación y lagos.” (Van der Hammen, 1995).

Edad

Para Helmens & Van der Hammen (1995), la formación Marichuela siempre se encuentra sobre el sustrato rocoso (rocas cretácicas), la alta deformación que sufren y el carácter sin-orogénico la sitúan por debajo de la secuencia pliocena-cuaternaria, por lo tanto sería del Mioceno. Toro et al., (2003), por huellas de fisión en circones arrojan con seguridad edades entre 2 y 5 millones de años (m.a.) que la colocan en el Plioceno, sin embargo presentan un dato de 8.2 m.a. correspondiente al Mioceno (Toro et al., 2003).



Fotografía 15. Depósitos de origen fluviotorrencial de la formación Marichuela sector Santa Librada

Área tipo y límites

Afloran en el valle de Usme, La Calera, Laguna de Neusa y en la región del Sisga, en la vereda Suralá.

Características físicas de los depósitos en el área tipo

Conforman depósitos matriz soportados de cantos angulares, redondeados a sub redondeados de areniscas de grano fino a muy fino, duras. Los cantos varían en tamaño y los más grandes suelen ser bloques de hasta 2 metros, se encuentran embebidos en matriz arcillo arenosa de grano grueso a conglomeráticas de coloración amarilla a rojiza, morfológicamente forman lomas bajas y abanicos de morfología alomadas muy largas de formas convexas y abruptas (Carvajal et. al. 2005). La formación presenta alto grado de deformación tectónica; ha sido interpretada como depósitos de flujos torrenciales y localmente gravitacionales, que se esparcen dentro de un paisaje de llanuras de inundación y lagos. Se le asigna un espesor de 40 m (Helmens 1990).

2.2.2.2. Sedimentos Relacionados con Ambientes de Montaña

➤ FORMACIÓN SAN MIGUEL (Qsm)

Nombre

La formación San Miguel (Helmens, 1990) incluye las secciones Villapinzón 1 y 2.

Edad

Aunque no se disponen de datos radiométricos absolutos, los datos palinológicos sugieren una edad de Pleistoceno Temprano a Medio

Área tipo y límites

Se encuentra en superficie corriente arriba, a lo largo del río Muña, en los cerros al norte de Facatativá y localmente en el valle de Usme. En éste último la formación yace sobre la formación Marichuela.

Características físicas de los depósitos en el área tipo

Arcillas (limo/arenosas) caoliníticas abigarradas y arenas arcillosas que a menudo contienen clastos subangulares muy meteorizados, que alternan con arcillas orgánicas, arenas y gravas. Son depósitos de pendiente con intercalaciones locales de sedimentos fluvio/lacustrinos, acumulados en condiciones climáticas glaciales. En el área del proyecto yace sobre sedimentos de la formación Marichuela. El espesor máximo es de al menos 15 metros.

➤ FORMACIÓN MONDOÑEDO

Esta formación, aunque no se muestra en la cartografía de este proyecto, se encuentra distribuida indistintamente sobre cualquiera de las litologías bien sea sobre las unidades de roca o sobre las unidades de depósito o suelo.

Nombre

Propuesto por Stirton (1953) para designar los suelos limosos de colores rojizos, marrones y negros que a menudo contienen clastos angulares de areniscas (Van der Hammen, 1995).

Edad

Cuaternario tardío (Menos de 500.000 años).

Área tipo y límites

Cubren grandes áreas en la parte inferior de las pendientes y los fondos de los valles. Generalmente están por encima de (o encajonados) en las arcillas de la formación Balsillas o reposan directamente sobre el substrato rocoso. Son el horizonte superior de la cobertura de suelos original de la ladera y aflora en zonas no intervenidas por la actividad extractiva.

En el Pleistoceno y el Plioceno existió un aporte de materiales volcánicos llegados en forma de lluvias de ceniza, como consecuencia de eventos eruptivos en la Cordillera Central. Debido a la distancia entre los focos eruptivos y la Sabana de Bogotá, estos materiales fueron depositados en forma de lluvia de cenizas finas,

que se preservaron en capas no alteradas en el fondo de los lagos o sufrieron transformaciones cuando cayeron sobre los relieves expuestos.

Características físicas de los suelos en el área de estudio

Son suelos negros limo-arenosos, poco plásticos, muy permeables, provenientes de cenizas, ricos en cuarzo tamaño arena (que constituye los suelos derivados del material parental de arenisca), con fracción limosa posiblemente transportada por el viento a partir de las erupciones volcánicas.

Se disponen en capas con espesor entre 30 cm (en zonas de ladera) y más de 1 metro en las zonas deprimidas; algunas veces las intercalaciones de suelos más claros desaparecen y dan lugar a secuencias espesas de suelos negros, con espesores cercanos 1 metro.

Intercaladas reposan capas de menos de 3 cm con guijos angulares, con tinción superficial de óxidos de hierro y horizontes de suelos pardos arenosos muy permeables, con guijos dispersos de gravas angulares (tamaño de 1 a 10 cm) con probable influencia glacial. El espesor de estas intercalaciones oscila entre 5 y 50 cm. Los sedimentos arenosos y limosos de la formación presentan una marcada variación lateral (Van der Hammen, 1995).



Fotografía 16. Depósito de suelos negros de la formación Mondoñedo Sector vía a la Pradera.

Sedimentos Relacionados con Ambientes de la Cuenca

➤ FORMACIÓN CHÍA (Qch)

Nombre

Helmens & Van der Hammen (1995), denominan formación Chía a los depósitos constituidos por sedimentos fluviales de grano fino que afloran a lo largo de los ríos principales que generalmente están por debajo de las llanuras de inundación de los ríos.

Edad

Los datos de C^{14} , arrojan edades del holoceno y hasta de 16.000 años (Van der Hammen, 2005).

Área tipo y límites

La formación Chía está sobre los sedimentos de la formación Río Tunjuelo o formación Sabana, afloran a lo largo de los ríos principales que generalmente están por debajo de las llanuras de inundación de los ríos.



Fotografía 17. Depósito fluvial formación Chía sector mina Gravicol municipio de Tabio.

Características físicas de los suelos en el área tipo

Arcillas de inundación, en ocasiones moteadas grises y naranja (como se observa en el sector de Chía) y en áreas fangosas, arcillas orgánicas/diatomíticas (Qch1). Localmente pueden contener limos fluviales (Qch2). Conforman una cobertera delgada de limos fluviales sobre gravas de la formación Tunjuelo (Qch3). Pueden interpretarse como arcillas de inundación y localmente pueden tener origen coluvial-fluvial (Helmens & Van der Hammen, 1995). Para Carvajal et al (2005), estos depósitos forman terrazas fluviales por erosión, son planas, de suave pendiente y son talladas por la acción de las corrientes fluviales actuales. El espesor máximo es de 5 m.

➤ FORMACIÓN RÍO TUNJUELO (Qrtsa)

Nombre

Helmens & Van der Hammen (1995), llaman formación río Tunjuelo al depósito constituido por sedimentos de grano grueso a lo largo de los ríos que cruzan la Sabana de Bogotá.

Edad

La edad asignada para este depósito es determinada por datos palinológicos y C^{14} y le asignan una edad Pleistoceno para la parte más superior. Sin embargo Van der Hammen (2003), considera que toda la formación río Tunjuelo cubre todo el Pleistoceno.

Área tipo y límites

Esta formación aflora en el Valle de Guasca, en la zona del río Tunjuelo y en cercanías a la cabecera del municipio de Cogua, estos sedimentos se han encontrado sobre rocas de la formación Marichuela en el río Tunjuelo y son recubiertas por una delgada capa de sedimentos finos de la formación Chía (Helmens & Van der Hammen, 1995).



Fotografía 18. Depósitos fluviales de la formación Río Tunjuelo Sector Parque Bavaria en el Centro Internacional de Bogotá.

Características físicas de los suelos en el área tipo

Helmens & Van der Hammen (1995) caracterizan esta formación como secuencias de gravas con intercalaciones de arenas arcillosas, arcillas, arcillas orgánicas y arcillas turbosas; las gravas pueden mostrar gradación, los cantos son redondeados con diámetros hasta de 40 cm.

En ciertas localidades los sedimentos constituidos por gravas pueden tener espesores de hasta 80 m (río Tunjuelo), según estos autores, esta formación está presente en varios niveles de terraza fluviales y son el resultado de depósitos en los valles marginales de la cuenca de la Sabana en donde se depositaron sedimentos arenosos; las gravas son depositadas en los canales a lo largo de los ríos, luego hubo periodos donde hubo sedimentación de material fino desde el centro de la cuenca a estos valles y se depositan arcillas y turbas.

Para Carvajal et al. (2005), estos depósitos son de origen fluvial, forman abanicos aluviales explayados y aterrazados con suaves pendientes.

➤ FORMACIÓN SABANA (Qsa)

Nombre

Se denomina formación Sabana a los depósitos lacustres que afloran en toda la zona plana y que hace parte de la Sabana de Bogotá. Para Helmens & Van der Hammen (1995), esta formación está constituida principalmente por arcillas y hacia las márgenes de la cuenca se observan arcillas orgánicas, arenosas y turba-lignita.

Edad

Por datos de huellas de fisión, ¹⁴Carbono, indican una edad Pleistoceno Medio y Tardío (Helmens & Van der Hammen, 1995).

Área tipo y límites

La formación Sabana se encuentra sobre los sedimentos de la formación Subachoque.

Características físicas de los suelos en el área tipo

Para Helmens & Van der Hammen (1995) el mayor espesor de la unidad es de 320m en la sección tipo Funza II (perforación). El depósito está constituido por sedimentos finos principalmente por arcillas de color gris con algunas intercalaciones hacia la parte media de arenas finas. Localmente los dos metros superiores presentan un complejo de suelos constituidos por cenizas volcánicas.

Para Carvajal et al. (2005), este depósito es el resultado de la acumulación de sedimentos finos en un antiguo lago, con fluctuaciones en el nivel de agua: principalmente arcillas lacustres (Qsa1), y hacia los bordes de esta cuenca sedimentaria arcillas orgánicas, turbas, arcillas arenosas y arenas (arcillosas) intercaladas (Qsa2). Este lago dejó planicies y deltas lacustres, los cuales son extensos, de aspecto aterrazado y con morfología ondulada suavemente inclinada y limitada hacia los cauces por los escarpes.

2.2.3. Otras Unidades

2.2.3.1. Depósitos de Pendiente (Qdp)

Son depósitos acumulados durante el Cuaternario reciente, de diferente granulometría que van de limosos a arenosos con bloques, depósitos de abanicos aluviales y sedimentos lacustrinos, todos de origen local.

2.2.3.2. Restos de Meteorización de Areniscas del Guadalupe (Trm)

Incluye bancos de areniscas desintegradas rodeadas por grandes concentraciones de arcillas caoliníticas limosas y arenosas, con intensos colores rojizos. El drenaje es principalmente subterráneo.

2.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Para dar contexto a los aspectos estructurales en el área de éste estudio, es necesario entender de manera general algunos aspectos de la geología regional que explicarían a nivel local la existencia de ciertas estructuras de plegamiento y fallamiento. Dichas estructuras no son otra cosa que la expresión de la deformación que presenta la corteza en esta parte de la sabana de Bogotá, producto del levantamiento de la Cordillera Oriental.

El siguiente aparte se toma del trabajo de geología realizado por el grupo de investigación en Geología Terrae, en el marco del estudio de la Sabana de Bogotá para el Ministerio de Ambiente y el IDEAM en el 2010.

2.3.1. Marco Tectónico de la Cordillera Oriental

Según Dimaté et al. (2002) los Andes Colombianos son una amplia zona de deformación continental que vincula 3 dominios tectónicos: (1) el cratón suramericano en el oriente, (2) el Complejo Caribeño en el norte y (3) las placas de Cocos y Nazca.

La convergencia relativa entre estas placas es absorbida principalmente por la subducción a lo largo de la cuenca colombo-ecuatoriana, la fosa caribeña del norte y por la deformación a lo largo de zonas de fallas activas y principales paralelas a los piedemontes de las cordilleras Oriental, Central y Occidental.

La Cordillera Oriental se conformó mediante múltiples fases de deformación a lo largo de la historia geológica. La primera fase de orogenia registrada es de mediados del Cretácico (cerca de 100 millones de años) y continuó de manera lenta hasta mediados del Terciario.

El pulso de levantamiento más fuerte fue desde finales del Mioceno hasta finales del Plioceno o inicios del Pleistoceno (cerca de 2 millones de años). Está conformada mediante un estilo estructural de cabalgamientos de escama gruesa (alcanza grandes profundidades), convergencia este y oeste (estructura en flor).

A nivel regional la Cordillera Oriental muestra diferentes estilos estructurales:

➤ EL DOMINIO NORTE

Ubicado entre Tunja y Bucaramanga, caracterizado por pliegues y fallas con acimut N-NE, consistentes con un acortamiento en dirección E-SE.

➤ EL DOMINIO CENTRAL (que incluye la Sabana de Bogotá)

Ubicado entre Tunja y el Páramo de Sumapaz, se caracteriza por pliegues apretados y fallas con dirección NS y NNE en el flanco occidental y por cabalgamientos escalonados en el flanco oriental; dichos cabalgamientos constituyen los bordes de la amplia meseta denominada Sabana de Bogotá.

➤ EL DOMINIO SUR

Al sur del Páramo de Sumapaz correspondiente a la zona de estrechamiento de la Cordillera, caracterizado en su flanco oriental por fallas principales de alto ángulo orientadas hacia el NE, con componente transpresivo y el flanco occidental por fallas de cabalgamiento con vergencia oeste y pliegues anchos y elongados.

2.3.2. Marco Tectónico de la Sabana De Bogotá

En la zona que hoy ocupa la Sabana de Bogotá la cordillera muestra un engrosamiento notorio en el que se encuentran los altiplanos Cundi-Boyacenses y la presencia de sucesivos anticlinales y sinclinales, por lo general fallados con sus flancos invertidos. Todas las estructuras ofrecen una dirección NE-SW sensiblemente paralela al eje general de la Cordillera Oriental y los pliegues presentan un cabeceo hacia el sur de la Sabana.

Además de las estructuras regionales, existen zonas con diapirismo de sal generalmente localizadas en el núcleo de los anticlinales. El diapirismo es un generador de estructuras muy complejas, interrumpen las fallas y pliegues regionales como es el caso en Zipaquirá y Nemocón, donde hay bloques de roca de diferentes unidades conectados por fallas de poca extensión y con un angostamiento considerable de los anticlinales.

Situación estructural parecida se observa en la serranía que se prolonga desde el sector de Sesquilé hasta el Municipio de La Calera, donde probablemente exista en el subsuelo actividad de diapirismo responsable del angostamiento de la serranía en el sitio denominado como El Salitre (a 10km al norte de la Calera) y de la escamación de fallas de cabalgamiento que producen una saliente hacia el oriente entre el Salitre y la Calera. (INGEOMINAS 2005).

La Sabana de Bogotá está ubicada geográficamente en el cinturón donde la Cordillera Oriental muestra un engrosamiento (INGEOMINAS, 1988), en el cual se configuran diferentes estructuras de plegamiento, por lo general fallados y con sus flancos invertidos.

Las estructuras tienen una dirección predominante NE-SW, con un cabeceo perceptible hacia el norte de la Sabana.

Para definir aspectos de la tectónica de la Sabana de Bogotá, se han postulado dominios o bloques que agrupan características estructurales similares; esta distribución permitió subdividir la Sabana en tres partes:

- a) Bloque localizado al norte de la Falla de Usaquén
- b) Bloque localizado al sur de la falla de San Cristóbal

c) Bloque central hundido, situado entre las fallas de Usaquén y San Cristóbal (INGEOMINAS, 1988).

2.3.3. Sistema Estructural

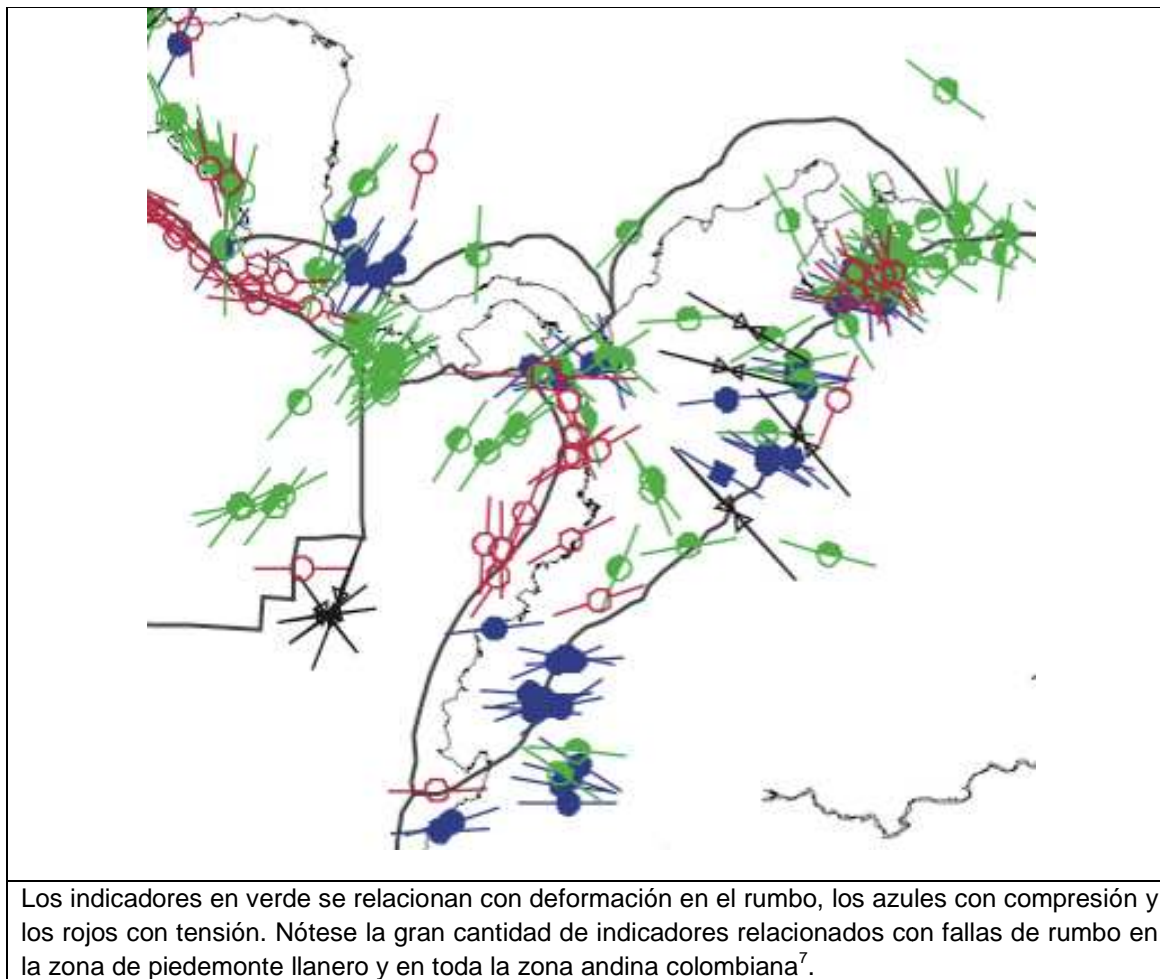
La documentación de estructuras transversales se relaciona con mediciones regionales, tales como el Mapa Mundial de Esfuerzos⁵ y estudios de paleomagnetismo.⁶

El mapa de esfuerzos (Figura 2) muestra una gran cantidad de esfuerzos medidos que se relacionan con deformación en el rumbo (a partir de mediciones de campo, breakouts en pozos petroleros, etc.) y que no se encuentra lo suficientemente soportada en los mapas geológicos publicados por el Instituto Geológico, en particular para la Cordillera Oriental.

⁵ Heidelberg Academy of Sciences and Humanities, www.world-stress-map.org

⁶ Universidad de Leeds. Mapa de anomalías magnéticas.

Figura 2. Mapa Mundial de Esfuerzos y los resultados para Colombia.



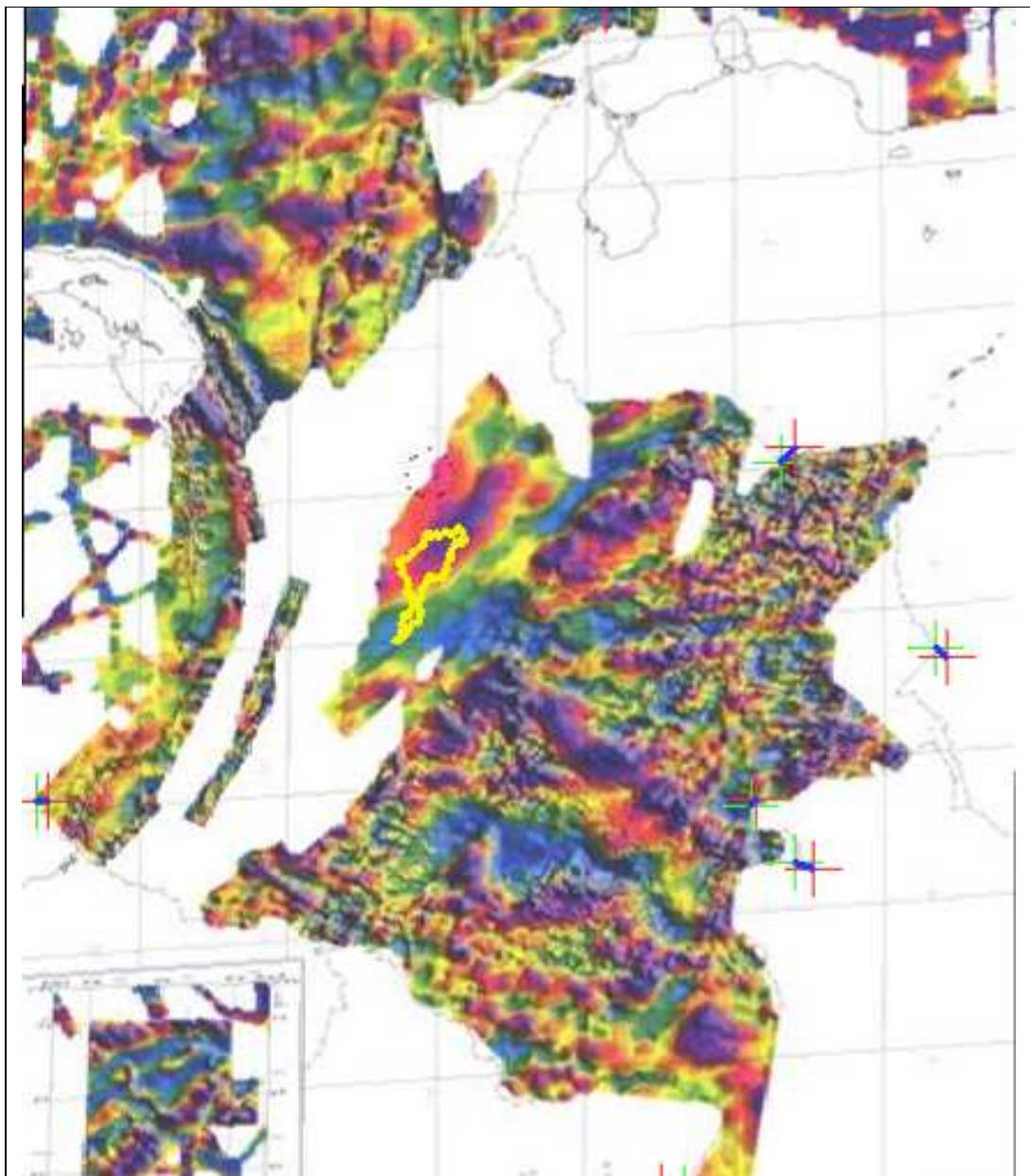
En cuanto a los mapas de anomalías magnéticas, entre las aplicaciones de la información magnetométrica se encuentra la detección de rasgos estructurales en basamento y la posible localización de fallas, es decir, la distribución de las anomalías puede indicar la presencia de fallas de rumbo las cuales se extienden bajo la cubierta sedimentaria.⁸

⁷ Opcit.

⁸ Sacramento State University, www.csus.edu

De acuerdo con el mapa de anomalías magnéticas de la Universidad de Leeds, el rasgo más conspicuo corresponde a una franja en dirección N60W, cuyo extremo noroeste se encuentra hacia la zona de estudio (Figura 3).

Figura 3. Mapa de Anomalías Magnéticas para una altura de 20 Km.



Nótese el fuerte rasgo en dirección N60W que discurre a lo largo de la línea Mitú – Ariari – Sur de Bogotá. En amarillo se destaca el polígono del Distrito Especial de Bogotá.

La propuesta técnica del Grupo de Investigación Terra se relaciona con la documentación de los patrones de deformación tectónica presentes en la Sabana de Bogotá, dadas sus fuertes implicaciones ambientales.

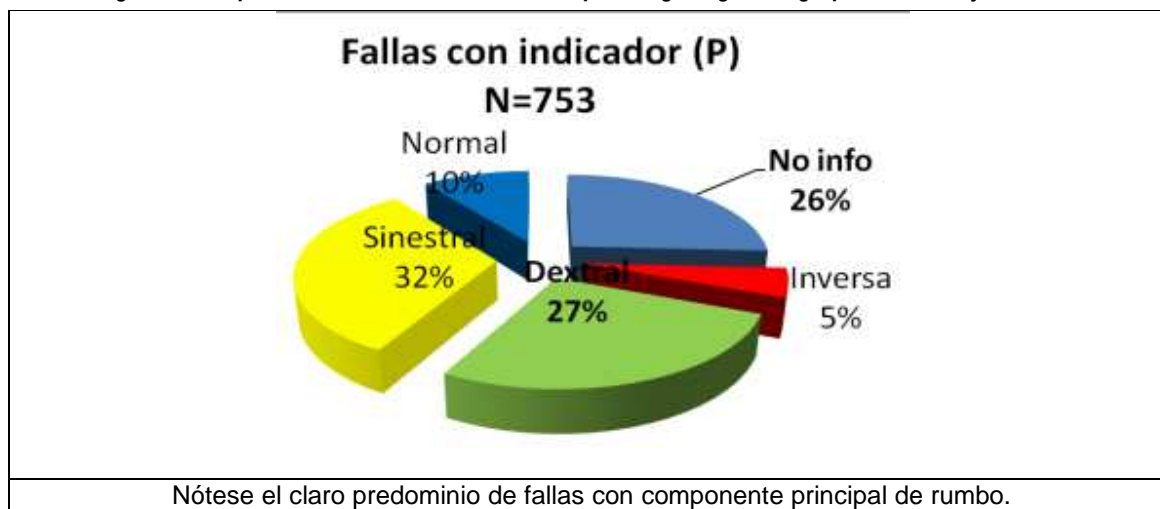
El hecho de que exista una deformación predominantemente en el rumbo, se relaciona con aspectos de fracturamiento y el consiguiente aumento en permeabilidad de las secuencias rocosas que define las zonas prioritarias de recarga de acuíferos (en caso que las litologías respondan a deformación frágil y que exista disponibilidad del recurso hídrico).

La tectónica de la Sabana de Bogotá ha sido definida como de estilo estructural compresivo, donde son típicos los anticlinales estrechos y los sinclinales amplios, con una tendencia de dirección NNE-SSW, generalmente limitados por fallas de cabalgamiento definidas por la falta de registro estratigráfico, como es el caso de la falla de Bogotá en la zona de estudio, prácticamente a todo lo largo del límite oriental del modelo hidrogeológico.

Sin embargo, las inversiones de los dos flancos de la totalidad de las estructuras regionales, separadas generalmente por valles cordilleranos; las zonas con rotación en la dirección de dichas estructuras y grandes áreas con deformación tectónica intensa, muestran rasgos cinemáticos con una predominancia casi total correspondiente a fallas transversales de desplazamiento lateral izquierdo, especialmente en el sur de la Sabana de Bogotá (Fierro & Ángel, 2008).

De igual manera, los datos de fallas con indicadores cinemáticos muestran un gran predominio de fallas de rumbo o con movimiento predominante en el rumbo (Figura 4.).

Figura 4. Compilado de datos de fallas medidas por los geólogos del grupo Terra a Mayo de 2008.



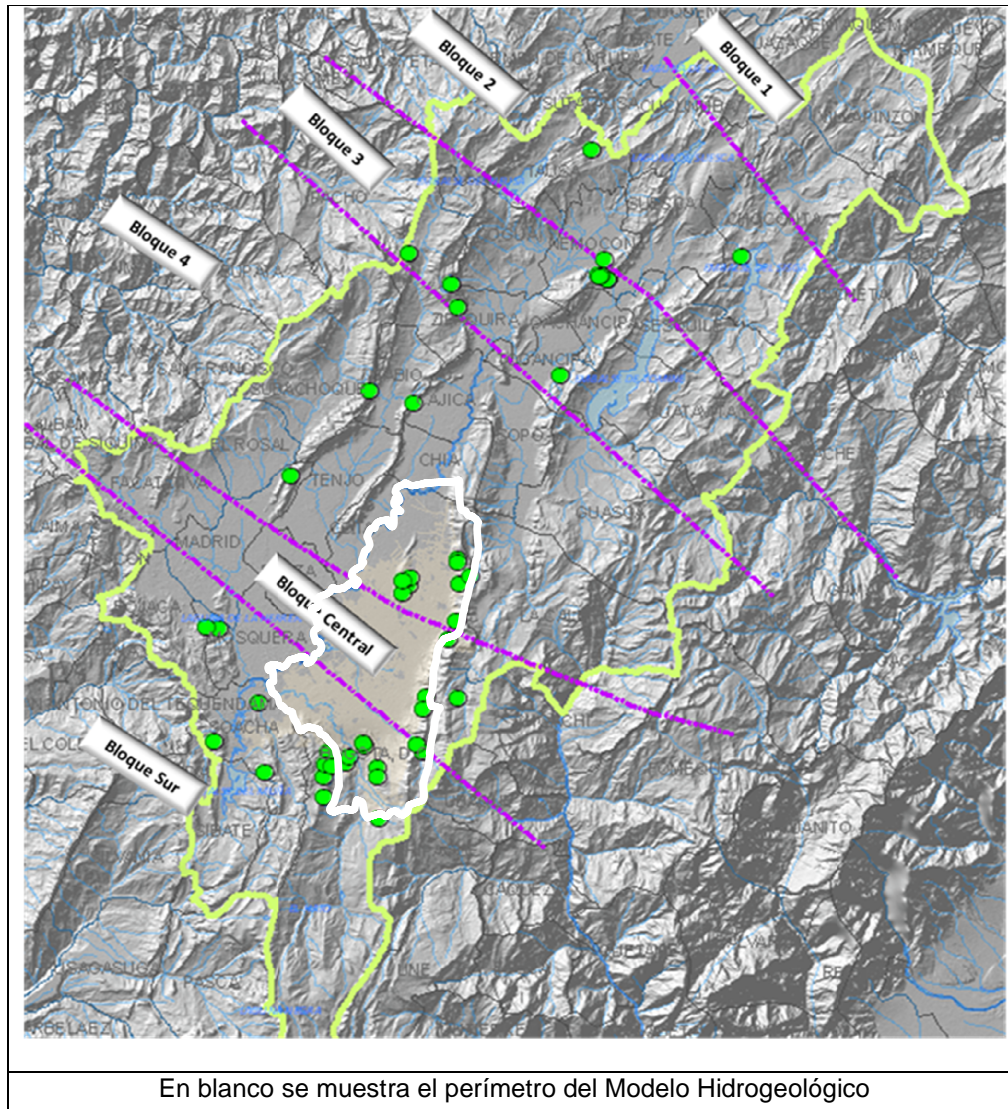
2.3.4. Fallas Transversales y División de la Sabana en Bloques Tectónicos

La existencia de un sistema transversal a la cordillera ha sido propuesto por Hubach, 1929; Royo y Gómez, 1946; Dehandschutter 1980; Gómez, 1991; Ujueta, 1988 y 2001; y Velandia & De Bermoudes, 2002 y Fierro-Morales & Bernal, 2009 y esbozadas como estructuras potencialmente sismogénicas por Mojica, 2007 y por Fierro-Morales y Ángel, 2008.

A partir de la revisión de información geológica y tectónica de informes internos de INGEOMINAS, de otros autores y de la información primaria generada por el Grupo de Investigación Terra, el grupo propone una nueva subdivisión, respetando la división gruesa planteada por INGEOMINAS en los estudios de Microzonificación Sísmica de Bogotá (INGEOMINAS – Universidad de Los Andes, 1999).

Otra de las fuentes de información en que se soporta la propuesta es en Gómez, H. (1991) quien postula la Paleomegacizalla de Colombia y relaciona la ubicación de conos volcánicos activos, evaporitas y domos salinos con su existencia.

Figura 5. Bloques propuestos a partir de los principales rasgos transversales.



La describe como una faja de 150 km de ancho promedio, con dirección regional N45W. Para la Sabana de Bogotá la ubica a lo largo de Albán, Facatativá-Madrid atravesando hacia Usme. De igual manera define las fallas de Nemocón-Rionegro, Salitre y Usaquén-Sasaima. Estas dos últimas son propuestas como satélites, relacionadas con el origen de la Sabana de Bogotá.

La distribución estructural descrita permite subdividir la Sabana en tres elementos: Bloque Norte situado al norte de la Falla de Muzo; Bloque Central localizado entre las fallas de Usaquén y San Cristóbal; Bloque Sur localizado al sur de la falla de San Cristóbal-Zipacquirá (Figura 5). Esta división informal a su vez se encuentra dividida en varios segmentos, listados a continuación:

➤ BLOQUES NORTE

Bloque 1 (al norte de la Falla de Muzo)

Fallas

- Andinas: Chocontá, Villapinzón, Farasia
- Transversales: Muzo

Pliegues: Anticlinal de Ventaquemada, Anticlinal de Chocontá

Bloque 2 (Entre las Fallas Nemocón-Rionegro y Muzo)

Fallas

- Andinas: Suralá, Cucunubá, Carupa, Sutatausa
- Transversales: Falla de Nemocón, Lineamiento Nemocón, Neusa

Pliegues: Sinclinal Sisga, Anticlinal San José, Anticlinal Suesca, Sinclinal Suesca, Anticlinal Nemocón, Sinclinal Checua, Anticlinal Tausa, Anticlinal Zipacquirá.

Bloque 3 (Entre las fallas de Zipaquirá – Teusacá y Nemocón)

Fallas

- Andinas: Suralá, Chocontá-Pericos
- Transversales: Teusacá, Zipaquirá, Guatavita, El Pino.

Pliegues: Sinclinal Sisga, Sinclinal Sesquilé, Anticlinal Sopo-Sesquilé, Anticlinal de Nemocón, Anticlinal Zipaquirá, Sinclinal de Riofrío.

Bloque 4 (Entre las fallas de Usaquén-Juan Amarillo y Zipaquirá – Teusacá)

Fallas

- Andinas: Teusacá, El Porvenir, Subachoque
- Transversales: La Pradera, Tabio, Cota y Usaquén-Juan Amarillo

Pliegues: Anticlinal Bogotá, Anticlinal Tabio, Sinclinal Subachoque.

- **BLOQUE CENTRAL** (Entre las fallas de San Cristóbal – Facatativá y Usaquén-Juan Amarillo y Zipaquirá)

Fallas

- Andinas: Bogotá
- Transversales: Verjón-Las Delicias, Zuque, San Cristóbal – Facatativá

Pliegues: Sinclinal Teusacá, Anticlinal Bogotá

➤ BLOQUE SUR (Al sur de la Falla de San Cristóbal – Facatativá)

Fallas

- Andinas: Río Tunjuelo, Cajitas, Sibaté, Sistema de Fallas Tequendama
- Transversales: Zona de Cizalla del Sur de Bogotá (ZCSB), Sistema de Falla de Mondoñedo, Sistema de Fallas de Santa Bárbara

Pliegues: Sinclinal Usme, Anticlinal Mochuelo, Sinclinal Sibaté

A continuación se presenta la identificación de rasgos estructurales, valiéndose de la información que aporta Caro (Ingeominas, 1988), respetando la distribución estructural descrita que permite subdividir la Sabana en tres elementos: Bloque Norte situado al norte de la Falla de Usaquén-Juan Amarillo, Bloque Central localizado entre las fallas de Usaquén y San Cristóbal, bloque Sur localizado al sur de la falla de Facatativá – San Cristóbal.

➤ **BLOQUE NORTE DE LA SABANA DE BOGOTÁ**

Bloque tectónico de la sabana que limita hacia el sur con la Falla de Usaquén – Juan Amarillo.

Esta es una de las estructuras documentadas de manera muy completa desde la primera mitad del Siglo XX. Royo y Gómez (1942) define una estructura con dirección N50W a partir del control del río Juan Amarillo. La falla presenta movimiento deslizante horizontal sinistral.

Se relaciona con la terminación abrupta del extremo sur de las sierras de Suba, Juaica y Manjuy los cuales corresponden a estructuras anticlinales que ofrecen una abrupta terminación en el extremo sur. De manera análoga con la terminación norte del Anticlinal de Bogotá – Usaquén. Controla el río Chicú hacia su desembocadura en el Bogotá y su control sobre el río Juan Amarillo es muy fuerte.

De acuerdo con la información consignada por la DPAE (2007), esta falla controla el espesor de sedimentos en la cuenca, es decir, la forma de la cuenca.

Identificación de rasgos estructurales transversales en el bloque tectónico norte, dentro del área delimitada por el Modelo Hidrogeológico de Bogotá.

Predominan fallas de tipo rumbo deslizantes sinestrales a saber: Falla ramal de Usaquén, Falla de Torca y Falla de La Floresta, con orientaciones entre N50W y N65W con desplazamientos en la horizontal de entre 200 y 300 metros. Como rasgo morfotectónico se aprecia fuerte control del curso de cauces, como es el caso de la quebrada de La Floresta.

Como fallas dextrales se observa la Falla del Boquerón del Carbón que corta y desplaza la loma de La Conejera de las lomas de Suba y que debido a la extensión de su trazo se considera de carácter local. La otra falla de este tipo es una falla de carácter regional, que cruza la cartografía de SW a NE, que aquí se nombra como Falla Lagartos – Codito y que se describe en el siguiente bloque tectónico.

➤ **BLOQUE CENTRAL DE LA SABANA DE BOGOTÁ**

Delimitado al norte por la falla Usaquén – Juan Amarillo y al sur por la falla Facatativá - San Cristóbal, es el bloque tectónico que presenta los mayores espesores de cobertura de sedimentos en la sabana de Bogotá, y de acuerdo con la información consignada por la DPAE (2007), la forma de esta parte de la cuenca se encuentra controlada por la Falla Usaquén – Juan Amarillo. Como ya se indicó, ésta es una de las estructuras muy bien documentada desde la primera mitad del Siglo XX. Royo y Gómez (1942) define una estructura con dirección N50W a partir del control del río Juan Amarillo y de termales alineados en el sector de Los Lagartos (antiguamente denominado Aguascalientes).

A partir de criterios geológicos, geomorfológicos y geoquímicos el autor establece: "...El extremo SW del cerro escarpado, como cortado transversalmente, y con una ladera de pendiente fuerte. Asoman allí las capas en toda su magnitud y con la inclinación y buzamiento anteriormente indicados. Esa forma topográfica y ese modo de presentarse aquí los estratos es debido a otra falla de dirección NW a SE que pasa por el... Club de Los Lagartos y por todo el borde SW del cerro,

coincidiendo con los puntos en donde aparecen los manantiales termales y fríos de Las Pléyades”

Identificación de rasgos estructurales transversales en el bloque tectónico central, dentro del área delimitada por el Modelo Hidrogeológico de Bogotá.

Fallas de tipo dextral se identifica el tramo oriental de la falla de La Picota la cual se tratará en el bloque tectónico sur.

Se identifica una falla dextral de carácter regional, que bordea el límite occidental del Modelo y que puede ejercer control estructural sobre un tramo de poco más de 7 kilómetros del curso del Río Bogotá. Esta falla aunque regional, se nombra aquí con nombres locales: Falla Lagartos – Codito. Un rasgo importante de esta falla es que al cruzar la falla de Usaqué – Juan Amarillo, lo hace hacia el extremo sur de las lomas de Suba, y junto con ésta falla, parece controlar la continuidad hacia el sur de estas lomas. Es posible que tenga que ver con las manifestaciones hidrotermales en el club de los Lagartos. A lo largo de su trazo sobre esta parte de los cerros orientales, se nota en su vecindad la fuerte reorientación del rumbo general de las estructuras, junto con el truncamiento de pliegues menores tipo anticlinal.

Entre las fallas de tipo sinistral, se destaca la falla de Santa Bárbara que define el curso del río San Francisco, antes de llegar a la sabana y que marca como rasgo principal el cambio en la orientación de la inclinación de las capas de las unidades rocosas al occidente de la falla de Bogotá: al norte de la falla capas invertidas e inclinadas hacia el SE, al sur de la falla capas en posición normal e inclinadas hacia el NE. Se calcula un desplazamiento horizontal de aproximadamente 100 metros.

En este bloque central y al sur de la falla de Usaqué – Juan Amarillo, en los cerros orientales se encuentra un conjunto de varios ramales, paralelo a ésta con una dirección N40W- N45W. Involucra rocas del Grupo Guadalupe y presenta en general inversión de los estratos con rumbo al NE, excepción hecha de una porción del terreno que muestra entre dos ramales capas normales e inclinadas hacia la sabana (NW) que en pocos metros se vuelven verticales para invertirse a la pata del cerro e inclinarse al SE.

➤ BLOQUE SUR DE LA SABANA DE BOGOTÁ

Por último el Bloque tectónico sur de la Sabana de Bogotá, delimita al norte con la Falla Facatativá - San Cristóbal. De particular relevancia en el área del modelo hidrogeológico de la SDA, se expresa en la zona de los cerros orientales de Bogotá, en el sector de la cuenca del río Fucha a lo largo de su cauce.

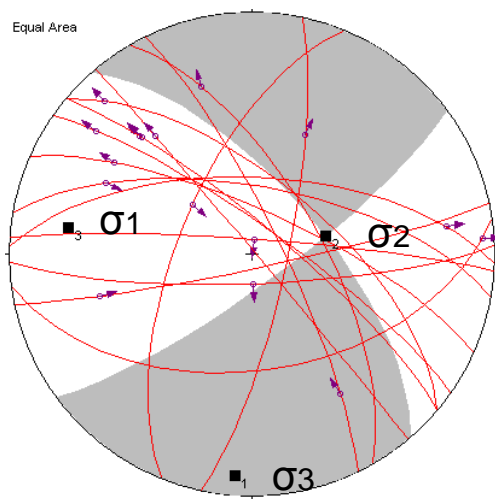
Propuesta por Hubach en 1929. Hace parte de una serie de estructuras que el mismo autor denominó como estructuras N56W. Define la morfología de la Sabana de Bogotá hacia el sur y controló la depositación de sedimentos a lo largo del Pleistoceno, de acuerdo con los datos de espesores definidos por la DPAE (2007).

El siguiente aparte se toma del trabajo de geología de la cuenca del río Fucha o San Cristóbal llevado a cabo por Fierro et. al., 2007. Los rasgos morfológicos relacionados con la falla incluyen alineamiento de valles, lomos y cursos de agua (especialmente los ríos Fucha y la quebrada La Upata) a lo largo de más de 30 km. Es probable que el cambio de curso del río Bogotá inmediatamente al sur del Aeropuerto Eldorado también esté relacionado con esta falla, en donde se observa en el cauce un discurrir de norte a sur en general, para torcer unos 70 grados hacia el sur occidente. Otros rasgos de interés son el afloramiento de rocas del Grupo Guadalupe a manera de islas dentro de la planicie de la Sabana al norte de esta falla.

El desplazamiento lateral izquierdo (sinistral) calculado a partir de rasgos morfotectónicos en la zona de El Yuste (cerros orientales de Bogotá) es de aproximadamente 300 metros.

El análisis cinemático de soluciones de planos de falla indican una contracción local σ_1 de 280/ 24, σ_2 de 76/64 y σ_3 de 184 / 8. Los planos de fallamiento teórico son 49 / 67 y 144 / 80, concordantes en orientación con las fallas de rumbo que conforman patrones conjugados, denotando las franjas de máxima extensión (franja sombreada) y de máxima compresión (Franja blanca), como se observa en la figura 6.

Figura 6. Soluciones de planos de falla para las fallas mesoscópicas registradas en la zona del río San Cristóbal.



Dentro de este bloque, delimitado al norte por la falla de Facatativá – San Cristóbal, se destaca como la principal estructura, de carácter regional, la Zona de Cizalla del Sur de Bogotá.

Esta zona de cizalla propuesta por Fierro y Ángel (2008) es una franja de deformación conformada por secuencias de fallas rumbo- deslizantes con dirección N50W a E-W de carácter sinistral, que generan amplias zonas de transferencia, y se caracterizan por presentar alto grado de brechamiento y replegamientos menores. Como rasgo morfo-tectónico destacable debido a esta zona de deformación, se observa en el área de influencia de la zona minera del Tunjuelo la desviación y truncamiento abrupto del trazo del eje del Sinclinal de Usme al norte de la estructura, en el sector de las lomas de Guacamayas (desviación de 30° al NW del rumbo predominante N-S de la estructura).

Dentro de la zona de cizalla, se diferencian dos tipos de deformación relacionadas con sistemas de fallas de rumbo: uno con dirección NW y un sistema conjugado NE. Son observables rasgos morfogeológicos a escala meso y regional que evidencian el sentido de movimiento de cada sistema: las fallas orientadas al NE son fallas de rumbo dextrales, caracterizadas por presentar en planta movimiento

relativo hacia la derecha del bloque opuesto al observador y las orientadas al NW, fallas de rumbo sinestrales con movimiento relativo hacia la izquierda del bloque opuesto, también conocidas como estructuras de fallamiento transversal. No obstante prevalecer el movimiento en la componente horizontal (fallas de rumbo) también se verifica en la componente vertical, ya sea como falla inversa o falla normal, según sea el caso analizado.

3. HIDROLOGÍA

Como parte de las fases a la implementación de un modelo hidrogeológico conceptual como insumo para el modelo matemático que permita simular el comportamiento del agua subterránea en el Distrito Capital, se ha desarrollado una actividad importante la cual se relaciona con el análisis climatológico e hidrológico del área de estudio; dado que como parte de este resultado, es posible conocer cuál es la recarga potencial de las aguas subterráneas en el Distrito y las posibles zonas de mayor recarga de acuerdo con el comportamiento climatológico e hidrológicos de la jurisdicción de la Secretaria Distrital de Ambiente. En este capítulo se presenta el análisis de la información hidroclimatológica (series históricas de lluvias, temperaturas, evaporación, caudales en los cauces principales de las cuencas de los ríos Tunjuelo, Fucha y Salitre), siendo el objetivo principal, estimar la recarga potencial hacia las aguas subterráneas.

Estos análisis hidrológicos de la zona, tienden esencialmente a estimar los volúmenes de agua que se infiltran; centrándose en una caracterización climática (análisis temporal y espacial de datos de lluvia, temperatura y evapotranspiración) para obtener como resultado final el balance hídrico regional que permite calcular la recarga potencial en el Distrito Capital.

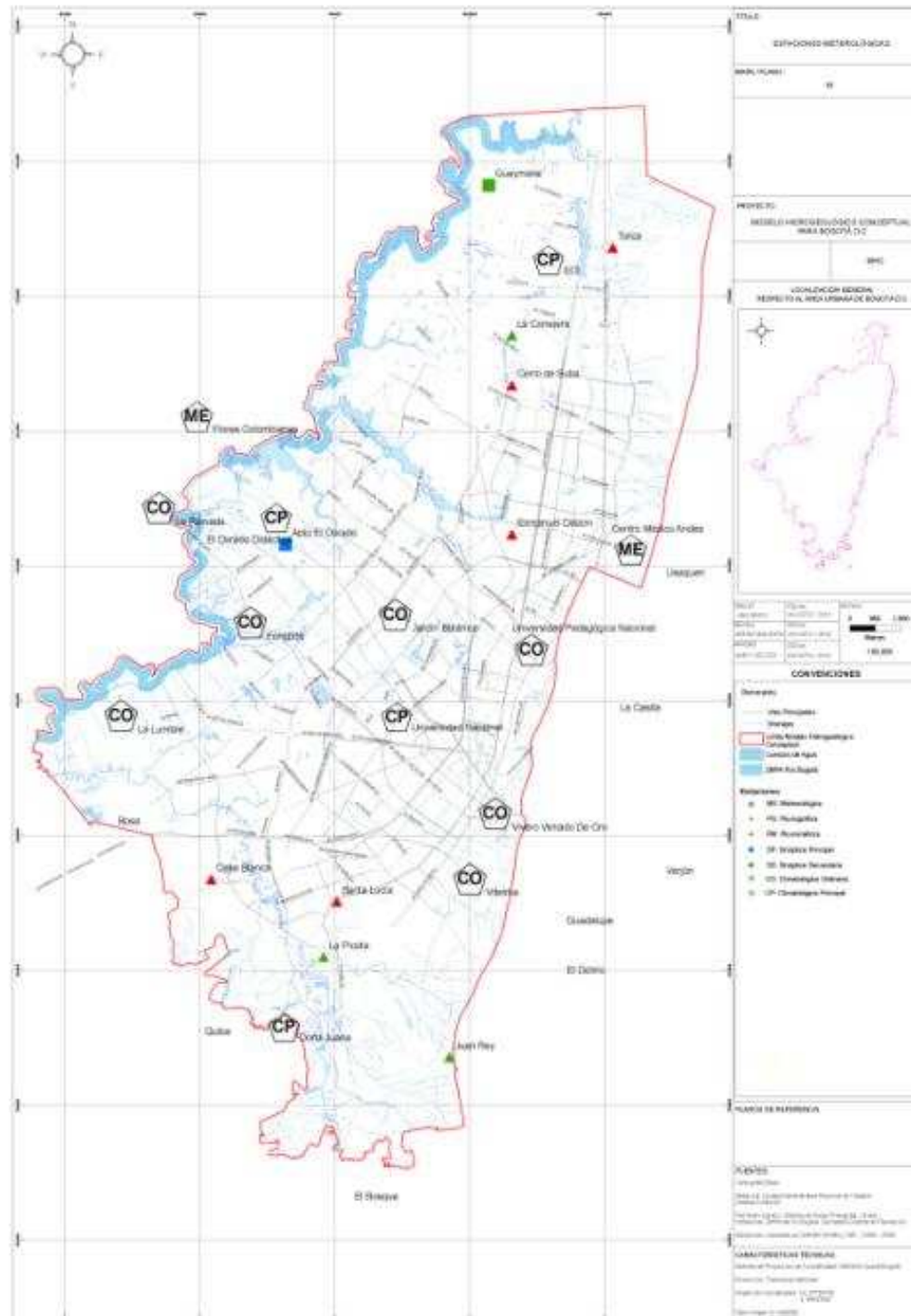
3.1 INFORMACIÓN RECOPIADA

Para estudiar el comportamiento hidrológico a nivel regional, se recopiló la información hidroclimatológica de siete estaciones climatológicas ordinarias, cinco

estaciones climatológicas principales, dos estaciones sinópticas (principal y secundaria), diez estaciones pluviográficas y diez estaciones pluviométricas, operadas por el Acueducto de Bogotá, la CAR y el IDEAM (Figura 6).

Para el análisis hidrológico, se recopilieron registros medios mensuales de precipitación, temperatura, evaporación, brillo solar, humedad relativa y niveles medios en el cauce de los principales ríos del Distrito e información de los Planes de Ordenación de las tres Cuencas.

Figura 7. Localización de estaciones hidroclimatológicas



PM: Estación pluviométrica, PG: estación Pluviográfica, CO: Climatológica ordinaria, CP: Climatológica principal, SP: Sinóptica principal, SS: Sinóptica secundaria.

3.1.1. Datos de temperatura, evaporación, brillo solar y humedad relativa

La zona de estudio cuenta con varias estaciones climatológicas ordinarias (Figura 7), localizadas estratégicamente abarcando en su totalidad el área urbana del Distrito Capital.

Tabla 1. Datos estaciones climatológicas

Código	Nombre estación	Registros desde el año	Tipo*	Operador	Coordenada Norte (m)	Coordenada Este (m)	Elevación (m.s.n.m.)
2120547	Fontibón	1972	CO	EAAB	1007180	992500	2518
2120524	Vitelma	1941	CO	EAAB	997682	1000642	2800
2120559	Guaymaral	1965	SS	CAR	1024100	1000725	2560
2120561	Muña	1966	CP	CAR	994560	980700	2565
2120630	Doña Juana	1989	CP	CAR	992300	993700	2700
2120579	Apto El Dorado	1972	SP	IDEAM	1010773	993176	2547
2120605	ECI	1986	CP	IDEAM	1020729	1003513	2650
2120516	La Ramada	1937	CO	CAR	1011430	989110	2545
2120552	El Dorado Didáctica	1959	CP	IDEAM	1011164	992335	2546
2120621	Flores Colombianas	1988	ME	IDEAM	1014850	990486	2560
2120571	Jardín Botánico	1975	CO	IDEAM	1007478	997883	2552
2120622	Universidad Nacional	1988	CP	IDEAM	1003791	997882	2556
2120558	Vivero Venado De Oro	1965	CO	IDEAM	1000105	1001581	2725
2120619	Universidad Pedagógica Nacional	1986	CO	IDEAM	1007478	1001581	2570
2120525	La Lumbre	1955	CO	CAR	1003730	987701	2540

*CO: Climatológica ordinaria, CP: Climatológica principal, SP: Sinóptica principal, SS: Sinóptica secundaria

3.1.2. Datos de lluvia

Para el presente estudio se contó con las series históricas de precipitación media mensual de varias estaciones. Como se puede apreciar en la Figura 7., la zona de estudio presenta 21 estaciones dentro y cercanas al área de influencia de este estudio: la estación más al norte, es la *Estación Aeropuerto Guaymaral*, hacia la parte central las estaciones *Jardín Botánico* y *Universidad Nacional*, hacia la parte alta de los cerros orientales las estaciones *El Delirio*, *Guadalupe*, *Juan Rey*, *Usaquén* y *La Casita* y hacia la parte occidental, *La Ramada*, *Bosa* y *Flores Colombianas*. En términos generales, todas las estaciones cuentan con más de 20 años de registro, en períodos que van hasta el año 2008.

Tabla 2. Datos estaciones pluviométricas y pluviográficas

Código	Nombre estación	Registros desde el año	Tipo*	Operador	Coordenada Norte (m)	Coordenada Este (m)	Elevación (m.s.n.m.)
2120085	El Bosque	1963	PG	CAR	986200	995560	2880
2120021	Santa Teresa	1942	PG	CAR	1017300	1017200	2580
2120156	La Picota	1980	PG	CAR	995500	994600	2580
2120182	Peñas Blancas	1988	PG	CAR	995200	967200	2450
2120166	El Fute	1959	PG	CAR	1002150	977280	2607
2120077	Torca	1960	PM	CAR	1021800	1005320	2579
2120112	La Casita	1973	PM	CAR	1004320	1005400	3045
2120653	Bosa	1957	PG	EAAB	1000106	986786	2640
2120197	Casa Blanca	1976	PM	EAAB	998377	990428	2665
2120204	Juan Rey	1990	PG	EAAB	991780	999260	2985
2120052	Santa Lucía	1956	PM	EAAB	997550	995080	2630
2120205	Quiba	1990	PG	EAAB	992305	989998	3000
2120198	Guadalupe	1987	PG	EAAB	996419	1003431	3316
2120208	La Conejera	1990	PG	EAAB	1018536	1001581	2500
2120034	Regadera	1948	PM	EAAB	978751	992782	3056
2120024	Verjón	1946	PM	EAAB	998263	1007130	3250
2120013	El Delirio	1933	PM	EAAB	994576	1003431	3000
2120111	Usaquén	1955	PM	EAAB	1009321	1007129	2647
2120031	Cerro de Suba	1947	PM	EAAB	1016693	1001581	2691
2120123	Enmanuel Dalzón	1974	PM	IDEAM	1011164	1001581	2520
2120573	Centro Médico Andes	1985	ME	IDEAM	1011164	1005279	2575

*PM: Estación pluviométrica, PG: Estación Pluviográfica

3.1.3. Información cartográfica

La cartografía básica empleada en el análisis hidrológico, fue recopilada a partir de la información disponible en la Secretaría Distrital de Ambiente, que cuenta con capas en formato shape (SHP), con temáticas como la red hidrográfica del Distrito, vías principales y secundarias, estructura ecológica principal, entre otras.

3.2 ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LLUVIA EN LA CUENCA

A continuación se presenta el análisis temporal de la información de lluvias sobre la zona de estudio, a partir de los registros de pluviómetro de las estaciones localizadas dentro del área de estudio y cercanas a la misma.

3.2.1. Consistencia de series

Para analizar la consistencia de los datos de las series hidrológicas, se realizaron curvas de doble masa agrupando las estaciones con base en las siguientes consideraciones:

- Las estaciones son cercanas
- El valor promedio de la precipitación anual del grupo de estaciones no difiere en más del 30%. Los valores medios de precipitación anual multianual en cada una de las estaciones corresponde al valor obtenido de cada una de las series de datos.

Para validar los registros, se tomó como base la estación Aeropuerto El Dorado dado que esta es la que presenta la menor cantidad de datos faltantes.

Con el análisis de consistencia de las series hidrológicas, se busca minimizar los errores que se puedan presentar en la medición de los datos en los casos en los que las estaciones son reubicadas o cuando se descalibran los equipos.

En general, las curvas de doble masa cuyas tendencias son lineales, indican que las estaciones en su periodo de registro, no han presentado cambios significativos que alteren o modifiquen las lecturas de los datos.

3.2.2. Llenado de datos faltantes

Para el presente estudio, se realizó el llenado de datos faltantes, empleando los valores promedios a nivel mensual, dado que con esto, se buscaba no alterar de forma significativa los valores que han sido medidos en cada una de las estaciones. En general, la selección de las estaciones empleadas obedeció también a que en éstas no se presentaron vacíos grandes de información, lo cual da una mayor confiabilidad en cuanto a la consistencia de las series históricas.

3.2.3. Análisis temporal de los datos de lluvia

Como se muestra en la Figura 8, el régimen de precipitación alrededor de la zona de estudio y dentro de la misma es bimodal, es decir, presenta dos períodos de lluvias intensas, y dos períodos de sequía o baja precipitación. Para este régimen bimodal, se presenta un periodo de lluvias intensas entre los meses de marzo, abril y mayo, seguido de una temporada de sequía, generalmente entre los meses de junio, julio y agosto, para luego volver a otra temporada invernal intensa entre los meses de septiembre, octubre y noviembre. Los meses de diciembre a febrero, generalmente son meses de bajas precipitaciones.

En general, en todas las estaciones, los valores altos se presentan entre los meses de septiembre, octubre y noviembre, en tanto que los valores más bajos se encuentran entre los meses de diciembre a febrero.

Para el segundo periodo de lluvias, las mayores precipitaciones que corresponden al mes de noviembre son registradas en las estaciones localizadas hacia los cerros orientales como es el caso de las estaciones Guadalupe (115 mm), Venado de Oro (144 mm), El Bosque (124 mm), Usaqué (104 mm), Torca (139 mm), El Delirio (104 mm) y Juan rey (103 mm).

Valores altos de precipitación se presentan también hacia sectores como los Cerros de Suba, donde para el mes de noviembre se presenta un valor medio mensual de 106 mm, y en la zona hacia el parque Simón Bolívar (se registra para el mes de noviembre, un valor medio mensual en las estaciones Jardín Botánico y Universidad Nacional de 120 y 128 mm respectivamente).

En cuanto al comportamiento de los valores medios mensuales multianuales, el comportamiento de la precipitación tiende a ser similar a lo explicado para las lluvias en el mes de noviembre: Valores cercanos a los 1000 mm en las zonas localizadas hacia los cerros orientales, valores por encima de los 900 mm en los cerros de Suba y en el sector del parque Simón Bolívar.

Tabla 3. Precipitación media mensual multianual

Estaciones	Precipitación en mm												
	Ene	Feb.	Mar	Abr.	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Muña	19.1	28.9	49.1	71.5	70.4	44.6	24.8	30.8	47.2	72.9	64.1	34.3	557.7
Bosa	16.3	27.5	48.7	72.0	74.1	51.8	31.8	32.2	45.6	72.1	60.0	29.9	561.8
La Picota	23.6	33.5	52.5	73.5	64.3	42.9	37.0	35.3	34.8	66.1	71.1	40.1	574.6
La Lumbre	19.0	26.8	42.9	77.0	67.3	49.5	30.4	32.7	45.4	81.8	74.9	35.0	582.7
Casa Blanca	19.5	26.8	50.5	78.2	80.7	51.2	39.3	32.4	47.4	74.2	64.0	34.4	598.5
El Fute	25.9	31.5	52.1	82.7	66.6	43.6	28.0	32.3	45.0	85.5	68.3	41.2	602.7
Doña Juana	26.6	36.1	61.6	70.1	84.3	61.2	50.9	45.5	35.5	71.7	75.6	43.0	662.2
Santa Lucía	19.3	39.8	67.8	81.1	81.9	49.0	40.6	36.8	50.9	80.6	71.2	46.5	665.4
Quiba	16.2	40.6	60.1	71.4	97.8	63.5	47.5	44.2	58.0	85.7	65.4	42.1	692.4
Flores Colombianas	29.8	38.3	73.5	88.7	94.5	48.8	43.4	35.0	51.8	94.9	65.2	34.2	698.1
Fontibón	22.7	39.8	71.8	90.4	82.7	54.9	40.6	36.7	60.9	88.4	82.4	43.4	714.7
La Ramada	25.8	39.0	56.0	93.0	88.4	57.8	40.0	41.0	53.3	106.3	85.3	50.7	736.5
El Dorado Didáctica	29.9	38.3	58.5	102.9	88.7	62.3	43.0	43.1	58.9	109.3	93.4	52.0	780.3
Guaymaral	27.6	53.2	65.1	92.7	84.1	62.9	45.1	43.2	66.9	105.2	93.2	45.9	785.4
Apto El Dorado	29.4	41.1	65.3	103.0	92.2	53.8	41.9	45.9	70.0	107.0	91.3	52.8	793.7
Centro Médico Andes	56.7	80.8	81.7	90.1	103.6	42.6	36.6	31.4	44.4	104.1	93.2	47.9	813.1
Santa Teresa	32.3	38.3	63.4	74.5	94.8	89.6	87.0	81.1	68.2	98.1	83.9	45.8	857.1
ECI	49.0	60.0	91.0	87.0	98.0	57.0	43.0	40.0	62.0	117.0	103.0	67.0	874.0
Enmanuel Dalzón	45.8	64.5	86.0	106.5	97.9	41.7	27.5	38.4	59.8	121.2	110.2	77.1	876.6
La Conejera	47.4	63.4	90.1	94.1	92.4	60.7	41.8	44.8	72.9	120.8	92.0	64.0	884.3
Cerro de Suba	30.6	77.9	92.4	106.7	99.7	59.3	39.1	47.7	80.7	103.8	106.1	65.2	909.2
Universidad Nacional	51.7	63.2	93.9	88.5	107.2	46.4	42.1	40.2	76.0	106.6	127.6	80.3	923.7
Jardín Botánico	43.0	56.2	87.8	127.5	126.3	63.6	43.0	48.5	79.5	114.9	120.2	67.2	977.7
Usaquén	81.3	88.3	106.6	98.6	86.8	58.5	49.6	42.3	57.1	111.9	104.7	93.9	979.6
Regadera	15.9	36.0	62.6	95.6	148.5	121.1	119.8	95.2	77.9	95.4	79.0	34.0	980.8
La Casita	53.0	67.8	92.8	110.2	108.8	77.5	70.5	64.4	53.8	107.6	119.8	80.5	1006.6
Vitelma	49.3	65.3	88.9	115.7	103.0	72.5	78.6	64.7	58.3	115.3	121.5	79.8	1012.9
U. Pedagógica Nacional	75.7	100.2	124.9	100.3	101.1	57.7	49.3	45.9	66.6	107.8	133.8	66.0	1029.3
Vivero Venado De Oro	59.2	75.6	99.9	124.2	111.1	77.2	68.0	66.3	68.5	123.0	144.2	48.2	1065.4
Torca	61.2	79.6	102.2	134.5	118.6	82.2	72.2	62.4	97.0	137.4	139.2	83.6	1170.1
Juan Rey	41.7	66.7	89.1	98.2	138.5	147.2	143.3	114.9	73.7	103.4	103.7	65.7	1186.2
Guadalupe	61.6	88.0	116.5	108.6	139.1	115.3	94.0	100.6	78.8	149.3	115.2	87.4	1254.4
El Bosque	36.7	52.1	73.7	121.3	141.7	152.5	167.3	134.5	101.4	116.8	123.9	65.9	1287.9

Estaciones	Precipitación en mm												
	Ene	Feb.	Mar	Abr.	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
El Delirio	63.2	86.0	98.1	101.3	140.3	154.5	173.7	131.4	75.8	105.9	104.5	64.3	1299.0
Verjón	58.4	80.6	102.6	114.1	147.6	170.0	159.4	134.1	89.2	116.1	111.1	69.3	1352.3
Peñas Blancas	93.7	96.6	158.5	171.2	132.4	73.9	70.2	66.8	95.1	187.0	196.4	150.4	1492.1

Figura 8. Precipitación media mensual multianual

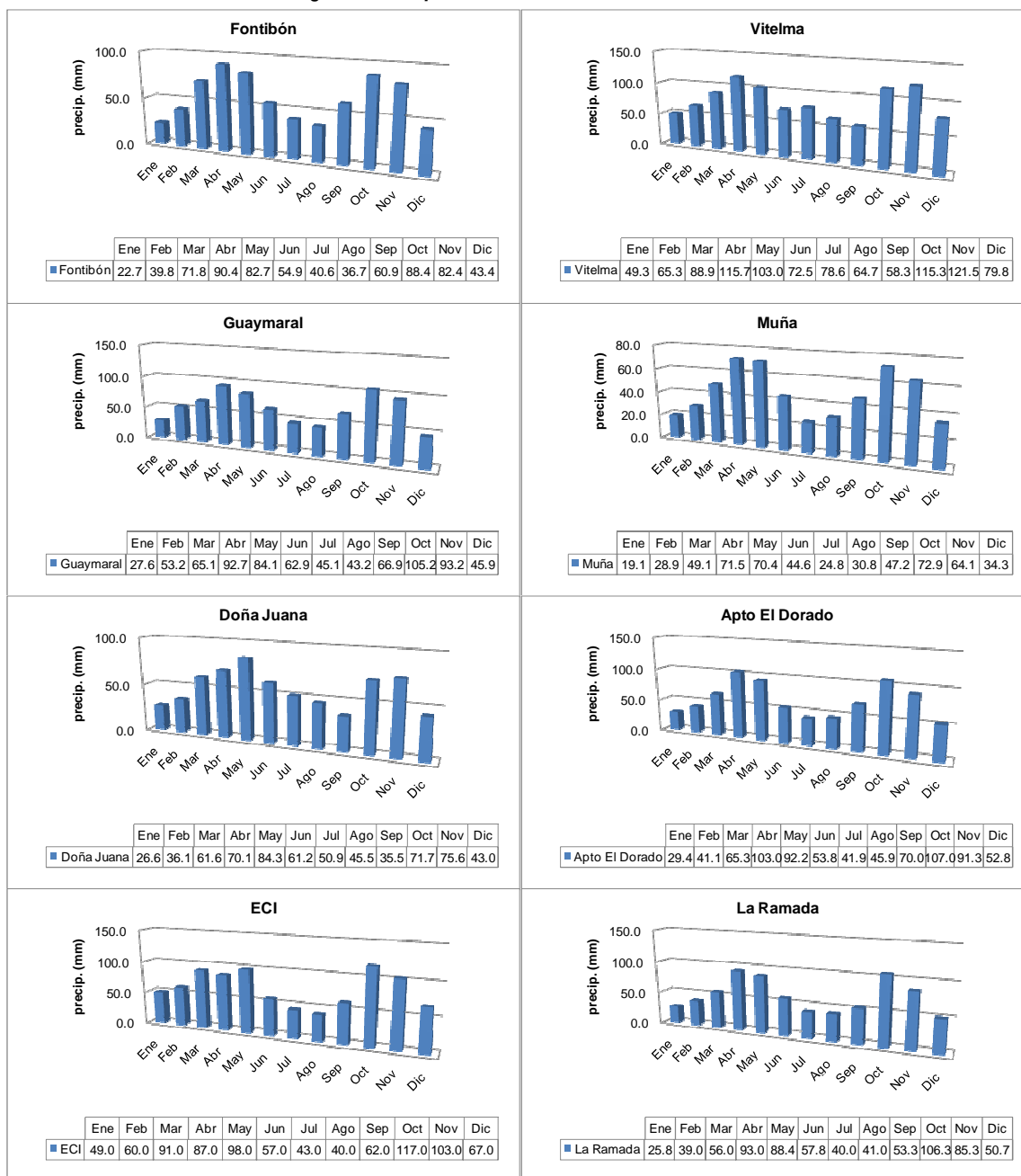


Figura 8. Precipitación media mensual multianual (Continuación)

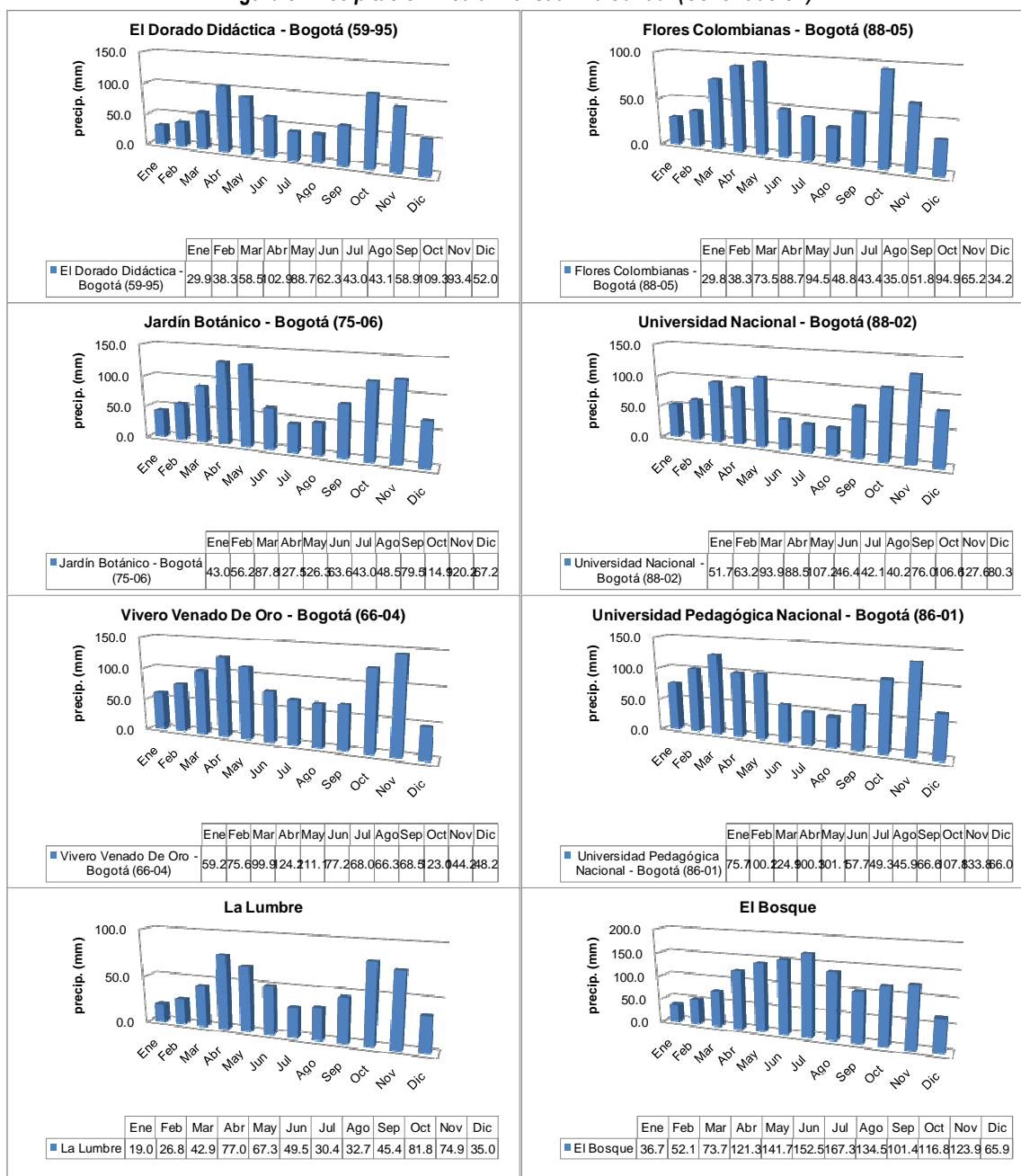


Figura 8. Precipitación media mensual multianual (Continuación)

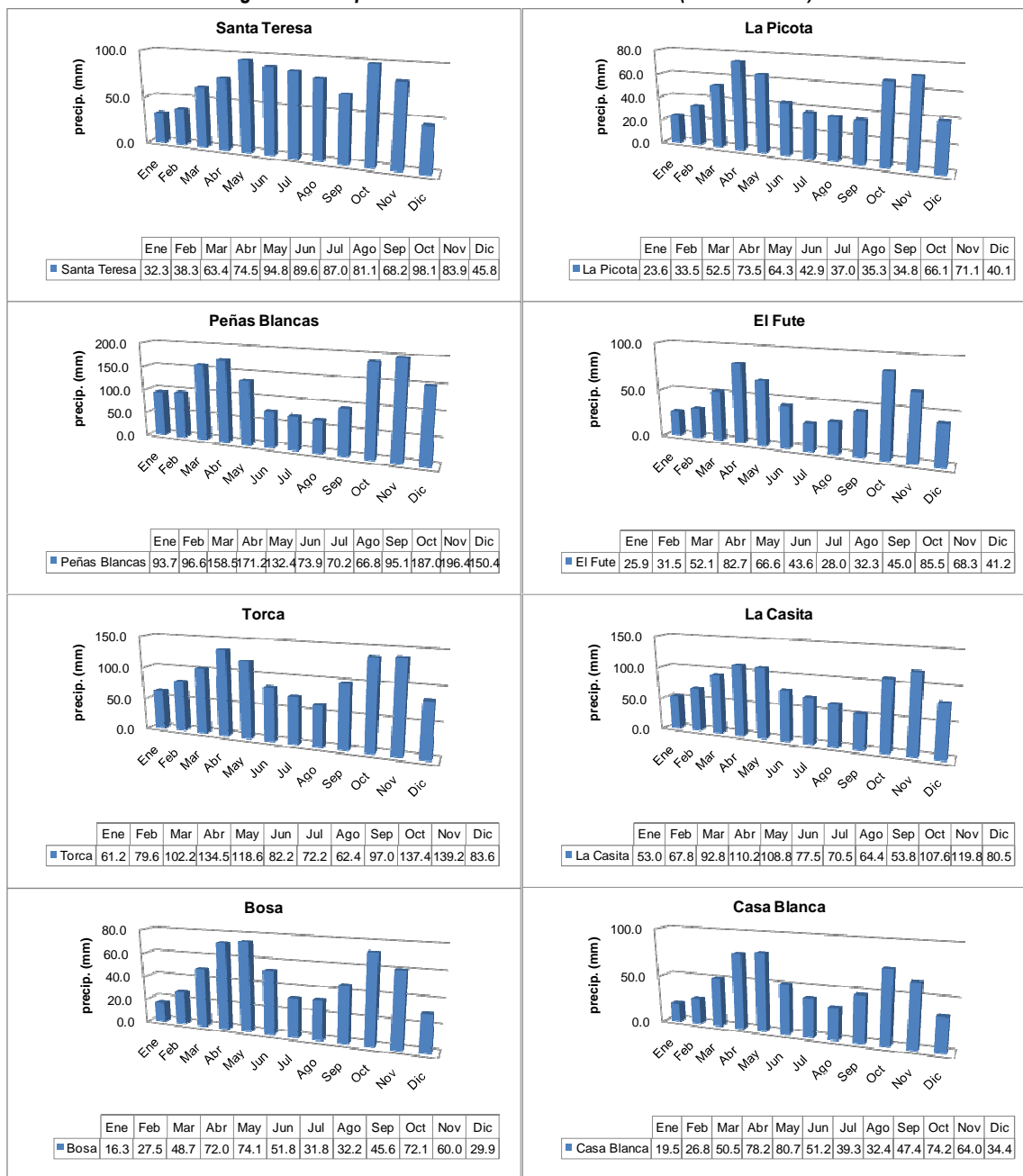
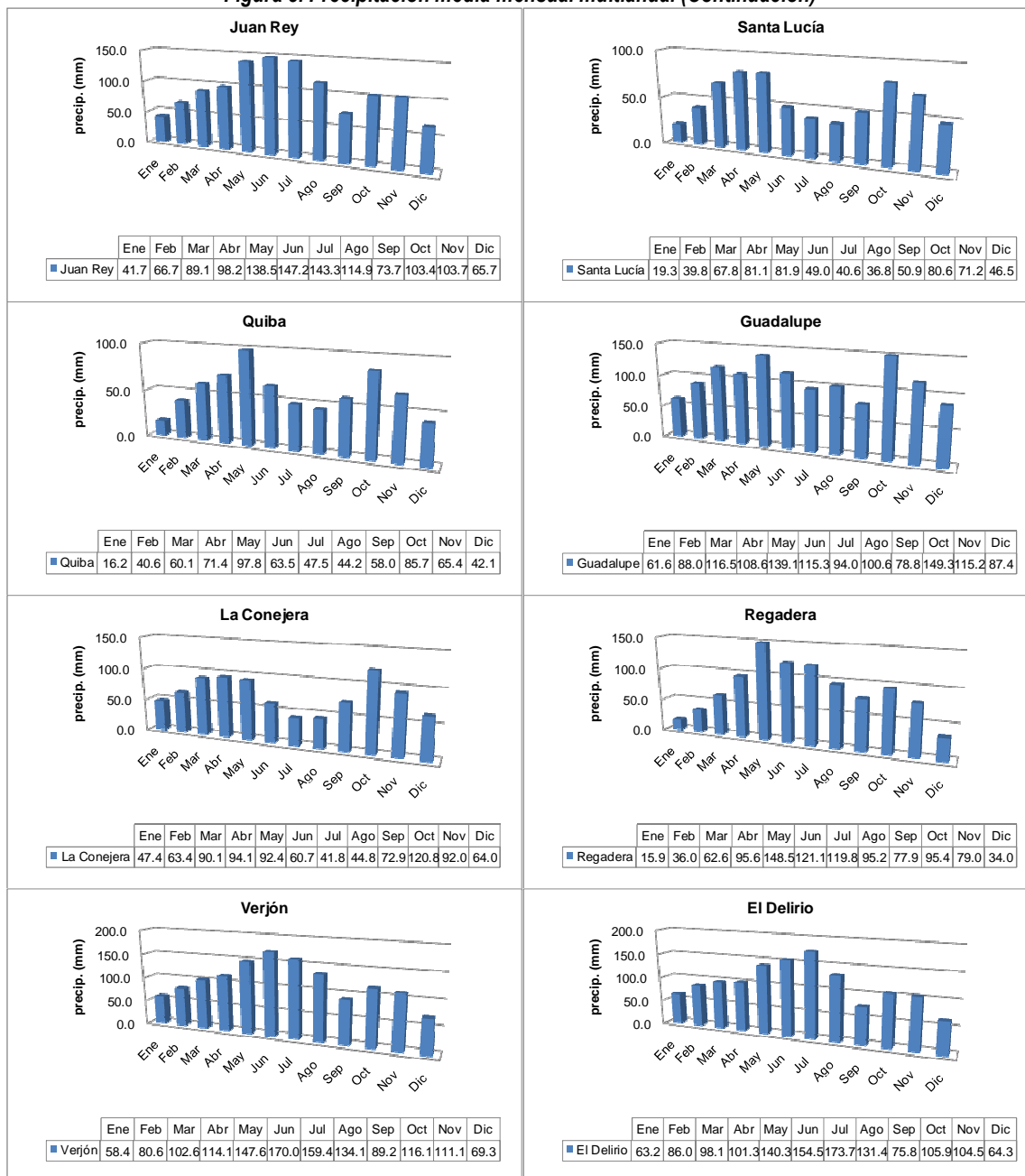


Figura 8. Precipitación media mensual multianual (Continuación)



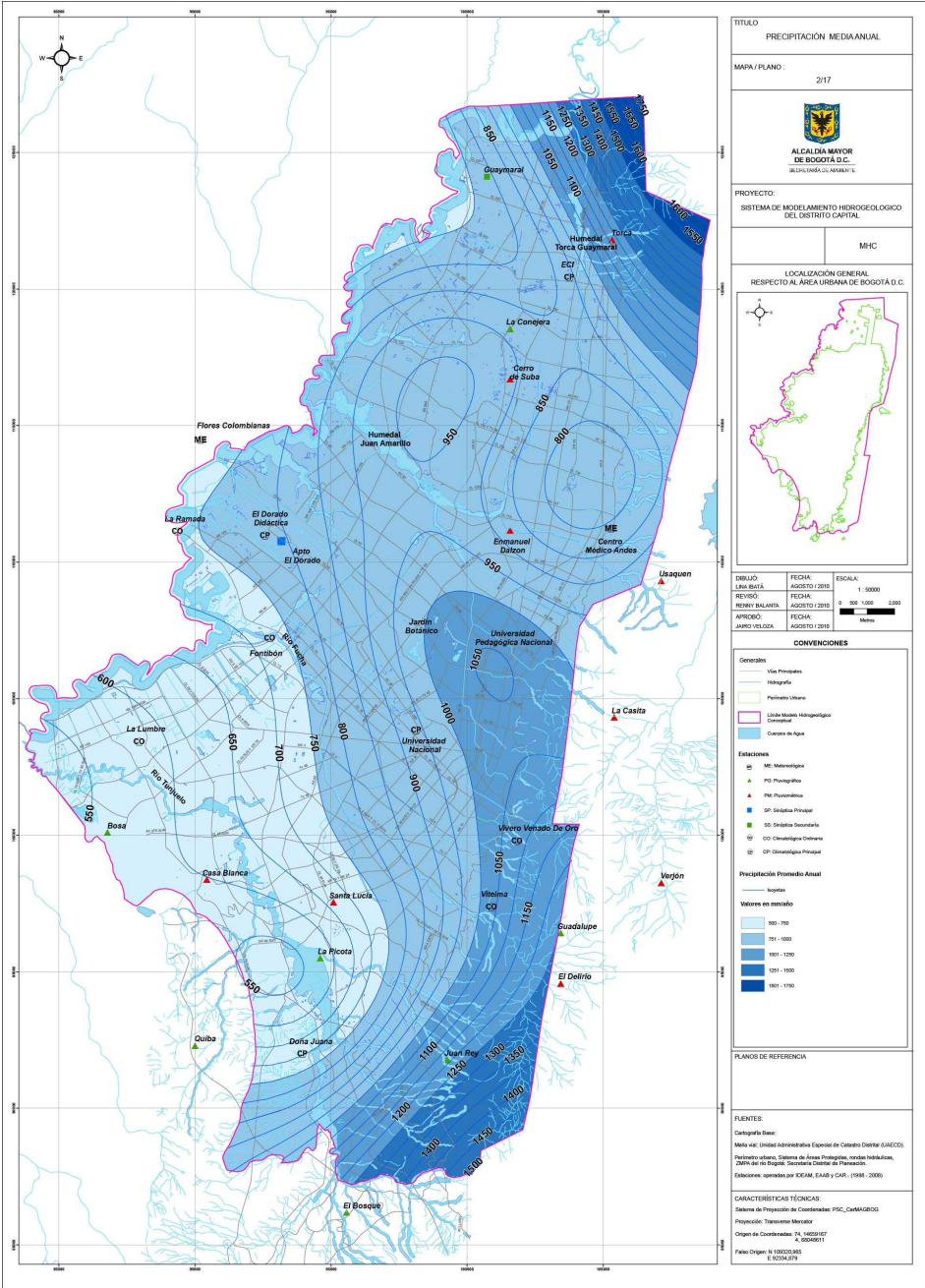
3.2.4. Análisis espacial y temporal

La Figura 9, muestra la distribución espacial de la precipitación total anual en el área correspondiente a la zona de estudio. Se puede apreciar que la precipitación promedio mensual multianual en las estaciones, disminuye con respecto a la altura; hacia la parte alta de los cerros orientales el valor promedio de precipitación total anual varía entre 1000 y 1400 mm, así mismo, hacia la parte urbana, la precipitación varía entre los 1000 y 800 mm, siendo la parte más seca, aquella localizada hacia el occidente en cercanías al río Bogotá.

Se aprecia también que, en la parte baja de la cuenca del río Tunjuelo, los valores de precipitación oscilan entre los 500 y 600 mm, siendo este el sector más seco de la ciudad.

Las isoyetas de precipitación anual, muestran un comportamiento descendiente de la precipitación en relación con la altura.

Figura 9. Isoyetas de precipitación total anual



3.2.5. Caracterización climatológica

La caracterización climatológica se realizó empleando los registros históricos de las estaciones climatológicas de tipo principal y secundaria, y las estaciones sinópticas de tipo principal y secundaria, las cuales se encuentran localizadas dentro del área correspondiente al Distrito Capital.

Para estas estaciones, se analizaron los valores promedio mensual multianual de parámetros climatológicos como la temperatura, evaporación y humedad relativa.

A continuación se describen la caracterización realizada a cada uno de los parámetros climatológicos:

3.2.5.1. Temperatura

Los valores promedios de temperatura registrados, generalmente han presentado valores no inferiores a 11°C y no superiores a los 16°C durante los años de registro en las distintas estaciones, siendo los meses de mayo, junio y octubre, los que presentan los valores más altos. En general se puede decir que en la Sabana, los cambios en la temperatura media no son significativamente altos, con respecto a otras regiones del país. (Figura 10).

Dichos cambios en la temperatura media mensual generalmente no exceden los 2°C, por lo que se puede inferir que a lo largo del año, la temperatura media en el Distrito Capital tiende a ser bastante homogénea.

En general, en todas las estaciones, los valores más bajos de temperatura se presentan durante la segunda mitad del año, siendo los meses de septiembre y octubre, los meses que registran las temperaturas más bajas, en tanto que en marzo y abril, se presentan los valores más altos.

Figura 10. Temperatura media mensual multianual Vs. Precipitación media mensual

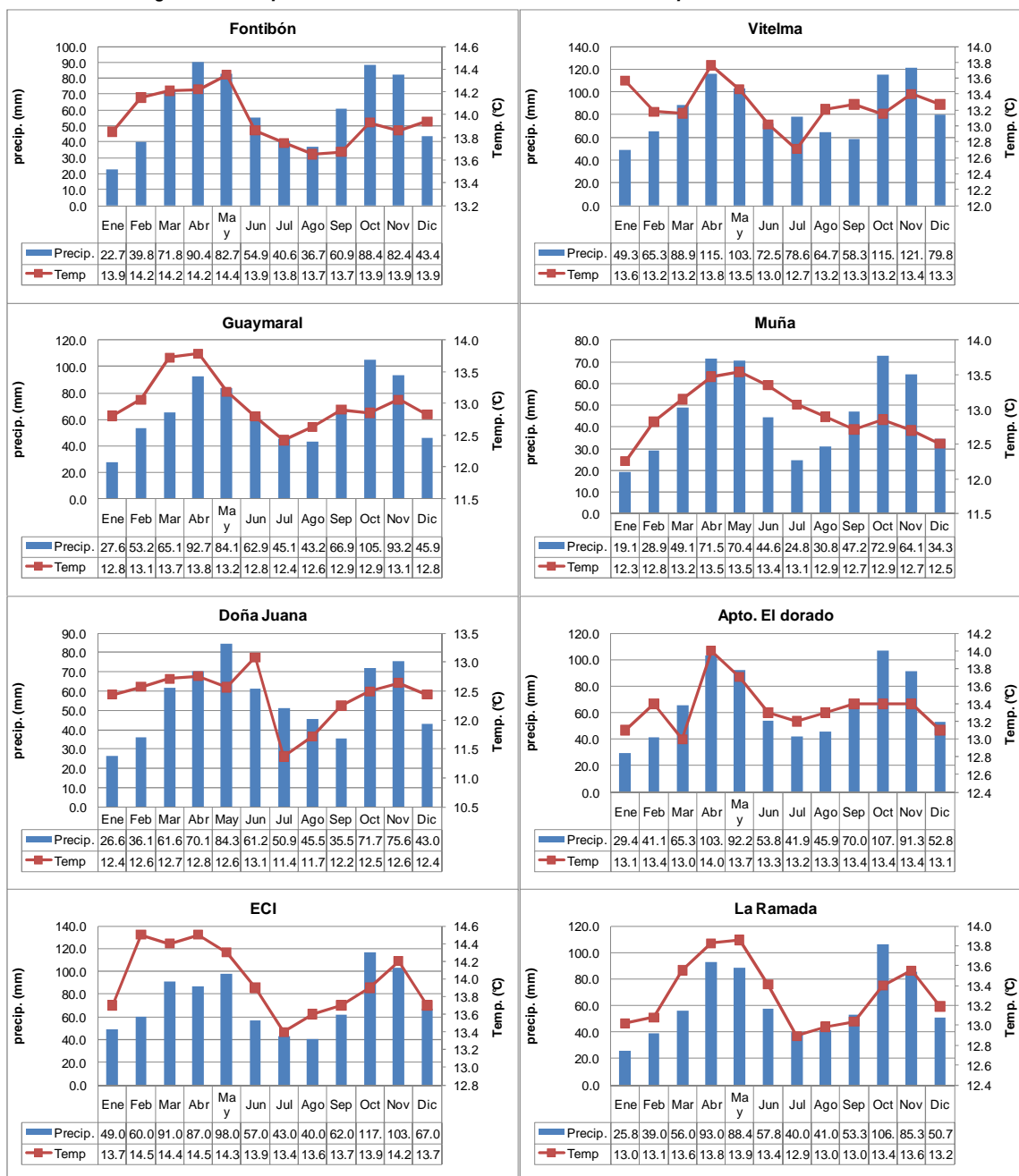


Figura 10. Temperatura media mensual multianual Vs. Precipitación media mensual (Continuación)

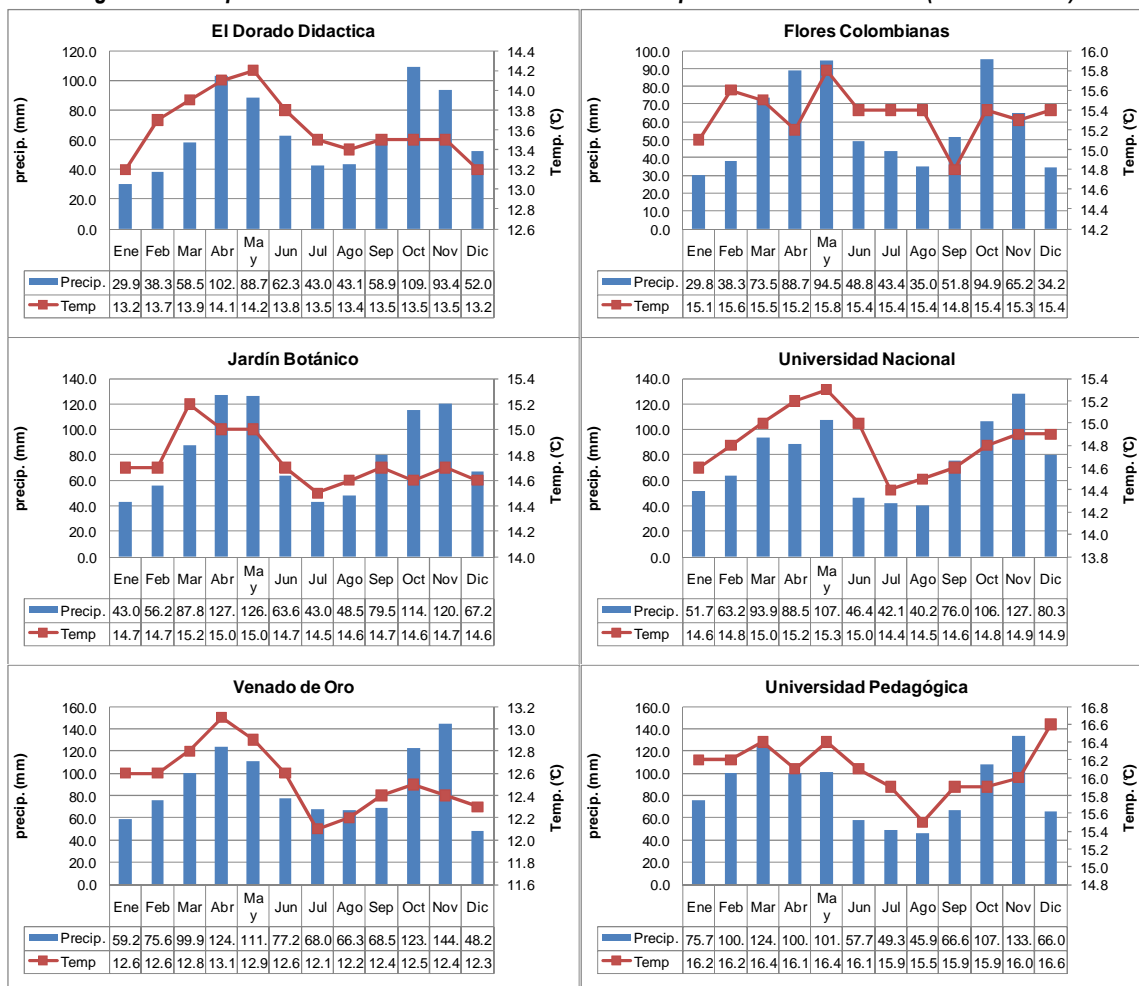


Tabla 4. Temperatura media mensual

Estaciones	Temperatura en °C												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Fontibón	13.9	14.2	14.2	14.2	14.4	13.9	13.8	13.7	13.7	13.9	13.9	13.9	14.0
Vitelma	13.6	13.2	13.2	13.8	13.5	13.0	12.7	13.2	13.3	13.2	13.4	13.3	13.3
Guaymaral	12.8	13.1	13.7	13.8	13.2	12.8	12.4	12.6	12.9	12.9	13.1	12.8	13.0
Muña	12.3	12.8	13.2	13.5	13.5	13.4	13.1	12.9	12.7	12.9	12.7	12.5	12.9
Doña Juana	12.4	12.6	12.7	12.8	12.6	13.1	11.4	11.7	12.2	12.5	12.6	12.4	12.4
Apto El Dorado	13.1	13.4	13.0	14.0	13.7	13.3	13.2	13.3	13.4	13.4	13.4	13.1	13.4
ECI	13.7	14.5	14.4	14.5	14.3	13.9	13.4	13.6	13.7	13.9	14.2	13.7	14.0
La Ramada	13.0	13.1	13.6	13.8	13.9	13.4	12.9	13.0	13.0	13.4	13.6	13.2	13.3
El Dorado Didáctica	13.2	13.7	13.9	14.1	14.2	13.8	13.5	13.4	13.5	13.5	13.5	13.2	13.6
Flores Colombianas	15.1	15.6	15.5	15.2	15.8	15.4	15.4	15.4	14.8	15.4	15.3	15.4	15.4
Jardín Botánico	14.7	14.7	15.2	15.0	15.0	14.7	14.5	14.6	14.7	14.6	14.7	14.6	14.8
Universidad Nacional	14.6	14.8	15.0	15.2	15.3	15.0	14.4	14.5	14.6	14.8	14.9	14.9	14.8
Vivero Venado De Oro	12.6	12.6	12.8	13.1	12.9	12.6	12.1	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12.5
Universidad Pedagógica Nacional	16.2	16.2	16.4	16.1	16.4	16.1	15.9	15.5	15.9	15.9	16.0	16.6	16.1

3.2.5.2. Evaporación

La evaporación media multianual en las estaciones analizadas, presenta valores entre 1070 y 721 mm/año, siendo el valor más alto el presentado en la estación Doña Juana, y el menor en la estación Vivero Venado de Oro.

En la periodicidad mensual, la evaporación no presenta cambios significativos en cada una de las estaciones, generalmente presenta una tendencia a ser constante a lo largo del tiempo. Los meses de mayor evaporación son Enero, Febrero y Marzo y los de menor son Julio, Agosto y Septiembre. La Figura 11 y la Tabla 5 presentan los valores medios mensuales multianuales de evaporación para las estaciones analizadas.

3.2.5.3. Humedad Relativa

Con respecto a la humedad relativa, con periodicidad mensual en cada una de las estaciones, presenta valores bastante uniformes en un rango entre 70 y 80%. No obstante, este rango, permanece casi constante en todas las estaciones, indicando que la humedad relativa es constante en el área de estudio.

Figura 11. Evaporación media mensual multianual Vs. Precipitación media mensual

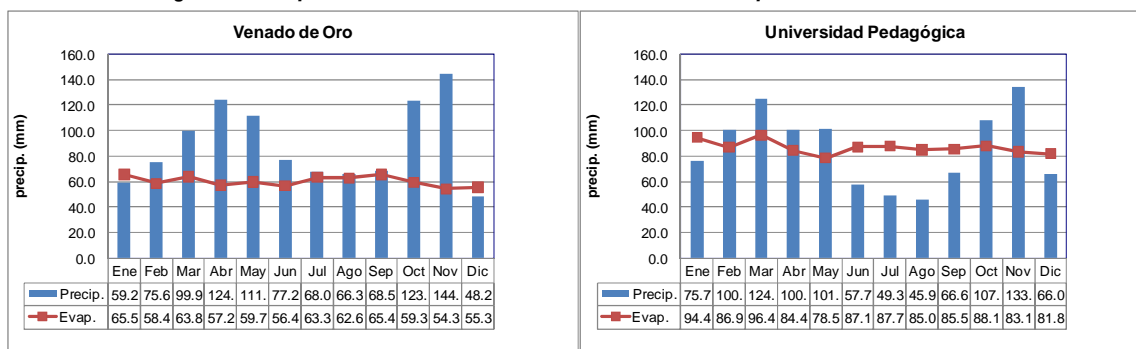


Figura 11. Evaporación media mensual multianual Vs. Precipitación media mensual (Continuación)

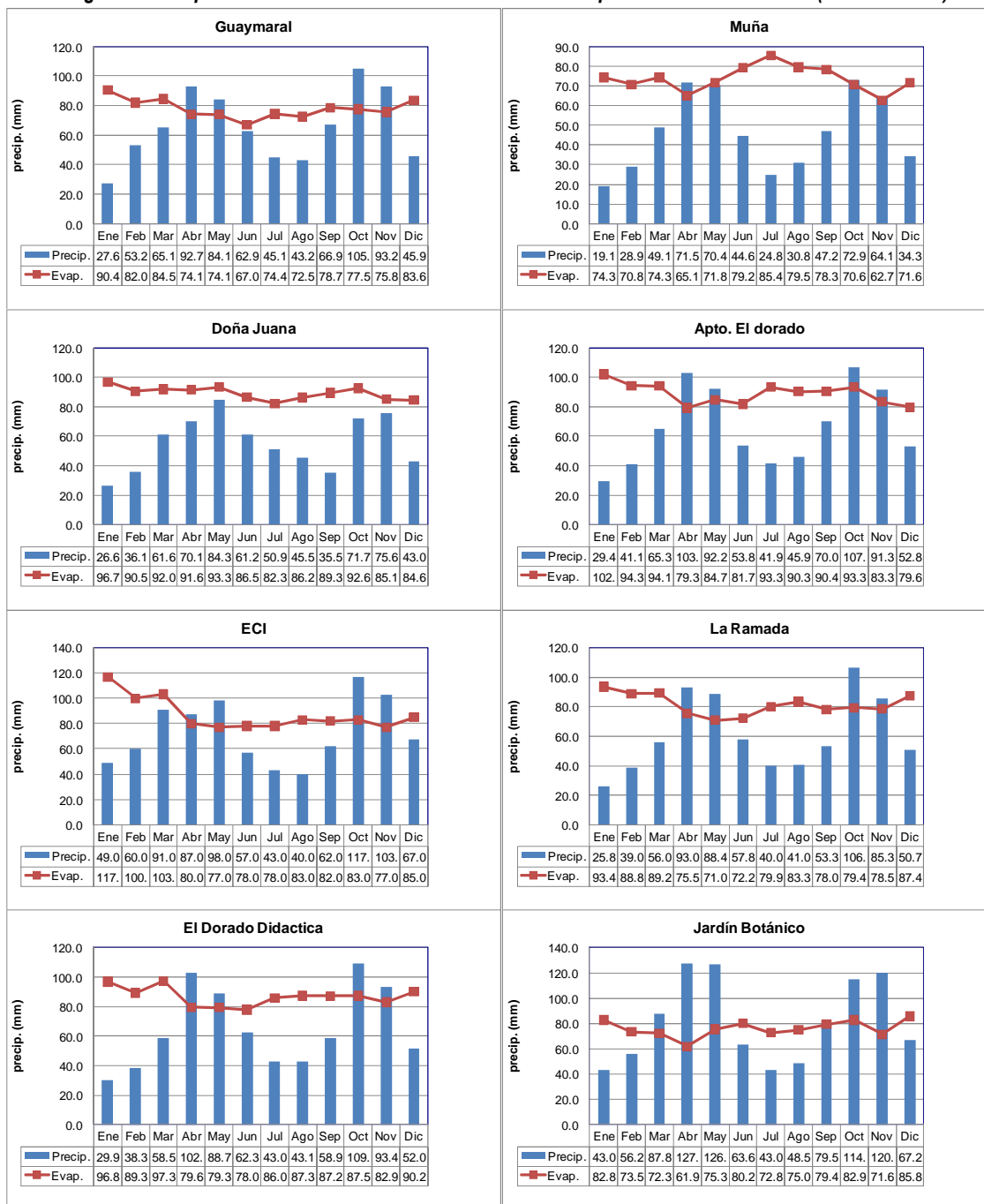


Tabla 5. Evaporación de tanque media mensual

Estaciones	Evaporación en mm												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Guaymaral	90.4	82.0	84.5	74.1	74.1	67.0	74.4	72.5	78.7	77.5	75.8	83.6	934.7
Muña	74.3	70.8	74.3	65.1	71.8	79.2	85.4	79.5	78.3	70.6	62.7	71.6	883.7
Doña Juana	96.7	90.5	92.0	91.6	93.3	86.5	82.3	86.2	89.3	92.6	85.1	84.6	1070.7
Apto El Dorado	102.1	94.3	94.1	79.3	84.7	81.7	93.3	90.3	90.4	93.3	83.3	79.6	1066.4
ECI	117.0	100.0	103.0	80.0	77.0	78.0	78.0	83.0	82.0	83.0	77.0	85.0	1043.0
La Ramada	93.4	88.8	89.2	75.5	71.0	72.2	79.9	83.3	78.0	79.4	78.5	87.4	976.6
El Dorado Didáctica	96.8	89.3	97.3	79.6	79.3	78.0	86.0	87.3	87.2	87.5	82.9	90.2	1041.4
Jardín Botánico	82.8	73.5	72.3	61.9	75.3	80.2	72.8	75.0	79.4	82.9	71.6	85.8	913.5
Universidad Pedagógica Nacional	94.4	86.9	96.4	84.4	78.5	87.1	87.7	85.0	85.5	88.1	83.1	81.8	1038.9
Vivero Venado De Oro	65.5	58.4	63.8	57.2	59.7	56.4	63.3	62.6	65.4	59.3	54.3	55.3	721.2

Tabla 6. Humedad relativa media mensual

Estaciones	Humedad Relativa												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Guaymaral	71.7	72.6	74.5	77.4	77.2	75.3	75.2	74.6	74.1	76.8	77.2	75.0	75.1
Muña	80.0	80.2	79.6	82.1	80.0	76.3	73.8	75.7	77.4	81.8	84.1	83.7	79.6
Doña Juana	62.6	64.5	67.7	68.5	72.2	73.3	74.9	72.8	68.2	71.0	69.6	71.8	69.8
ECI	78.1	77.5	79.6	80.7	80.9	80.8	79.9	79.7	78.9	80.3	80.9	80.3	79.8
La Ramada	73.7	73.4	75.1	77.3	76.9	75.0	73.5	73.3	73.7	77.3	78.1	76.4	75.3
El Dorado Didáctica	77.0	76.6	78.0	80.3	80.2	78.0	76.0	76.8	77.0	80.1	81.4	79.1	78.4
Jardín Botánico	81.0	82.4	83.7	84.0	83.4	82.4	80.6	80.7	81.2	84.3	84.2	84.1	82.7
Universidad Nacional	76.1	78.1	79.2	79.2	78.1	76.1	75.4	75.2	76.5	77.1	79.8	78.2	77.4
Vivero Venado De Oro	78.0	78.8	79.7	81.3	81.9	81.7	81.0	79.9	79.4	81.2	82.8	80.1	80.5
Universidad Pedagógica Nacional	66.5	78.1	77.5	80.4	80.9	80.4	84.5	76.1	78.4	78.0	79.9	65.0	77.1

3.3 BALANCE HÍDRICO

En esta sección se determina el balance hídrico para el área de estudio, con el fin de obtener el volumen promedio que se infiltra en la zona. Este cálculo, se realiza a partir de los datos de precipitación (como entrada al volumen de control), y la evapotranspiración potencial como salida de dicho volumen; a continuación se presenta el cálculo de la evapotranspiración en cada una de las estaciones de trabajo.

3.3.1. Cálculo de la Evapotranspiración

Los datos de evapotranspiración son estimados a partir de los datos de temperatura con la ecuación de Thornthwaite para el cual, la evapotranspiración potencial se define a partir de la siguiente ecuación:

$$Ej = 16 \left(\frac{10 Tj}{I} \right)^a$$

Donde Ej es la evapotranspiración potencial mensual del mes j no ajustada; Tj la temperatura media mensual del mes j (en °C); I el índice de calor que se define a partir de la siguiente expresión:

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

$$a = 0.675 \times 10^{-6} I^3 - 0.771 \times 10^{-4} I^2 + 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49$$

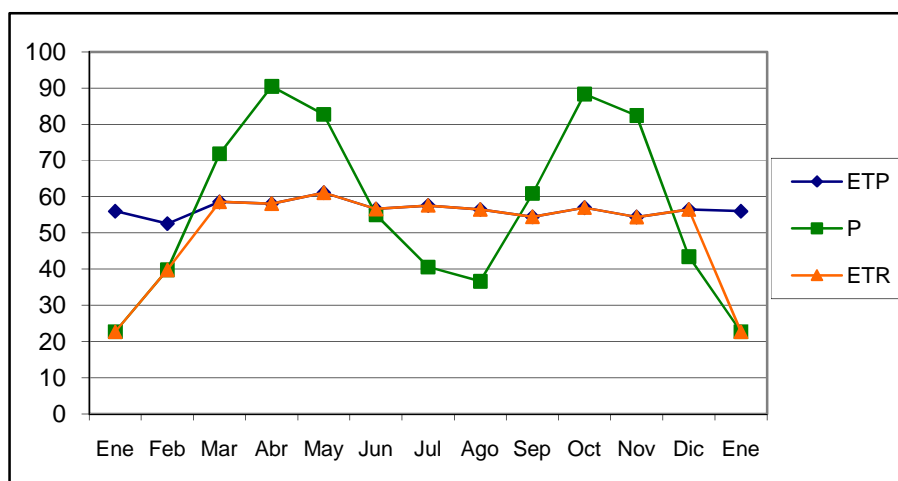
Los valores de Ej deben ser ajustados a la longitud del día y al número de días en el mes.

En los siguientes cuadros se presenta el cálculo de la evapotranspiración a partir de los datos de temperatura en las estaciones; En dichos cuadros se comparan los valores medios mensuales multianuales de precipitación con los valores medios de evapotranspiración calculados, comparación que se puede apreciar en las siguientes figuras:

Tabla 7. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Fontibón

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
T (°C)	13.9	14.2	14.2	14.2	14.4	13.9	13.8	13.7	13.7	13.9	13.9	13.9		14.0
I	4.68	4.83	4.86	4.87	4.93	4.68	4.63	4.57	4.58	4.72	4.68	4.72		56.8
a	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38		1.4
Ei (mm)	54.9	56.6	56.9	56.9	57.7	55.0	54.4	53.8	53.9	55.3	55.0	55.4		
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02		1.0
ETP corr. (mm)	56.0	52.6	58.6	58.1	61.1	56.6	57.6	56.5	54.5	57.0	54.4	56.5	56.0	679.5

Figura 12. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Fontibón



Nótese que para la estación Fontibón (como ejemplo), la evapotranspiración es casi constante, contrario a lo que ocurre con la lluvia que presenta variaciones a lo largo del año. En algunos meses, la precipitación supera la evapotranspiración significando esto, que en esos meses del año hay agua disponible para escorrentía subsuperficial.

A continuación se presentan los resultados del cálculo de la evapotranspiración en las diferentes estaciones empleadas para el análisis.

Tabla 8. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Vitelma

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
T (°c)	13.6	13.2	13.2	13.8	13.5	13	12.7	13.2	13.3	13.2	13.4	13.3		13.3
l	4.53	4.34	4.33	4.63	4.48	4.26	4.11	4.35	4.38	4.32	4.45	4.38		52.6
a	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32		1.3
Ei (mm)	55.8	53.7	53.6	56.8	55.2	52.8	51.2	53.8	54.2	53.5	54.9	54.2		
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02		1.0
ETP corr. (mm)	56.9	49.9	55.2	58.0	58.5	54.4	54.3	56.5	54.7	55.1	54.3	55.3	56.9	663.1

Figura 13. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Vitelma

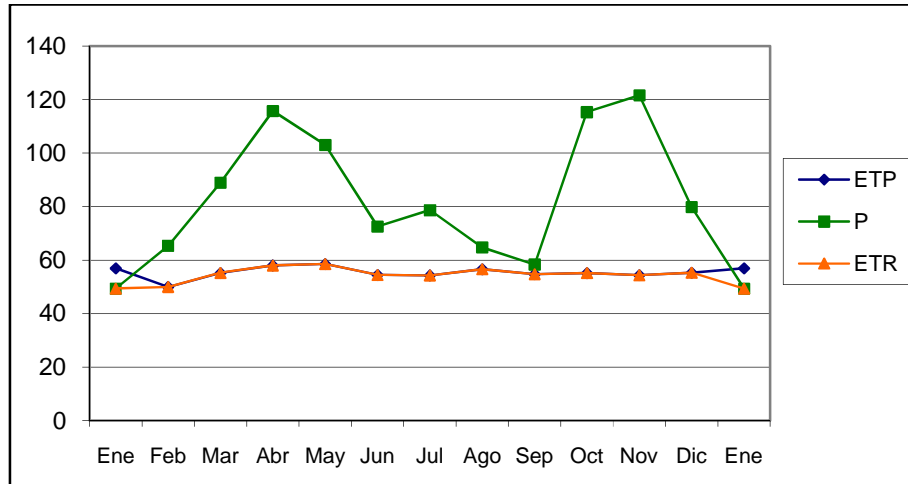


Tabla 9. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Guaymaral

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
T (°c)	12.8	13.1	13.7	13.8	13.2	12.8	12.4	12.6	12.9	12.9	13.1	12.8		13.0
l	4.15	4.28	4.61	4.64	4.34	4.15	3.97	4.07	4.20	4.18	4.28	4.16		51.0
a	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29		1.3
Ei (mm)	52.6	53.9	57.5	57.9	54.6	52.5	50.6	51.7	53.1	52.8	54.0	52.7		
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02		1.0
ETP corr. (mm)	53.7	50.2	59.2	59.0	57.9	54.1	53.6	54.3	53.6	54.4	53.4	53.8	53.7	657.2

Figura 14. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Guaymaral

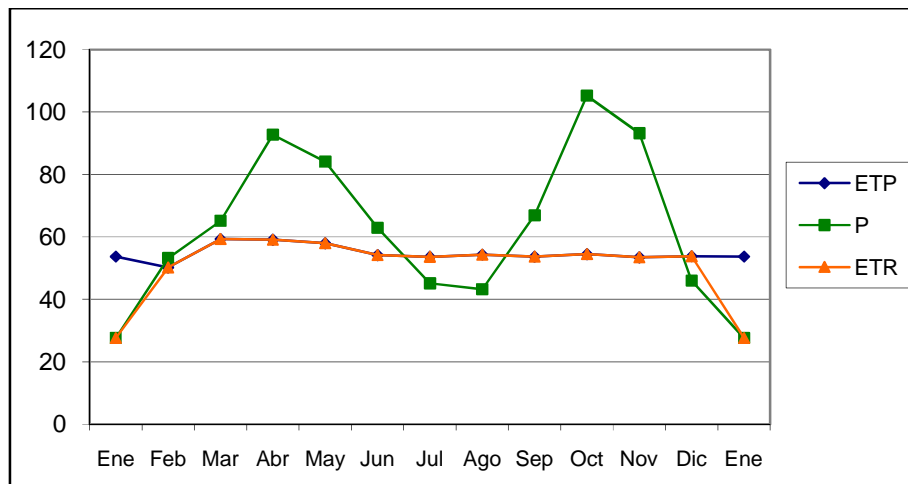


Tabla 10. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Muña

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
T (°c)	12.3	12.8	13.2	13.5	13.5	13.4	13.1	12.9	12.7	12.9	12.7	12.5		12.9
l	3.89	4.16	4.32	4.48	4.52	4.42	4.29	4.20	4.11	4.18	4.10	4.01		50.7
a	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29		1.3
Ei (mm)	49.9	52.9	54.6	56.4	56.7	55.7	54.2	53.3	52.3	53.1	52.2	51.2		
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02		1.0
ETP corr. (mm)	50.9	49.2	56.3	57.5	60.1	57.4	57.5	56.0	52.8	54.6	51.7	52.2	50.9	656.3

Figura 15. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Muña

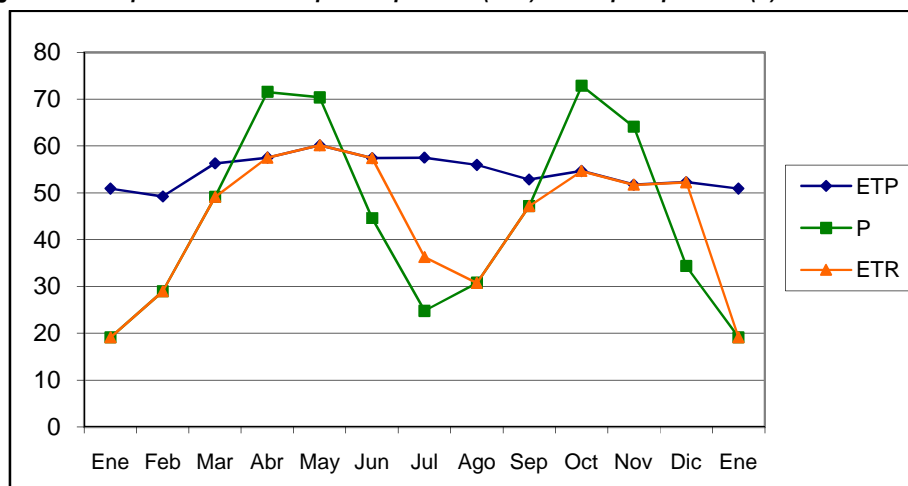


Tabla 11. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Doña Juana

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
T (°c)	12.4	12.6	12.7	12.8	12.6	13.1	11.4	11.7	12.2	12.5	12.6	12.4		12.4
l	3.97	4.04	4.11	4.13	4.04	4.29	3.47	3.63	3.88	4.00	4.07	3.97		47.6
a	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24		1.2
Ei (mm)	52.7	53.4	54.2	54.4	53.4	56.1	47.2	48.9	51.7	53.0	53.8	52.7		
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02		1.0
ETP corr. (mm)	53.7	49.7	55.8	55.5	56.6	57.8	50.0	51.4	52.2	54.6	53.2	53.8	53.7	644.2

Figura 16. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Doña Juana

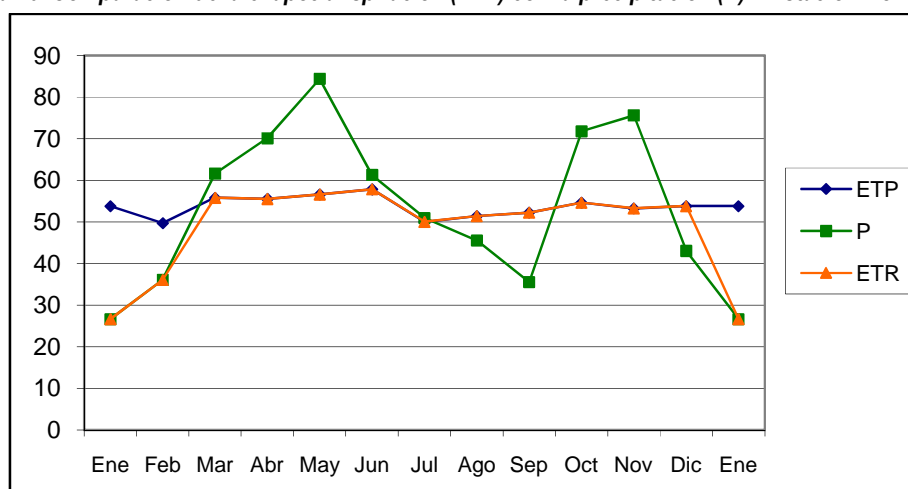


Tabla 12. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Aeropuerto El Dorado

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
T (°c)	13.1	13.4	13	14	13.7	13.3	13.2	13.3	13.4	13.4	13.4	13.1		13.4
l	4.30	4.45	4.25	4.75	4.60	4.40	4.35	4.40	4.45	4.45	4.45	4.30		53.1
a	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33		1.3
Ei (mm)	52.9	54.5	52.4	57.8	56.2	54.0	53.5	54.0	54.5	54.5	54.5	52.9		
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02		1.0
ETP corr. (mm)	54.0	50.7	54.0	59.0	59.5	55.6	56.7	56.7	55.1	56.2	54.0	54.0	54.0	665.4

Figura 17. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Aeropuerto El Dorado

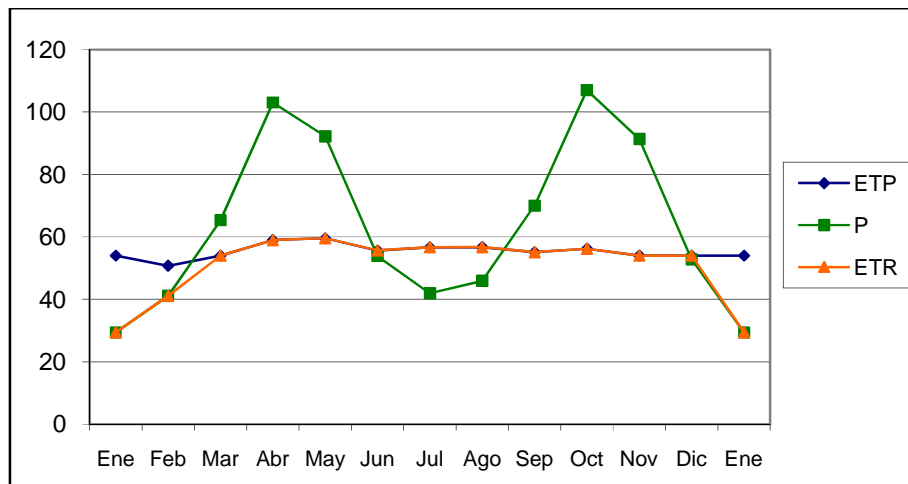


Tabla 13. Cálculo de la evapotranspiración - Estación ECI

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
T (°C)	13.7	14.5	14.4	14.5	14.3	13.9	13.4	13.6	13.7	13.9	14.2	13.7		14.0
l	4.60	5.01	4.96	5.01	4.91	4.70	4.45	4.55	4.60	4.70	4.86	4.60		57.0
a	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39		1.4
Ei (mm)	54.0	58.4	57.8	58.4	57.3	55.1	52.3	53.4	54.0	55.1	56.7	54.0		
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02		1.0
ETP corr. (mm)	55.1	54.3	59.6	59.6	60.7	56.7	55.5	56.1	54.5	56.7	56.2	55.1	55.1	679.9

Figura 18. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación ECI

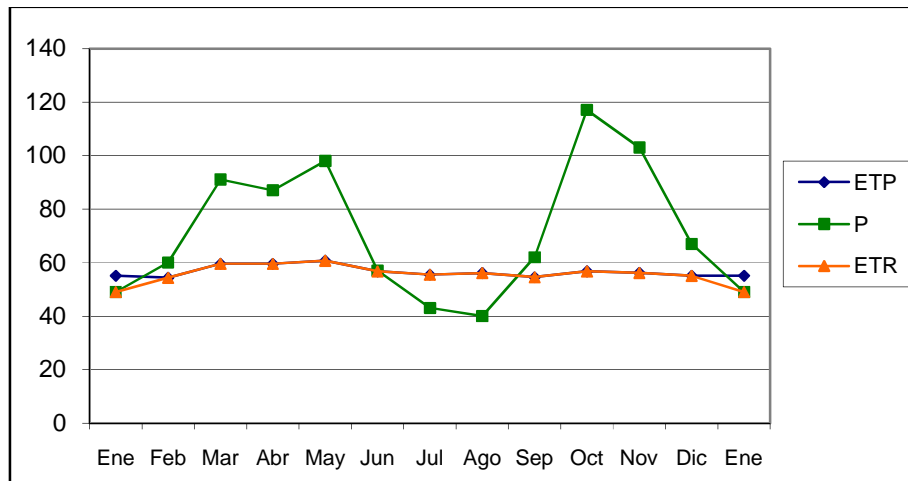


Tabla 14. Cálculo de la evapotranspiración - Estación La Ramada

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
T (°C)	13	13.1	13.6	13.8	13.9	13.4	12.9	13	13	13.4	13.6	13.2		13.3
l	4.26	4.29	4.53	4.66	4.68	4.45	4.20	4.24	4.27	4.45	4.52	4.34		52.9
a	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32		1.3
Ei (mm)	52.6	53.0	55.5	57.0	57.2	54.7	52.0	52.5	52.7	54.7	55.5	53.6		
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02		1.0
ETP corr. (mm)	53.7	49.2	57.2	58.1	60.6	56.4	55.1	55.1	53.3	56.3	54.9	54.6	53.7	664.5

Figura 19. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación La Ramada

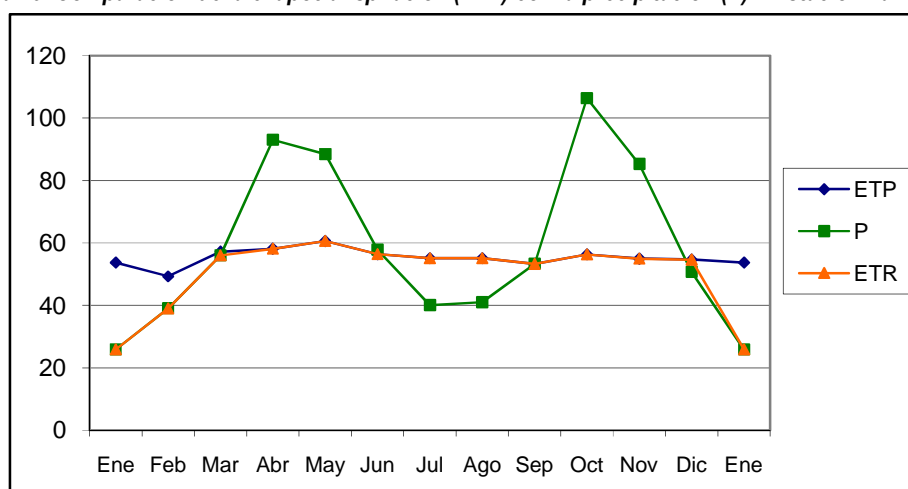


Tabla 15. Cálculo de la evapotranspiración - Estación El Dorado Didáctica

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
T (°C)	13.2	13.7	13.9	14.1	14.2	13.8	13.5	13.4	13.5	13.5	13.5	13.2		13.6
l	4.35	4.60	4.70	4.80	4.86	4.65	4.50	4.45	4.50	4.50	4.50	4.35		54.8
a	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35		1.4
Ei (mm)	52.5	55.2	56.3	57.4	58.0	55.8	54.1	53.6	54.1	54.1	54.1	52.5		
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02		1.0
ETP corr. (mm)	53.6	51.4	58.0	58.6	61.4	57.4	57.4	56.3	54.7	55.8	53.6	53.6	53.6	671.7

Figura 20. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación El Dorado Didáctica

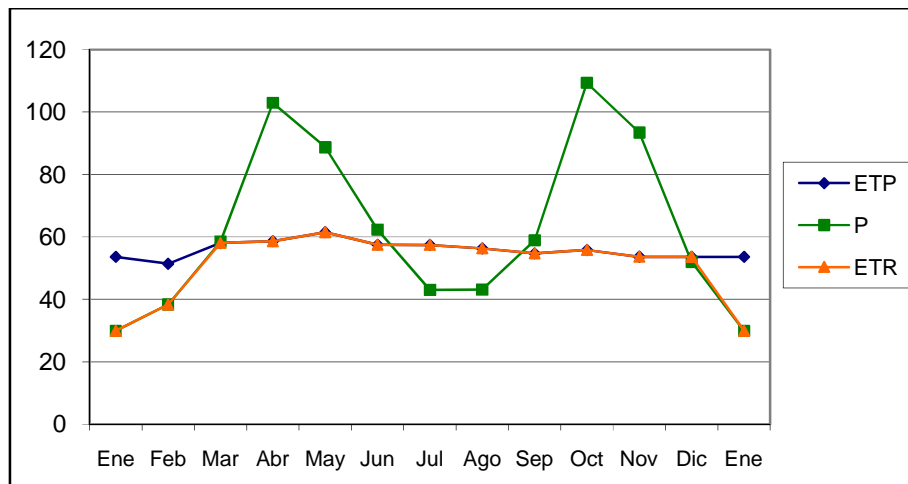


Tabla 16. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Flores Colombianas

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
T (°c)	15.1	15.6	15.5	15.2	15.8	15.4	15.4	15.4	14.8	15.4	15.3	15.4		15.4
l	5.33	5.60	5.55	5.38	5.71	5.49	5.49	5.49	5.17	5.49	5.44	5.49		65.6
a	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52		1.5
Ei (mm)	57.0	59.9	59.3	57.6	61.1	58.7	58.7	58.7	55.3	58.7	58.2	58.7		
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02		1.0
ETP corr. (mm)	58.1	55.7	61.1	58.7	64.7	60.5	62.3	61.7	55.8	60.5	57.6	59.9	58.1	716.7

Figura 21. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Flores Colombianas

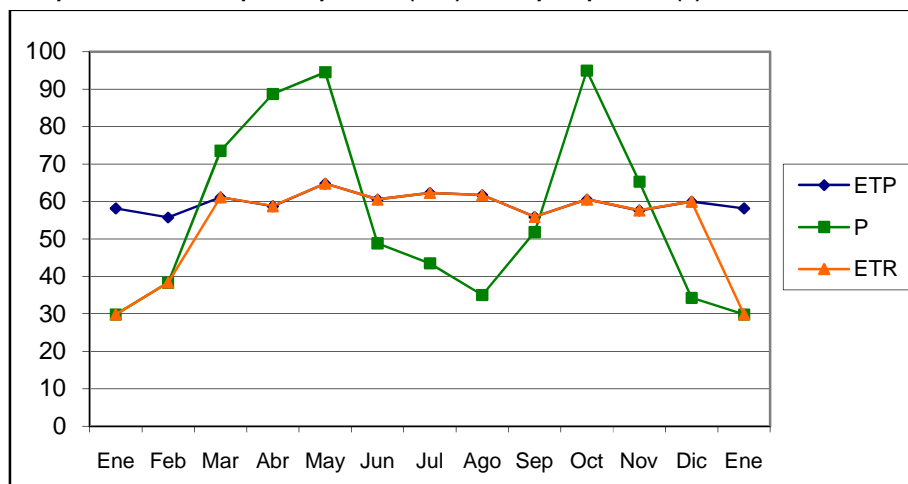


Tabla 17. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Jardín Botánico

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
T (°C)	14.7	14.7	15.2	15	15	14.7	14.5	14.6	14.7	14.6	14.7	14.6		14.8
l	5.12	5.12	5.38	5.28	5.28	5.12	5.01	5.07	5.12	5.07	5.12	5.07		61.7
a	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46		1.5
Ei (mm)	56.8	56.8	59.7	58.6	58.6	56.8	55.7	56.3	56.8	56.3	56.8	56.3		
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02		1.0
ETP corr. (mm)	58.0	52.9	61.5	59.7	62.1	58.6	59.1	59.1	57.4	58.0	56.3	57.4	58.0	699.9

Figura 22. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Jardín Botánico

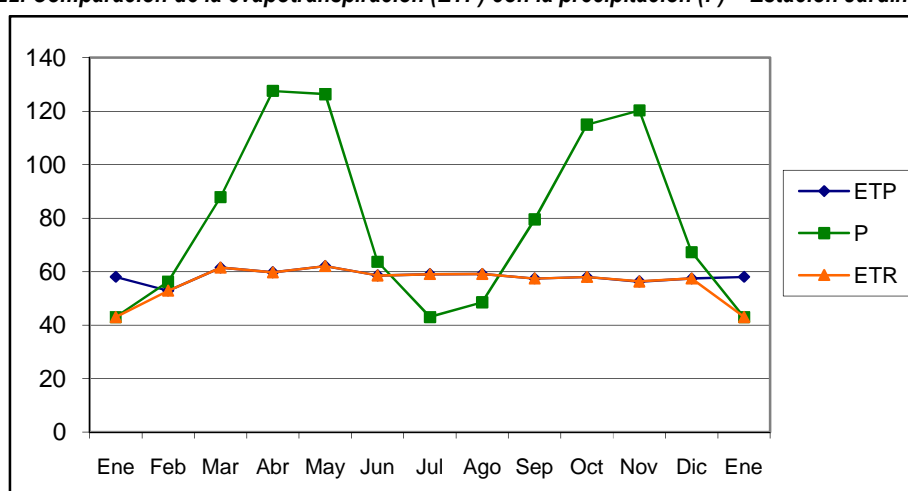


Tabla 18. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Universidad Nacional

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
T (°C)	14.6	14.8	15	15.2	15.3	15	14.4	14.5	14.6	14.8	14.9	14.9		14.8
l	5.07	5.17	5.28	5.38	5.44	5.28	4.96	5.01	5.07	5.17	5.22	5.22		62.3
a	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47		1.5
Ei (mm)	56.0	57.1	58.3	59.4	60.0	58.3	54.9	55.4	56.0	57.1	57.7	57.7		
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02		1.0
ETP corr. (mm)	57.1	53.1	60.0	60.6	63.6	60.0	58.2	58.2	56.5	58.8	57.1	58.8	57.1	702.1

Figura 23. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Universidad Nacional

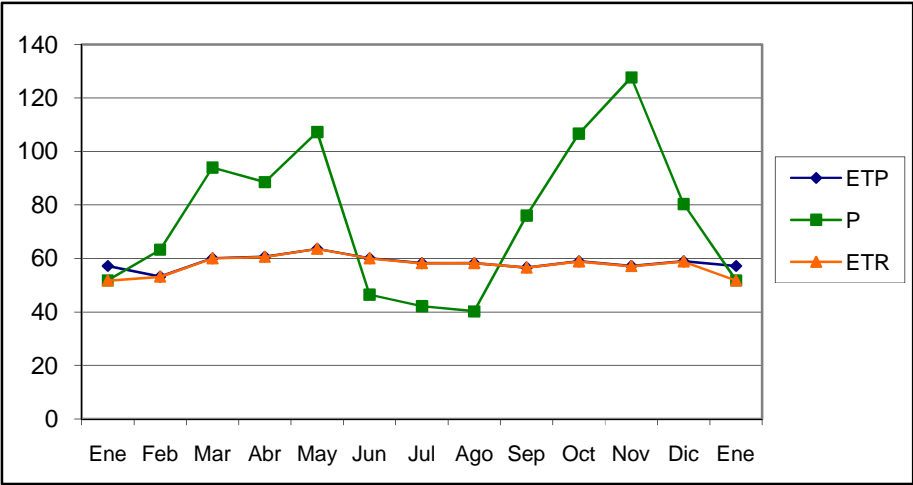


Tabla 19. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Vivero Venado de Oro

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
T (°C)	12.6	12.6	12.8	13.1	12.9	12.6	12.1	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3		12.5
l	4.05	4.05	4.15	4.30	4.20	4.05	3.81	3.86	3.96	4.00	3.96	3.91		48.3
a	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25		1.3
Ei (mm)	53.1	53.1	54.2	55.8	54.7	53.1	50.5	51.0	52.1	52.6	52.1	51.6		
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02		1.0
ETP corr. (mm)	54.2	49.4	55.8	56.9	58.0	54.7	53.5	53.6	52.6	54.2	51.6	52.6	54.2	647.1

Figura 24. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Vivero Venado de Oro

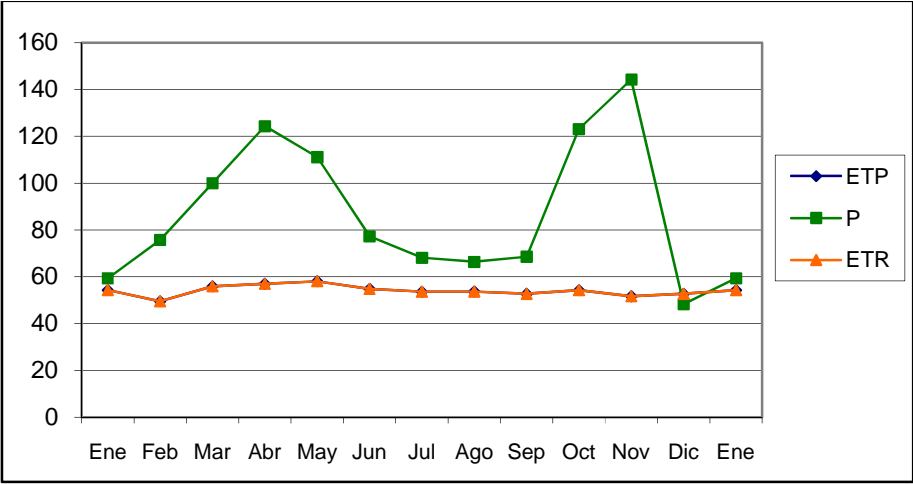
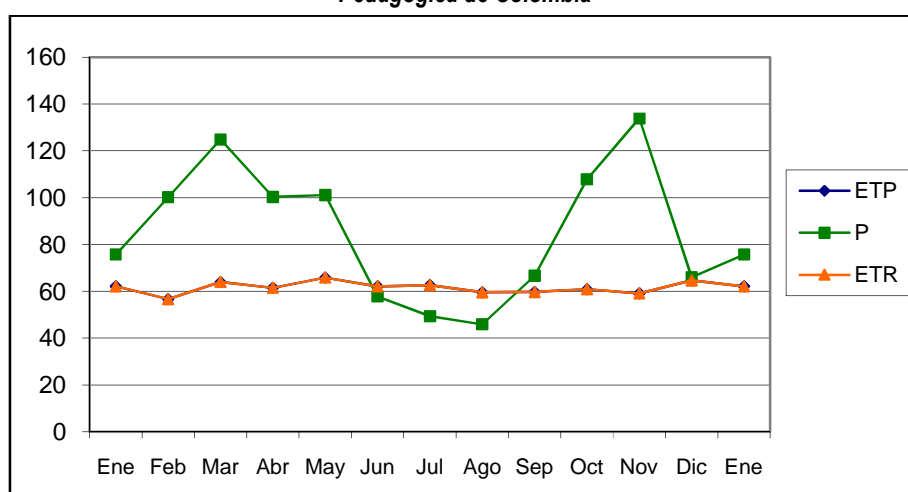


Tabla 20. Cálculo de la evapotranspiración - Estación Universidad Pedagógica de Colombia

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
T (°c)	16.2	16.2	16.4	16.1	16.4	16.1	15.9	15.5	15.9	15.9	16	16.6		16.1
I	5.93	5.93	6.04	5.87	6.04	5.87	5.76	5.55	5.76	5.76	5.82	6.15		70.5
a	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61		1.6
Ei (mm)	60.9	60.9	62.1	60.3	62.1	60.3	59.1	56.7	59.1	59.1	59.7	63.3		
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02		1.0
ETP corr. (mm)	62.1	56.6	64.0	61.5	65.9	62.1	62.7	59.6	59.7	60.9	59.1	64.6	62.1	738.8

Figura 25. Comparación de la evapotranspiración (ETP) con la precipitación (P) – Estación Universidad Pedagógica de Colombia



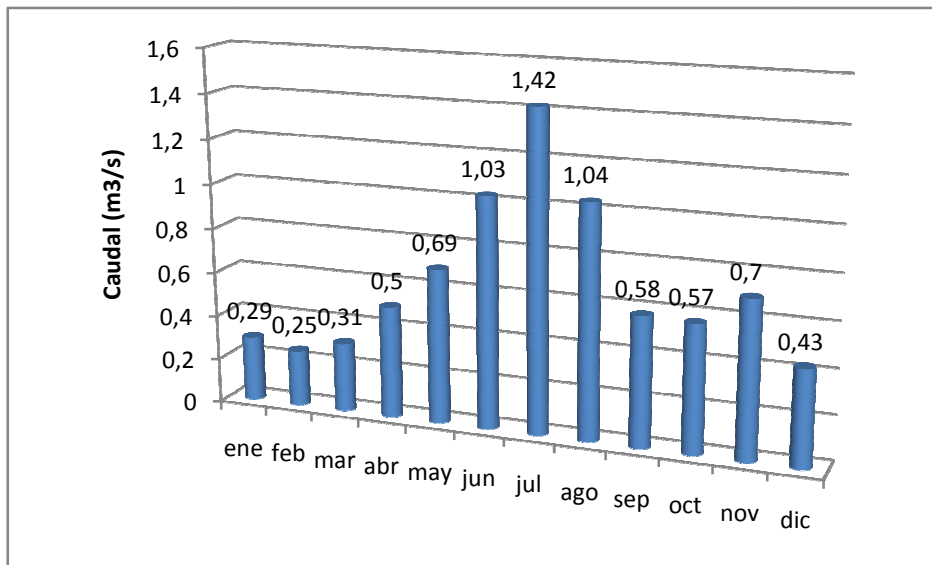
3.3.2. Análisis de Datos de Caudales

3.3.2.1. Cuenca del Río Fucha

A partir de los datos de niveles medios y máximos mensuales y empleando las curvas de calibración de la estación limnigráfica El Delirio, se obtuvieron los caudales medios y máximos mensuales en un período de registro entre el año 1952 y el año 2006 para el cual se cuenta con registros aproximadamente continuos.

En cuanto a los caudales medios, el río San Cristóbal en su parte alta, presenta valores entre 0.25 y 1.42 m³/s, siendo los meses de mayo, junio, julio y diciembre, en los que se presentan los valores más altos y los meses de enero, febrero, marzo los que presentan los valores más bajos. Esto coincide con la tendencia de los registros totales mensuales multianuales de precipitación en la estación pluviográfica El Delirio.

Figura 26. Promedio de caudales mensuales multianuales río Fucha (1990-2001)

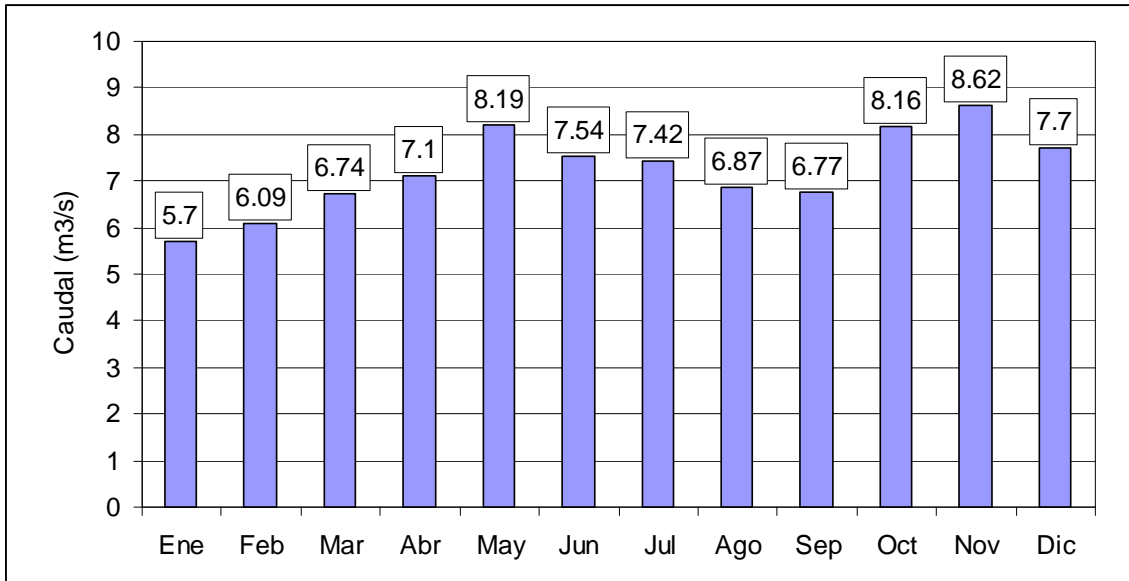


Los valores máximos presentados en dicha estación, van desde $4.42 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de febrero que presenta normalmente valores bajos de precipitación, hasta $26.60 \text{ m}^3/\text{s}$, en el mes de abril, que es un mes con pluviosidad por encima del promedio (Este valor de caudal máximo se presentó en el año 1982).

De acuerdo con el POMCA del río Fucha, en la parte baja de la cuenca, se localiza la estación limnimétrica Fontibón, estación para la cual se presentan los datos de caudal medio para un período comprendido entre 1984 y 2007.

De la Figura 27 se puede apreciar que en la parte baja de la cuenca, los caudales promedio oscilan entre 5.7 y $8.6 \text{ m}^3/\text{s}$., presentándose también en los caudales promedios un comportamiento bimodal, siendo los caudales más altos aquellos presentados en el mes de noviembre.

Figura 27. Promedio de caudales mensuales multianuales río Fucha Estación Fontibón



A continuación en la Figura 28 se presenta de forma gráfica, el comportamiento de los caudales de la Estación Fucha - Fontibón a lo largo del tiempo, durante una serie de años. En la figura se presenta también la curva de recesión de caudales para dicha estación.

De lo anterior, fue posible inferir que el caudal base a partir de la información de la curva de recesión es en promedio igual a $2.36 \text{ m}^3/\text{s}$, valor que resulta cercano y en el mismo orden de magnitud, que el obtenido por la Firma Consultora HMTV (2002), quienes estimaron a partir de los datos de dicha estación la curva de duración de caudales, de la cual se obtiene que el caudal base equivalente al caudal con una permanencia en tiempo del 95% es igual a $2.52 \text{ m}^3/\text{s}$. Se presenta en la Figura 29 la curva de duración de caudales de la estación Fontibón.

Es importante resaltar que los datos de caudal medidos para el cauce del río Fucha, presentan un aporte importante de aguas residuales, recogidas a lo largo de todo el cauce del río, por lo tanto no se puede estimar la relación río - agua subterránea.

Figura 28. Serie de datos mensuales en la estación Fucha - Fontibón

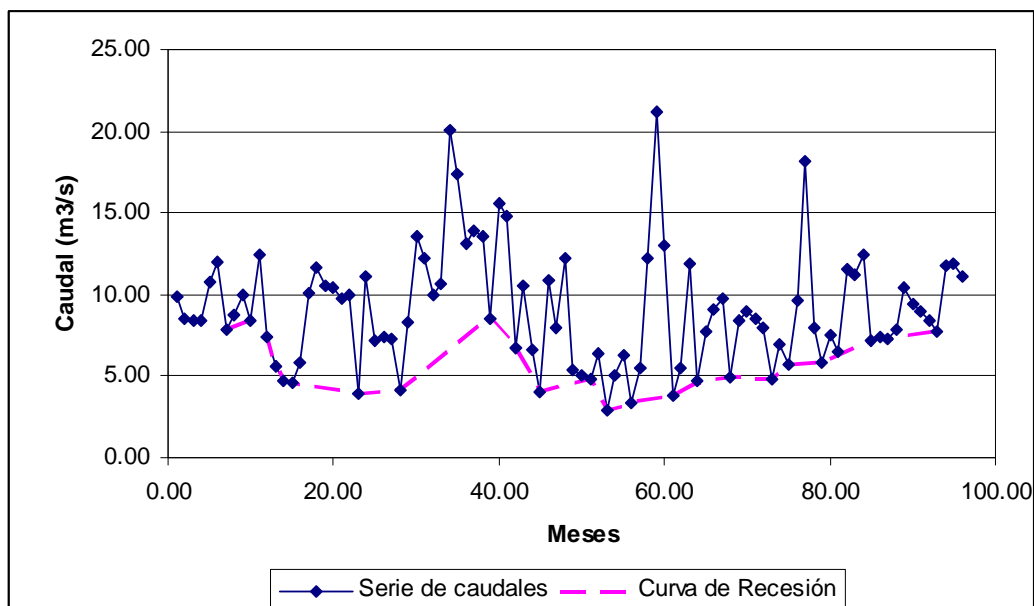
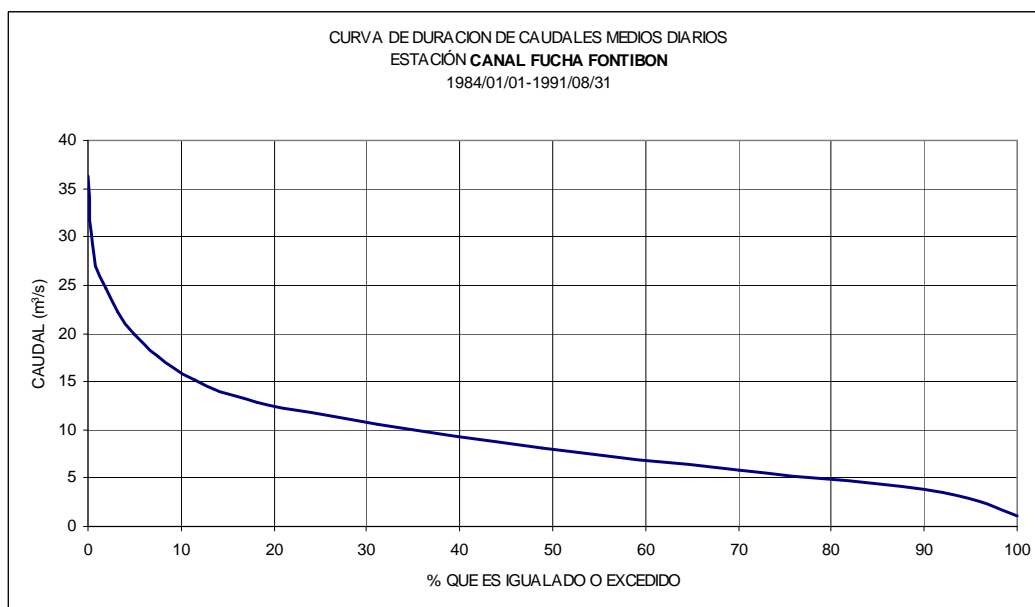


Figura 29. Curva de duración de caudales estación Fucha – Fontibón.



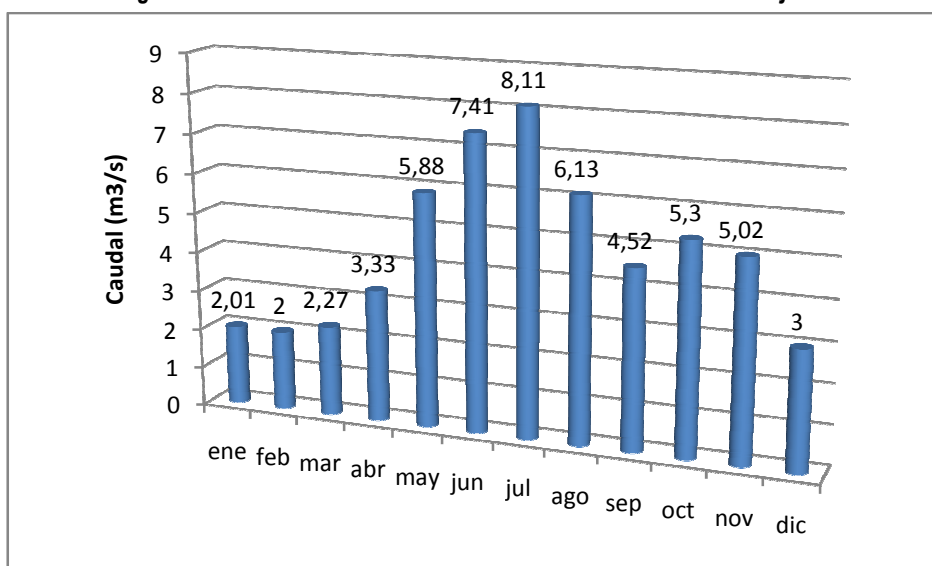
*Fuente: HMV-EAAB, 2002

3.3.2.2. Cuenca del Río Tunjuelo

El régimen de caudales medios en el río Tunjuelo tiende a presentar un comportamiento monomodal a lo largo del año (Figura 30), con un período de caudales bajos desde diciembre hasta abril, mes en el que el caudal aumenta hasta alcanzar valores máximos en el mes de julio. Normalmente en octubre se presenta un pequeño aumento en el caudal, aunque el descenso de caudal es evidente a finales del año.

La estación Puente Bosa, es la estación localizada más aguas abajo del cauce del río muy cerca de la desembocadura del mismo, los caudales medios máximos mensuales presentan valores cercanos a $8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 30. Promedio de caudales mensuales multianuales río Tunjuelo



En la Figura 31 y 32 se muestra el comportamiento a lo largo del tiempo de los caudales de la Estación Puente Bosa y la curva de recesión de caudales, con lo anterior se tiene que el caudal base estimado para la cuenca del río Tunjuelo a partir del análisis de la curva de recesión, es igual a $0.55 \text{ m}^3/\text{s}$ promedio anual, valor que al ser comparado con el obtenido a partir de la curva de duración de caudales estimada por la Firma Consultora HVM (2002), resulta ser también muy similar y del mismo orden de magnitud (para una permanencia en tiempo del 95% el caudal estimado a partir de la curva de duración de caudal es igual a $0.44 \text{ m}^3/\text{s}$). Se debe tener en cuenta que este río recibe aguas residuales, por lo tanto el componente subterráneo no es totalmente el valor calculado con el flujo base.

Figura 31. Serie de datos mensuales en la estación Puente Bosa

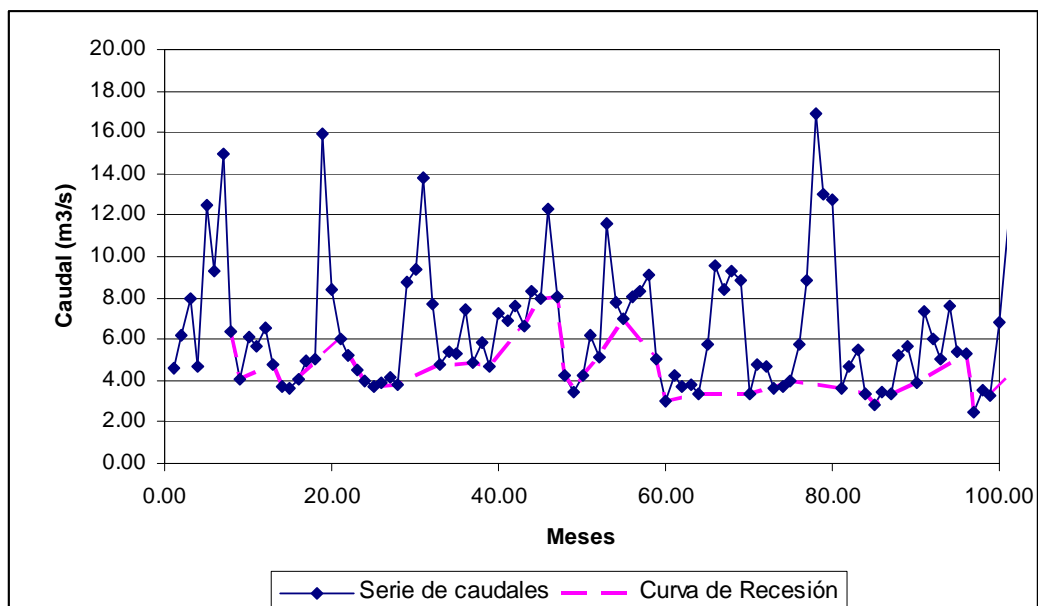
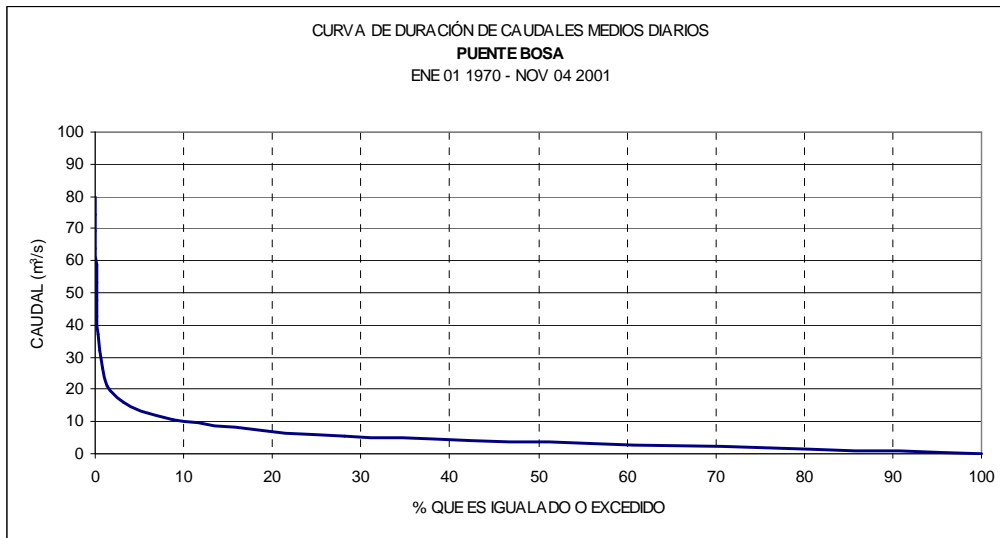


Figura 32. Curva de duración de caudales estación Puente Bosa.



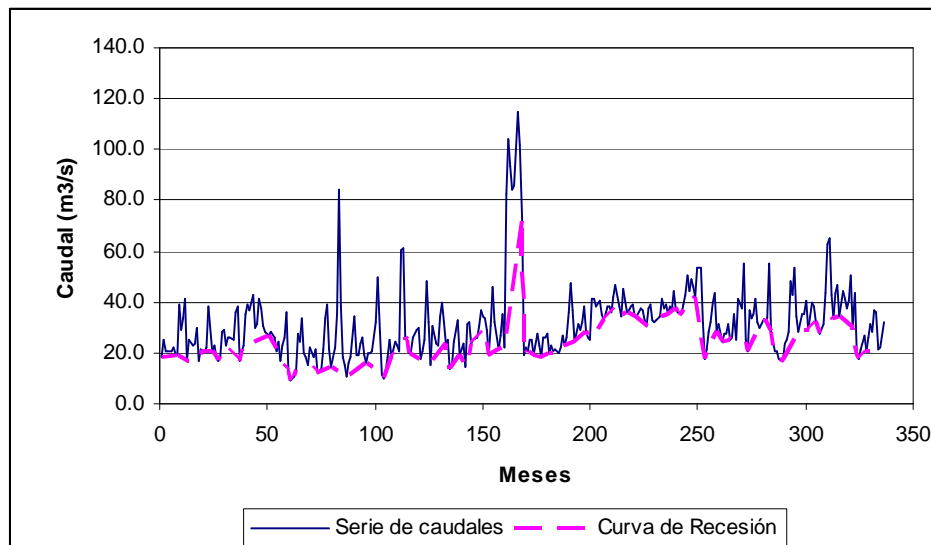
*Fuente: HMMV-EAAB, 2002

3.3.2.3. Río Bogotá - Estación Las Huertas

Para analizar los caudales base, se tomaron las series de datos de la estación Las Huertas sobre el río Bogotá, estación que se localiza aguas abajo de la desembocadura del río Tunjuelo al río Bogotá.

La Figura 33 muestra a lo largo del tiempo, el comportamiento de los caudales de la estación y la curva de recesión de caudales encontrados de forma gráfica, el caudal base estimado para el río Bogotá en esta estación es igual a 3.63 m³/s promedio anual, cabe notar que el río recibe aguas residuales, por lo tanto el flujo base no es lo que realmente se ha calculado en las gráficas.

Figura 33. Serie de datos mensuales en la estación Las Huertas – Río Bogotá



3.4 BALANCE DE AGUA EN LA CUENCA

El balance hídrico se realizó comparando mensualmente la ETP y la precipitación neta, encontrando inicialmente un sobrante o un déficit. Posterior a ello, se introduce en el cálculo, la reserva útil del suelo que depende de la textura y espesor del suelo.

Dicha reserva útil se calcula como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento. Cuando escasea el agua en el suelo, la evapotranspiración real (ETR) es inferior a la potencial existiendo escasez o falta de agua. Lo contrario, es decir, cuando hay abundancia de agua en el suelo, permiten la ocurrencia de la infiltración y por ende la recarga hacia los acuíferos.

En términos generales, en un balance hídrico se debe cumplir que las entradas de flujo (I) menos las salidas (O) son el equivalente al almacenamiento en la zona de estudio (ΔS), es decir:

$$I - O = \Delta S$$

Es importante resaltar que, la recarga obtenida mediante los balances hídricos, es la cantidad potencial del agua que pudiera ingresar a los acuíferos mediante la infiltración.

Para este caso, se considera como entrada al volumen de control la precipitación correspondiente a la precipitación media mensual en cada una de las estaciones. Como salidas, se tiene el volumen de escurrimiento y la evapotranspiración.

El volumen de escurrimiento es calculado a partir de los datos de caudal en cada una de las cuencas y la evapotranspiración en cada una de las estaciones se calculó, como se muestra en el numeral 3.3.1 *Cálculo de la Evapotranspiración* de este capítulo.

Los resultados del balance hídrico en cada una de las estaciones, se presenta en resumen en la Tabla 21.

Tabla 21. Balance Hídrico en cada estación

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Fontibón	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Vitelma	0.0	0.0	0.0	16.8	44.5	18.1	24.3	8.2	3.6	60.2	67.2	24.5	267.4
Guaymaral	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Muña	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Doña Juana	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Apto El Dorado	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ECI	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.1	10.1
La Ramada	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
El Dorado didáctica	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Flores Colombianas	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jardín Botánico	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.1	63.9	9.8	102.8
Universidad Nacional	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.5	21.5	37.0
Vivero Venado de Oro	0.0	0.0	0.0	52.6	53.1	22.5	14.5	12.7	15.9	68.8	92.6	0.0	332.7
U Pedagógica	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	22.4	74.7	1.4	100.5

Calculo de la recarga potencial mediante la ecuación empírica de Cheeturvedi (Sinha y Sharma 1998)

$$r = 1.35 (p - 14)^{0.5}$$

Donde:

r es la recarga potencial (pul/año)

p es la precipitación (pul/año)

En términos generales se observa en los resultados, que las estaciones que se localizan hacia la parte oriental de la zona de estudio, por lo general no presentan potencialmente recarga hacia el acuífero. Esto, debido a que los volúmenes de precipitación en forma regular, alcanzan a surtir los volúmenes de evapotranspiración y los volúmenes que se escurren superficialmente por cada uno de los cauces que cruzan por la zona estudiada.

No obstante, las zonas de mayor recarga potencial (Balance hídrico) se presentan hacia los cerros orientales, especialmente hacia las partes altas de las cuencas de los ríos Fucha y Tunjuelo donde los valores en algunos casos superan los 190 mm/año. (Figura 34).

De igual forma, se presenta una menor recarga potencial (Balance hídrico), hacia la zona sur occidental, en las desembocaduras de los Ríos Fucha y Tunjuelo, cuyos valores se encuentran entre 0 y 50 mm/año. Como resultado general, para la zona de estudio se calculo que la recarga potencial promedio (Balance hídrico) es de 70 mm/año.

Así mismo, si se analiza el valor de la recarga potencial (Balance hídrico) para cada una de las cuencas del Distrito Capital, se obtiene que para la cuenca del río Tunjuelo el valor promedio anual es de 6.73 mm, siendo esta la recarga potencial promedio anual más baja. Para el caso de las cuencas de Salitre y Fucha, los valores promedio anual de recarga potencial son iguales a 169.3 mm y 225.6 mm respectivamente. Para el caso de la cuenca del río Torca el valor es igual a 92.38 mm.

Es de anotar que hacia la zona de los humedales más grandes que tiene el Distrito Capital, es decir, hacia el humedal Juan Amarillo y el humedal Jaboque, la recarga Potencial oscila entre 10 y 100 mm al año.

Se presentan valores de -50 a -200 mm/año en la parte media y baja del Río Tunjuelo y parte baja del Río Fucha (Figura 34), lo que indica y evidencia una posible recarga de la cuenca del Paramo de Sumapaz.

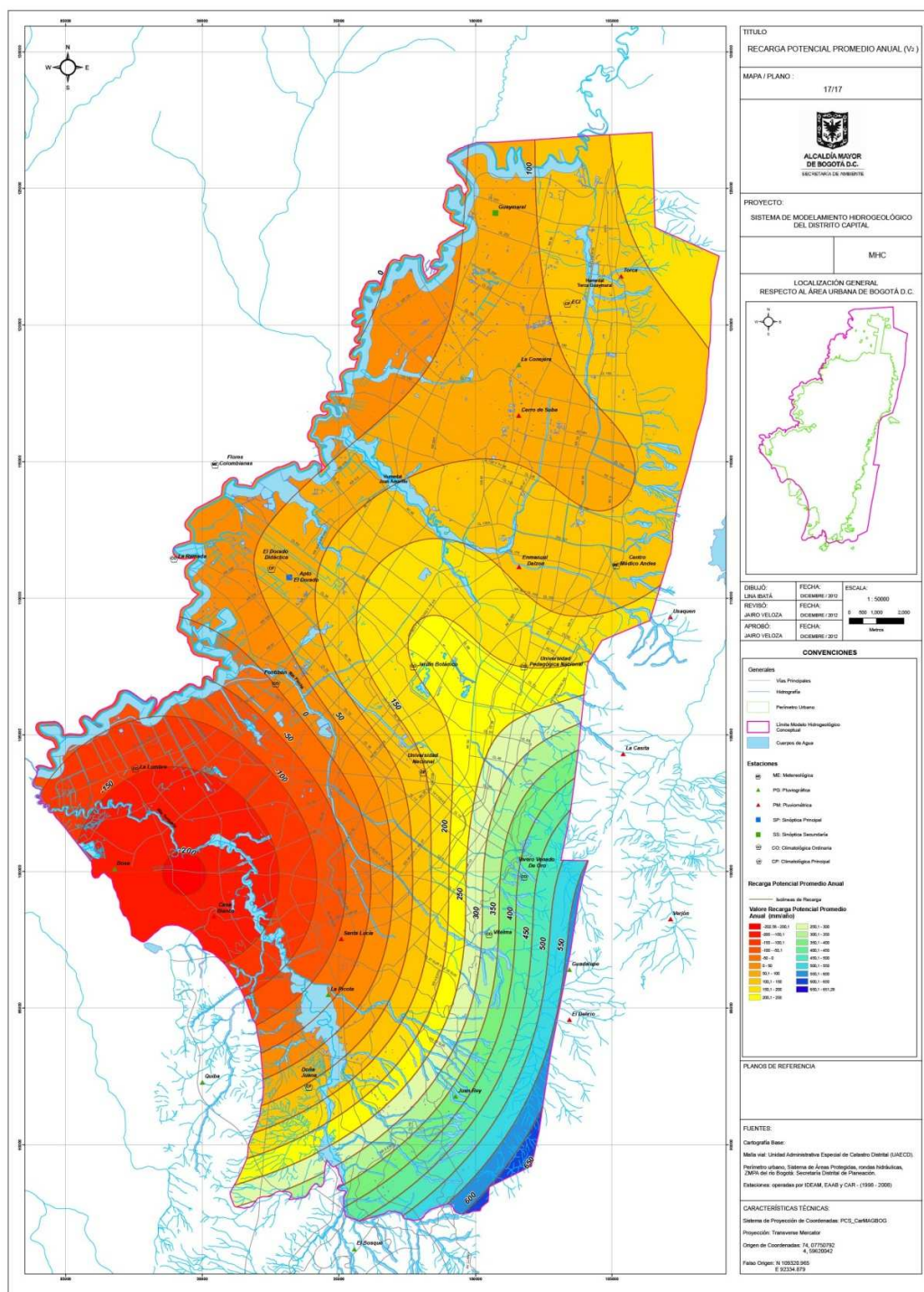
La recarga potencial calculada mediante el mapa de isorecarga potencial es del orden de 157 mm/año.

La recarga potencial mediante el método de Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1988) es del orden de 143 mm/año.

El volumen de la recarga potencial estimada para formaciones Arenisca Dura, Labor Tierna y Plaeners es del orden de 18.332.841,3 m³/año dentro del área de la jurisdicción de la Secretaria Distrital de Ambiente.

El volumen de la recarga potencial estimada para los depósitos cuaternarios es del orden de 39.108.856,8 m³/año dentro del área de la jurisdicción de la Secretaria Distrital de Ambiente.

Figura 34. Recarga Potencial en la zona de estudio



4. GEOFÍSICA

Para determinar las características geológicas e hidrogeológicas para la formulación del modelo hidrogeológico conceptual como insumo para el modelo matemático se tomó en cuenta la información geofísica de HIDROGEOCOL (1999) a diferentes profundidades, el mapa de anomalía gravimétrica Bouguer total de la Sabana de Bogotá (INGEOMINAS 2004) y se realizaron 30 SEVs en cercanías de los cerros orientales y cerros de Suba de Bogotá D.C.

4.1 GEOELÉCTRICA

Se realizaron 30 sondeos eléctricos verticales mediante el contrato 1005 de 2010 para identificar los espesores y las resistividades de las diferentes capas que conforman el subsuelo y correlacionarla con la información existente.

4.1.1. Interpretación Geoeléctrica

La gráfica resultante del sondeo geoeléctrico se interpretó por el método gráfico tradicional y por simulación en computadora. La superposición de las curvas medidas en campo y las curvas calculadas por el simulador presenta un excelente ajuste con un error inferior al 4%.

4.1.2. Ubicación de los Sondeos Geoeléctricos

La ubicación de los centros de los sondeos geoeléctricos se localizaron por medio de G.P.S. (Global Position System por sus siglas en ingles). Las coordenadas halladas en el terreno fueron tomadas en el sistema de referencia Gauss Kruger, teniendo como origen el observatorio de Bogotá.

Tabla 22. Coordenadas de los puntos de medición (Gauss Kruger)

Sondeo	Coordenada X (mN)	Coordenada Y (mE)	Abertura AB	Profundidad investigada (m)
1	1022956	1001495	1200	600
2	1022736	1004350	1200	600
3	1018574	1003689	800	400
4	1017425	1004547	800	400
5	1017080	1005566	600	300
6	1021186	999043	1000	500
7	1016540	1001982	800	400
8	1012370	1004951	1000	500
9	1013397	1004990	1000	500
10	1011557	1004951	700	350
11	1011365	1004702	1000	500
12	1010456	1004369	1200	600
13	1009435	1002588	1000	500
14	1008642	1001200	800	400
15	1008489	1001955	660	330
16	1009309	1003644	500	250
17	1003688	1000262	600	300
18	998026	982912	900	450
19	1000031	983308	800	400
20	1000297	984980	1200	600
21	999417	984965	1200	600
22	998947	986832	600	300
23	1000344	989321	1000	500
24	998670	990922	800	400
25	998589	991296	700	350
26	997244	993820	1000	500
27	994740	995168	800	400
28	998303	996185	650	325
29	997700	996550	500	250
30	997952	996929	500	250

4.1.3. Resultados de la Interpretación Geoelectrica

Los resultados de la interpretación geoelectrica fue realizada según el algoritmo de Schlumberger, obteniendo las siguientes unidades de resistividad:

➤ Niveles arcillosos	5 a 20 Ohmm.
➤ Arcilla arenosa	20 a 45 Ohmm
➤ Arena arcillosa	45 a 80 Ohmm.
➤ Arenas saturadas	80 a 180 Ohmm
➤ Arenas y gravas saturadas	180 a 1000 Ohmm
➤ Arenas y gravas baja saturación	mayor de 1000 Ohmm

A continuación se presentan los resultados de la interpretación geoelectrica y estratigráfica:

Tabla 23. Perfiles de los Sondeos Eléctricos Verticales

Sondeo eléctrico vertical N° 1			
	SEV - 1		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
152	0,4	0,4	Suelo arenoso
400	0,7	1,1	Arenas baja saturacion
27,2	10,8	11,9	Arcilla arenosa
13,9	115,7	127,6	Arcilla
33,9	>468,4	>600	Areniscas y Arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N° 2			
	SEV - 2		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
10,2	0,04	0,0	Suelo arcilloso
1237	0,05	0,1	Suelo arenoso
127	1	1,1	Arenas saturadas
29,8	16,1	17,2	Arcilla arenosa
20,7	29,3	46,5	Arcillas
33,3	66,2	112,7	Arcilla arenosa
9,3	>487	>600	Arcillolitas

Sondeo eléctrico vertical N°3			
	SEV - 3		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
155	0,5	0,5	Suelo arenoso
67,8	2,6	3,1	Suelo areno arcilloso
19,6	15,4	18,5	Arcillas
4,2	87,6	106,1	Arcillas
6,3	>294	>400	Arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N°4			
	SEV - 4		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
97,2	0,8	0,8	Suelo arenoso
295	0,8	1,6	Suelo arenoso
47,1	6,2	7,8	Arena arcillosa
20,5	16,6	24,4	Arcillas
38,6	41,2	65,6	Arena arcillosa
30,1	143	208,6	Arena arcillosa
35,5	>191	>400	Areniscas y arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N°5			
	SEV - 5		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
93,4	0,7	0,7	Suelo arenoso
484	1,4	2,1	Suelo arenoso
20,3	3,8	5,9	Arcilla
50,3	17,5	23,4	Arena arcillosa
33,7	37,8	61,2	Arcilla arenosa
665	98,9	160,1	Areniscas saturadas
191	>140	>300	Areniscas saturadas

Sondeo eléctrico vertical N°6			
	SEV - 6		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
9802	0,1	0,1	Suelo arenoso
80,7	1,8	1,9	Arenas saturadas
17,3	3,1	5,0	Arcillas
26,9	13,2	18,2	Arcilla arenosa
17,8	40	58,2	Arcilla
36,9	82	140,2	Arcilla arenosa
18,3	>359,8	>500	Arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N°7			
	SEV - 7		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
54,6	0,6	0,6	Suelo arenoso arcilloso
508	0,5	1,1	Suelo arenoso
36,1	1,4	2,5	Arcilla arenosa
27,1	20,6	23,1	Arcilla arenosa
16	40,5	63,6	Arcilla
29,2	77,9	141,5	Arcilla arenosa
25,5	>258	>400	Arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N°8			
	SEV - 8		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
200	0,5	0,5	Suelo arenoso
11,2	0,07	0,6	Arcillas
23,1	9,7	10,3	Arcillas
51,1	49,2	59,5	Arenas y Arcillas
14,4	195	254,5	Arcillas
352	>246	>500	Areniscas saturadas

Sondeo eléctrico vertical N°9			
	SEV - 9		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
752	0,3	0,3	Suelo arenoso
113	9,3	9,6	Arenas saturadas
19,4	39,6	49,2	Arcillas
155	98,9	148,1	Arenas saturadas
0,6	>352	>500	Arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N°10			
	SEV - 10		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
152	0,6	0,6	Suelo arenoso
427	0,6	1,2	Suelo arenoso
43,3	3,7	4,9	Arcilla arenosa
24,1	37	41,9	Arcillas
9,4	41,8	83,7	Arcillas
58,9	>266,2	>350	Areniscas saturadas y arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N°11			
	SEV - 11		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
133	0,4	0,4	Suelo arenoso
209	2	2,4	Suelo arenoso
4,2	17,2	19,6	Arcillas
108	74,9	94,5	Arenas saturadas
7,6	>476,9	>500	Arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N°12			
	SEV - 12		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
44,2	1,2	1,2	Suelo areno arcilloso
141	1,6	2,8	Suelo arenoso
16,1	6,6	9,4	Arcillas
90,9	15,7	25,1	Arenas saturadas
24,1	154	179,1	Arcilla arenosa
6,2	>421	>600	Arcillolitas

Sondeo eléctrico vertical N° 13			
	SEV - 13		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
91,2	1,2	1,2	Suelo arenoso
22,6	12,8	14,0	Arcillas
17,9	75,3	89,3	Arcillas
7,4	124	213,3	Arcillas
186	>286	>500	Arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N° 14			
	SEV - 14		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
74,4	0,3	0,3	Suelo arenoso
364	0,5	0,8	Suelo arenoso
21,3	11,6	12,4	Arcillas
4,7	12,1	24,5	Arcillas
7,3	62,1	86,6	Arcillas
13	>313,4	>400	Arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N° 15			
	SEV - 15		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
98,7	1,5	1,5	Suelo Arenoso
14,3	5,4	6,9	Arcillas
23	12,9	19,8	Arcillas
16,3	23,2	43,0	Arcillas
21,9	50,1	93,1	Arcillas
9,9	112	205,1	Arcillolitas
32	>125	>330	Arcillolitas y areniscas

Sondeo eléctrico vertical N° 16			
	SEV - 16		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
183	0,9	0,9	Suelo arenoso
21,4	3,8	4,7	Arcillas
14,9	7	11,7	Arcillas
79,7	28,1	39,8	Arenas saturadas
10,5	>210,2	>250	Arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N° 17			
	SEV - 17		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
558	0,2	0,2	Suelo arenoso
76,6	2,4	2,6	Suelo arenoso
45,9	7	9,6	Arenas y arcillas
89,3	20,2	29,8	Arenas saturadas
20,2	38,2	68,0	Arcillas
51,9	183	251,0	Areniscas
22,1	>49	>300	Arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N° 18			
	SEV - 18		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
7,4	0,3	0,3	Suelo arcilloso
15,5	1,2	1,5	Suelo arcilloso
2,3	2,2	3,7	Arcillas
18,6	34,2	37,9	Arcillas
54,3	351	388,9	Areniscas saturadas
31,7	>61	>450	Chert saturados

Sondeo eléctrico vertical N° 19			
	SEV - 19		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
6,6	1,3	1,3	Suelo Arcilloso
18	2,8	4,1	Arcillas
12,2	9,1	13,2	Arcillas
18,4	69,6	82,8	Arcillas
87,3	207	289,8	Areniscas saturadas
55,1	>110	>400	Chert saturados
Sondeo eléctrico vertical N° 20			
	SEV - 20		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
8,7	0,6	0,6	Suelo arcilloso
25,4	0,6	1,2	Suelo arcilloso
4	3	4,2	Arcillas
19,7	29,8	34,0	Arcillas
15,3	105	139,0	Arcillas
42,3	>461	>600	Arenaniscas saturadas y Arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N° 21			
	SEV - 21		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
25,8	0,8	0,8	Suelo arcilloso
6,7	2,6	3,4	Arcillas
12,1	8,7	12,1	Arcillas
19,7	142	154,1	Arcillas
96,8	>446	>600	Areniscas saturadas

Sondeo eléctrico vertical N° 22			
	SEV - 22		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
66,6	0,9	0,9	Suelo arenoso
23,8	1,7	2,6	Arcillas
5,7	6,3	8,9	Arcillas
31	22,6	31,5	Arcilla arenosa
29,4	110	141,5	Arcillolitas
707	>258	>400	Areniscas saturadas
Sondeo eléctrico vertical N° 23			
	SEV - 23		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
13,5	1	1,0	Suelo arcilloso
58,3	2,9	3,9	Arena arcillosa
29,6	9,4	13,3	Arcilla arenosa
92,6	11,3	24,6	Arena y gravas
30	103	127,6	Arcilla arenosa
48,2	73,9	201,5	Arena arcillosa
29,8	96,6	298,1	Arcillolitas
109	>202	>500	Arenaniscas saturadas
Sondeo eléctrico vertical N° 24			
	SEV - 24		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
193	0,4	0,4	Suelo arenoso
50,5	2,3	2,7	Arenas y arcillas
6,1	3,7	6,4	Arcillas
44,9	16,5	22,9	Arenas y arcillas
31,8	162	184,9	Arcillolitas
4233	>215	>400	Areniscas saturadas

Sondeo eléctrico vertical N° 25			
	SEV - 25		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
17,4	0,6	0,6	Suelo arcilloso
5,1	1,2	1,8	Suelo arcilloso
176	3,2	5,0	Arenas saturadas
44,6	14,1	19,1	Arenas y Arcillas
137	17,7	36,8	Arenas saturadas
22,4	88,5	125,3	Arcillolitas
4635	>225	>350	Areniscas saturadas
Sondeo eléctrico vertical N° 26			
	SEV - 26		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
77,4	0,5	0,5	Suelo arcilloso
23,3	1,2	1,7	Suelo arcilloso
37,8	2,1	3,8	Arenas y arcillas
26,3	14,9	18,7	Arenas y arcillas
125	164	182,7	Arenas y gravas
72,8	149	331,7	Areniscas saturadas
106	>168	>500	Areniscas saturadas
Sondeo eléctrico vertical N° 27			
	SEV - 27		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
667	0,2	0,2	Suelo arenoso
50,8	1	1,2	Suelo arenoso
16,2	12,3	13,5	Arcillas
10,3	2,6	16,1	Arcillas
2,9	45,2	61,3	Arcillas
53,1	>338,7	>400	Areniscas y Arcillolitas

Sondeo eléctrico vertical N° 28			
	SEV - 28		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
82,7	0,5	0,5	Suelo arenoso
18,2	4	4,5	Arcillas
135	5,5	10,0	Arenas saturadas
17,7	248	258,0	Arcillas
30,9	>67	>325	Arcillolitas y Areniscas
Sondeo eléctrico vertical N° 29			
	SEV - 29		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
407	0,2	0,2	Suelo arenoso
16,2	1,6	1,8	Suelo arcilloso
9	3,4	5,2	Arcillas
39,6	3,5	8,7	Arenas arcillosa
22,4	62,6	71,3	Arcillolitas
49,1	32,3	103,6	Areniscas y Arcillolitas
2,1	>146	>250	Arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N° 30			
	SEV - 30		
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohmm	m	m	
177	0,4	0,4	Suelo arenoso
20,4	2,5	2,9	Suelo arcilloso
58,3	5,1	8,0	Arenas saturadas
34,6	26,4	34,4	Arcilla arenosa
16,2	55,5	89,9	Arcilolitas
105	124	213,9	Areniscas saturadas
46,8	>36	>250	Arcillolitas y Areniscas

4.1.4. Perfiles Geoeléctricos

Fueron realizados seis perfiles geoeléctricos donde se aprecia la condición hidrogeológica existente bajo las zonas exploradas en Bogotá (Ver Tabla 23. Perfiles de los Sondeos Eléctricos Verticales).

Perfil A-A': Se aprecia que existe el depósito Fluvio-lacustre de la Sabana de Bogotá desde la superficie del terreno hasta una profundidad variable de 10 a 214 m, este depósito es eminentemente arcilloso y presenta resistividades bajas en el rango de 10 a 30 Ohmm.

Por debajo se presenta un sustrato arcilloso correspondiente a sedimentos terciarios. Bajo el SEV-15 se encontraron resistividades del orden de 32 Ohmm que al correlacionarse con el entorno geológico de la zona corresponde a unas areniscas.

Bajo los SEV-8 y SEV-10 fueron medidas resistividades encima de 58 Ohmm correspondientes a areniscas saturadas.

La geoeléctrica muestra que existe una falla geológica en el borde de los cerros orientales, en donde la presencia de una gran falla inversa marca el hundimiento de los sedimentos terciarios y levanta las areniscas del Grupo Guadalupe hacia los cerros orientales.

Perfil B-B': Este perfil se encuentra ubicado hacia el oriente del cerro de Suba, muestra un depósito cuaternario con una profundidad que varía de 61 a 209m, con sedimentos potencialmente acuíferos dentro del Cuaternario en los casos en que la resistividad está encima de los 30 Ohmm.

Los SEV-4 y SEV-5 muestran en profundidad sedimentos de arenas con resistividad del orden de 35.5 a 665 Ohmm hacia el costado oriental de la falla geológica, mientras que hacia el costado occidental se presentan en el sustrato sedimentos Terciarios.

Perfil C-C': Localizado hacia la zona del aeropuerto de Guaymaral, en esta sección se aprecia el levantamiento de las areniscas cretáceas hacia la zona norte del cerro de Suba, existiendo dos fallas inversas que producen el levantamiento del sector del cerro de Suba.

Perfil D-D': Localizado hacia la zona de Soacha, muestra un depósito cuaternario de espesor variable entre 31.5 y 154 m, con resistividades entre 18 y 31 Ohmm potencialmente acuífero, por debajo se presentan en los 3 sondeos areniscas saturadas cretáceas, con resistividades que varían dependiendo del

grado de saturación de las mismas entre 87.3 y 707 Ohmm. A mayor resistividad menor saturación de la arenisca.

Perfil E-E': Localizado en los alrededores del río Tunjuelito, empezando en el cementerio El Apogeo, se presenta un depósito cuaternario de espesor variable entre 22.9 y 201 m y un sustrato profundo de arcillolitas terciarias y por debajo areniscas cretáceas de muy alta resistividad bajo los SEV-24 y SEV-25 con valores de 4233 y 4635 Ohmm, indicando baja saturación de estas areniscas. Hacia el sector oriental del río Tunjuelito se aprecian resistividades de acuífero ideal estando todas en el intervalo de 80 a 180 Ohmm. Estos valores corresponden a la Formación Tunjuelito y areniscas cretáceas en el SEV-26, mientras que en el SEV-27 corresponden a areniscas terciarias, caracterizadas en el sector por sus capas fuertemente inclinadas.

Perfil F-F': Se presentan arcillolitas terciarias y por debajo areniscas terciarias.

HIDROGEOCOL en 1999 realizó sondeos geoeléctricos, utilizando la disposición Schlumberger, en algunas zonas de Bogotá, de cuya interpretación se generaron mapas de iso-resistividad a profundidades de 50, 100 y 250 metros. De lo cual se presenta lo siguiente: a profundidad de 50 metros: se presentan valores de resistividad mayores a 100 ohm-m. Se interpreta que en los sectores cercanos a los cerros el cuaternario presenta poco espesor. Valores bajos de resistividad se presentan al occidente y áreas alejadas de los Cerros Orientales, en inmediaciones de los cauces de los ríos Bogotá, Fucha y Juan Amarillo, interpretándose un cuaternario arcilloso; también se presentan bajos valores de resistividad, para un material arcilloso, en la zona plana entre los Cerros Orientales y el Cerro de Suba. En la zona de Quiba y Cazucá, siguiendo el cauce del río Tunjuelo, las resistividades son del orden de 20 a 50 ohm-m. en la parte baja del río, correspondiente a un material arcillo arenoso, y con resistividades de 100 a 150 ohm-m. en la parte alta, donde se explotan las gravas y arenas del río. A una profundidad de 100 metros: se presenta el mismo comportamiento de la resistividad de 50 metros de profundidad pero en los al norte y sur de Bogotá. A una profundidad de 250 metros: Se interpreta un comportamiento similar a los anteriores en el sector norte, con altas resistividades en el piedemonte de los cerros donde se interpreta en el subsuelo rocas consolidadas; se presentan bajas resistividades en la parte plana, lo cual indica que el depósito cuaternario alcanza espesores mayores a los 250 metros. En el sector sur los valores de las resistividades aumentan hasta valores de 200

ohm-m., infiriendo estructuras de mayor consolidación en el subsuelo.⁹

4.2 MÉTODO CSAMT EAAB JICA

Se ha tomado la información del método CSAMT (Controlled Source Audio Magnetotelluric) de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y JICA (2003 -2006) de lo cual se resalta lo siguiente:

En la interpretación de los resultados del sondeo CSAMT, fueron aplicados los siguientes criterios:

- La resistividad eléctrica del Cuaternario es menor de 30 Ω m
- La resistividad eléctrica del Terciario es menor de 50 Ω m
- La resistividad eléctrica del Cretáceo es mayor de 50 Ω m

Los valores de la resistividad en las formaciones geológicas son diferentes, incluso dentro de la misma formación, dependiendo del contenido de material arcilloso y si estuviera seco o saturado. Por lo tanto, es imposible tomar un valor de resistividad único para una formación específica.

En el área ubicada al sur de Bogotá y norte del municipio de Soacha sobre la formación Bogotá, de acuerdo con el resultado del sondeo CSAMT, la parte superficial del suelo (por encima de los 250 m de profundidad) tiene una resistividad variable y valores menores a 10 Ω m, estos están distribuidos en forma continua desde los 250 hasta por lo menos 1.200 m de profundidad. Esta unidad parece ser Terciaria y Cuaternaria. Por lo tanto, se asume que el Grupo Guadalupe se distribuye, por lo menos, a una profundidad mayor a los 1.200 m del nivel del suelo.

El área ubicada al norte de Bogotá y el municipio de Chía, de acuerdo con los resultados de los sondeos CSAMT, altas resistividades de formaciones superiores a 80 Ω m, se distribuyen en espesores de más de 1000 metros; esta formación parece corresponder a la formación Guadalupe. Los mapas geológicos existentes muestran a la formación Cretácea hundiéndose debido a la actividad de fallas.

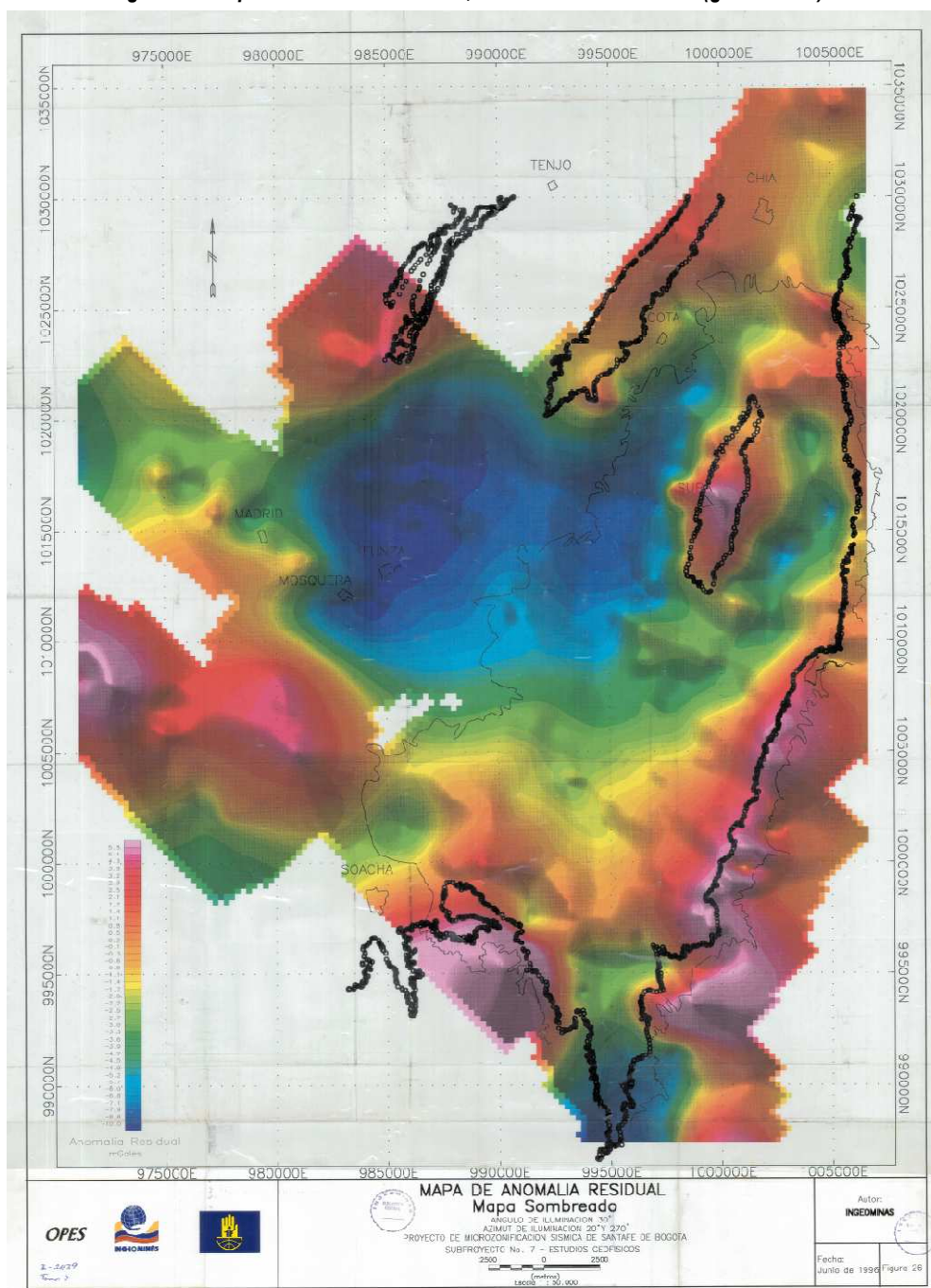
⁹ A RESTREPO M, Luis E. Modelo Hidrogeológico Conceptual Acuífero Cuaternario en el Área de Bogotá.

Los resultados del CSAMT muestran que dicho hundimiento está alrededor de los 250 metros.

4.3 GRAVIMETRÍA

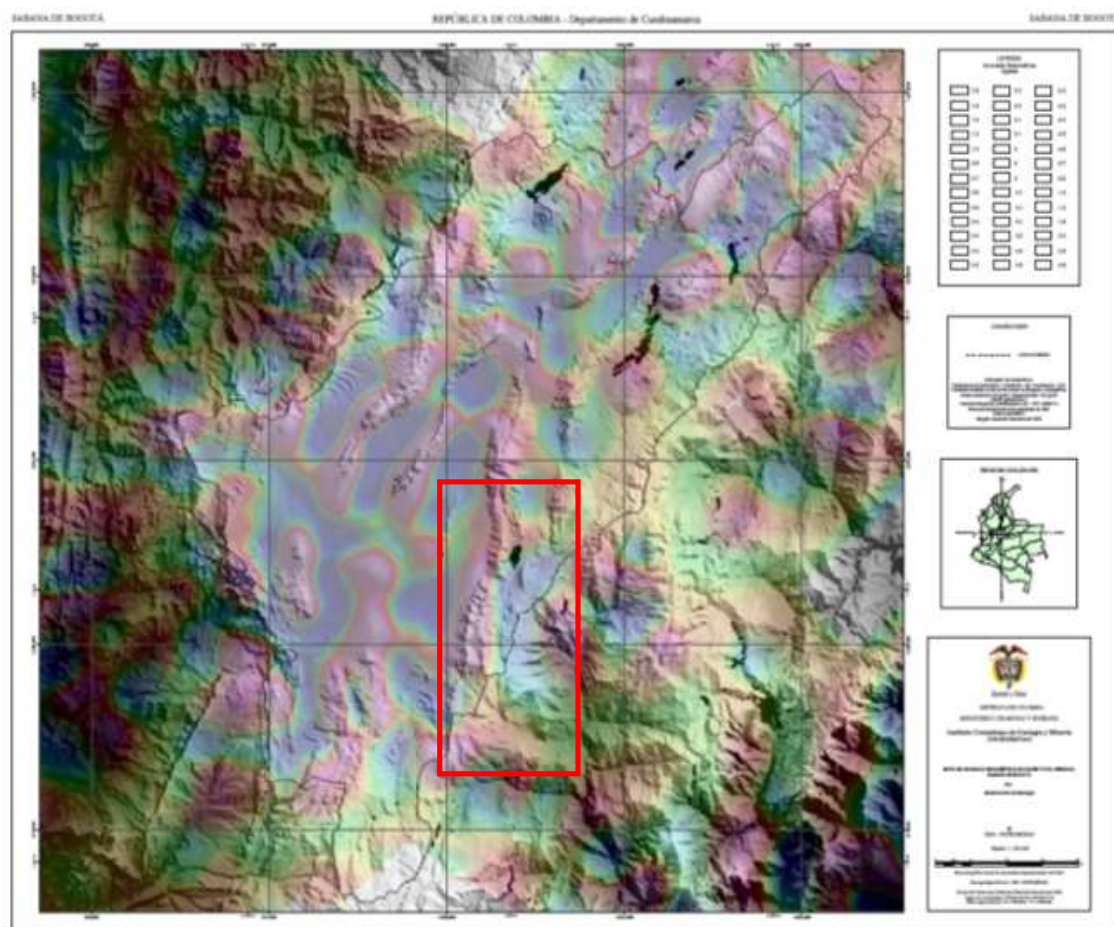
Se ha evaluado el estudio Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá, en el cual se levantaron más de 370 estaciones gravimétricas; dentro de estos análisis se concluye que el espesor de los sedimentos entre los cerros de Cota y los cerros de Suba es del orden de 500 metros y entre los cerros de Suba y los cerros Orientales de Bogotá es del orden de 240 m. Con la perforación exploratoria realizada en Suba (Bilbao) por parte de la Secretaria Distrital de Ambiente, se han encontrado 520 metros de sedimento, por lo tanto los espesores promedio obtenidos están alrededor de un 5% de aproximación al real (Ver Figura 35. Mapa de anomalía residual y la Figura 37. Mapa de espesor de sedimentos modificado).

Figura 35. Mapa de anomalía residual, con efectos de sombra (gravimetría)*.



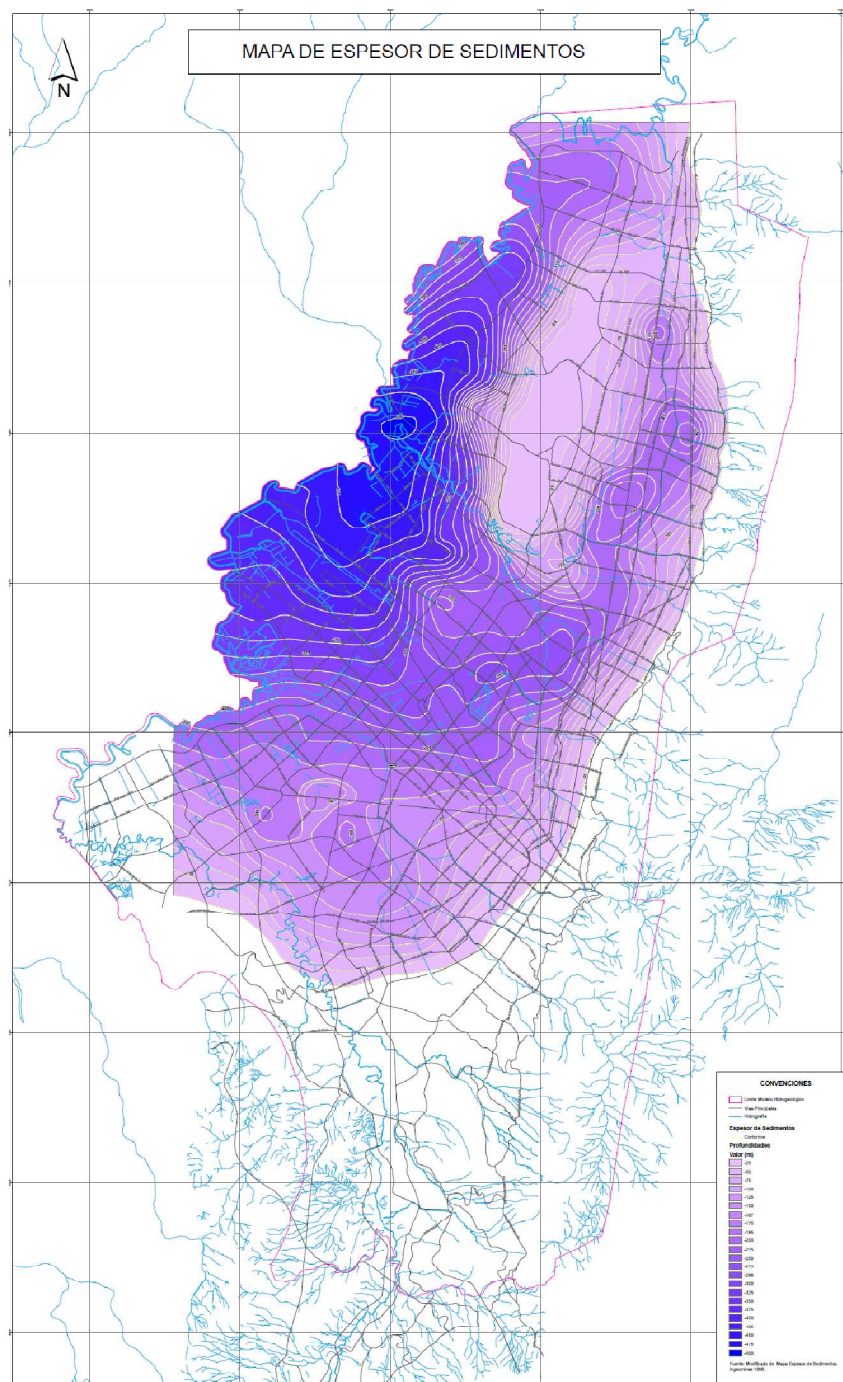
*Fuente: INGEOMINAS, Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá, 1997.

Figura 36. Mapa de anomalía Gravimétrica Bouguer Total Residual Sabana de Bogotá Subdirección de Geología*.



*Fuente: INGEOMINAS, 2004.

Figura 37. Mapa de espesor de sedimentos*.



*Fuente: INGEOMINAS, 1996 modificado.

4.4 SÍSMICA

ECOPETROL adelantó un programa de reflexión sísmica, J-78 JUICA, para la exploración de hidrocarburos. De este proyecto se pudo calcular el techo del cretácico (670 metros) en cercanía de la margen occidental del río Bogotá. Se cuenta con información de una línea de reflexión sísmica producto del “Estudio Geofísico e Hidrogeológico en la planta de INDEGA-PANAMCO en Santa Fe de Bogotá D.C”; la línea se ejecutó sobre una longitud de 2.631 metros en la Avenida la Esperanza, costado sur del Aeropuerto El Dorado. También se cuenta con información de las líneas de refracción sísmica efectuadas durante el proyecto de Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá. De acuerdo a la interpretación de la línea del proyecto J-78 JUICA, se concluye:

- Al occidente del río Bogotá, en la zona norte, a la altura de la glorieta de Siberia, intersección de la Autopista Medellín y la vía Cota-Funza, existe un sistema de fallamiento de tipo inverso importante, que posiblemente afecta a la Formación Tilatá.
- En general se aprecian fallas transversales a la dirección de la línea sísmica, que indican hundimientos de todas las formaciones, lo cual evidencia que a través del tiempo la zona ha sido expuesta a una tectónica de bloques controlados por fallamientos fuertes.

HIDROGEOCOL presenta, como resultado del Estudio de Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá, mapas que contienen líneas de contorno que definen la variación del espesor del depósito cuaternario y la profundidad del techo de las formaciones consolidadas. Hidrogeocol concluye que el espesor del depósito cuaternario es bastante irregular, debido a la sedimentación de materiales sobre el relieve preexistente. Estos mapas no se encontraron disponibles para el análisis en este documento.

- En la zona norte el mayor espesor del relleno cuaternario se presenta entre las zonas de Engativá y Tibabuyes, en las inmediaciones al cauce del río Bogotá y sus principales afluentes, en donde el relleno alcanza espesores entre 200 y 475 metros.

- En la zona norte se presenta otro sector de gran espesor, el cual está definido en la parte plana entre los Cerros Orientales y El Cerro de Suba.

En el centro del área, zona de Engativá, (sector de confluencia del río Bogotá con los ríos Fucha y Juan Amarillo), las formaciones consolidadas se encuentran a una profundidad mayor a los 400 metros.¹⁰

¹⁰ A RESTREPO M, Luis E. Modelo Hidrogeológico Conceptual Acuífero Cuaternario en el Área de Bogotá.

5. EVOLUCIÓN DE NIVELES Y DIRECCIÓN DE FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO CUATERNARIO

Para evaluar los niveles del agua subterránea en el acuífero cuaternario, se tuvo en cuenta los niveles registrados durante el periodo comprendido entre 1999 a 2010, con los cuales se realizaron de mapas de isopiezas mes a mes, año a año, época de alta y baja precipitación, promedios de alta y baja precipitación y promedio del comportamiento total multianual desde 1999 a 2010 (Figuras 38, 39 y Figura 40. Mapa de isopiezas total 1999 - 2010).

A continuación se presenta la evolución de los comportamientos y fluctuaciones de los niveles piezométricos en la jurisdicción de la SDA desde 1999 hasta el año 2010:

En el sector de Puente Aranda desde 1999 hasta el año 2000 no se presentaba ninguna evolución favorable o desfavorable en el comportamiento de los niveles piezométricos; del año 2001 al 2010 se han venido reflejando descensos del orden de 5 a 10 metros aproximadamente esto debido a que las captaciones han aumentado; las fluctuaciones en las zona más próximas al complejo industrial de Bogotá se han visto afectadas como sucede en el sector de Kennedy que desde 1999 a 2010 se han presentado descensos del orden de 20 metros y en el sector de Fontibón descensos del orden de 12 metros con algunos ascensos en los últimos años. El sector norte de Bogotá no presenta mayores fluctuaciones y se evidencian comportamientos estables, cabe notar que entre la calle 127 y la calle 180 se encuentran pozos artesianos con alturas del orden de 2 metros que captan el acuífero cautivo del Cretácico.

En el sector sur de la localidad de Ciudad Bolívar se evidencian descensos de pocos metros, pero al occidente de los cerros del sur, en el pozo de PROTABACO se presenta un incremento del nivel piezométrico debido que la demanda ha disminuido potencialmente.

En la localidad de Bosa y de Suba se presentan pequeñas fluctuaciones con algunos ascensos y descensos menores.

La dirección del flujo del recurso hídrico subterráneo obedece principalmente a condiciones antrópicas; el agua subterránea tiene una dirección general de Este a Oeste, es decir, desde los cerros orientales hacia el río Bogotá.

Al norte de la ciudad entre las calles 100 y 180, el agua subterránea se desplaza de los cerros orientales a los cerros de Suba y de los cerros de Suba al río Bogotá; al norte de los cerros de Suba el agua toma una dirección sur-norte hacia los humedales de Torca y Guaymaral y hacia el río Bogotá en la desembocadura del río Frio.

De la calle 100 a la calle 15 sur el agua subterránea fluye de los cerros orientales al complejo industrial de Puente Aranda, debido a la gran demanda del recurso hídrico subterráneo.

Parte del agua subterránea de Puente Aranda, en inmediaciones del Barrio Galán, fluye de Este a Oeste hacia las industrias del Sur de Bogotá en la Localidad de Bosa.

Al noroccidente y occidente de la ciudad en las localidades de Engativa y Fontibón, el agua subterránea tiene una dirección de Este a Suroeste, debido a la influencia de la gran demanda de las industrias presentes en el área de Fontibón. También se observa una dirección natural con tendencia hacia el humedal de Capellania.

Al sur de Bogotá en el sector de Tunjuelo el agua fluye hacia el sinclinal de Usme principalmente con una cierta influencia de condiciones antrópicas en el sector del barrio Olarte y Bosa centro (Industrias).

Figura 38. Mapa de isopiezas temporada de baja precipitación 1999 – 2010

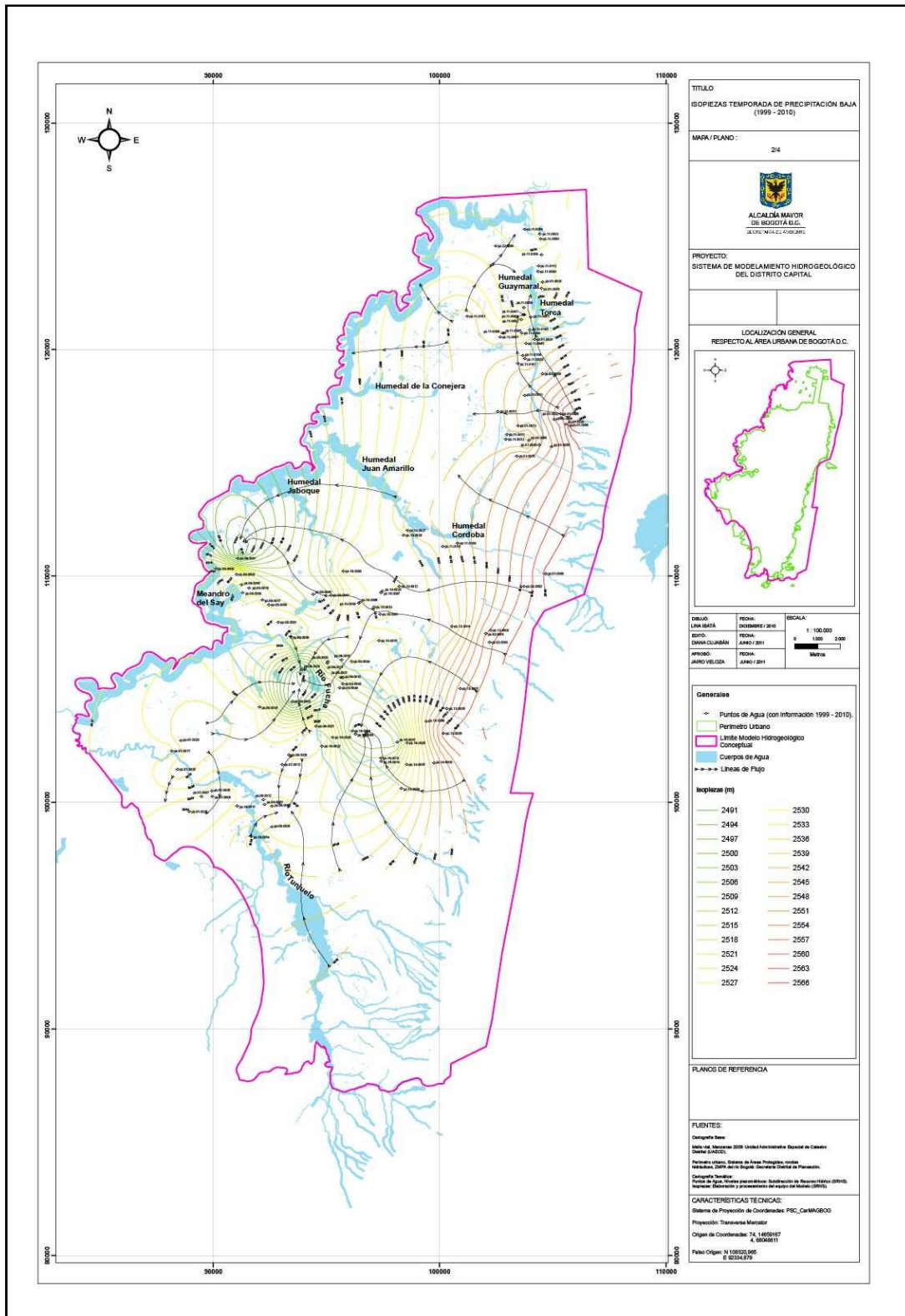


Figura 39. Mapa de isopiezas temporada de alta precipitación 1999 – 2010

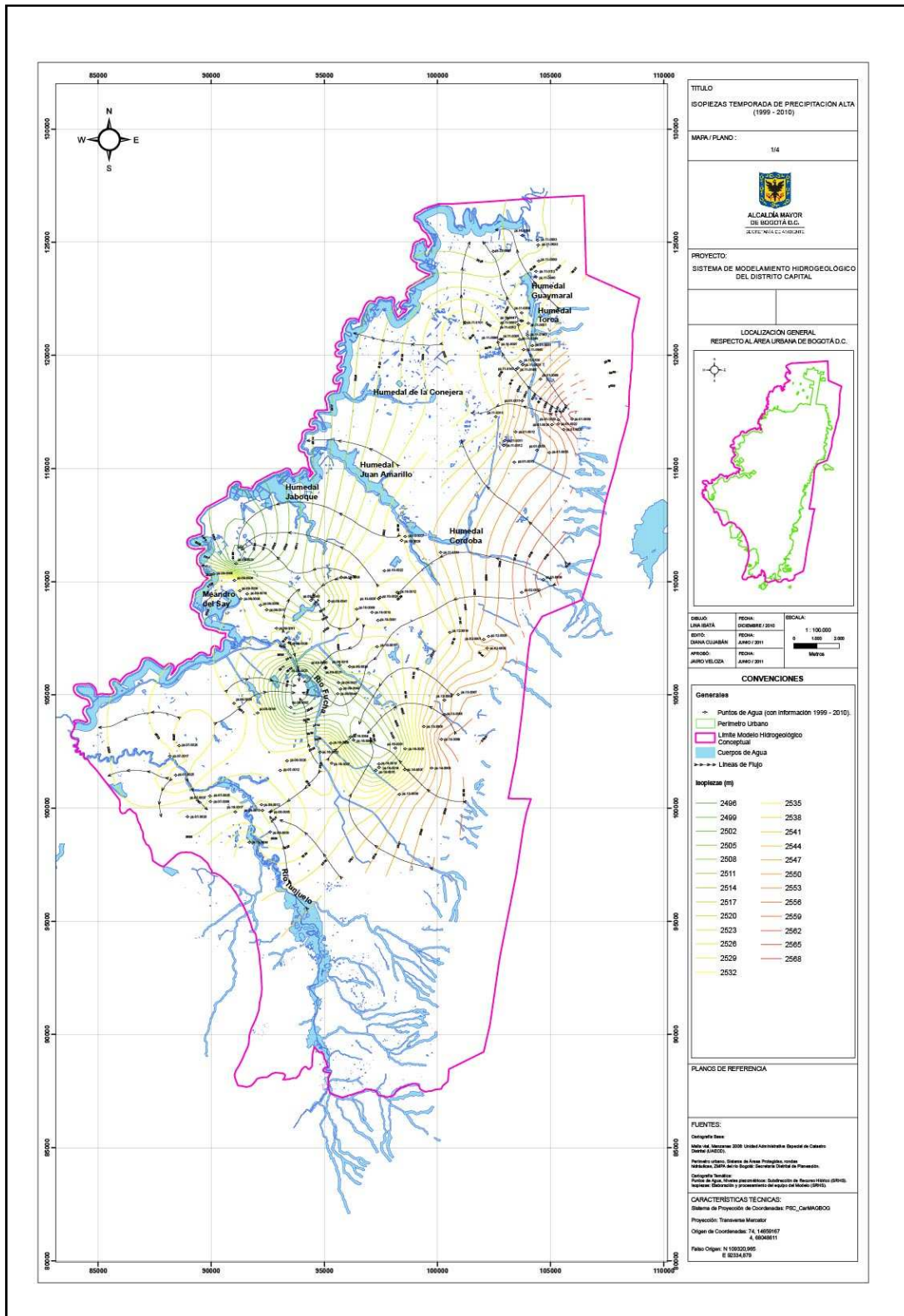
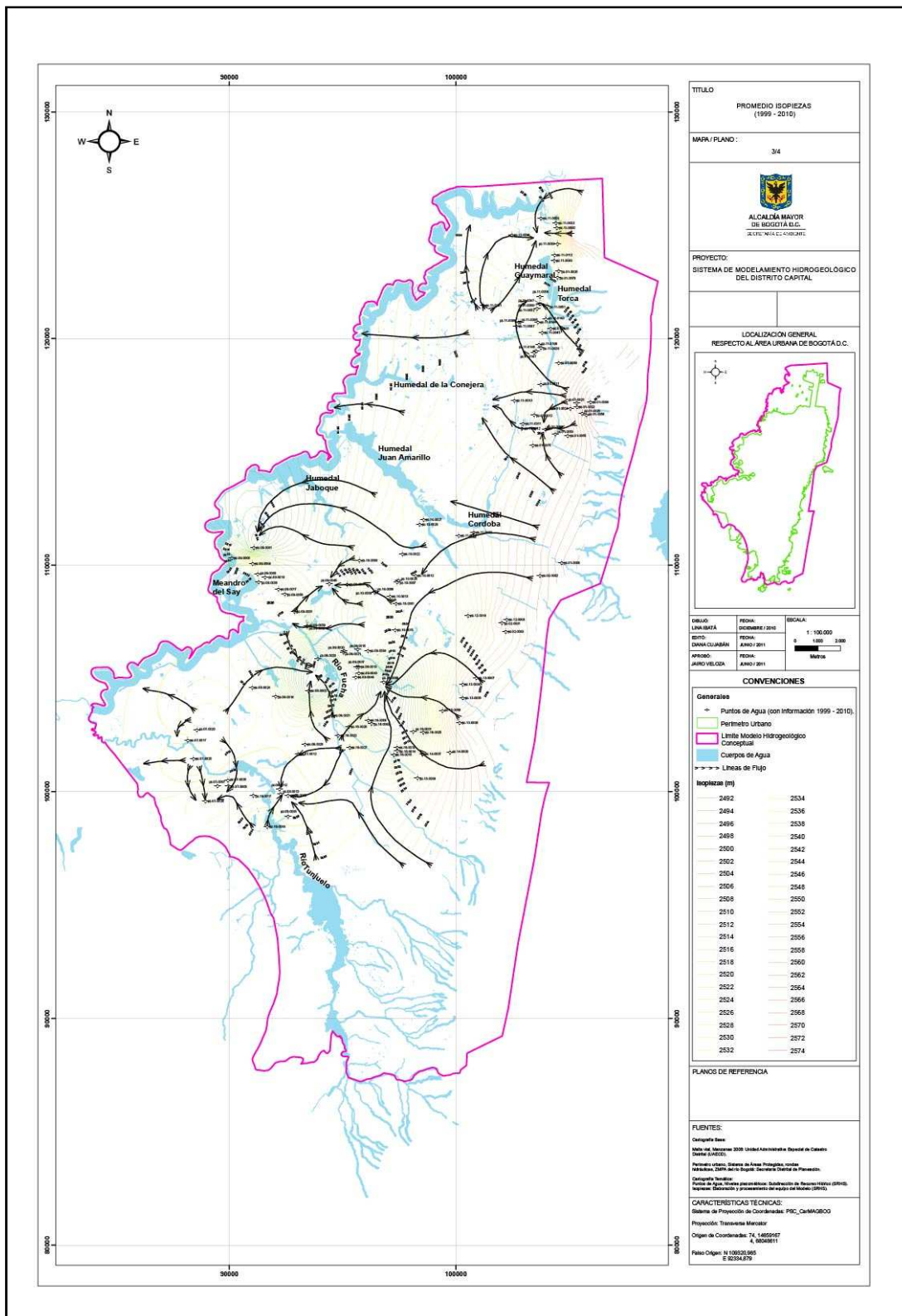
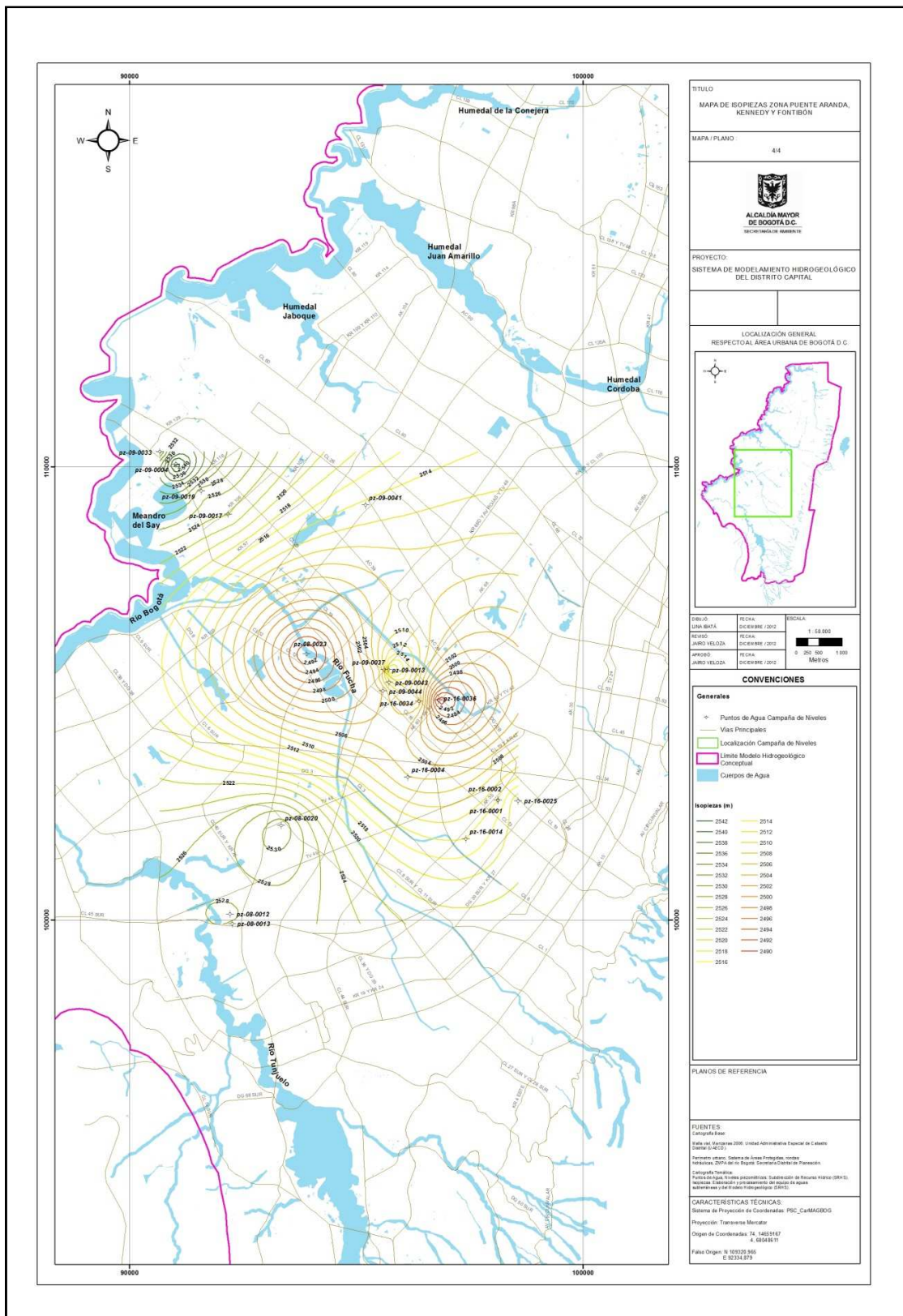


Figura 40. Mapa de isopiezas total 1999 – 2010



Se programo una campaña de niveles estáticos en el mes de noviembre y diciembre de 2012, en los sectores de Puente Aranda, Kennedy y Fontibón, para verificar las condiciones de movimiento, dirección y descensos de niveles del agua subterránea del acuífero de la formación Sabana, para lo cual se ha desarrollado el mapa de isopiezas del área en mención (Figura 41); se observa una dirección de flujo preferencial hacia el sector donde se ubican los pozos con mayor extracción de agua subterránea en la zona industrial de la ciudad, de tal manera que en esta área no es recomendable otorgar nuevas concesiones de aguas subterráneas.

Figura 41. Mapa de isopiezas zonas de Puente Aranda, Kennedy y Fontibón



6. HIDROGEOQUÍMICA

Se seleccionaron 72 puntos entre pozos, aljibes, humedales, quebradas y ríos del Distrito a los cuales se les realizó análisis físico-químico e isotópico. Esta selección de puntos de agua para hidroquímica se realizó teniendo en cuenta valores fuera del promedio de la zona, en cuanto a conductividad eléctrica, pH, así como también el uso del agua y la distribución real, con el fin de tener una representatividad de los tipos de agua en diferentes zonas.

La campaña para la toma de muestras de agua para hidroquímica, se realizó en el mes de noviembre de 2010, muestras que fueron tomadas para ser analizadas por laboratorios certificados nacional e internacionalmente, después de tratamientos preliminares en campo de acuerdo con el protocolo llevado a cabo por la SDA.

6.1 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

La interpretación geoquímica del agua subterránea y superficial se realizó mediante los diagramas de Piper y a continuación se presenta la clasificación de los puntos muestreados:

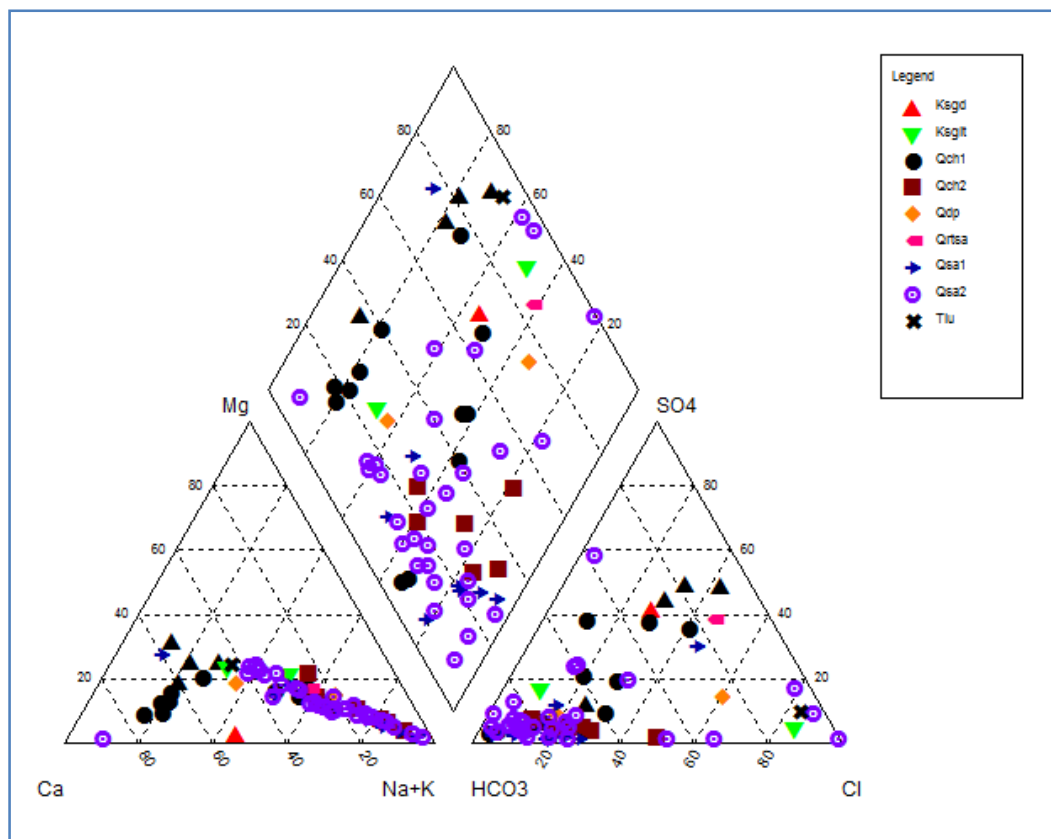
Tabla 24. Clasificación Geoquímica de los puntos de agua

Station ID	Water Type	Geology
Quebrada Aguas Calientes	Ca-Mg-HCO ₃ -Cl	
Río Arzobispo	Ca-Mg-SO ₄ -Cl	
Quebrada El Delirio	Ca-SO ₄ -Cl-HCO ₃	
Quebrada La Vieja	Ca-SO ₄ -Cl-HCO ₃	
Páramo de Guacheneque - Río Bogotá	SO ₄ -HCO ₃ -Cl	
pz-01-0100 La Aguadora - EAAB	Ca-HCO ₃ -SO ₄	Ksglt
Humedal La Regadera	Ca-Cl-SO ₄ -HCO ₃	Qch1
Humedal Santa María del Lago	Ca-HCO ₃	Qch1
Humedal Córdoba	Ca-HCO ₃	Qch1
Humedal Salitre - Juan Amarillo	Ca-HCO ₃	Qch1

Station ID	Water Type	Geology
Humedal Jáboque	Ca-HCO3-Cl	Qch1
Humedal Guaymaral	Ca-HCO3-SO4-Cl	Qch1
Humedal Conejera	Ca-K-SO4-HCO3-Cl	Qch1
aj-07-0034 Sudeim	HCO3-SO4	Qch1
Humedal Tibanica	Na-Ca-HCO3-Cl	Qch1
pz-10-0041 Finca La Junca	Na-Ca-HCO3-Cl	Qch1
pz-07-0017 Clara Fey No. 2	Na-HCO3	Qch1
pz-07-0020 Consultécnica	Na-HCO3	Qch1
pz-06-0005 Acegrasas No. 2	Na-HCO3	Qch2
pz-06-0008 General Motors	Na-HCO3-Cl	Qch2
pz-19-0021 Frigorífico Guadalupe	Na-HCO3-Cl	Qch2
pz-06-0003 Natesa	Na-HCO3-Cl	Qch2
pz-06-0009 Parque El Tunal	Na-HCO3-Cl	Qch2
pz-08-0012 Gaseosas Colombiana No. 2	Na-HCO3-Cl	Qch2
aj-11-0197 Sapito Pito	Ca-HCO3-Cl	Qdp
pz-11-0008 Mobil Suba Inversiones Viacar	Na-Cl-HCO3-SO4	Qdp
pz-14-0003 Centro Car 19	Na-Ca-HCO3-Cl	Qrtsa
aj-17-0002 La Mansión del Duende	Na-Cl-SO4	Qrtsa
aj-10-0020 Servicentro El Radar	Ca-Cl-SO4-HCO3	Qsa1
pz-09-0040 Indega Panamco Planta Norte	HCO3	Qsa1
aj-11-0201 Pequeñitas y Pequeñitos de Jesús	HCO3-Cl	Qsa1
pz-10-0022 Lavadero Beto	Na-HCO3	Qsa1
pz-09-0041 Protela S.A.	Na-HCO3-Cl	Qsa1
pz-09-0007 HB Estructuras Metálicas	Na-HCO3-Cl	Qsa1
pz-08-0023 La Fayette No. 1	Na-HCO3-Cl	Qsa1
pz-09-0031 Imal	Na-HCO3-Cl	Qsa1
pz-07-0005 Carboquímica No. 2	Ca-HCO3	Qsa2
pz-07-0033 Carboquímica No. 4	Ca-HCO3	Qsa2
pz-01-0009 Autocentro Santana	Ca-HCO3-Cl-SO4	Qsa2
pz-01-0101 Los Tres	Ca-HCO3-SO4-Cl	Qsa2
pz-15-0001 Lava Cars Ciudad Jardín	Ca-Mg-HCO3	Qsa2
aj-01-0095 Escuela Unión Colombia	Ca-Na-Cl-NO3	Qsa2
pz-19-0015 Pavco	Ca-Na-HCO3	Qsa2
pz-11-0011 Carmel Club No. 2	Ca-Na-HCO3	Qsa2
aj-19-0025 Mary Osorio de Morales	Ca-Na-Mg-Cl	Qsa2
pz-01-0023 Universidad San Buenaventura	Ca-SO4-HCO3	Qsa2
pz-01-0058 Hijas de Santa María Providencia	Cl	Qsa2
pz-01-0069 Tibatí	HCO3	Qsa2
pz-01-0083 Sede Social y Deportiva No. 2 Bavaria	HCO3-SO4-Cl	Qsa2
pz-11-0047 Cafam No. 1	K-HCO3-Cl	Qsa2

Station ID	Water Type	Geology
pz-16-0014 Grasco No. 2 Bodega 14	Na-Ca-HCO ₃ -Cl	Qsa2
pz-19-0024 Petco	Na-Ca-HCO ₃ -Cl	Qsa2
pz-11-0101 Colegio El Rosario	Na-Cl-HCO ₃	Qsa2
pz-11-0023 Meals	Na-Cl-HCO ₃	Qsa2
pz-16-0002 Gaseosas Colombiana No. 4	Na-HCO ₃	Qsa2
pz-11-0096 Colegio La Enseñanza No. 2	Na-HCO ₃	Qsa2
pz-01-0010 Unicentro	Na-HCO ₃	Qsa2
pz-13-0015 Ingeominas No. 2	Na-HCO ₃	Qsa2
pz-01-0004 Country No. 2	Na-HCO ₃	Qsa2
pz-07-0007 Jardines del Apogeo No. 1	Na-HCO ₃	Qsa2
pz-13-0010 Parque Simón Bolívar	Na-HCO ₃	Qsa2
pz-13-0010 Parque Simón Bolívar	Na-HCO ₃	Qsa2
pz-08-0002 Bavaria No. 2	Na-HCO ₃	Qsa2
pz-13-0007 Parqueadero Punto de Plata	Na-HCO ₃ -Cl	Qsa2
pz-19-0017 Hilat No. 2	Na-HCO ₃ -Cl	Qsa2
pz-16-0034 Asitex Ltda No. 2	Na-HCO ₃ -Cl	Qsa2
pz-01-0075 Colegio Teresiano	Na-HCO ₃ -Cl	Qsa2
pz-09-0044 Manufacturas Eliot No. 2	Na-HCO ₃ -Cl	Qsa2
pz-05-0003 Ladrillera Helios S.A.	Ca-Cl	Tiu
pz-11-0153 Suba - EAAB	Ca-Mg-HCO ₃	TKgm
pz-11-0136 Sociedad Proma Ltda	Na-HCO ₃ -Cl	TKgm

Figura 42. Diagrama de Piper por unidad geológica



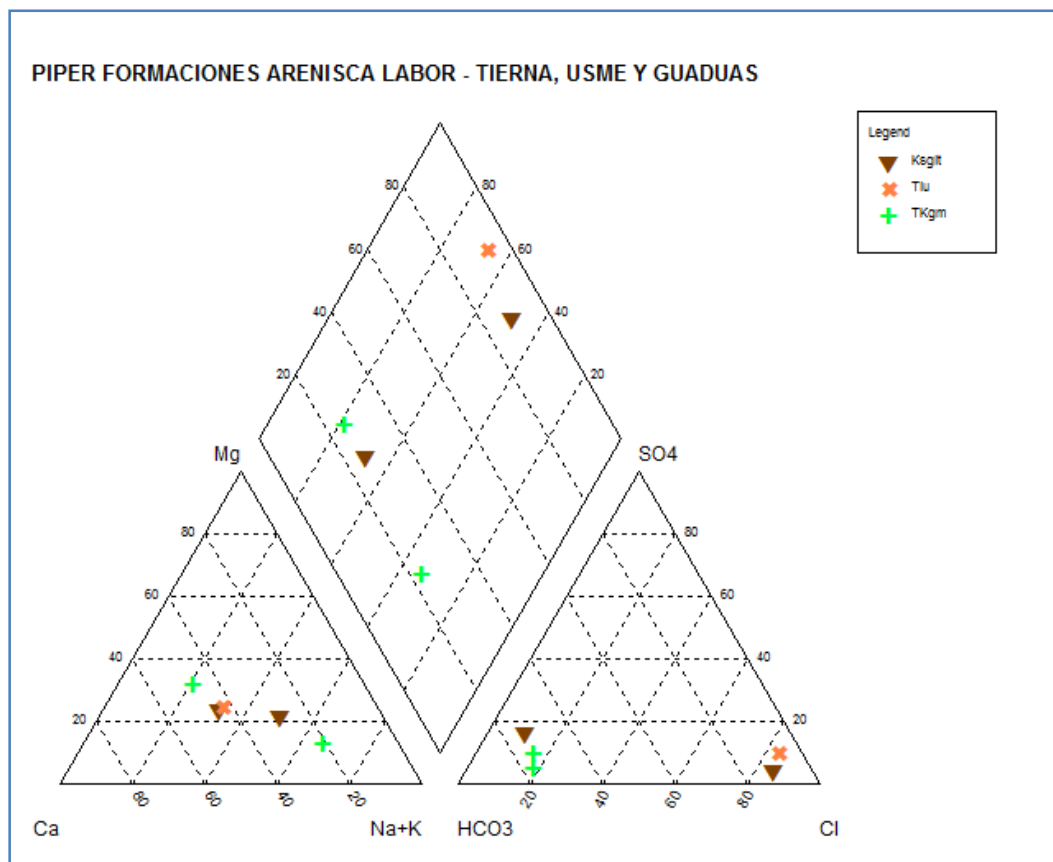
6.1.1. Clasificación Geoquímica de las formaciones Arenisca Dura (Ksgd), Arenisca Labor – Tierna, Usme y Guaduas.

El agua subterránea de la formación Arenisca Labor – Tierna se clasifica como clorurada-cálcica-sódica y bicarbonatada sódica, debido a la disolución de minerales silicatados como cuarzo y feldespatos, así mismo presenta un flujo de carácter regional.

El agua subterránea proveniente de la formación Usme se clasifica como clorurada-cálcica-sódica, debido a la presencia de material arcilloso y ataque de silicatos como feldespatos y cuarzo principalmente.

El agua subterránea de la formación Guaduas se clasifica como bicarbonatada cálcica debido a la disolución de minerales silicatados y posiblemente indica flujos intermedios a locales.

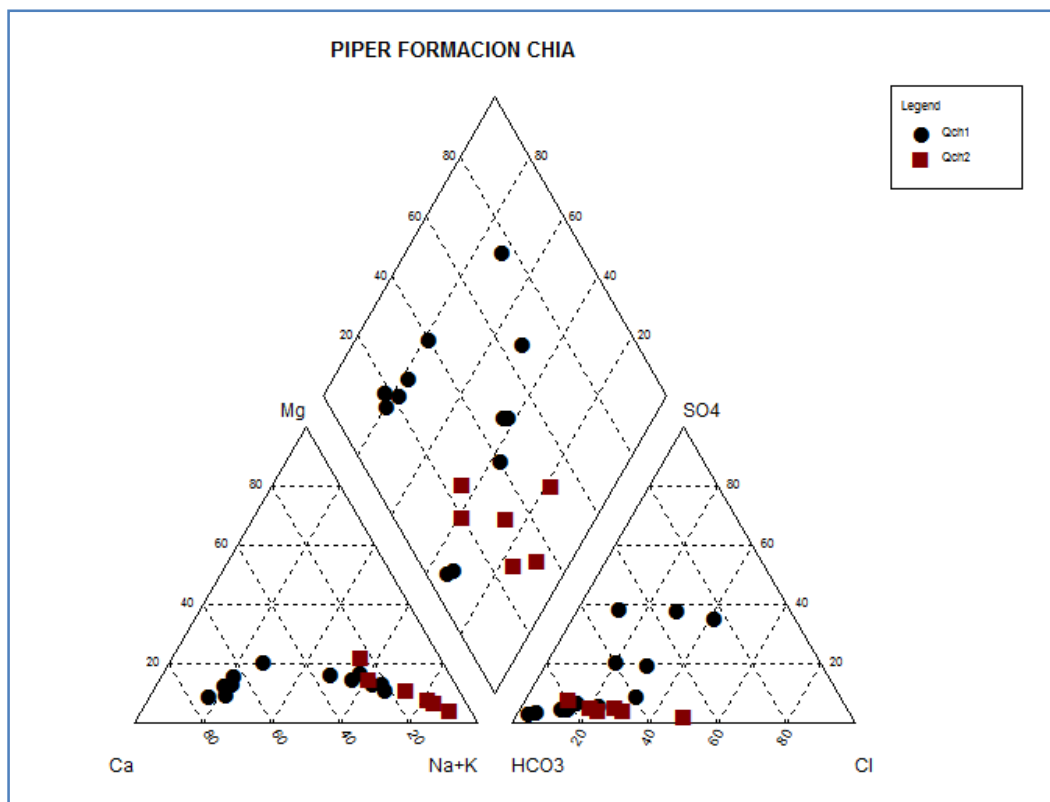
Figura 43. Diagrama de Piper Formaciones Arenisca Labor–Tierna, Usme y Guaduas.



6.1.2. Clasificación Geoquímica Formacion Chia (Qch1, Qch2)

El agua subterránea de la formación Chía se clasifica principalmente como bicarbonatada sódica y cálcica. La presencia de los iones HCO_3 y Ca se puede atribuir a la disolución irreversible de los minerales silicatados. El sodio proviene de la disolución del agua con los materiales esencialmente arcillosos; posiblemente presenta un flujo de carácter regional y algo local.

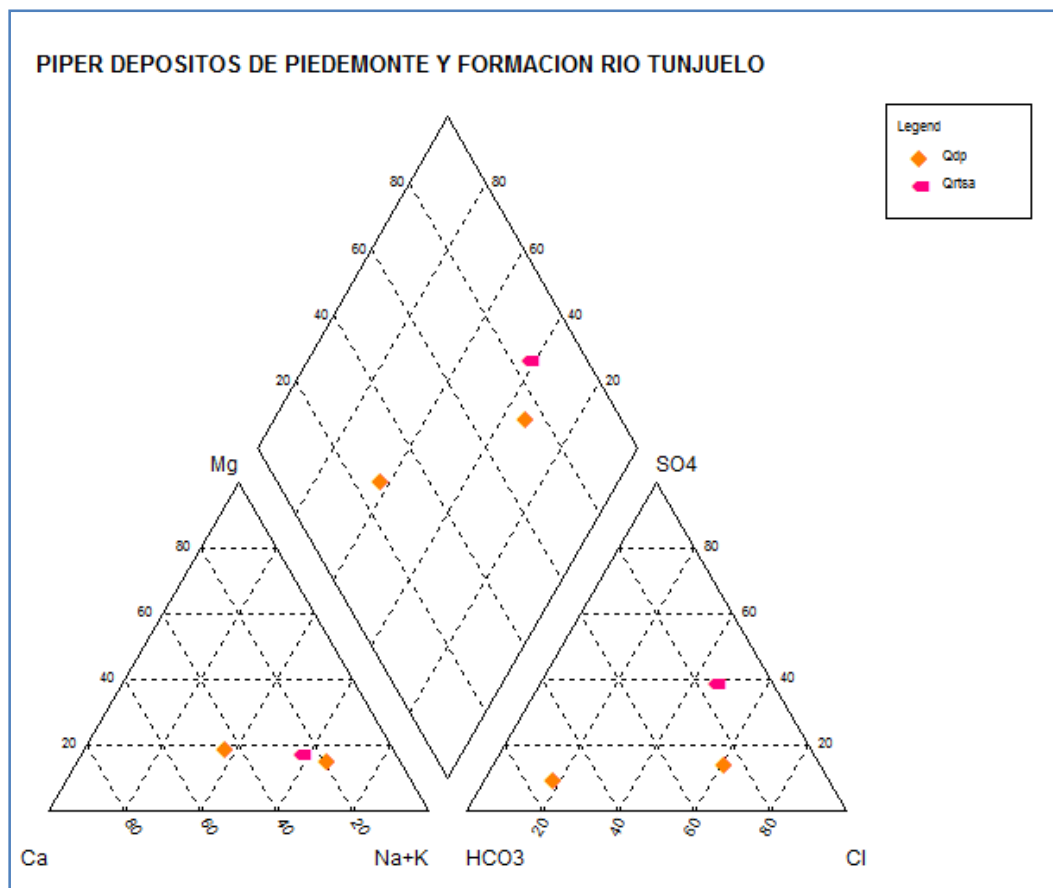
Figura 44. Diagrama de Piper de la formación Chía



6.1.3. Clasificación Geoquímica Depósitos de piedemonte (Qdp) y Formación Río Tunjuelo (Qrtsa)

El agua subterránea de los depósitos de piedemonte y la formación Río Tunjuelo se clasifica como cloruradas cálcicas. Con un flujo evidentemente local.

Figura 45. Diagrama de Piper Depósitos de piedemonte y Formación Río Tunjuelo

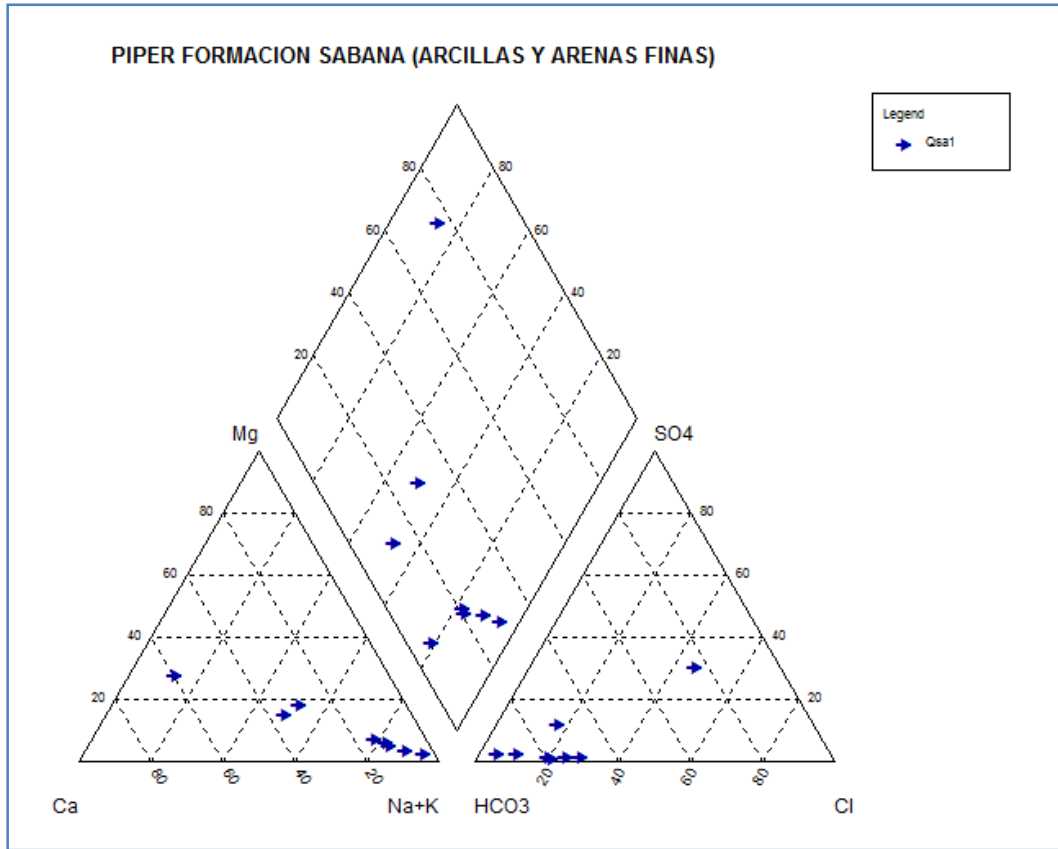


6.1.4. Clasificación Geoquímica Formación Sabana Arcillas y arenas finas (Qsa1)

En la formación Sabana arcillas y arenas finas el agua se clasifica como bicarbonatada sódica.

La presencia de sodio se debe principalmente a procesos de cambio de bases de las arcillas. Flujo de carácter regional

Figura 46. Diagrama de Piper Formación Sabana arcillas y arenas finas

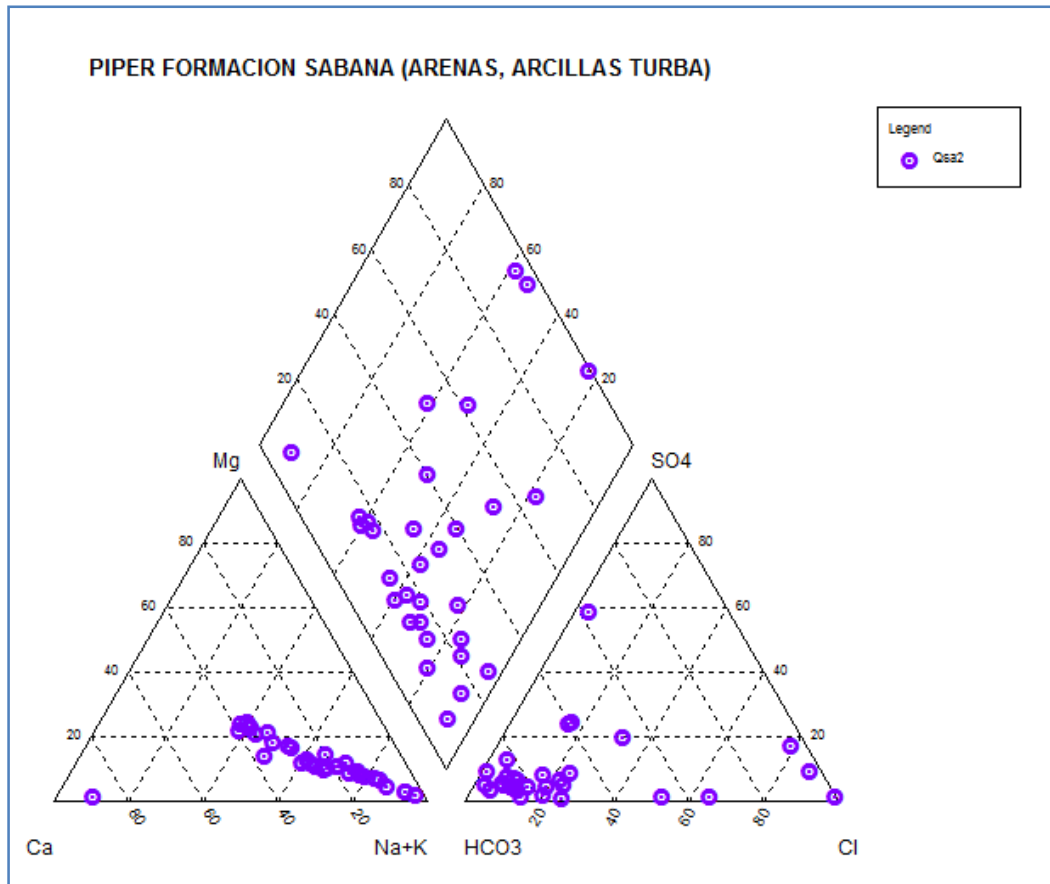


6.1.5. Clasificación Geoquímica Formación Sabana arenas, arcillas y turba (Qsa2)

La formación Sabana arenas, arcillas y turba se clasifica como aguas bicarbonatadas sódicas.

La presencia de sodio se debe principalmente a procesos de cambio de bases de las arcillas. Se presenta concentraciones importantes de NO_3 y sulfatos debido a la materia orgánica y actividades industriales y urbanas del Distrito. Flujo de carácter Regional posiblemente.

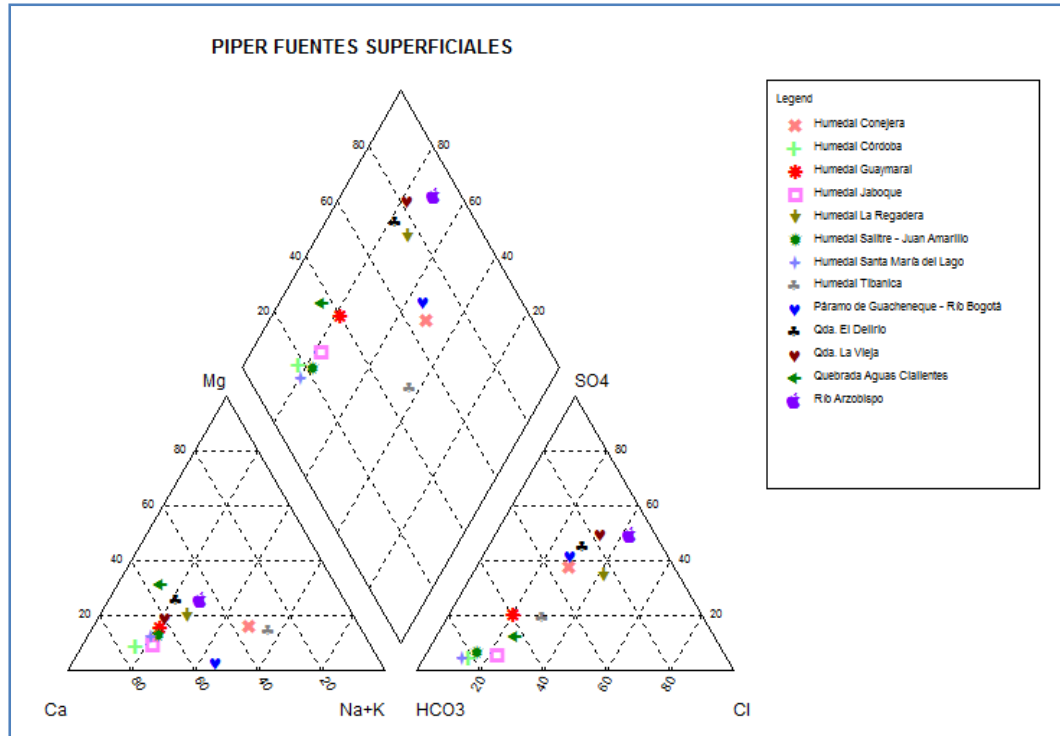
Figura 47. Diagrama de Piper Formación Sabana arenas, arcillas y turba



6.1.6. Clasificación Geoquímica de fuentes superficiales

Las fuentes superficiales se clasifican como aguas bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas, debido al carácter de tipo local, la presencia de sulfatos se debe a las actividades urbanas e industriales.

Figura 48. Diagrama de Piper fuentes superficiales

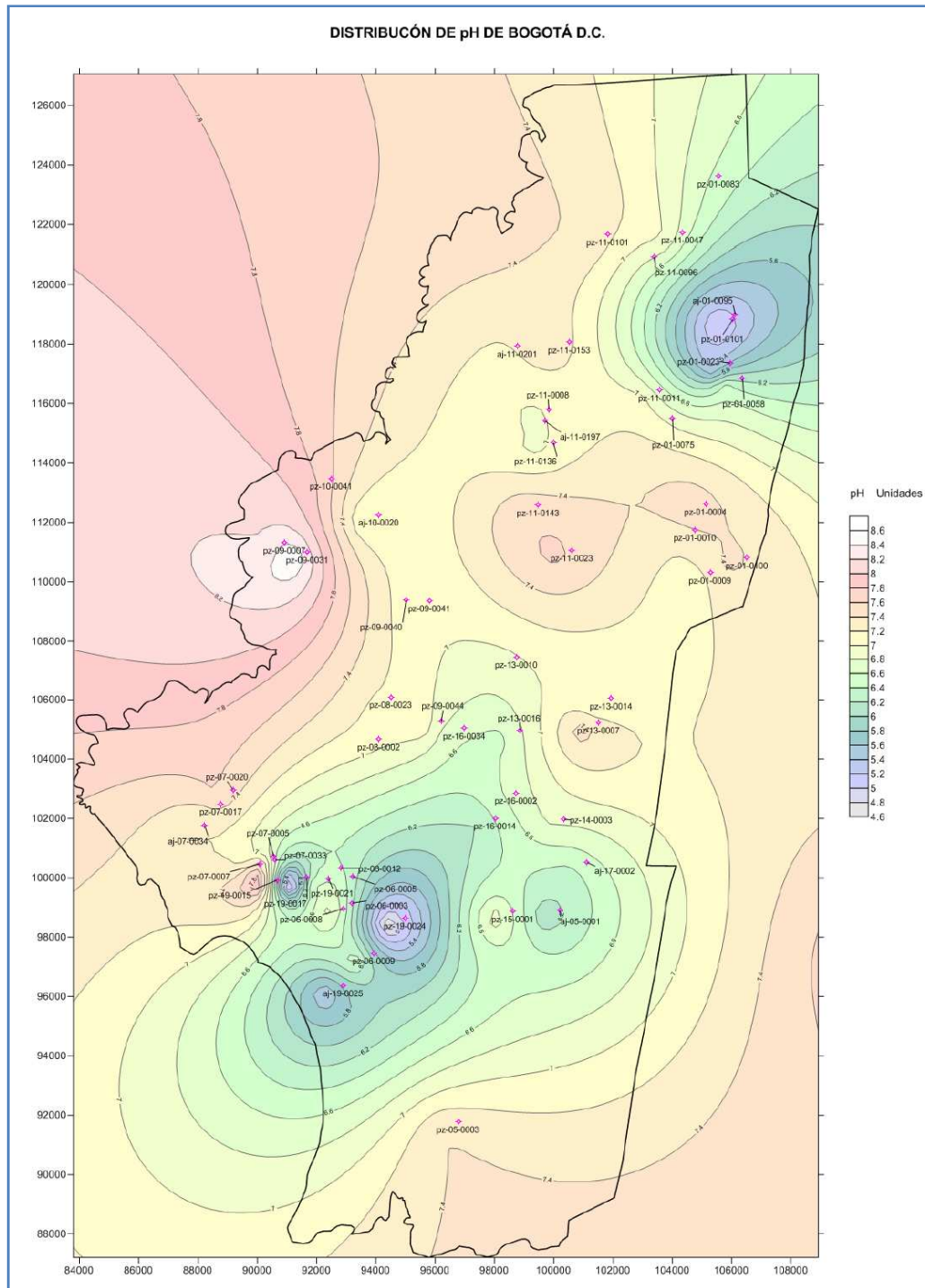


6.2 EVALUACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

6.2.1. pH

El agua subterránea en el Distrito Capital tiene valores de pH entre 5.6 a 8.8, los valores más bajos se presentan en los sectores de Puente Aranda y Bosa al centro y sur de Bogotá y en el área de Usaquén y Torca – Guaymaral al norte de Bogotá, coincidiendo con en las zonas de descarga (Ver Figura 49). En el sector centro y sur se presenta una descarga (pozos profundos) desde el punto de vista antrópico debido a la demanda de agua subterránea para uso industrial principalmente; al norte de Bogotá se presenta una descarga natural del acuífero Cretácico con presencia de pozos artesianos.

Figura 49. Distribución Espacial de pH



6.2.2. Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica en el Distrito Capital presenta valores de 100 a 1900 $\mu\text{s}/\text{cm}$, la cual se va incrementando de Este a Oeste concordando con la dirección de flujo del agua subterránea.

La figura 50 muestra el cambio de aniones, y los relaciona con la salinidad del agua teniendo en cuenta el recorrido y tiempo de permanencia del agua en el acuífero (secuencia de Chevotarev), esto evidencia que la conductividad eléctrica en los cerros orientales de Bogotá es menor debido a que es la zona de recarga y luego tiene un movimiento hacia el occidente hasta inmediaciones del río Bogotá donde se presentan los mayores valores, mostrando claramente el recorrido del agua subterránea, este incremento de iones se debe al paso del agua subterránea a través de las rocas del cretácico y luego fluyendo por los depósitos de la formación Sabana y Chía principalmente.

Figura 50. Secuencia de Chevotarev

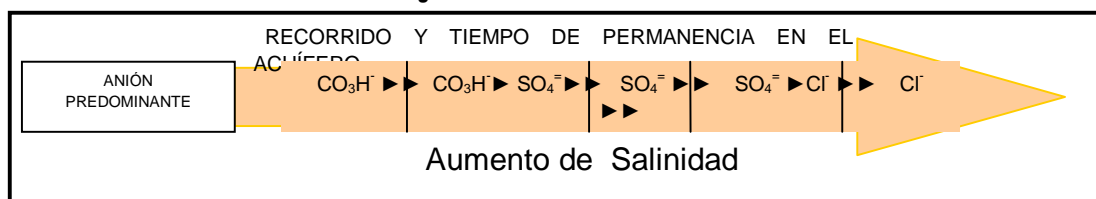
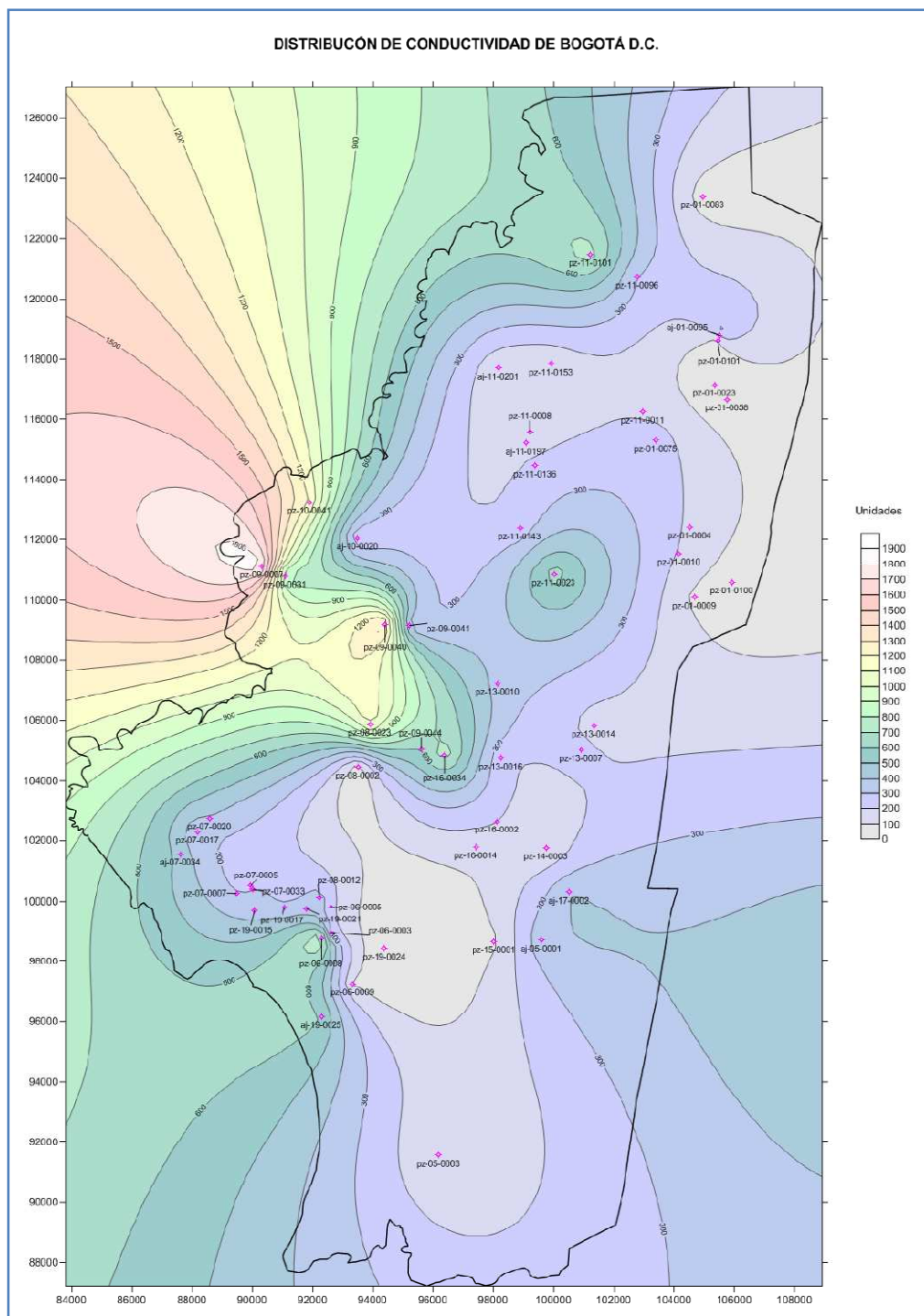


Figura 51. Distribución Espacial de la Conductividad Eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$)



6.2.3. Temperatura

La temperatura de las aguas subterráneas aumenta 33 °C por cada Km de profundidad. En acuíferos con porosidad primaria (aguas de capa), la temperatura varía con la extensión lateral y penetración de los estratos en el subsuelo.

Al distribuir de forma espacial la temperatura (Figura 52), se aprecia que los valores más altos se presentan en las zonas de gran extracción y demanda de agua subterránea (zonas industriales), debido que en estas áreas se encuentran ubicados los pozos de gran profundidad (200 – 500 m).

Figura 52. Distribución Espacial de Temperatura

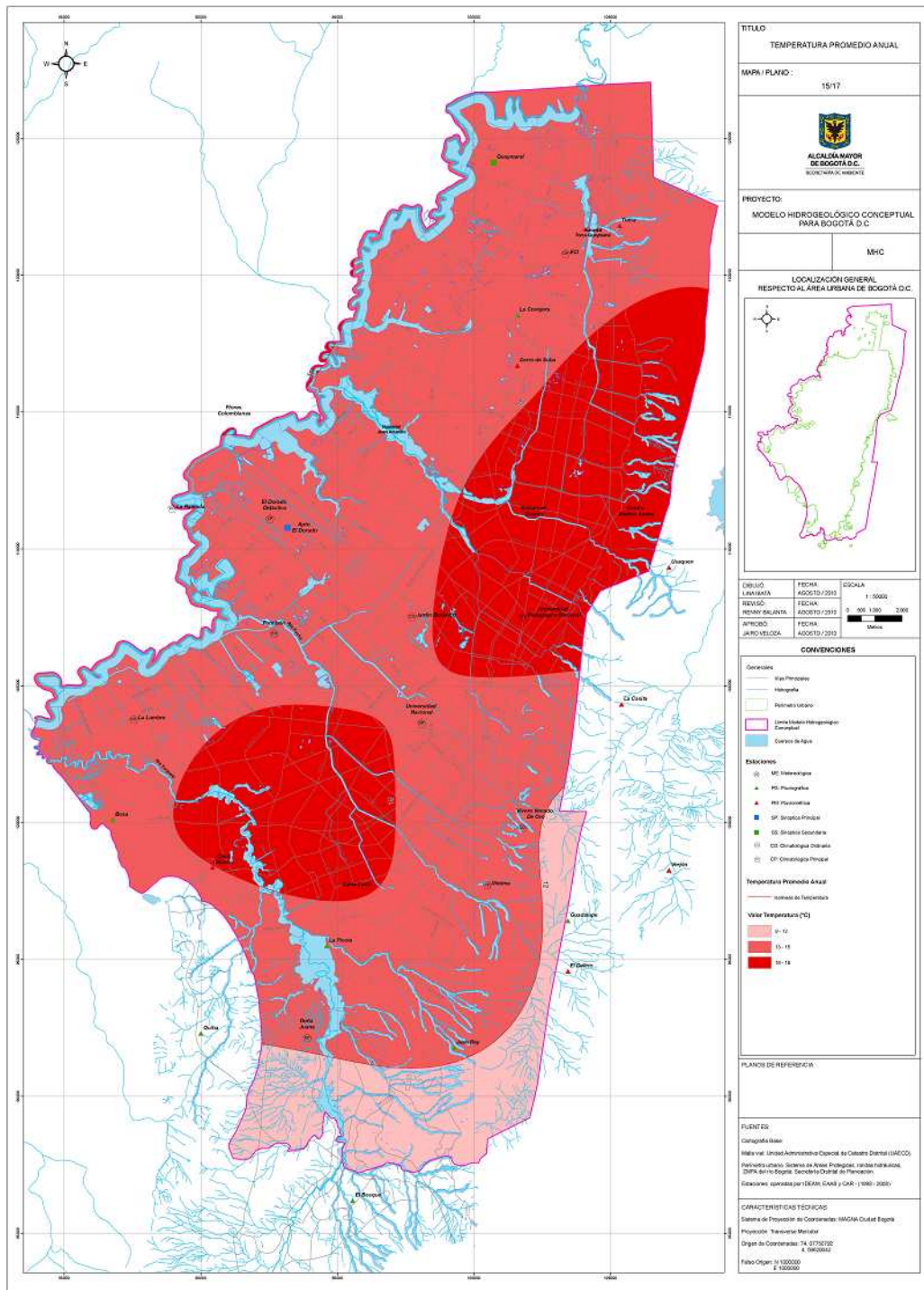


Figura 53. Distribución Espacial del Sodio

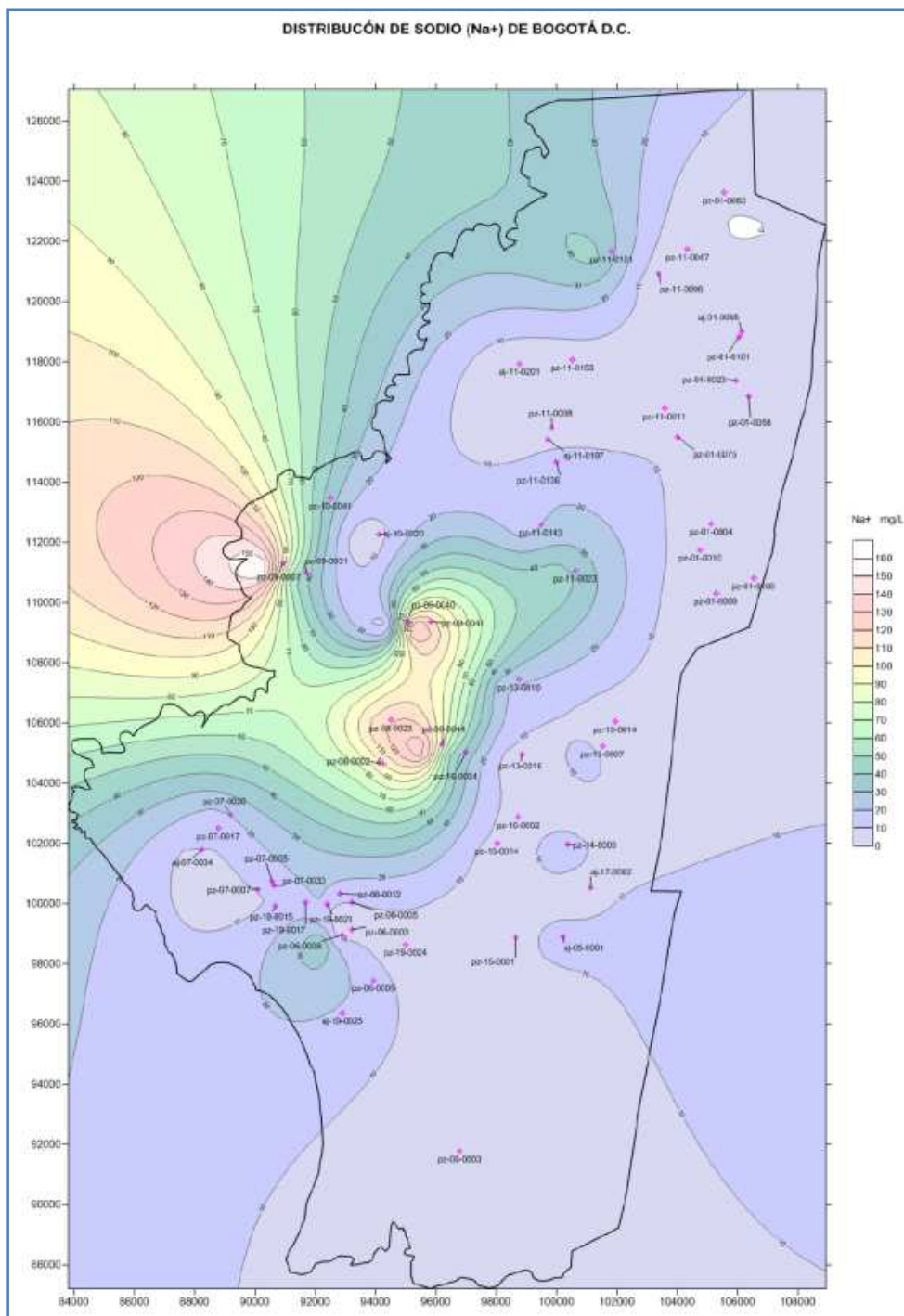
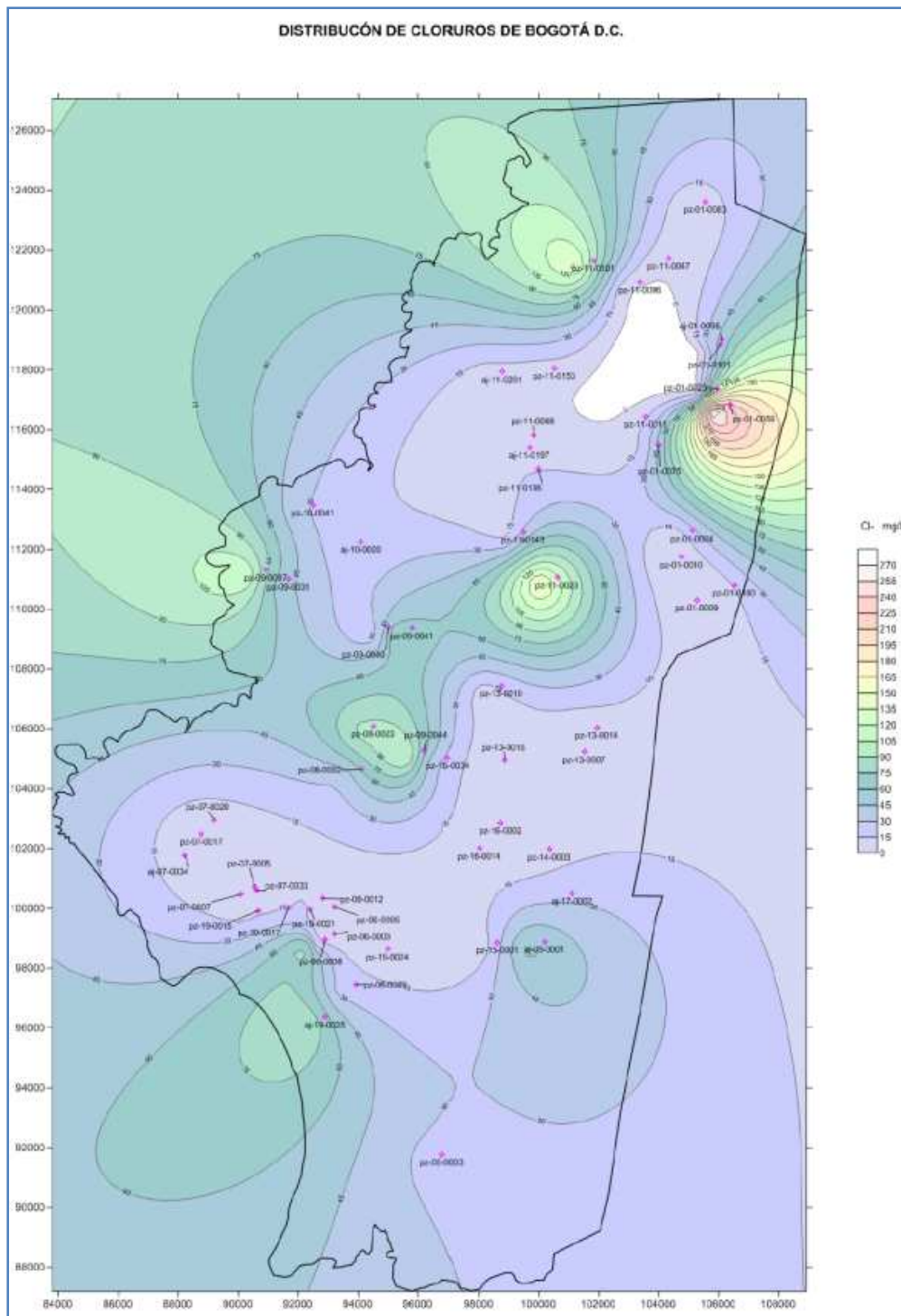


Figura 54. Distribución Espacial de Cloruros

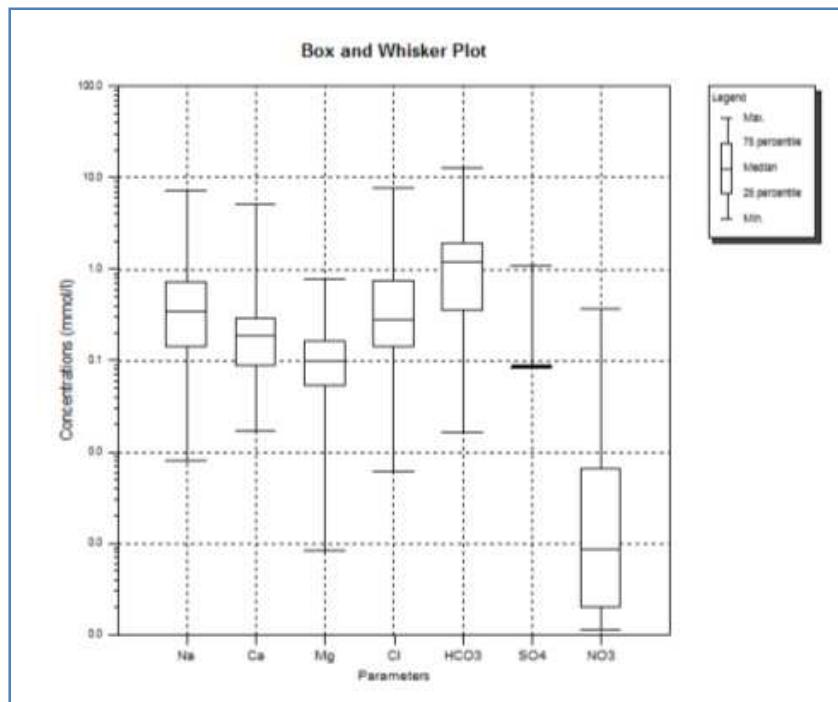


En las figuras 53 y 54 se presenta la distribución espacial del sodio y de cloruros respectivamente, donde se puede observar que las mayores concentraciones de estos iones se encuentran en los sectores de gran extracción de agua subterránea, siendo concordante con el comportamiento del pH, la conductividad eléctrica y la temperatura; esta situación es lógica y deja ver que el agua subterránea tiene un tiempo de permanencia considerable, el cual presenta un flujo a nivel regional proveniente de los cerros orientales de los estratos rocosos del grupo Guadalupe, ya sea por condiciones de porosidad primaria y/o por el incremento o presencia de fracturas abiertas.

En el mapa de isocloruros figura 54 se observa que en los sectores de Usaquén y Torca-Guaymaral se presenta un incremento de los cloruros, esto debido a que es una zona de descarga del acuífero confinado de la Formación Arenisca de Labor y Tierna en donde se presentan pozos artesianos.

En la figura 55 de diagrama de cajas se evidencia el comportamiento de los iones en todas las unidades geológicas evaluadas en el área de estudio, donde se puede observar que los bicarbonatos presentan mayor abundancia como es normal en todo tipo de aguas subterránea. Los cloruros y sodio sobresalen de los demás iones, lo que confirma la tendencia de un flujo principalmente regional desde los cerros orientales y del sur de Bogotá hacia el grupo Guadalupe en el occidente de la ciudad.

Figura 55. Diagrama de cajas de los iones de las unidades geológicas área del Distrito Capital



6.2.4. Isotopos

El estudio isotópico fue enfocado principalmente a la determinación de isótopos estables que se encuentran en una molécula de agua, el Deuterio (H₂ ó D) y el Oxígeno -18 (O¹⁸).

Los isótopos ambientales Hidrogeno - 2 (H₂) y el oxígeno -18 (O¹⁸), se consideran como trazadores ideales y permiten señalar los procesos que actúan sobre ellos, tal como la evaporación, condensación, solidificación, etc; con lo cual se logra identificar la procedencia de la molécula de agua. Esto está estrechamente relacionado con el fraccionamiento isotópico causado por los cambios de estado que se presentan en el ciclo hidrológico.

Se realizó la toma de muestras y análisis de isotopos estables, con el protocolo adecuado y laboratorios certificados para la toma de muestras en puntos, tanto de agua superficial como de agua subterránea, para la interpretación del origen y corroborar el movimiento del recurso hídrico subterráneo en el Distrito Capital.

La composición isotópica de una muestra de agua, se expresa en desviación por mil (δ), con relación a un estándar llamado SMOW (stándar mean ocean water); de tal manera se tiene:

$$\delta = R - R_{\text{smow}} / R_{\text{smow}}$$

Donde:

R = se refiere a la relación de isótopos D/H, O18/O16 de la muestra en estudio.

Harmon Craig en 1961 desarrolla una ecuación lineal entre 18 O y 2H para el agua lluvia a escala mundial y la denomina Línea meteórica mundial de Craig. La relación existente entre el hidrogeno 2 y el oxigeno 18 se establece mediante una ecuación, resultado de numerosas mediciones realizadas con muestras de agua lluvia o precipitación en Colombia (Rodríguez. C; 2004), la cual corresponde a una línea recta con pendiente definida denominada línea de precipitación o línea meteórica de Colombia, representada en un eje de coordenadas cartesianas (δH_2 vs δO_{18}). La ecuación se expresa:

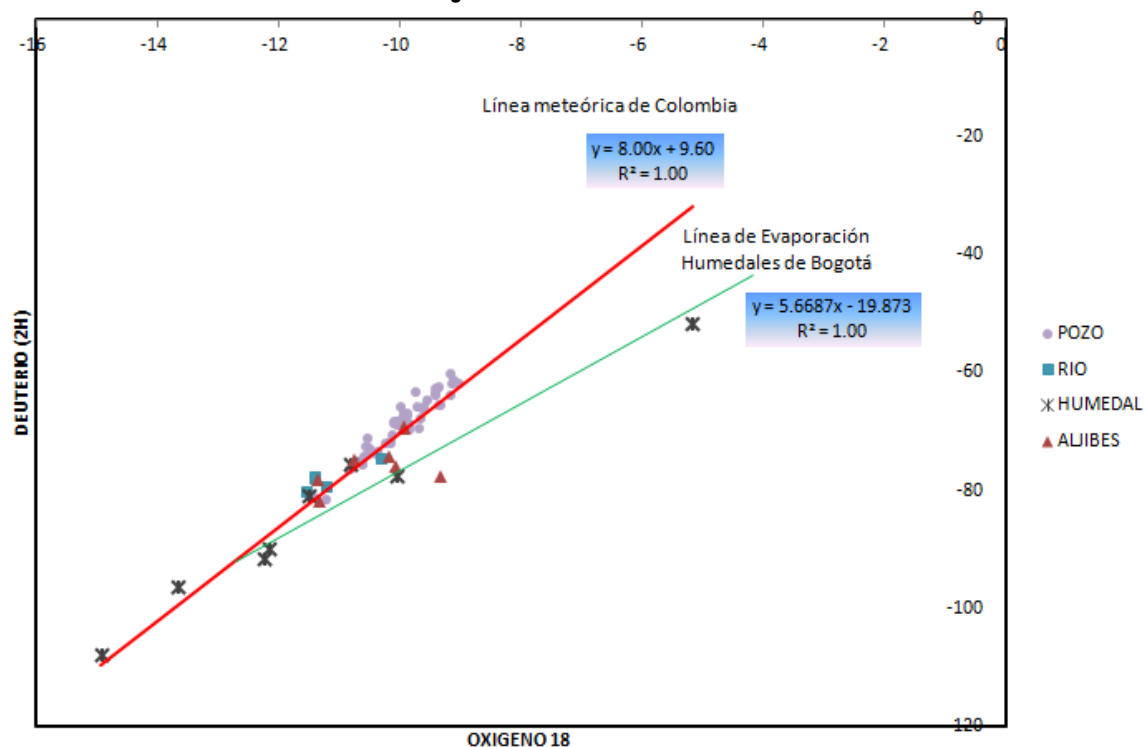
$$\delta\text{H}_2 = 8.00 \delta\text{O}_{18} + 9,6 \text{ Línea Meteórica de Colombia}$$

Para el caso de un lago, embalse, humedal o cualquier masa de agua expuesta a evaporación directa se produce un cambio en la relación δH_2 y δO_{18} , obteniendo una línea recta llamada línea de evaporación, con una pendiente que oscila entre 4 y 6; y así se obtiene una ecuación que es diferente para cada sistema que se analice.

Las muestras tomadas en los humedales del Distrito Capital conforman la línea de evaporación la cual obedece a la siguiente ecuación:

$$\delta\text{H}_2 = 5,66 \delta\text{O}_{18} + 19,87$$

Figura 56. Línea Meteórica



La muestra del humedal Juan Amarillo deja ver claramente que son aguas sometidas a evaporación durante decenas de años, lo cual sirvió para elaborar la línea de evaporación de los humedales de Bogotá (presenta la mayor evaporación según el análisis de isótopos estables, lo que indica que no se presenta ninguna conexión agua superficial – agua subterránea)

El humedal Santa María del Lago presenta menor evaporación y una posible interacción con agua subterránea de flujo local.

El humedal Tibanica y la represa la Regadera son esencialmente alimentados en gran proporción por precipitación local y fuentes superficiales, no evidencian conexiones hidráulicas con el agua subterránea.

Los humedales de Guymaral y Torca presentan una interconexión agua superficial – agua lluvia, alimentados principalmente de agua subterránea con un flujo intermedio a regional.

El humedal Conejera presenta interconexión con fuentes superficiales y relación agua subterránea.

Los humedales de Córdoba y Jaboque son alimentados principalmente por agua subterránea con un flujo de carácter regional.

Las muestras del paramo de Guacheneque (Nacimiento del Río Bogotá, Río Arzobispo y Humedal Conejera provenientes de las partes de mayor altura en la cuenca, son captada y conducida por los niveles permeables del Grupo Guadalupe y Formación Guaduas, que posteriormente fluye a los depósitos cuaternarios y Formación Sabana en sus niveles permeables.

Teniendo en cuenta la curva meteórica para Colombia (Rodríguez, C. 2004), la cual posee la siguiente ecuación:

$$y = 8x + 9.6$$

Como referencia del comportamiento de los diferentes puntos de agua se observa que con la relación altitudinal que presenta la siguiente ecuación para el Deuterio:

$$\Delta H2 = -0,0186h - 19 \text{ (Rodríguez, C. 2004)}$$

Se calculó la posible zona de recarga de los diferentes puntos de agua muestreados, donde se observa que el humedal Juan Amarillo recibe solamente agua lluvia y que los demás humedales están siendo alimentados de agua subterránea con tiempos de transito extensos y flujo intermedio a regional, posiblemente de los cerros aledaños a la ciudad de Bogotá.

Tabla 25. Relación de Altitud de Recarga con Deuterio

PUNTO DE AGUA	Altitud de recarga con Deuterio
HUMEDAL SALITRE - JUAN AMARILLO	2672
INGEOMINAS No 2	3134
UNICENTRO	3188
COLEGIO DE LA ENSEÑANZA NO. 2	3220
COLEGIO TERESIANO "COMPAÑIA DE SANTA TERESA DE JESUS"	3220
GASEOSAS COLOMBIANA NO. 4	3258
COUNTRY No. 2	3263
PARQUEADERO PUNTO DE PLATA LUIS ENRIQUE PLATA	3268
CAFAM No. 1	3295
TIBATI	3301
HIJAS DE SANTA MARIA PROVIDENCIA	3327
CARMEL CLUB No. 2	3327
MEALS	3376
BAVARIA No. 2	3413
SUBA - EAAB	3424
SEDE SOCIAL Y DEPORTIVA NO. 2 BAVARIA	3430
CLUB LOS LAGARTOS RAQUETA	3435
GRASCO No. 2 BODEGA 14	3440

PUNTO DE AGUA	Altitud de recarga con Deuterio
PARQUE SIMON BOLIVAR	3456
AUTO CENTRO SANTANA	3494
ASITEX LTDA No. 2	3500
LOS TRES	3505
UNIVERSIDAD SAN BUENAVENTURA	3510
MOBIL SUBA INVERSIONES VIACAR	3537
AV CIUDAD DE CALI-LAVADERO BETO	3559
CENTRO CAR 19	3564
LA AGUADORA - EAAB	3575
MANUFACTURAS ELIOT No. 2	3580
PROTELA S.A	3580
INDEGA PANAMCO PLANTA NORTE	3586
COLEGIO EL ROSARIO	3602
FINCA LA JUNCA	3607
SAPITO PITO	3612
LADRILLERA HELIOS S.A	3634
ESCUELA UNION COLOMBIA	3634
SOCIEDAD PROMA LTDA	3639
GASEOSAS COLOMBIANA No. 2	3693
LAVA CARS CIUDAD JARDIN	3720
ACEGRASAS No. 2	3747
HB ESTRUCTURAS METALICAS	3763
CONSULTECNICA	3774
LAFAYETTE No. 1	3801
GENERAL MOTORS	3806
CLARA FEY No. 2	3844
FRIGORIFICO GUADALUPE	3865
NATESA	3870
PARQUE EL TUNAL	3881
LA VECINA	3887
QUEBRADA AGUAS CLALIENTES	3897
HILAT NO. 2	3919
SERVICENTRO EL RADAR	3924
IMAL	3930
CARBOQUIMICA No. 2	3962
HUMEDAL GUAYMARAL	3967
MARY OSORIO DE MORALES	3973
JARDINES DEL APOGEO No. 1	3994
PETCO	4010
HUMEDAL SANTA MARIA DEL LAGO	4069

PUNTO DE AGUA	Altitud de recarga con Deuterio
SUDEIM	4075
QUEBRADA LA VIEJA	4075
EL DELIRIO - (QUEBRADA SAN CRISTOBAL)	4086
PEQUEÑITAS Y PEQUEÑITOS DE JESUS	4107
PARAMO DE GUACHENEQUE POZO DE LA NUTRIA, NACIMIENTO RIO BOGOTÁ	4155
RIO ARZOBISPO	4204
HUMEDAL CONEJERA	4247
PAVCO	4268
CARBOQUIMICA No 4	4279
LA MANSIÓN DEL DUENDE	4290
HUMEDAL LA REGADERA	4731
HUMEDAL TIBANICA	4833
HUMEDAL JABOQUE	5086
HUMEDAL CÓRDOBA	5704

Las muestras de los pozos y aljibes (agua subterránea) está evidenciando una posible recarga y mezcla de agua lluvia con condiciones de flujo local a intermedio. De igual forma en la cuenca de la Sabana de Bogotá se presenta una desviación (δ) por el efecto de la temperatura, continentalidad y altitud, por tal razón se hace necesario realizar un muestreo mensual para identificar las anomalías por fraccionamiento isotópico.

7. HIDRÁULICA DE POZOS

Los parámetros hidráulicos son muy importantes para una verdadera interpretación hidrogeológica por lo tanto con la recopilación de información de puntos agua subterránea se procedió a interpretar las pruebas de bombeo a caudal constante de los pozos existentes y bajo condiciones normales de flujo de agua subterránea y condiciones normales de bombeo. La evaluación de los parámetros hidráulicos (Transmisividad y coeficiente de almacenamiento) se realizó mediante los métodos de Cooper & Jacob y Theis, mediante el software especializado AQUIFERTEST: (prueba de bombeo y recuperación) para la generación de las curvas de interpretación hidráulica.

7.1 FLUJO ESTABLE

Para explicar la ecuación de flujo estable, William Kearton representa mediante un rectángulo, un dispositivo (Tobera, turbina o álabe) a través del cual fluye vapor o gas constantemente; es aquí donde comienza la teoría de flujo por medio de un conducto vertical y su interpretación hidráulica:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z) = 0$$

Ecuación de Laplace

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

7.2 FLUJO RADIAL NO EQUILIBRADO EN ACUÍFEROS CONFINADOS (TRANSIENT REGIME)

Las ecuaciones que se relacionan a continuación y que caracterizan el comportamiento de los acuíferos confinados son utilizables para tiempos mayores de 40-50 minutos.

$$Ss = \rho g(\alpha + n\beta)$$

Cambio de masa por agua producida

$$Ss(\partial h / \partial t)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{Ss}{K} \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$T = K \cdot b$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

En coordenadas polares se tiene:

$$x = r \cos \theta$$

$$y = r \sin \theta$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Teniendo en cuenta la teoría de flujo anterior se define la solución de Theis en 1935 así:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int \frac{e^{-u}}{u} du$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad W(u) = \int \frac{e^{-u}}{u} du \quad \text{Función de pozo}$$

$$W(u) = -0.577216 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots$$

De acuerdo a la teoría de Theis, Jacob desarrollo el siguiente método así:

Para un tiempo largo

$$u \leq 0.01 \text{ entonces}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt})$$

$$s = \frac{2.30Q}{4Tt} \log\left(\frac{2.25Tt}{r^2 S}\right)$$

$$s \text{ vs } \log t \rightarrow \text{recta} \rightarrow \text{para } s=0 \quad t = t_0$$

$$S = \frac{2.25t_0}{r^2} \quad T = \frac{2.30Q}{4\pi \Delta s}$$

Δs , es la diferencia de caída de datos por ciclo logarítmico de t.

Q, es el caudal constante extraído del pozo

t, es el tiempo transcurrido a partir del inicio del bombeo

r, es el radio de influencia del pozo.

T, es la Transmisividad

S, es el coeficiente de almacenamiento

7.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS

La evaluación de los parámetros hidráulicos se realizó teniendo en cuenta principalmente las pruebas de bombeo y las ecuaciones de flujo y ley de Darcy. Se debe aclarar que las pruebas de bombeo a caudal constante obtenidas para la evaluación hidráulica tienen tiempos de bombeo y recuperación de niveles de 600 a 2800 minutos aproximadamente con una mayor frecuencia de 1440 minutos.

A continuación se presentan los parámetros evaluados:

7.3.1. Nivel estático (NE)

El nivel estático en el acuífero cretácico es del orden de 0 a 25.14 metros de profundidad, el nivel estático en el acuífero cuaternario Formación Sabana es del orden de 2,61 a 94.93 metros de profundidad y el nivel estático en el acuífero cuaternario de la formación Chía – Río Tunjuelo es del orden de 13.88 a 29.26 metros.

7.3.2. Nivel dinámico (ND)

El nivel dinámico en el acuífero cretácico es del orden de 2.79 a 48.42 metros de profundidad, el nivel dinámico en el acuífero cuaternario Formación Sabana es del orden de 9.8 a 106.54 metros de profundidad y el nivel dinámico en el acuífero cuaternario de la formación Chía – Río Tunjuelo es del orden de 16.23 a 32.57 metros de profundidad.

7.3.3. El abatimiento (s)

El abatimiento en el acuífero cretácico es del orden de 1.79 a 33.83 metros de profundidad, el abatimiento en el acuífero cuaternario Formación Sabana es del orden de 0.44 a 59.98 metros de profundidad y el abatimiento en el acuífero cuaternario de la formación Chía – Río Tunjuelo es del orden de 2.35 a 3.59 metros de profundidad

7.3.4. Caudal (Q)

Caudal utilizado durante las pruebas de bombeo es del orden de 0.27 a 27.12 l/seg

A continuación se presentan algunas de las curvas por el método de Cooper Jacob, Theis y recuperación mediante el software especializado AQUIFERTEST obtenidas en los pozos para el cálculo de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento:

La prueba de bombeo a caudal constante del pozo pz-07-0016 de Clara Fey 1, con base a la interpretación de la prueba se presenta una transmisividad promedio del orden de $172 \text{ m}^2/\text{día}$:

Figura 57. Bombeo a caudal constante método Cooper and Jacob. Pozo Clara Fey 1.

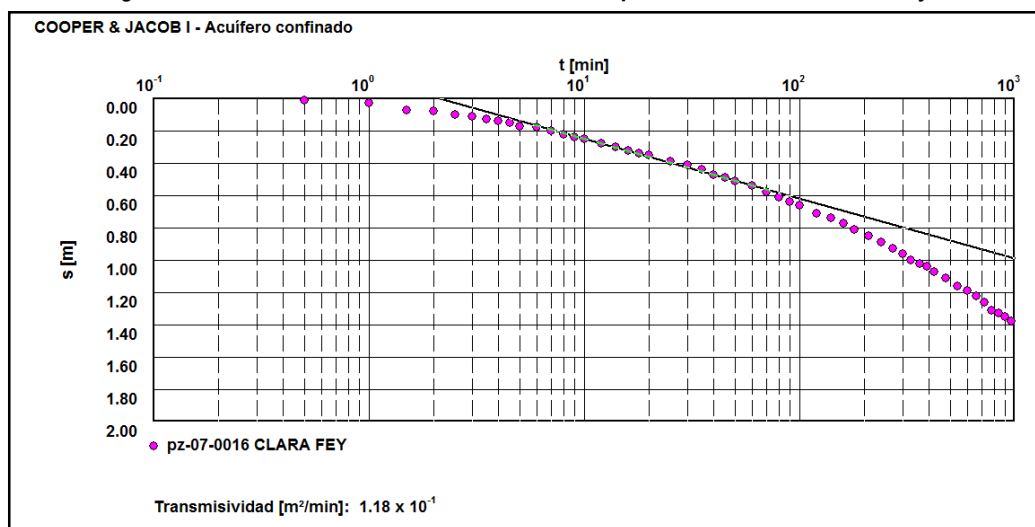


Figura 58. Bombeo a caudal constante método Theis. Pozo Clara Fey 1.

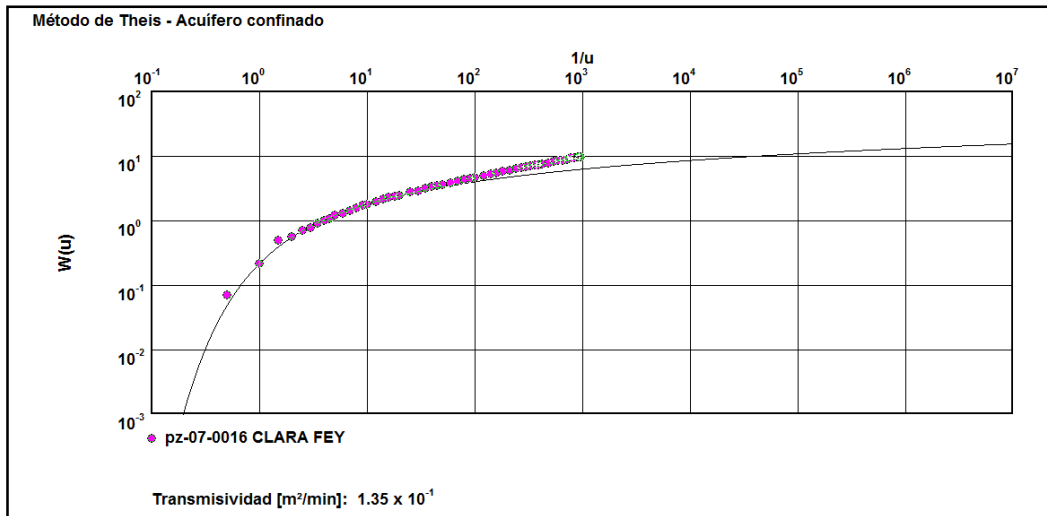
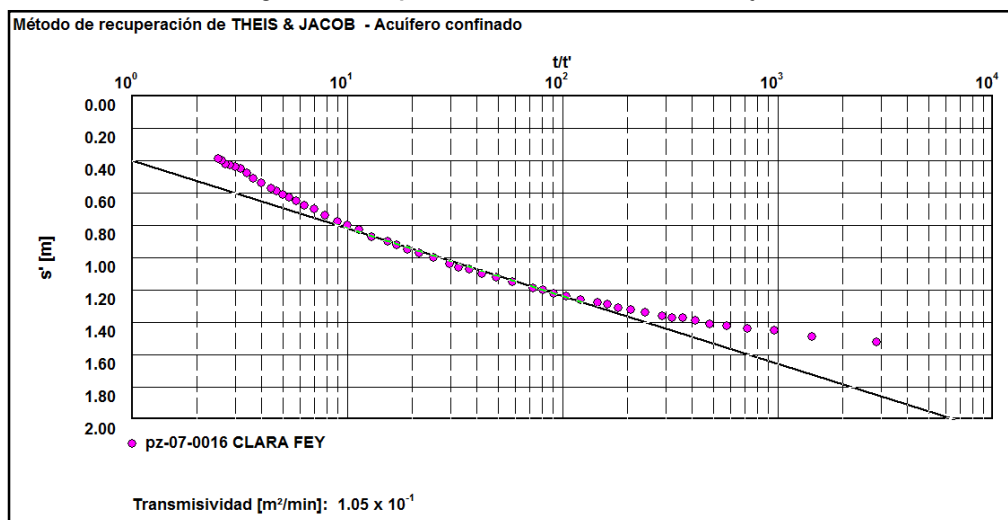


Figura 59. Recuperación de niveles. Pozo Clara Fey 1.



La prueba de bombeo a caudal constante del pozo pz-07-0017 de Clara Fey 2 presenta una transmisividad promedio del orden de $106 \text{ m}^2/\text{día}$

Figura 60. Bombeo a caudal constante método Cooper and Jacob. Pozo Clara Fey 2.

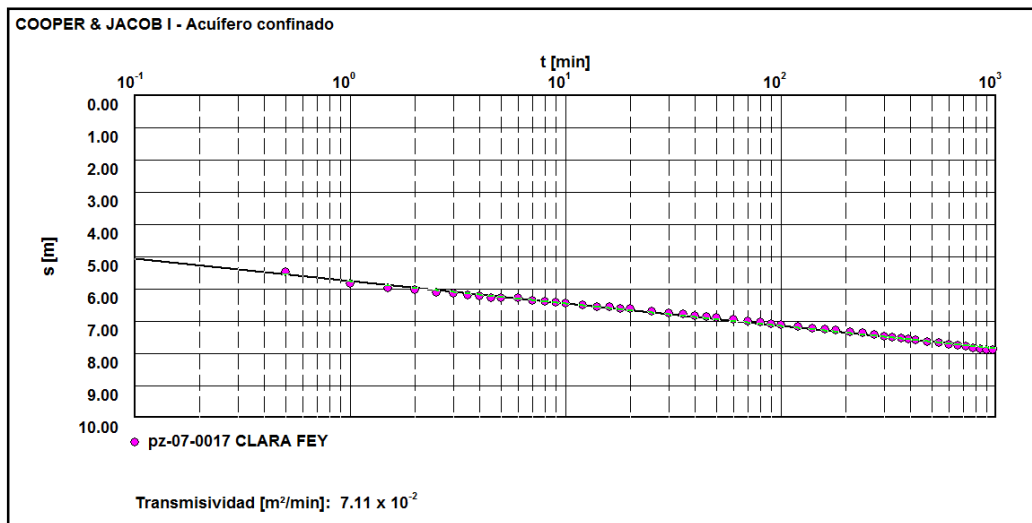
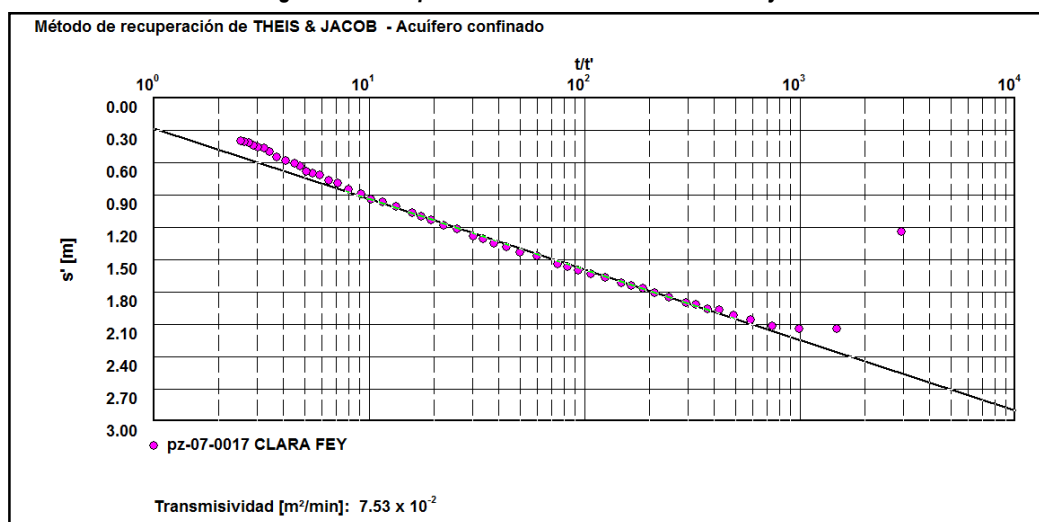
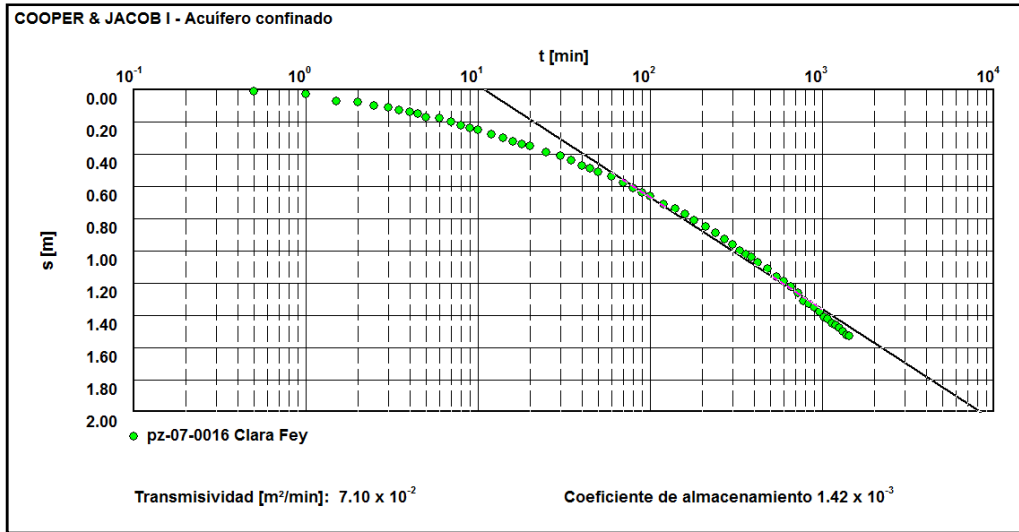


Figura 61. Recuperación de niveles. Pozo Clara Fey 2.



El pozo pz-07- 0016 se ha sido observación del pozo pz-07-0017 a una distancia de 35 metros, los cuales presentan una conexión hidráulica para determinar el coeficiente de almacenamiento del acuífero cuaternario de la formación Sabana el cual es del orden de 1.42×10^{-3}

Figura 62. Pozo de observación Clara Fey 1.



7.3.5. Transmisividad (T)

La transmisividad en el acuífero cretácico es del orden de 5.4 a 1064 $\text{m}^2/\text{día}$, la transmisividad en el acuífero cuaternario Formación Sabana es del orden de 1.37 a 373 $\text{m}^2/\text{día}$ y la transmisividad en el acuífero cuaternario de la formación Chía – Río Tunjuelo es del orden de 315 a 1432 $\text{m}^2/\text{día}$.

7.3.6. Conductividad Hidráulica (K)

Para calcular este parámetro es indispensable conocer el diseño del pozo para obtener el espesor de las rejillas o filtros de extracción del recurso hídrico subterráneo.

La conductividad hidráulica en el acuífero cretácico es del orden de 0.7 a 59.11 $\text{m}/\text{día}$, la conductividad hidráulica en el acuífero cuaternario Formación Sabana es del orden de 0.54 a 9.11 $\text{m}/\text{día}$ y la conductividad hidráulica en el acuífero cuaternario de la formación Chía – Río Tunjuelo es del orden de 17.5 a 43.57 $\text{m}/\text{día}$.

7.3.7. Capacidad Específica (Ce)

La capacidad específica en el acuífero cretácico es del orden de 0.021 a 4.13 l/seg/m, la capacidad específica en el acuífero cuaternario Formación Sabana es del orden de 0.005 a 4.54 l/seg/m y la capacidad específica en el acuífero cuaternario de la formación Chía – Río Tunjuelo es del orden de 2.35 a 8.06 l/seg/m.

7.3.8. El coeficiente de almacenamiento (s)

El coeficiente de almacenamiento en el acuífero cuaternario Formación Sabana es del orden de 1.1×10^{-4} a 8×10^{-5} y el coeficiente de almacenamiento en el acuífero cuaternario de la formación Chía – Río Tunjuelo es del orden de 2.62×10^{-3} .

A continuación se presenta una tabla resumen de los parámetros hidráulicos evaluados:

CÓDIGO	NOMBRE POZO	PROFUNDIDAD	NORTE	ESTE	ACUÍFERO	Q (l/seg)	NE (m)	ND (m)	Abat (m)	Ce (l/seg/m)	T (m ² /día)	b (m)	K (m/día)	Coefficiente almacenamiento
pz-01-0001	AMERICAN PIPE				cuaternario - cretácico	7.2	0	8.9	8.9	0.808988764	65			
pz-01-0011	PARMALAT	80	117984,003	103754,720	cuaternario	0.68	6.8	15.93	9.13	0.074479737	4.1			
pz-01-0012	LAS VEGAS	97	116612,586	103457,433	cuaternario	0.4	6.7	12.23	5.53	0.072332731	9.6			
pz-01-0023	UNIVERSIDAD SAN BUENAVENTURA	167	117147,976	105342,960	cuaternario - cretácico	2.5	0	6.86	6.86	0.364431487	1064	18	59.11111111	
pz-01-0069	MONASTERIO BENEDICTINO DE TIBATI	100	118929,673	104551,679	cuaternario	2.32	6.24	9.8	3.56	0.651685393	33	12	2.75	
pz-01-0072	LA SALLE - EAAB	263	117547,000	106018,000	cuaternario	22.54	0	33.83	33.83	0.666272539	130	111	1.171171171	
pz-01-0075	COLEGIO TERESIANO	201	115286,809	103398,528	cuaternario	3.52	8.72	68.7	59.98	0.058686229	13	24	0.541666667	
pz-02-0002	MOBIL CHICO	80	109529,246	103719,796	cuaternario - cretácico	0.42	0.07	19.8	19.73	0.02128738	5.4			
pz-06-0005	ACEGRASAS No. 2	101	99831,690	92599,493	cuaternario	3.95	29.26	29.75	0.49	8.06122449	315	18	17.5	
pz-06-0008	GENERAL MOTORS	175	98737,000	92286,000	Cretácico - cuaternario	11.76	13.88	16.23	2.35	5.004255319	489			
pz-06-0009	PARQUE EL TUNAL	151	97241,200	93327,490	Cretácico - cuaternario	11.7	28.98	32.57	3.59	3.259052925	543			
pz-07-0007	APOGEO 1	61	100253,758	89479,497	cuaternario	2	22.85	23.29	0.44	4.545454545	58			1.62x10-4
pz-07-0008	APOGEO 2	89	100.547.000	89.452.000	cuaternario	2.37	22.51	27.32	4.81	0.492723493	52			1.62x10-4
pz-07-0011	PROTABACO 3	127	100018,256	88628,225	Cuaternario CRETACICO	4.1	7.72	13.16	5.44	0.753676471	78			
pz-07-0016	CLARA FEY No. 1	155	102.259.339	88.205.917	cuaternario	4	15.18	16.56	1.38	2.898550725	172			1.42x10-3
pz-07-0017	CLARA FEY No. 2	155	102271,993	88172,863	cuaternario	4.49	15.19	23.08	7.89	0.569074778	106	24	4.416666667	1.42x10-3
pz-07-0020	CONSULTECNICA	64	102.744.026	88.576.752	cuaternario	0.6	17	17.7	0.7	0.857142857	39			
pz-08-0020	LAVAUTOS LA 65	98	102083,824	93347,582	cuaternario	0.3	22.32	25.74	3.42	0.087719298	8.2	15	0.546666667	
pz-08-0023	LAFAYETTE 1	513	105871,010	93901,460	cuaternario	26.93	53.11	64.86	11.75	2.291914894	373			
pz-08-0032	CLINICA NUESTRA SEÑORA DE LA PAZ No. 1	126	104638,441	94510,494	cuaternario	1.68	29.43	35.37	5.94	0.282828283	31			
pz-09-0006	FRIGORIFICO SUIZO	220	110315,279	90107,004	cuaternario	12.39	19.63	31.86	12.23	1.013082584	117			
pz-09-0013	TEXTILES ROMANOS	80.8	105.524.088	95.709.969	cuaternario	0.98	29.19	40.49	11.3	0.086725664	17			
pz-09-0017	DUQUESA	204	108952,435	92173,680	cuaternario	3.02	2.61	26.36	23.75	0.127157895	57	30	1.9	
pz-09-0019	FLOTA LA MACARENA	140	109.464.101	91.579.838	cuaternario	1.21	17.13	26.33	9.2	0.131521739	6.8			

CÓDIGO	NOMBRE POZO	PROFUNDIDAD	NORTE	ESTE	ACUÍFERO	Q (l/seg)	NE (m)	ND (m)	Abat (m)	Ce (l/seg/m)	T (m³/día)	b (m)	K (m/día)	Coefficiente almacenamiento
pz-09-0021	HILACOL No. 2	161	106.159,616	95.041,641	cuaternario	4.43	23.73	67.62	43.89	0.100934154	22.6			
pz-09-0040	INDEGA PANAMCO PLANTA NORTE GASES	529	109170,908	94412,877	Cuaternario	27.12	29.51	44.84	15.33	1.769080235	150	63	2.380952381	
pz-09-0041	PROTELA S.A	523	109149,073	95204,400	Cuaternario	19.09	41.63	53.6	11.97	1.594820384	185	96	1.927083333	
pz-09-0043	MANUFACTURAS ELIOT No. 1	226	105240,190	95724,137	cuaternario	25.57	36.05	60.23	24.18	1.057485525	81	36	2.25	
pz-09-0047	ACABADOS INFORMALES Y LAVADOS S.A	218	104899,835	94993,231	cuaternario	4.59	33.85	77.6	43.75	0.104914286	58	33	1.757575758	
pz-09-0059	COLTANQUES N° 2	196	107296,290	93461,609	cuaternario	2.26	22.9	43.18	20.28	0.111439842	46	33	1.393939394	
pz-10-0003	ALIMENTOS EL JARDIN	70	110.213.002	95.746.963	cuaternario	4.29	17.4	48.93	31.53	0.136060894	25			
pz-10-0015	COMPENSAR	201	107136,848	97326,213	cuaternario	2.25	24.03	31.74	7.71	0.291828794	20			
pz-10-0024	AUTOLAVADO EL PASTUSO	80	109.323.751	97.467.717	cuaternario	0.45	18.86	19.44	0.58	0.775862069	10			1.1x10-4
pz-10-0027	COOTRANSNIZA LTDA	102	111996,611	98576,410	cuaternario	1.33	12.29	18.7	6.41	0.2074883	22	18	1.222222222	3.78x10-4
pz-10-0028	SERVIAUTOS LA ESTRELLA		111798,857	98409,145	cuaternario	0.77	12.43	16.41	3.98	0.193467337	17	12	1.416666667	3.78x10-4
pz-11-0011	CARMEL CLUB No 2	183	116231,275	102970,209	cuaternario	0.27	12.65	64.21	51.56	0.005236618	1.37			
pz-11-0012	CARMEL CLUB No 1	151	116022,836	102927,296	cuaternario	1.03	4.65	47.44	42.79	0.024071045	2.4			
pz-11-0014	HORTICULTURA No. 2	404	116412,872	100915,903	Cretácico - cuaternario	16.19	25.14	48.42	23.28	0.695446735	269	24	11.20833333	
pz-11-0026	CLUB LOS LAGARTOS No. 2 - HOYO 17	60	112692,343	99293,919	Cretácico - cuaternario	3.48	15.6	41.09	25.49	0.136524127	189	18	10.5	
pz-11-0028	CLUB EL RANCHO No 1	127	119568,908	103759,212	cuaternario	2.02	15.66	20.05	4.39	0.460136674	42			8x10-5
pz-11-0030	TENNIS CLUB No. 2	98	124890,766	104461,247	cuaternario	2.11	27.14	31.64	4.5	0.468888889	70	18	3.888888889	1.6x10-4
pz-11-0033	COLSUBSIDIO	115	125098,859	104424,329	cuaternario	3.05	26.03	28.95	2.92	1.044520548	164	18	9.111111111	1.6x10-4
pz-11-0051	COLEGIO SAN VIATOR No. 2	140	121.424.263	104.019.790	cuaternario Guaduas	2.28	22.13	33.25	11.12	0.205035971	21	30	0.7	

CÓDIGO	NOMBRE POZO	PROFUNDIDAD	NORTE	ESTE	ACUÍFERO	Q (l/seg)	NE (m)	ND (m)	Abat (m)	Ce (l/seg/m)	T (m ² /día)	b (m)	K (m/día)	Coefficiente almacenamiento
pz-11-0052	GIMNASIO DE LOS ANDES No. 1	86	121323,659	103584,236	cuaternario	2.84	26.24	40.14	13.9	0.204316547	19	24	0.791666667	
pz-11-0058	CLUB CAMPESTRE GUAYMARAL	100	125297,080	103754,580	cuaternario	4.73	22.6	37.83	15.23	0.310571241	62			
pz-11-0080	CAFAM No. 2	177	121530,175	103703,207	cuaternario	3.27	52.21	76.76	24.55	0.133197556	15			1.87x10-5
pz-11-0095	LA ENSEÑANZA No. 1	108	120702,214	102855,064	cuaternario	0.32	21.13	27.7	6.57	0.04870624	4.1			2.13x10-4
pz-11-0097	LA ENSEÑANZA No. 3		120545,951	102676,477	cuaternario	0.36	21.75	26.13	4.38	0.082191781	10			2.13x10-4
pz-11-0140	JARDINES DEL RECUERDO No. 2	110	120.875.890	103.986.778	cuaternario	2.16	15.04	49.25	34.21	0.063139433	6.1			
pz-11-0148	COLEGIO SANTA MARIANA DE JESUS	86	119439,762	103549,535	cuaternario	0.3	13.83	16.36	2.53	0.118577075	25			
pz-11-0180	CLUB LOS LAGARTOS No. 5 - LAGO MATIZ		112675,000	98808,000	Cretácico - cuaternario	7.4	1	2.79	1.79	4.134078212	114			
pz-13-0005	MULTILAVADO LA 45	74	104.132.013	100.308.382	cuaternario	0.44	15.44	27.8	12.36	0.035598706	9	12	0.75	
pz-13-0006	ESTACION MOBIL TEUSAQUILLO	75	103035,558	100176,997	cuaternario	0.32	12.35	15.57	3.22	0.099378882	18	15	1.2	
pz-13-0010	PARQUE SIMON BOLIVAR	216	107069,000	98389,000	cuaternario	10.65	35.12	51.96	16.84	0.632422803	67	48	1.395833333	
pz-14-0004	HERMANAS DOMINICAS PRESENTACION	180	102.000.000	99.480.000	cuaternario	3.2	38.1	46.25	8.15	0.392638037	29			
pz-16-0002	GASEOSAS COLOMBIANA No 4	280	102641,915	98123,065	cuaternario	14.69	47.31	56.95	9.64	1.523858921	166			
pz-16-0003	GASEOSAS LUX No. 1	192	103013,049	96279,691	cuaternario	3.3	47.94	72.33	24.39	0.135301353	27			2.0x10-4
pz-16-0019	GENFAR	140	103.567.000	97.369.000	cuaternario	0.95	13.99	34.98	20.99	0.045259647	4.7			
pz-16-0022	Henry Gyovanny Gómez	75	102475,581	94816,538	cuaternario	0.63	20.37	22.72	2.35	0.268085106	11.8			
pz-16-0029	COLORTEX	215	103341,284	96116,069	cuaternario	8.85	47.51	73.47	25.96	0.340909091	36			2.0x10-4
pz-16-0034	ASITEX LTDA No. 2	238	104823,166	96381,403	cuaternario	25.07	36.5	68.22	31.72	0.79035309	109	45	2.422222222	2.10x10-4

<i>CÓDIGO</i>	<i>NOMBRE POZO</i>	<i>PROFUNDIDAD</i>	<i>NORTE</i>	<i>ESTE</i>	<i>ACUÍFERO</i>	<i>Q (l/seg)</i>	<i>NE (m)</i>	<i>ND (m)</i>	<i>Abat (m)</i>	<i>Ce (l/seg/m)</i>	<i>T (m²/día)</i>	<i>b (m)</i>	<i>K (m/día)</i>	<i>Coefficiente almacenamiento</i>
pz-16-0036	LIME	225	104.855.180	96.814.632	cuaternario	3.89	45.5	47.55	2.05	1.897560976	76			2.10x10-4
pz-19-0005	FRIGORIFICO GUADALUPE No. 1	134	99655,000	91805,000	cuaternario	14.9	23.87	26.39	2.52	5.912698413	1432			2.62x10-3
pz-19-0009	INMACU No. 4	403	99511,788	89833,300	cuaternario	6.25	94.93	106.54	11.61	0.538329027	32			
pz-22-0010	SAN SIMON	105	124.865.530	103.317.820	cuaternario	7.11	37.52	44.57	7.05	1.008510638	142			

8. MAPA HIDROGEOLÓGICO

Con base en la caracterización hidrogeológica de las formaciones geológicas y la información hidroclimatológica, geofísica e hidrogeoquímica, se elaboró el Mapa Hidrogeológico, el cual se describirá de forma detallada en el presente capítulo.

8.1 SEDIMENTOS Y ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE INTERGRANULAR

Son sistemas acuíferos discontinuos de extensión regional y local, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente de la cuenca (fluvial y lacustre) de montaña, de ladera y rocas sedimentarias terciarias y cretácicas; son acuíferos de productividad alta a baja con transmisividades del orden de 1 a 1400 m³/día.

Dentro de este grupo se encuentran las siguientes unidades geológicas:

- DEPÓSITOS DE PENDIENTE (Qdp)
- RESTOS DE METEORIZACIÓN DE ARENISCAS DEL GUADALUPE (Trm)
- FORMACIÓN SAN MIGUEL (Qsm)
- FORMACIÓN CHIA (Qch)
- FORMACIÓN RÍO TUNJUELO (Qrtsa)
- FORMACIÓN SABANA (Qsa1, Qsa2, Qsa intercalaciones)

- FORMACIÓN MARICHUELA (Tma)
- FORMACIÓN ARENISCA REGADERA (Tir)
- FORMACIÓN CACHO (Tic)
- FORMACIÓN GUADUAS Conjunto Medio (Tkgm)
- FORMACIÓN ARENISCA LABOR - TIERNA (Ksglt)

8.2 ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE A TRAVÉS DE FRACTURAS

Son sistemas acuíferos discontinuos de extensión regional y local, conformados por rocas cretácicas consolidadas. Acuíferos con media a baja productividad.

Dentro de este grupo se encuentran las siguientes unidades geológicas:

- FORMACIÓN PLAENERS (Ksgp)
- FORMACIÓN ARENISCA DURA (Ksgd)

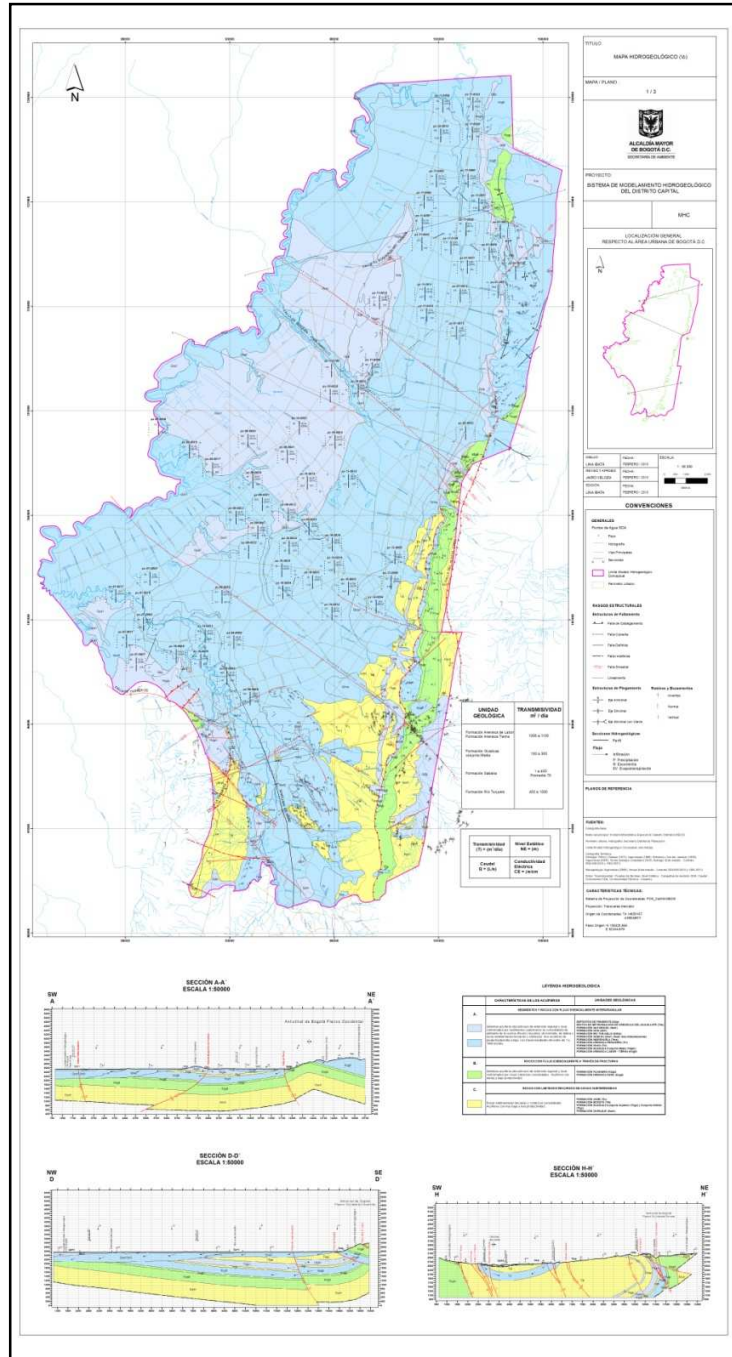
8.3 ROCAS CON LIMITADOS RECURSOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Son rocas sedimentarias terciarias y cretácicas consolidadas. Acuíferos con muy baja a nula productividad

Dentro de este grupo se encuentran las siguientes unidades geológicas:

- FORMACIÓN USME (Tiu)
- FORMACIÓN BOGOTÁ (Tib)
- FORMACIÓN GUADUAS Conjunto Superior (Tkgs) y Conjunto Inferior (Tkgi)
- FORMACIÓN CHIPAQUE (Ksch)

Figura 63. Mapa Hidrogeológico



8.4 POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DE UNIDADES GEOLÓGICAS DE INTERÉS HIDROGEOLÓGICO DEL DISTRITO

8.4.1. Acuífero Grupo Guadalupe (Arenisca Labor Tierna)

Corresponde a areniscas cretácicas con un espesor promedio de 120 m que puede producir caudales del orden de 20 lps. A pesar de ser el acuífero más importante en el área... su explotación es limitada y localizada en aquellos lugares cerca a los afloramientos (DAMA, 2004)

Hubach (1931) realizó informes sobre las “aguas de roca” en la zona centro-norte de los Cerros Orientales, en los cuales hizo descripciones sobre la producción de aguas en las unidades del Guadalupe, las cuales se transcriben en a continuación:

El propio surtidor de aguas, en especial de aguas potables, es el piso de Guadalupe. Primeramente son acuíferas las areniscas superiores que constituyen la parte más alta del piso de Guadalupe y que sirven para la extracción de arena. Ellas contienen capas irregulares de areniscas de grano regular hasta grueso, poco compactadas y altamente porosas, es decir ellas son buenos almacenes de agua de roca...

La formación Plaeners que quedan debajo de las areniscas superiores a todo lo largo del cordón de Bogotá (a causa de la inversión, ellos quedan topográficamente encima) tiene la capacidad acuífera por su porosidad sino por su alto fracturamiento, mediante el cual se forma un sin número de intersticios que permite la circulación de los líquidos.

Finalmente, las areniscas inferiores son buenas fuentes de agua debido a que se hallan fuertemente agrietadas y muestran separación intersticial de los estratos.

8.4.2. Formación Guaduas

De acuerdo con lo establecido en el estudio de DAMA (2004), la Formación Guaduas es un acuitardo continuo de extensión regional de bajo rendimiento, asociado a rocas arcillosas principalmente. En el área de estudio se estima que puede aportar un caudal entre 1 l/s a 3 l/s. Es importante mencionar que esta descripción corresponde con los miembros inferior y superior de la Formación donde predominan lodolitas.

No obstante, en la zona de estudio predomina en Miembro Medio, el cual está compuesto por areniscas cuarzosas bien cementadas y con muy poca matriz arcillosa y que ha sido considerado como acuífero, con algunos pozos en Ciudad Bolívar que aprovecha sus aguas (Hidrogeólogo J. Chaves, comunicación personal).

8.4.3. Formación Regadera

El componente hidrogeológico relaciona la geología, la hidráulica del agua subterránea, las fuentes y áreas de recarga y el tipo de agua que se encuentra dentro del subsuelo. La Formación Regadera dada su matriz arcillosa y alta cementación, presenta una porosidad primaria baja, la cual se incrementa producto de la porosidad secundaria controlada por nivel de alteración que permite el lavado de la matriz arcillosa y pérdida de grano, aumentando de esta forma, el número y diámetro de los espacios vacíos interconectados.

Las areniscas de la Formación Regadera, definida como un acuifero discontinuo de extensión regional, asociado a rocas arcillosas con algunas intercalaciones de arenas, conforman originalmente mesas estructurales, con buzamientos cercanos a la horizontal. Forman un acuífero semiconfinado, con permeabilidad primaria en los miembros superiores (suelos residuales de areniscas y areniscas poco alteradas infrayacidas por arcillolitas), en el que las arcillolitas actúan como una unidad confinante.

A pesar de la permeabilidad relativamente alta (cercana al 15%, de acuerdo con la petrografía), las rocas poco fracturadas tienen poca interconexión entre los poros, pero se constituye en acuífero de calidad moderada por fracturamiento. Existen afloramientos y manantiales de esta unidad en el sector del barrio Jalisco-Gibraltar y cerca a la entrada de Lucero alto, al norte de la zona minera de Mochuelo,.

Estas consideraciones ponen de relieve la posibilidad de que esta Formación tenga importancia en cuanto a la regulación de flujos hidrogeológicos en la cuenca media-baja del río Tunjuelo (de hecho, areniscas de la Formación Regadera se constituyen en sustrato rocoso de ciertas zonas del valle aluvial del Tunjuelo y probablemente aportaba en la recarga de dichos materiales antes de ser extraídos para fines mineros).

9. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Dentro de las unidades hidrogeológicas de interés se debe precisar lo siguiente:

La Formación Sabana en sus niveles arenosos continuos se clasifica como un acuífero de porosidad primaria con gran importancia hidrogeológica, los acuíferos que no poseen continuidad lateral o conexión hidráulica (lentes) son acuíferos colgados y con poca o ninguna posibilidad de presentar recarga.

La formación Labor – Tierna es un acuífero de porosidad primaria de alta productividad y gran interés hidrogeológico, incrementando su almacenamiento debido a la presencia de las fallas de Torca y Boquerón del Carbón.

La formación Guaduas en su conjunto medio presenta un acuífero de porosidad primaria con extensión lateral limitada y con recarga mínima.

La Formación Arenisca Dura se halla fracturada a nivel regional, es de esperarse que tenga gran importancia hidrogeológica y se puede constituir en el acuífero de mayor importancia, aunque es de esperarse que esta formación se encuentre a más de 650 de profundidad.

9.1 MODELO HIDROGEOLÓGICO SECCIÓN A – A` NORTE DEL DISTRITO

Existen dos tipos principales de flujos de agua subterránea. Un flujo regional proveniente de infiltración y recarga en la zona de afloramiento de las formaciones Labor – Tierna y Arenisca Dura (zonas fracturadas). El agua se percola y se mueve hacia la parte de menor pendiente topográfica. Otro flujo de agua es el originado de la recarga sobre la formación Sabana, en la parte plana proveniente principalmente de las partes de contacto entre las rocas fracturadas al oriente de la ciudad.

De NE a SW: el agua proveniente de la precipitación de infiltra hacia el oriente en inmediaciones de la Quebrada Aguas Claras hacia otra cuenca, desde el eje hacia el flanco occidental del anticlinal de Bogotá se presenta una recarga favorable a la cuenca de la jurisdicción del Distrito Capital, posteriormente favorecido por la inclinación de las capas el agua se percola a través de la Falla de Torca y fluye por los estratos permeables de la Formación Labor – Tierna hasta la Falla de Boquerón del Carbón.

El agua que proviene de la escorrentía y favorecida por el gradiente hidráulico se infiltra al oriente por la Formación Sabana y alimenta al Humedal Torca Y Guaymal.

En el flanco oriental de la loma la Conejera el agua fluye por la Formación Guaduas conjunto medio a través de sus niveles permeables y alimenta a la formación Sabana con un extensión lateral limitada.

En el flanco Occidental de la loma Conejera el agua favorecida por la pendiente topográfica se infiltra por los niveles arenosos de la Formación Sabana y tiene una dirección hacia el Oeste.

Se ha realizado la caracterización estructural para identificar las condiciones favorables para la recarga y almacenamiento de agua subterránea del Distrito Capital como se identifica en las siguientes tablas y figuras:

Tabla 26. Caracterización Estructural de los Cerros Orientales

CERROS ORIENTALES									
SECTOR	TRAMO	LONGITUD (Km)		FLANCO / LADERA	RUMBO DE LAS CAPAS	BUZAMIENTO	ROCAS EN SUPERFICIE		
1	Loma Petaca - Qda. San Cristóbal	12		Normal /ladera afuera	N60W a N50E	15 - 34 SW a NW	Ksgp	Ksglt	
2	Qda. San Cristóbal - Qda Rosales	9,95	2,1	Normal e invertido/ladera adentro	N-S a N10E	12 - 50 SE		Ksglt	
3			2	Normal / ladera afuera	N 35-45 E	60 - 70 NW		Ksglt	
4			0,9	Invertido / ladera adentro	N-S a N45E	45 E a SE		Ksglt	
5			2,5	Normal e invertido/ladera afuera	N20E a S85E	17 a 50 NW a NE		Ksgd Ksglt	
6			0,7	Invertido / ladera adentro	N 25 - 45 E	60 SE		Ksgd Ksgp	
7			1,75	Normal /ladera afuera	N 25-45 E	50 - 70 NW		Ksgd Ksgp	
8	Qda Rosales - cerro Guadalupe	7,5		Invertido / ladera adentro	N5W a N40E	40-72 SW predominante		Ksgd Ksgp Ksglt Tkgs Tic Tib	
9	cerro Guadalupe - falla de San Cristóbal	4		Normal /ladera afuera	NS piedemonte	15 - 40 W		Tkgs Tic Tib	
					NS a N40E media y alta ladera	30-45 NW		Ksgd Ksgp Ksglt Tkgm	

Figura 64. Cerros Orientales secciones de recarga 1 a 7

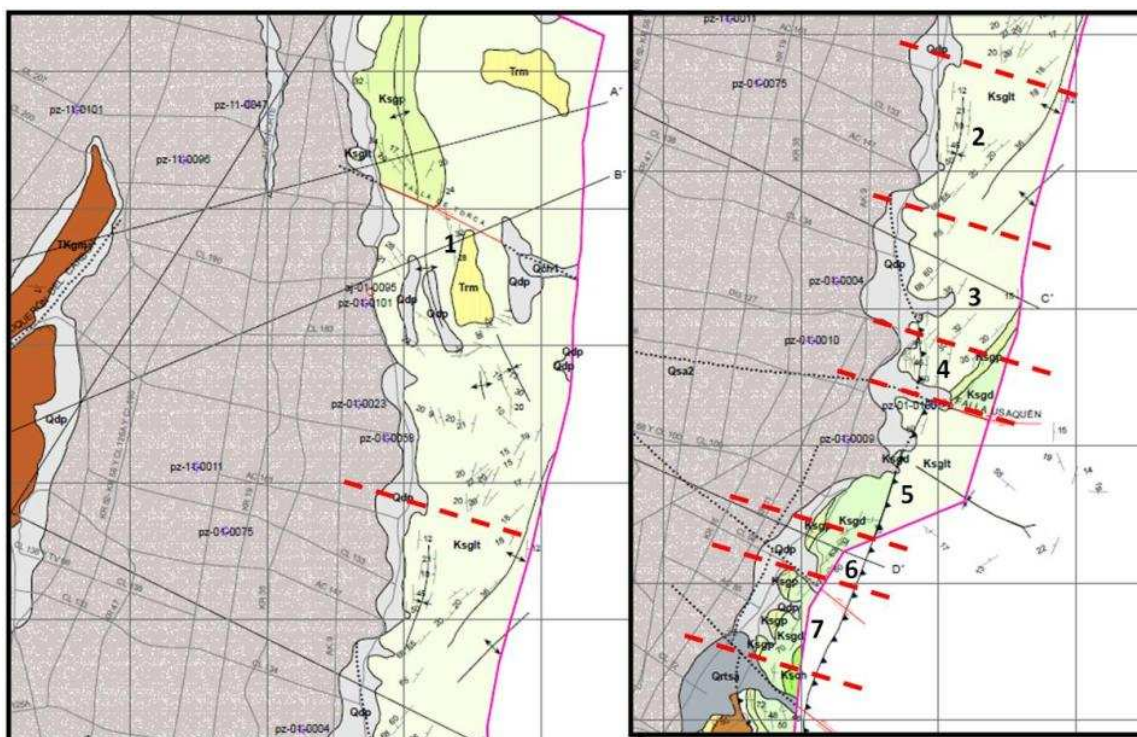


Figura 65. Cerros Orientales secciones de recarga 8 y 9

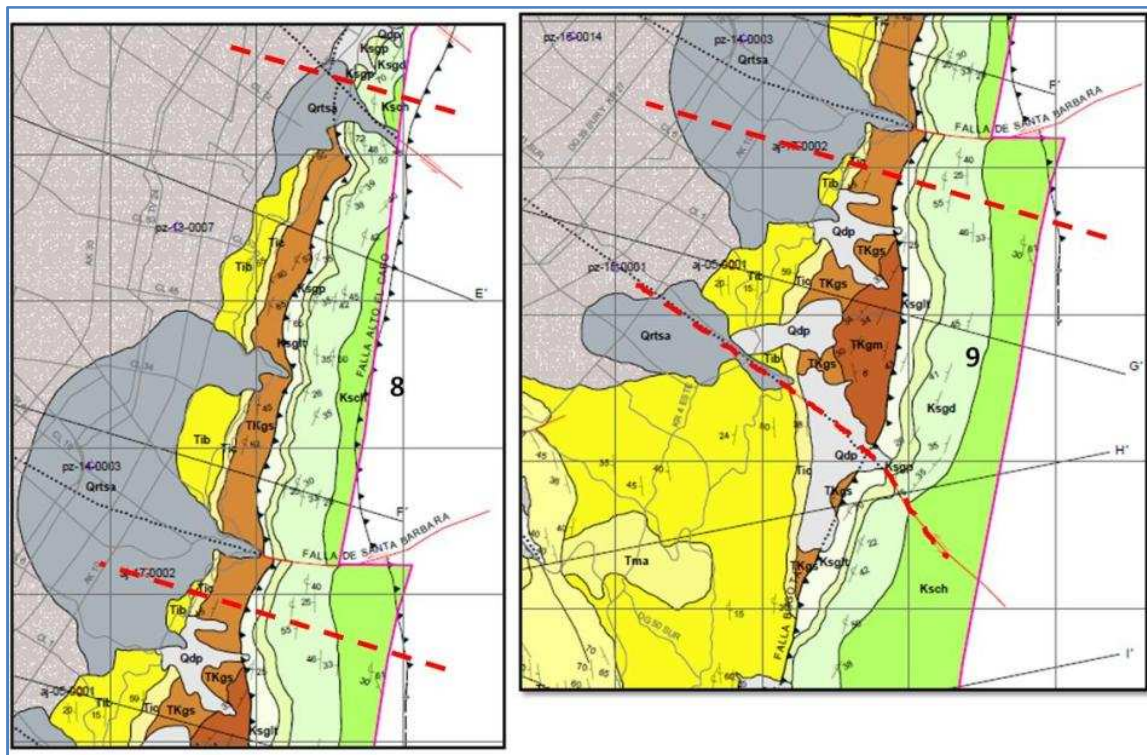


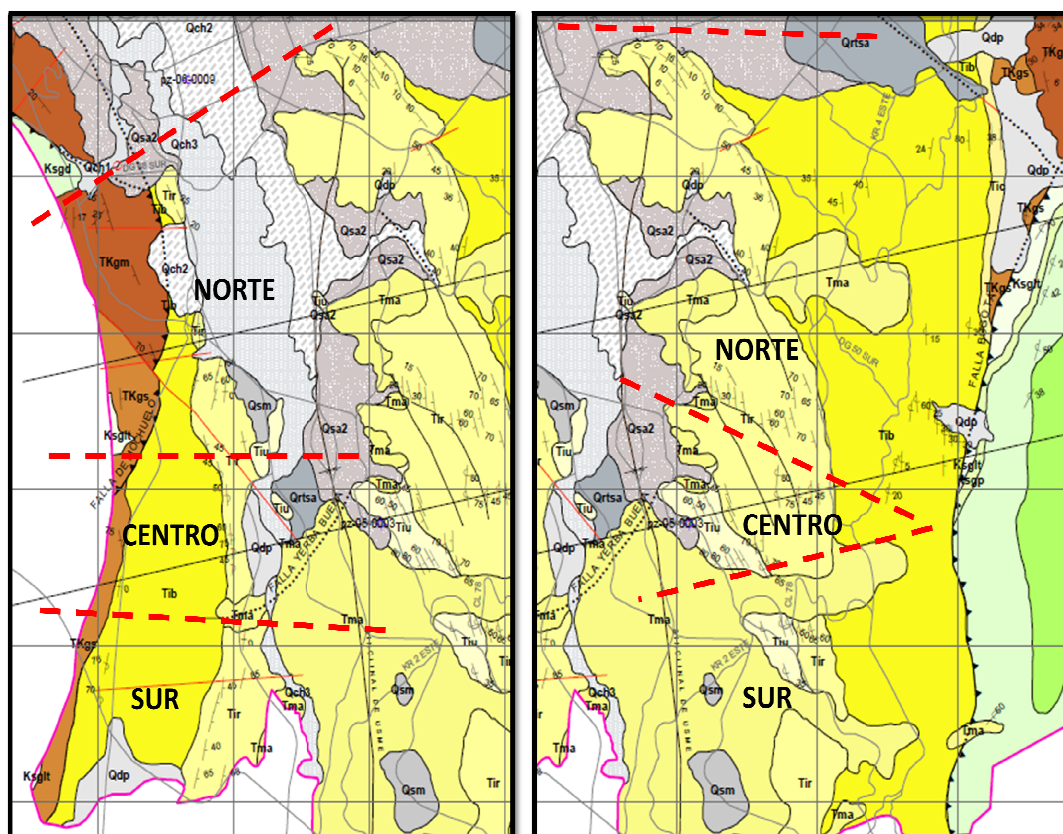
Tabla 27. Caracterización Estructural Sinclinal Usme flanco oriental

SINCLINAL DE USME (Flanco oriental entre Usme y lomas de Guacamayas)						
SECTOR	TRAMO	LONGITUD (Km)	FLANCO / LADERA	RUMBO DE LAS CAPAS	BUZAMIENTO	ROCAS EN SUPERFICIE
Norte		5	Normal / ladera afuera	N 75 W a NS	6 - 70 SW al W	Tir Tiu
central		2	Normal / ladera afuera (eje sinclinal)	NS a N20W	NS a N20W	Tir Tiu
			Invertido / ladera adentro (E falla La Fiscala)	N10W a N5E	45 - 80 NE a SE	Tir
Sur		3,5	Invertido / ladera adentro	N 20 W	35 - 65 NE	Tir Tiu

Tabla 28. Caracterización Estructural Sinclinal Usme flanco occidental

SINCLINAL DE USME (Flanco occidental entre la Qda. Limas y Usme)						
SECTOR	TRAMO	LONGITUD (Km)	FLANCO / LADERA	RUMBO DE LAS CAPAS	BUZAMIENTO	ROCAS EN SUPERFICIE
Norte		5,3	Normal / ladera afuera	N30W a N20E	20 a 75 NE a SE y verticales	Tir Tiu
central		2	Invertido / ladera adentro	N15W a N5E	45 a 75 SW a NW	Tib Tir
Sur		2,5	Normal / ladera afuera	N5E a N15E	43 SE a verticales	Tkgs Tib Tir

Figura 66. Sinclinal de Usme secciones de recarga



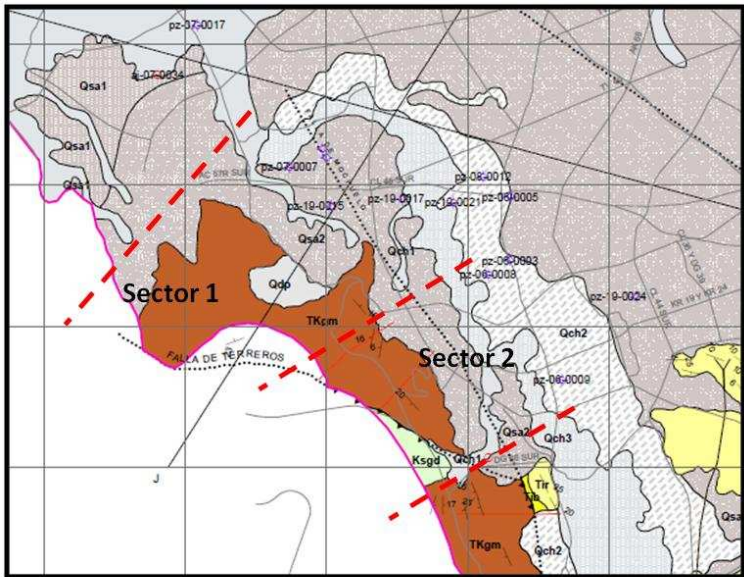
Flanco Occidental

Flanco Oriental

Tabla 29. Caracterización Estructural Noroccidente Ciudad Bolívar

NOROCCIDENTE CIUDAD BOLIVAR (Norte Qda. Limas)						
SECTOR	TRAMO	LONGITUD (Km)	FLANCO / LADERA	RUMBO DE LAS CAPAS	BUZAMIENTO	ROCAS EN SUPERFICIE
1		3,5	Normal / ladera afuera	N40W a N70E	15 NE a 23NW	Tkgm
2		2,2	Normal /ladera adentro	N45W a N15E	6 NW a 20SW	Tkgm

Figura 67. Noroccidente de Ciudad Bolívar secciones de recarga



9.2 RESERVAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN DISTRITO CAPITAL

El cálculo de las reservas del Distrito Capital se ha enfocado a los sistemas acuíferos más importantes las rocas del Grupo Guadalupe y los Sedimentos de la

Formación Sabana, Formación Chía y Formación Tunjuelo; teniendo en cuenta el rendimiento específico (Tabla 30)

Tabla 30. Valores de Rendimiento específico para diferentes materiales de la corteza terrestre.

Material	Rendimiento específico (%)				
	Walton (1970)	Johnson (1967)	Rodríguez (1984)	USGS (1987)	Sanders (1998)
Arcilla	1-10	0-5	0-3	2	
Arcilla arenosa		3-12			
Arena	10-30			22	
Arena fina		10-28	18-22		10-28
Arena media		15-32	26-28		
Arena gruesa		20-35	27-30		22-35
Arena y grava	15-25	20-35	17-21		
Arenisca	5-15				0,5-10
Arenisca semiconsolidada				6	
Grava	15-30			19	13-26
Grava fina		21-35	22-24		
Grava media		13-26	16-24		
Grava gruesa		12-28	17-22		
Caliza	0,5-5			18	
Calizas, dolomitas no carstificadas					0,5-10
Calizas, dolomitas carstificadas					5-40
Lutita	0,5-5		0-3		0,5-5
Limo		3-19			3-19
Granito				0,09	
Basalto				8	
Rocas ígneas					0,005-0,01

*Fuente Estudio Nacional de Aguas subterráneas ENA. 2010.

9.2.1. Reservas Distrito Capital

Tabla 31. Reservas en el Distrito Capital.

Unidad Geológica	Área km ²	Rendimiento específico (%)	Reservas m ³ *10 ⁶
Grupo Guadalupe	540.053	6	24303
Depósitos no consolidados	391.088	3	6453

10. VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El término vulnerabilidad a la contaminación del acuífero es usado para representar las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante (Foster, 1987).

10.1 METODOLOGÍA GOD (FOSTER 1987)¹¹

Este método relaciona tres factores para evaluar cualitativamente la vulnerabilidad de un acuífero y hace una valoración de estos factores entre cero y uno, para obtener un promedio y así el grado de vulnerabilidad (tablas 32 a 36) G : groundwater occurrence, que hace referencia al tipo de acuífero. Un valor de cero sería asignado a la no existencia de un acuífero y el otro extremo a un acuífero libre o freático, pasando por un acuífero artesano, semiconfinado y confinado. O: overal aquifer class, litología de la cobertura. Es muy importante mencionar y cualificar el tipo de material encontrado antes del acuífero ya que este tiene gran influencia en la infiltración de los contaminantes hacia el agua subterránea. Este parámetro se ubica entre valores de 0.4 hasta 1.0, dependiendo del grado de confinamiento o fracturamiento de los materiales que estén en la parte superior del nivel freático o del acuífero. D: deph, profundidad del agua subterránea. Este parámetro relaciona el recorrido que tendría que hacer un

¹¹ FOSTER and HIRATA. Determinación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Revista del (CEPIS). Organización Mundial de la Salud. Lima, Perú. 1990.

contaminante para llegar al acuífero. Esta distancia también se valora sobre rangos entre 0.4 y 1.0.

Tabla 32. Tipo de acuífero.

Tipo de acuífero	Valoración
Ninguno	0,0
Surgente	0,1
Confinado	0,2
Semi-confinado	0,4
No confinado (cubierto)	0,6
No confinado	1,0

Tabla 33. Litología de la cobertura (No Consolidado)

Litología (no consolidada)	Valoración
Arcillas lacustres y de estuarios	>0,4
Suelos residuales	0,4
Limos aluviales, loess, till glaciario	0,5
Arenas eólicas	0,6
Arenas aluviales y fluvioglaciares	0,7
Gravas coluviales	0,8
Sedimentos no consolidados	0,9

Tabla 34. Litología de la cobertura (Consolidado)

Litología (no consolidada)	Valoración
Arcillolitas lutitas	0,5
Llimolitas	0,6
Areniscas	0,7
Calizas blandas Calcáreas	0,8

Tabla 35. Profundidad del agua subterránea.

Profundidad del agua subterránea	Valoración
Cualquier profundidad	1,0
>5	0,9
5 a 20	0,8
20-50	0,7
>50	0,6

Tabla 36. Grados de vulnerabilidad GOD

Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero	GRADO
Despreciable	0,0-0,1
Baja	0,1-0,3
Media	0,3-0,5
Alta	0,5-0,7
Extrema	0,7-1,0

10.2 ANÁLISIS Y RESULTADOS DE METODOLOGÍA GOD

Con base en la recopilación bibliográfica, desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual del Distrito Capital y la metodología propuesta por Foster (1987), se elaboró el mapa de vulnerabilidad intrínseca parcial a la contaminación método GOD.

Mapa Geológico: Mapa geológico elaborado para el modelo hidrogeológico conceptual como insumo para el modelo matemático del Distrito Capital (2011) tomando como base las formaciones, depósitos no consolidados y las estructuras geológicas presentes.

Mapa Hidrogeológico: Al igual que el mapa geológico se tomo el mapa hidrogeológico a partir de la información del sistema de modelamiento hidrogeológico del Distrito Capital.

Mapa de Ocurrencia de Agua Subterránea ó Parámetro “G”: Este mapa temático propuesto en la metodología de Foster 1987, se elaboró con base en la caracterización hidrogeológica, igualmente se evaluaron las formaciones geológicas en sus condiciones de porosidad, permeabilidad y sus características como acuífero.

Mapa de Ocurrencia Litológica ó (Parámetro “O”): Este mapa temático propuesto en la metodología de Foster 1987, se elaboró con base en la geología, se tomo en cuenta la litología predominante en cada unidad geológica.

Mapa de espesor de la capa confinante ó (Parámetro “D”): Este mapa temático propuesto en la metodología de Foster 1987, se elaboró teniendo en cuenta los inventarios de puntos de agua con sus respectivos niveles para lo cual se utilizó el mapa de isopiezas del Distrito Capital elaborado para el modelo hidrogeológico conceptual de Bogotá.

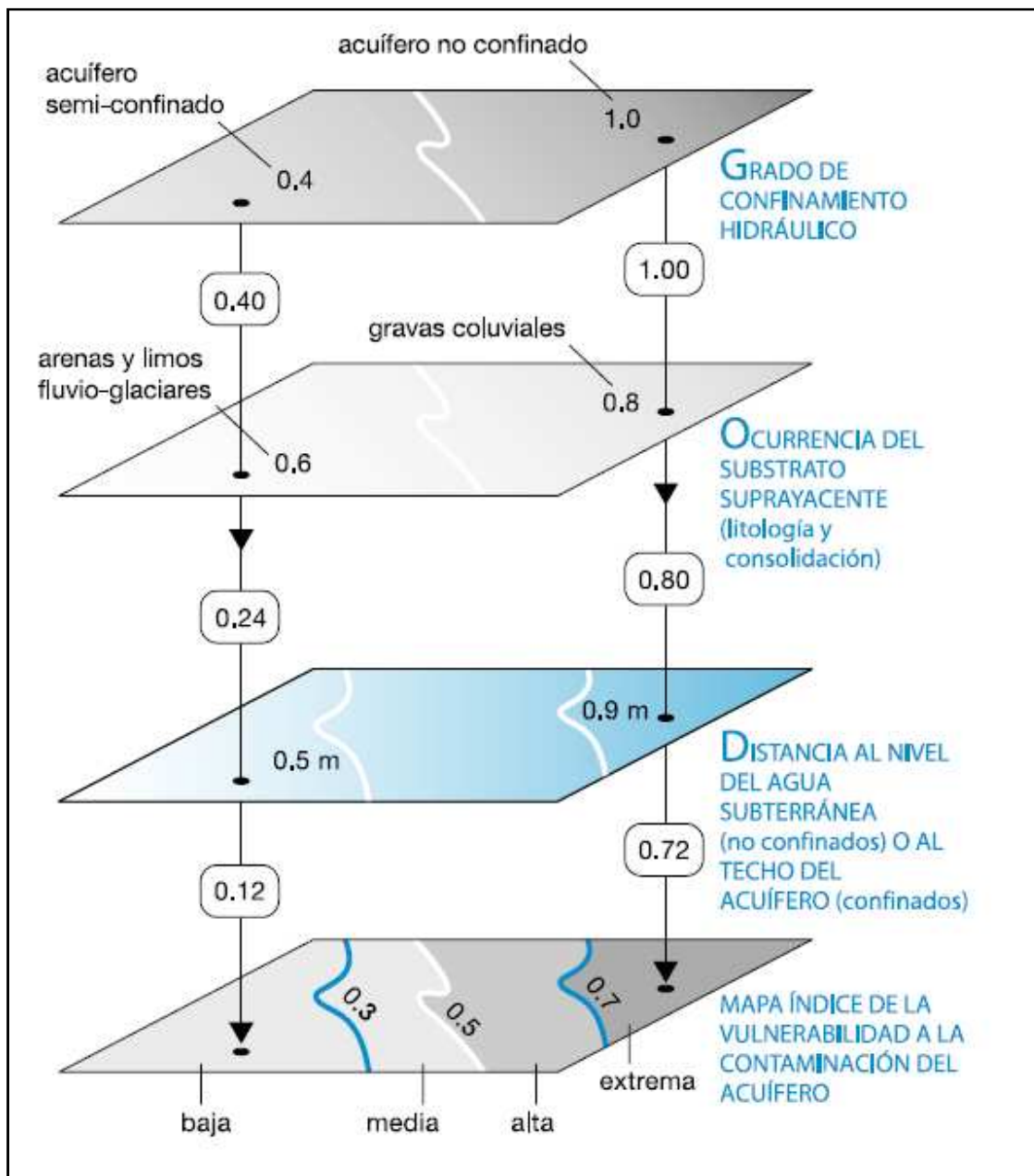
Manejo de mapas y datos según el sistema

La vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación es, en forma práctica, lo inverso de lo que en la jerga de la gestión de calidad del agua de ríos se conoce como ‘la capacidad de asimilación de contaminantes por un cuerpo receptor’. Se puede evaluar a partir de las características hidrogeológicas de la zona no saturada o de las capas confinantes suprayacentes. La definición de índices para cada una de estas características (Figura 68) permite construir un índice general de vulnerabilidad que se puede representar con facilidad en un mapa. La superposición de este mapa con otro con los resultados de los levantamientos en campo de la carga potencial contaminante sub-superficial facilita la evaluación del peligro de contaminar el agua subterránea.

Una vez elaborados los mapas temáticos, por medio del software ArcGis se superponen estas tres capas, multiplicando de esta manera sus valores de evaluación para obtener como resultado el índice de la vulnerabilidad parcial a la contaminación de los acuíferos del Distrito Capital.

Al suponer los mapas temáticos se obtienen valores del resultado de la evaluación para determinar el índice de vulnerabilidad, se agrupan los valores en los rangos propuestos en la metodología de GOD Foster (1987); generando una zonificación.

Figura 68. Esquema para la vulnerabilidad por el método GOD



En la figura 68 se presenta el esquema para la generación de un mapa de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, utilizando la metodología GOD, con base en las características hidrogeológicas de la zona no saturada o de las

capas confinantes suprayacentes. (Grupo Base del GW•MATE Stephen Foster¹ Héctor Garduño² Karin Kemper Albert Tuinhof Marcella Nanni Charles Dumars)

10.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA PARCIAL A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DEL DISTRITO CAPITAL POR LA METODOLOGÍA GOD

10.3.1. Zona de vulnerabilidad extrema

Ubicada en los flancos del sinclinal de Usme, corresponde a las zonas de recarga, donde las unidades litológicas presentes se caracterizan por ser de tipo arenoso con alto grado de porosidad y permeabilidad y que corresponden a la parte sur de la ciudad en los sectores de Yomasa, Juan Rey, San Jacinto, Guacamayas, Lomas, Usme, La Victoria, La Fiscala, Alaska y Danubio Azul de las localidades de Usme y Tunjuelito. (Ver mapa de vulnerabilidad GOD).

10.3.2. Zona de vulnerabilidad alta

Esta zona se encuentra ubicada en la parte sur oriental de la ciudad y comprende los sectores de San Blas, Vitelma, Corinto Montecarlo de la localidad de San Cristóbal; Eduardo Santos, El Guavio, Candelaria, San Diego, La merced, La Sabana, La Soledad, Magdalena, Santa Teresita, Teusaquillo, Samper Mendoza, Los Mártires y Santafé de las localidades Santafé, Los Mártires, Teusaquillo y Candelaria, esta zona también se presenta en la parte inferior de los cerros orientales de Bogotá y en los cerros de Suba. (Ver mapa de vulnerabilidad GOD).

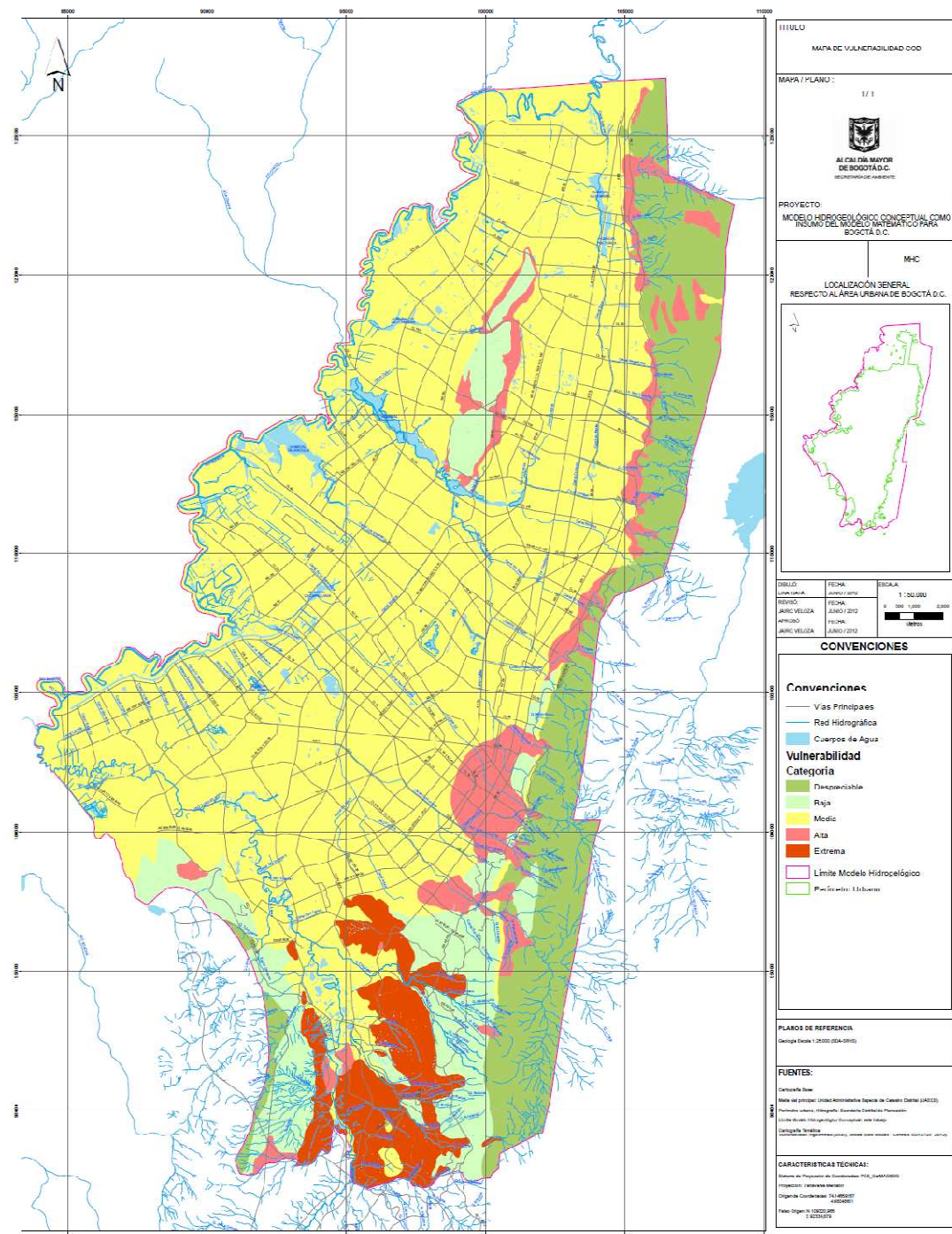
10.3.3. Zona de vulnerabilidad media

Esta zona se encuentra ubicada en la parte plana de la ciudad de norte a sur desde el río Frio hasta límites con Soacha es decir las localidades de Suba, Parte de Usaquén, Engativa, Barrios Unidos, Fontibón Kennedy, Puente Aranda, parte de Teusaquillo y Bosa. (Ver mapa de vulnerabilidad GOD).

10.3.4. Vulnerabilidad baja y despreciable

Se presenta en los cerros Orientales de Bogotá y en los cerros de Suba principalmente en las rocas que se consideran de baja permeabilidad y no presentan fracturamiento. (Ver mapa de vulnerabilidad GOD).

Figura 69. Mapa de Vulnerabilidad método GOD



10.4 METODOLOGÍA DRACTIC

La metodología DRASTIC se ajusta a los rangos de cada una de las variables de zona de interés, tomando como referencia principalmente la geología y la información multitemporal de la Secretaria Distrital de Ambiente - SDA.

10.4.1. Capacidad de atenuación de la carga contaminante (2 variables)

- Suelo, es la parte más superficial de la zona no saturada, con espesores hasta 2 metros y su importancia radica en la capacidad de atenuación de la carga contaminante.
- Zona no saturada, es el espesor comprendido entre la superficie y el nivel freático y es considerado la primera defensa del acuífero, debido al retraso que puede generar en el transito del contaminante y generar procesos de atenuación.

10.4.2. Resistencia o inaccesibilidad en sentido hidráulico (3 variables)

- Régimen hidráulico del acuífero, es el grado de confinamiento de las aguas que contienen y de acuerdo al tipo de acuífero (libre, confinado y semi-confinado).
- Profundidad del agua subterránea, es la profundidad a la cual se encuentra el agua subterránea, para los acuíferos libres es el nivel freático.
- Características litológicas, son la definición específica del material que contiene la zona no saturada y las capas confinantes, teniendo en cuenta el grado de consolidación y el tipo de litología.

10.4.3. Transporte de contaminantes (2 variables)

- Topografía, es un factor relevante en la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos, dado que las variaciones de la superficie pueden permitir la evacuación de los contaminantes.
- Recarga potencial o neta, es el volumen de agua por unidad de área que ingresa al acuífero durante un periodo de tiempo.

El método DRASTIC (su nombre viene del inglés por cada una de las variables utilizadas en la metodología), para determinar la vulnerabilidad intrínseca, se define por:

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

$$iV = (Dr * Dw) + (Rr * Rw) + (Ar * Aw) + (Sr * Sw) + (Tr * Tw) + (Ir * Iw) + (Cr * Cw)$$

iV: Índice de vulnerabilidad

r: Factor de clasificación o valoración

w: Factor de ponderación

10.4.4. Generación gráfica de variables

se utilizó el software ArcGis, para la generación y estructuración de coberturas de cada una de las variables, elaborando un shape en formato raster, tomando como referencia principal el límite del modelo hidrogeológico de la SDA; así mismo se determinaron los rangos y las valoraciones de los parámetros de la metodología, de acuerdo al conocimiento de la zona de estudio. A continuación se presenta el proceso realizado por cada una de las variables de la metodología DRASTIC:

➤ **D: Profundidad (m)**

Inicialmente se analizó y determinó el método de interpolación más adecuado para la zona de estudio, comparando las diferentes metodologías de interpolación de datos usadas en ArcGis (kriging, natural neighbor, spline e IDW), siendo el IDW el más adecuado para el análisis de datos de profundidad (niveles estáticos) por época climática vs año, generando shapes de puntos, los cuales se procedieron, de forma individual, a interpolar por este método, generando capas tipo raster (con tamaños de celdas de 30 metros), las cuales se promediaron por año generando dos principales coberturas llamadas: prom_lluvia_Dr y prom_seca_Dr, siendo estas las primeras variables de la metodología a desarrollar.

Los rangos a utilizar para esta variable de acuerdo al método empleado, se describen en la siguiente tabla:

Tabla 37. Factor de valoración de la variable profundidad

D: PROFUNDIDAD (m)	Dr
0 - 1,5	10
1,5 - 4,6	9
4,6 - 9,1	7
9,1 - 15,2	5
15,2 - 22,9	3
22,9 - 30,5	2
> 30,5	1

*Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

➤ **R: Recarga (mm)**

Para esta variable se adecuaron los rangos, de acuerdo a la zona de estudio y a la experiencia desarrollada por la SDA, calculando una recarga potencial en formato raster; por lo tanto en el siguiente cuadro se especifican los valores y los rangos para el área de interés:

Tabla 38. Factor de valoración de la variable recarga potencial

R: RECARGA POTENCIAL (mm)	Rr
< -200	4
-199 a -100	3
-100 a 0	1
0 a 100	2
100 a 200	3
200 a 300	4
300 a 400	5
400 a 500	6
500 a 600	7
> 600	8

*Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente. Sistema de Modelamiento Hidrogeológico para el Distrito Capital. 2012

➤ **A: Litología del Acuífero**

Para esta variable también se adecuaron los valores típicos, de acuerdo los rangos de la metodología, a la zona de estudio y a la experiencia desarrollada por la SDA, en la elaboración del Sistema de Modelamiento Hidrogeológico para el Distrito Capital, partiendo de la geología desarrollada a escala 1:25.000 y generando una cobertura tipo raster; por lo tanto en el siguiente cuadro se especifican los valores y los rangos para el área de interés:

Tabla 39. Factor de valoración de la variable litología del acuífero

A: LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO*	Ar
Lutita masiva	1 - 3
Arenas y gravas de origen glacial	4 - 6
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 - 9
Arenisca masiva	4 - 9
Arena o grava	4 - 9

*Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

➤ **S: Tipo de Suelo**

Se tuvieron en cuenta los valores y las descripciones de la variable tipo de suelo, de acuerdo a la metodología DRASTIC y al área de estudio para generar una cobertura tipo raster; valores que se describen en la siguiente tabla:

Tabla 40. Factor de valoración de la variable tipo de suelo

S: TIPO DE SUELO	Sr
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compacto	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol-cieno	2
Arcilla no compacta y no agregada	1

*Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

➤ **T: Pendiente (%)**

Es la pendiente del terreno en forma porcentual, de acuerdo a la topografía de la zona, teniendo en cuenta la valoración asignada en la metodología, lo que generó una cobertura tipo raster; rangos y valores que se describen en la siguiente tabla:

Tabla 41. Factor de valoración de la variable tipo de suelo

T: PENDIENTE (%)	Tr
0 - 2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
> 18	1

*Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

➤ **I: Naturaleza de la Zona No Saturada**

Para esta variable se adecuaron los valores típicos, los rangos según la metodología, de acuerdo a la zona de estudio y a la experiencia desarrollada por la SDA, partiendo de la geología desarrollada a escala 1:25.000 y generando una cobertura tipo raster; por lo tanto en el siguiente cuadro se especifican los valores y los rangos para el área de interés:

Tabla 42. Factor de valoración de la variable naturaleza de la zona no saturada

I: NATURALEZA DE ZONA NO SATURADA	Ir
Capa confinante	1
Arcilla - limos	2 - 6
Lutita	2 - 5
Liditas	2 - 6
Arenisca	4 - 8
Secuencia de arenas y arcillas	2 - 6
Arena o grava	4 - 8
Secuencia de areniscas, arcillolitas y lutitas	4 - 8

*Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente. Sistema de Modelamiento Hidrogeológico para el Distrito Capital. 2012

➤ **C: Conductividad Hidráulica (m/día)**

Se tomaron en cuenta los valores y los rangos de la variables conductividad hidráulica, de acuerdo a la metodología planteada y al área de estudio, generando una cobertura tipo raster, pero teniendo en cuenta la experiencia adquirida en el desarrollo del Sistema de Modelamiento Hidrogeológico para el Distrito Capital, se considera que existe una sobreestimación de este parámetro dentro de la metodología y se sugiere seguirlo analizando; los valores se describen en la siguiente tabla:

Tabla 43. Factor de valoración de la variable conductividad hidráulica

C: CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (m/día)	Cr
0,04 - 4,08	1
4,08 - 12,22	2
12,22 - 28,55	3
28,55 - 40,75	6
40,75 - 81,49	8

C: CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (m/día)	Cr
> 81,49	10

*Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

10.4.5. Desarrollo de la Metodología DRASTIC

Posterior a regionalizar cada una de las variables en el software ArcGis, generando un total de 8 coberturas tipo raster, esto debido a que la metodología plantea 7 variables pero para el presente estudio se incluyó la variable profundidad dos veces, una para la temporada de alta precipitación y la otra para la temporada de baja precipitación, por lo tanto se procede a plantear la ecuación del método DRASTIC, que viene definida por:

$$iV = (Dr * Dw) + (Rr * Rw) + (Ar * Aw) + (Sr * Sw) + (Tr * Tw) + (Ir * Iw) + (Cr * Cw)$$

Para los factores de ponderación según la metodología, se tomaron los datos para el tipo de contaminante no pesticida, según el comportamiento del área de estudio, los cuales vienen definidos en la siguiente tabla:

Tabla 44. Factores de ponderación para el método DRASTIC

FACTORES DE PONDERACIÓN							
TIPO DE CONTAMINANTE	D_w	R_w	A_w	S_w	T_w	I_w	C_w
No Pesticida	5	4	3	2	1	5	3

*Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

Determinando así dos planos a escala 1:50.000, con datos estadísticos para las temporadas de alta y baja precipitación, a saber:

Tabla 45. Estadísticas de la variable profundidad por temporada de precipitación

TEMPORADA DE ALTA PRECIPITACIÓN		TEMPORADA DE BAJA PRECIPITACIÓN	
ESTADÍSTICO	VALOR	ESTADÍSTICO	VALOR
Valor Mínimo	34	Valor Mínimo	34
Valor Máximo	142	Valor Máximo	147
Media	68,64	Media	69,39
Desviación Estándar	17,332	Desviación Estándar	17,948

Lo que conlleva a establecer que para el área de interés, el valor máximo de vulnerabilidad es de 147, lo que considera la metodología una zona de vulnerabilidad moderada, de acuerdo a los grados de vulnerabilidad planteados por la metodología, por tanto se establece que para el Distrito Capital se cuentan con tres grados de vulnerabilidad según la presenta tabla:

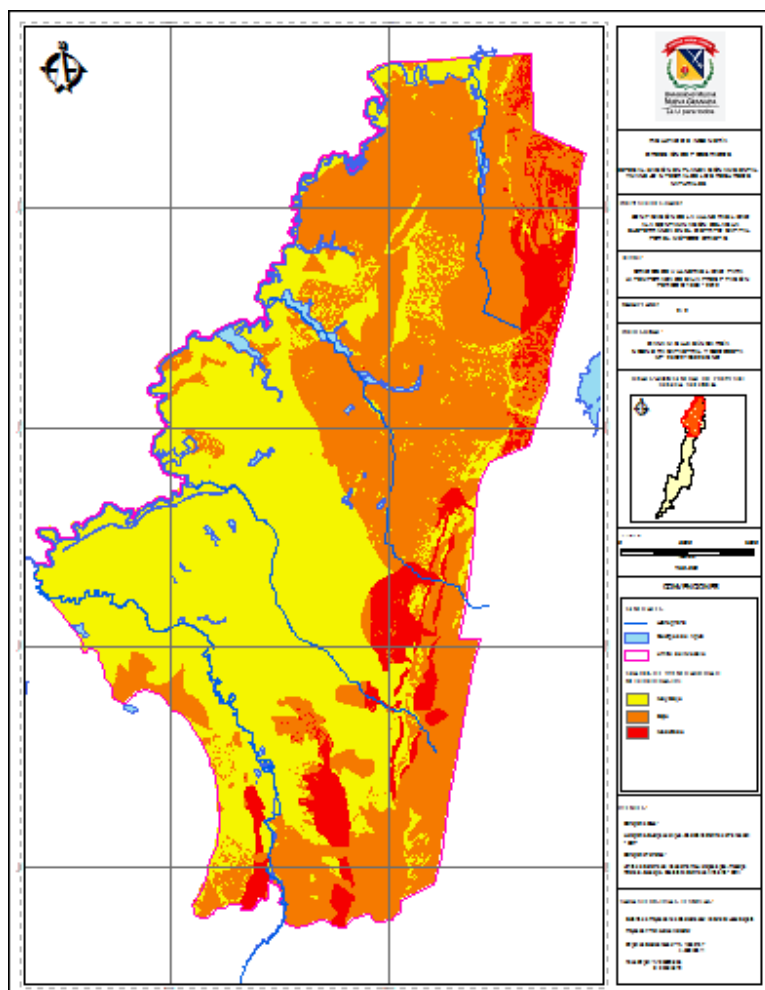
Tabla 46. Grados de Vulnerabilidad - Método DRASTIC

VULNERABILIDAD GENERAL	
GRADO	VULNERABILIDAD
Muy Bajo	23 - 64
Bajo	65 - 105
Moderado	106 - 146
Alto	147 - 187
Muy Alto	188 - 230

*Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

10.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS POR LA METODOLOGÍA DRASTIC

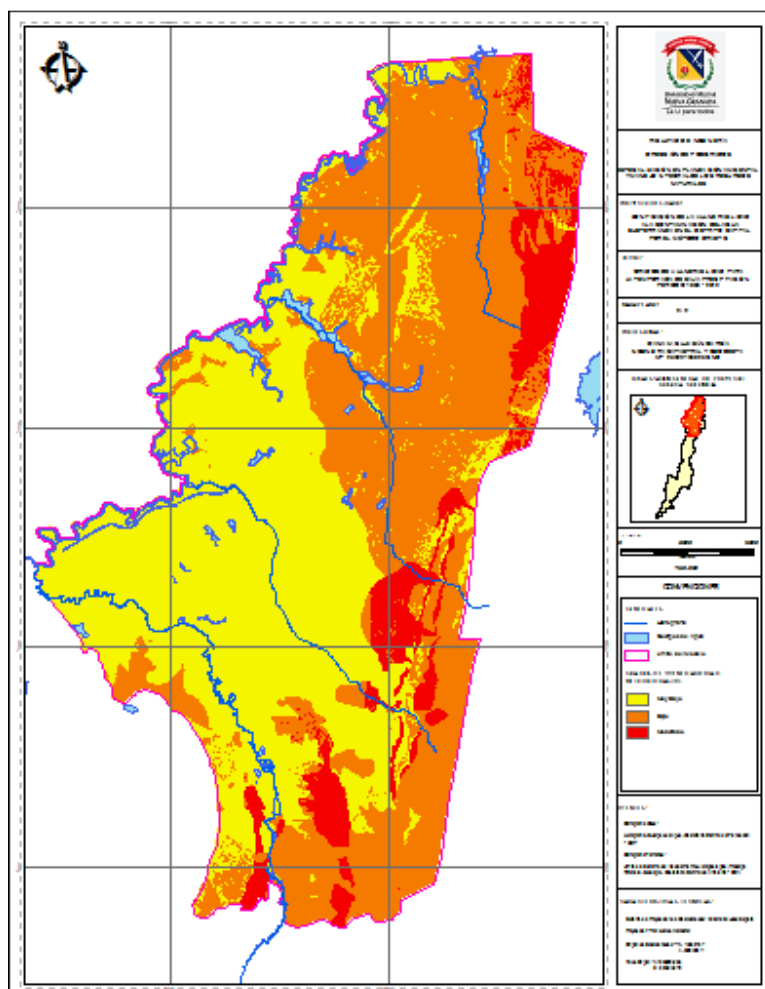
10.5.1. Temporada de alta precipitación



Como se visualiza en el mapa de zonificación para la temporada de alta precipitación, se determinaron tres grados de vulnerabilidad en el área de estudio, los cuales vienen definidos por: vulnerabilidad muy baja (valores de 23-64), identificada principalmente en la zona sur-occidental del Distrito Capital, que comprende en totalidad las localidades de Fontibón, Puente Aranda, Kennedy,

Bosa, Antonio Nariño y Tunjuelito; y parte importante de las localidades de Rafael Uribe Uribe, Los Mártires y Teusaquillo. Con una vulnerabilidad baja (valores de 65-105) en la zona nor-occidental y parte sur-oriental, donde se encuentran las localidades de Suba y Barrios Unidos, parte de Engativá, Usaquén, Teusaquillo, Santa Fe y San Cristóbal; y con una vulnerabilidad moderada (valores de 106-147) distribuida en las zonas nor-oriental y sur oriental, donde se encuentra la localidad de Candelaria y en pequeños porcentajes las localidades de Usaquén, Los Mártires, Teusaquillo, Usme y Ciudad Bolívar, estas últimas zonas son las que se deben plantear como prioritarias en la gestión a realizar en el programa de Evaluación, control y seguimiento que realiza la Secretaria Distrital de Ambiente en su jurisdicción.

10.5.2. Temporada de baja precipitación



Equivalente al mapa anterior, se presenta la zonificación para la temporada de baja precipitación, determinando tres grados de vulnerabilidad en el área de estudio, iguales a las definidas anteriormente: muy baja (valores de 23-64), donde las localidades identificadas son las mismas que en la temporada de alta precipitación, con una pequeña ampliación en la localidad de Engativá hacia el nor-occidente. Con una vulnerabilidad baja (valores de 65-105) se identifican las mismas localidades del mapa anterior; y con una vulnerabilidad moderada (valores de 106-147) se encuentra la localidad de Candelaria y los porcentajes de la

localidad de Usaquén aumentan hacia el nor-orienté del Distrito Capital, siendo estas últimas zonas las que se deben plantear como prioritarias en la gestión a realizar en el programa de Evaluación, control y seguimiento que realiza la Secretaría Distrital de Ambiente en su jurisdicción

Según lo anterior las las dos temporadas de baja y alta precipitación la vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico subterráneo (DRASTIC) presenta las mismas condiciones de vulnerabilidad por lo tanto se ha tomado un solo mapa de vulnerabilidad por el método DRASTIC

11. DIAGNOSTICO DEL MODELO MATEMÁTICO COMPUTACIONAL

El modelo matemático computacional fue desarrollado en dos estudios:

- Elaboración del modelo hidrogeológico para los acuíferos de Santa Fe de Bogotá, D.C. modelo matemático PNUD DAMA.1999.
- Brindar apoyo técnico y actualizar herramientas para la regulación del aprovechamiento de las aguas subterráneas en Bogotá contrato inter-administrativo UN-DAMA-190/2005

11.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio modelada por el DAMA y según el informe de 1999, comprende los siguientes límites geográficos: al Oriente El Río Bogotá, al Occidente el Río Teusacá, al Norte la confluencia de los Ríos Teusacá y Bogotá, y al Sur los Cerros de Quiba y Cazuca. Pero la necesidad de tener un marco regional más amplio que permitiera obtener una visualización completa de los principales aspectos de la cuenca, se tomó una zona mucho más grande dentro de las siguientes coordenadas planas Gauss IGAC:

N1: 988.000m E1: 978.000m

N2: 1'044.000m E2: 1'017.000m

El área total del modelo es de 2184 Km². El modelo cubre el área limitada por las cordilleras Occidental y Central en su parte plana (coordenadas IGAC 1'045.000m. E. a 1'099.000m. Origen Occidente), por el sur el límite es la confluencia de estas

dos cordilleras (coordenada 820.000m. N.) y por el norte la coordenada 869.200m. N. Esta área es mayor que la de interés del estudio y se establece con el propósito de fijar fronteras geológicas de no-flujo.

11.2 ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO PARA LOS ACUÍFEROS DE SANTA FE DE BOGOTÁ, D.C. MODELO MATEMÁTICO PNUD DAMA

La discretización matemática del modelo hidrogeológico conceptual se realizó de la siguiente manera:

- Definición de 5 capas a las cuales se les incorporó la topografía y morfología obtenidas de las secciones transversales realizadas previamente.
- La geología, de superficie como de subsuelo, se definió a través de diferentes valores de conductividad hidráulica asignados previamente para cada una de las formaciones caracterizadas.
- Se incorporó una base topográfica digital, la cual fue elaborada a partir de las bases cartográficas existentes en el IGAC y la EAAB.
- Se escogieron los ríos más importantes, que pueden interactuar de manera directa sobre el comportamiento de la cuenca hidrogeológica tales como: el Río Bogotá y el Río Tunjuelito; para efectuar esta labor se utilizaron levantamientos topográficos detallados suministrados por la EAAB, los cuales sirvieron para definir la forma del lecho de los cauces.
- Se incorporaron los mapas de Infiltración Real y Evapotranspiración Potencial, elaborados en la primera fase, como variables hidrológicas
- La malla de cálculo numérico se definió de tal forma que fuera más densa en aquellos sectores de mayor interés como son los centros existentes de bombeo.
- Se escogieron como límites del modelo las divisorias de agua existentes, en los cerros circundantes

- Se definieron los parámetros geohidráulicos (conductividad hidráulica, coeficientes de almacenamiento, porosidad etc.) tomándolos inicialmente de los datos existentes.

Para el sistema acuífero de Santa Fe de Bogotá, la calibración del modelo final se realizó teniendo en cuenta la topografía natural del terreno, tal que la tabla de agua estuviera muy cerca de la superficie, y los acuíferos profundos con presiones artesanas entre 20 y 60 m por encima de la superficie. También se tuvo en cuenta datos fragmentarios de las primeras perforaciones realizadas en la Sabana de Bogotá. Lo anterior debido a la falta de una red de pozos de monitoreo en el área.

Las direcciones de flujo obtenidas se correlacionan con el modelo hidrogeológico elaborado previamente.

La velocidad máxima calculada fue de 0.0082 m/día la cual concuerda con los datos reportados hasta la fecha.

El análisis de sensibilidad se hizo para las variables de mayor incidencia sobre el modelo como son: conductividad hidráulica y evapotranspiración. Adicionalmente se realizaron simulaciones con el fin de observar la incidencia de la permeabilidad de las fallas sobre los resultados del modelo.

Del balance del modelo se concluye que la Recarga Media hacia los Acuíferos es del orden de 1 m³/s (1019 l/s), valor menor que el estimado en estudios anteriores (del orden de 3 m³/s).

11.3 PROYECTO: BRINDAR APOYO TÉCNICO Y ACTUALIZAR HERRAMIENTAS PARA LA REGULACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN BOGOTÁ CONTRATO INTER-ADMINISTRATIVO UN-DAMA-190/2005

En esta fase del proyecto se adelantaron la revisión y análisis del modelo computacional elaborado para el DAMA en 1999, la información utilizada y sus productos, además, una actualización del modelo de flujo utilizando la información conseguida dentro del desarrollo del convenio.

El modelo no sufrió cambios en la discretización en planta ni en perfil, tampoco los límites ni el área modelada, se modificaron las propiedades del relleno cuaternario, recarga, evapotranspiración, pozos de bombeo y observación.

Como era de esperarse, la actualización del modelo matemático computacional no conduce a un modelo aprovechable para efectos de evaluación y pronósticos.

Por esta razón, recomienda formular un nuevo modelo computacional que involucre solamente los depósitos cuaternarios debido a que se hallan delimitados lateralmente y en profundidad por depósitos arcillosos y por las formaciones geológicas circundantes, consideradas de muy baja permeabilidad.

➤ *Este modelo recomendó:*

Adelantar por parte del DAMA una campaña para la determinación de las propiedades hidráulicas de los acuíferos, al menos en los sitios de mayor interés involucrando pozos de observación, esto con el propósito de conseguir un modelamiento de dichas áreas con todos los parámetros medidos.

Utilizar información topográfica más detallada para toda el área con el propósito de mejorar la calibración y por lo tanto la precisión de sus predicciones. Especialmente se deben tener todos los pozos nivelados con equipos de precisión y un detallado conocimiento del diseño de los pozos, que junto con el modelo geológico más detallado permita localizar correctamente los lentes acuíferos.

La información de los cauces utilizados en el modelo es poco confiable, principalmente porque las cotas de los niveles de agua no son coherentes con la topografía, se recomienda hacer mediciones de estos datos dentro del área del modelo, así como pruebas sobre los materiales del lecho para determinar su capacidad de intercambio de agua con los acuíferos.

11.4 CONSIDERACIONES

El modelo matemático computacional se desarrollo con información geológica regional (INGEOMINAS 2000) a escala 1:100.000 y con algunos parámetros estimados, por lo tanto el modelo matemático se debe realizar con la geología e

hidrogeología que se ha levantado y actualizado a escala 1:25.000, con la cual cuenta actualmente el Distrito.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Hidrológicamente el área de estudio tiene un régimen de lluvias bimodal con valores máximos en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre, y un valor promedio del orden de 800 mm/año, lo que representa gran importancia para la recarga potencial de los acuíferos a nivel regional.

La recarga potencial a partir de datos hidroclimatológicos es del orden de 70 mm/año obtenida mediante el balance de masas.

La recarga potencial mediante el mapa de isorecarga potencial es del orden de 157 mm/año, teniendo en cuenta que en el sector de Tunjuelo se presenta una entrada de agua de otra cuenca.

La recarga potencial mediante el método de Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1988) es del orden de 143 mm/año.

Las zonas de mayor recarga se presentan hacia los cerros orientales, especialmente hacia las partes altas de las cuencas de los ríos Fucha y Tunjuelo donde los valores se superan los 190 mm/año.

El volumen de la recarga potencial estimada para formaciones Arenisca Dura, Labor Tierna y Plaeners es del orden de 18.332.841,3 m³/año dentro del área de la jurisdicción de la Secretaría Distrital de Ambiente.

El volumen de la recarga potencial estimada para los depósitos cuaternarios es del orden de 39.108.856,8 m³/año dentro del área de la jurisdicción de la Secretaría Distrital de Ambiente.

Las reservas del recurso hídrico subterráneo en las unidades de Grupo Guadalupe son del orden de 24303*10⁶ m³ y de 6453*10⁶ m³ para los depósitos no consolidados en jurisdicción de la Secretaría Distrital de Ambiente.

En el sector de Puente Aranda del año 2001 al 2010 se han venido presentando descensos del orden de 5 a 10 metros aproximadamente, debido a que las captaciones han aumentado las fluctuaciones en las zona más próximas al complejo industrial de Bogotá, como sucede en el sector de Kennedy que desde 1999 a 2010 se han presentado descensos del orden de 20 metros y en el sector de Fontibón descensos del orden de 12 metros con algunos ascensos en los últimos años. El sector norte de Bogotá no presenta mayores fluctuaciones y se evidencian comportamientos estables, cabe notar que entre la calle 127 y la 180 se presentan pozos artesianos con alturas del orden de 2 metros que captan el acuífero cautivo del Cretácico.

La dirección de flujo de recurso hídrico subterráneo obedece principalmente a condiciones antrópicas; el agua subterránea tiene una dirección general de Este a Oeste es decir de los cerros orientales hacia el río Bogotá.

Se programo una campaña de niveles estáticos en el mes de noviembre y diciembre de 2012, en los sectores de Puente Aranda, Kennedy y Fontibón, para verificar las condiciones de movimiento, dirección y descensos de niveles del agua subterránea del acuífero de la formación Sabana, para lo cual se ha desarrollado el mapa de isopiezas del área en mención; se observa una dirección de flujo preferencial hacia el sector donde se ubican los pozos con mayor extracción de agua subterránea en la zona industrial de la ciudad, de tal manera que en esta área no es recomendable no otorgar nuevas concesiones de aguas subterráneas.

El comportamiento de los iones en las unidades geológicas evaluadas en el área de estudio se puede observar que los bicarbonatos presentan mayor abundancia, como es normal en todo tipo de aguas subterránea. Los cloruros y sodio sobresalen de los demás iones lo que confirma la tendencia de un flujo principalmente regional desde los cerros orientales y del sur de Bogotá hacia el grupo Guadalupe y el occidente de la ciudad.

La transmisividad en el acuífero cretácico Guadalupe es del orden de 5.4 a 1064 m²/día, la transmisividad en el acuífero cuaternario Formación Sabana es del orden de 1.37 a 373 m²/día y la transmisividad en el acuífero cuaternario de la formación Chía – Río Tunjuelo es del orden de 315 a 1432 m²/día.

La conductividad hidráulica en el acuífero cretácico Guadalupe es del orden de 0.7 a 59.11 m/día, la conductividad hidráulica en el acuífero cuaternario Formación Sabana es del orden de 0.54 a 9.11 m/día y la conductividad hidráulica en el acuífero cuaternario de la formación Chía – Río Tunjuelo es del orden de 17.5 a 43.57 m/día.

La capacidad específica en el acuífero cretácico Guadalupe es del orden de 0.021 a 4.13 l/seg/m, la capacidad específica en el acuífero cuaternario Formación Sabana es del orden de 0.005 a 4.54 l/seg/m y la capacidad específica en el acuífero cuaternario de la formación Chía – Río Tunjuelo es del orden de 2.35 a 8.06 l/seg/m.

El coeficiente de almacenamiento en el acuífero cuaternario Formación Sabana es del orden de 1.1×10^{-4} a 8×10^{-5} y el coeficiente de almacenamiento en el acuífero cuaternario de la formación Chía – Río Tunjuelo es del orden de 2.62×10^{-3} .

La muestra de Deuterio y Oxígeno 18 del humedal Juan Amarillo deja ver claramente que son aguas sometidas a evaporación durante decenas de años; el humedal Santa María del Lago presenta menor evaporación y una posible interacción con agua subterránea de flujo local; el humedal Tibanica y la represa la Regadera son esencialmente alimentados en gran proporción por precipitación local y fuentes superficiales, no evidencian conexiones hidráulicas con el agua subterránea; los humedales de Guymaral y Torca presentan una interconexión agua superficial – agua lluvia, alimentados principalmente de agua subterránea con un flujo intermedio a regional; el humedal Conejera presenta interconexión con fuentes superficiales y relación agua subterránea y los humedales de Córdoba y Jaboque son alimentados principalmente por agua subterránea con un flujo de carácter regional.

La vulnerabilidad extrema se ubicada en los flancos del sinclinal de Usme, corresponde a las zonas de recarga, donde las unidades litológicas presentes se caracterizan por ser de tipo arenoso con alto grado de porosidad y permeabilidad y que corresponden a la parte sur de la ciudad en los sectores de Yomasa, Juan Rey, San Jacinto, Guacamayas, Lomas, Usme, La Victoria, La Fiscala, Alaska y Danubio Azul de las localidades de Usme y Tunjuelito. La Zona de vulnerabilidad alta se encuentra ubicada en la parte sur oriental de la ciudad y comprende los sectores de San Blas, Vitelma, Corinto Montecarlo de la localidad de San

Cristóbal; Eduardo Santos, El Guavio, Candelaria, San Diego, La merced, La Sabana, La Soledad, Magdalena, Santa Teresita, Teusaquillo, Samper Mendoza, Los Mártires y Santafé de las localidades Santafé, Los Mártires, Teusaquillo y Candelaria, esta zona también se presenta en la parte inferior de los cerros orientales de Bogotá y en los cerros de Suba. La zona de vulnerabilidad media se encuentra ubicada en la parte plana de la ciudad de norte a sur desde el río Frio hasta límites con Soacha es decir las localidades de Suba, Parte de Usaquén, Engativa, Barrios Unidos, Fontibón Kennedy, Puente Aranda, parte de Teusaquillo y Bosa. La Vulnerabilidad baja y despreciable se presenta en los cerros Orientales de Bogotá y en los cerros de Suba principalmente en las rocas que se consideran de baja permeabilidad y no presentan fracturamiento. Aunque es importante aclarar que esta zona debe ser declarada como zona de protección ambiental por ser una área de recarga tanto para la cuenda de Bogotá como para la cuenca de la Orinoquia.

Se recomienda investigar más a fondo las conexiones agua superficial agua subterránea.

Se recomienda investigar el espesor de los depósitos no consolidados y el límite con rocas de cretáceo. (Métodos directos e indirectos)

Se recomienda realizar el modelo matemático computacional.

Se recomienda seguir actualizando el sistema de modelamiento hidrogeológico y desarrollo del modelo conceptual a nivel local y regional (Sabana de Bogotá y jurisdicción CAR)

BIBLIOGRAFÍA

- BANCO MUNDIAL. Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y autoridades ambientales. Año 2003.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA – CAR. Inclusión del Balance Hídrico, Implementación del Modelo Hidrogeológico y Capacitación en Modflow SIAM. Convocatoria Pública No. 107 de 2005. 2006.
- CAR Y EL INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA - INGEOMINAS. Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá. Bogotá D.C. 1989.
- _____. Aplicación de Técnicas Isotópicas en los Estudios de Aguas Subterráneas Informe de Caracterización Geoquímica e Isotópica de los Acuíferos de la Cuenca Alta del Río Bogotá – Col 8019. 2001.
- EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ – EAAB. Estudio sobre el Suministro de Agua Sostenible para la Ciudad de Bogotá y las Áreas vecinas basadas en el Manejo de los Recursos de Agua Integrados, en la República de Colombia. Periodo de Estudio: Noviembre de 2007 - Febrero 2009.
- HEIDELBERG ACADEMY OF SCIENCES AND HUMANITIES WSM. Disponible en www.world-stress-map.org.

- HIDROGEOCOL, EL DEPARTAMENTO TÉCNICO ADMINISTRATIVO DEL MEDIO AMBIENTE – DAMA (Actualmente Secretaria Distrital de Ambiente) Y EL PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO (PNUD/COL/96/023). Elaboración del Modelo Hidrogeológico para los Acuíferos de Santa Fe de Bogotá, D.C. 1999.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA - INGEOMINAS. Estudio Hidrogeológico de las Zonas de Soacha y Ciudad Bolívar. Informe 2085. Bogotá D.C. 1988.
- _____. Estudio Hidrogeológico en la Periferia de Santafé de Bogotá y en Algunas Poblaciones Cercanas para Abastecimiento de Agua. Informe 2275. Bogotá D.C. 1996.
- _____. Hidrogeología de la Cuenca del Río Teusacá, Sabana de Bogotá. Informe 2220. 1993.
- _____. Hidrogeología de las Cuencas de los Ríos Muña, Soacha y Tunjuelo. 1992.
- _____. Informe Técnico de Perforación: Pozo Escuela General Santander. Proyecto C98F03. 1999.
- _____. Inventario de Datos Hidrogeológicos en la Zona de Bosa, Soacha y Sibate. Informe 2011. Bogotá D.C. 1987.
- _____. Mapa de anomalía gravimétrica Bouguer total de la Sabana de Bogotá. 2004.
- _____. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá. Bogotá D.C. 2000 – 2002.

- _____. Perforación y Construcción de Pozos en Sibate, Muña y Soacha. Informe 2267. 1996.
- _____. Resultados de la Perforación, Construcción y Análisis del Piezómetro 227-IV D-104. 2002.
- JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY – JICA Y EAAB. Estudio del Desarrollo Sostenible del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá. Febrero de 2003.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Año 2010
- RESTREPO M, Luis E. Adquirir los servicios de un especialista para apoyar la Formulación del Modelo Hidrogeológico y la red del Monitoreo del Recurso Hídrico Subterráneo. Contrato 761- 2009. 2009.
- RODRÍGUEZ, Cesar. Línea meteórica isotópica de Colombia. Meteorol. Colomb.8: 43-51. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. 2004.
- SACRAMENTO STATE UNIVERSITY. Disponible en www.csus.edu.
- UNIVERSIDAD DE LEEDS. Mapa de anomalías magnéticas.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA Y EL DAMA. Brindar Apoyo Técnico y Actualizar Herramientas para la Regulación del Aprovechamiento de las Aguas Subterráneas en Bogotá. Contrato Inter-administrativo No. 190/2005. 2006.

- VAN DER HAMMEN, Thomas. Servicio Geológico Nacional. El Salto de Tequendama. Informe 1301. Julio de 1958.

ANEXOS

A. Listado de mapas físicos entregados con el presente Informe

Tema	Nombre del Mapa	No. De Mapa	Escala	Tamaño de Impresión
Balance Hídrico	Estaciones Meteorológicas	1/17	1:50.000	1x0.70m
	Precipitación Media Anual	2/17	1:50.000	1.0.70m
	Precipitación Promedio Mensual Enero	3/17	1:100.000	0.5x0.6m
	Precipitación Promedio Mensual Febrero	4/17	1:100.000	0.5x0.6m
	Precipitación Promedio Mensual Marzo	5/17	1:100.000	0.5x0.6m
	Precipitación Promedio Mensual Abril	6/17	1:100.000	0.5x0.6m
	Precipitación Promedio Mensual Mayo	7/17	1:100.000	0.5x0.6m
	Precipitación Promedio Mensual Junio	8/17	1:100.000	0.5x0.6m
	Precipitación Promedio Mensual Julio	9/17	1:100.000	0.5x0.6m
	Precipitación Promedio Mensual Agosto	10/17	1:100.000	0.5x0.6m
	Precipitación Promedio Mensual Septiembre	11/17	1:100.000	0.5x0.6m
	Precipitación Promedio Mensual Octubre	12/17	1:100.000	0.5x0.6m
	Precipitación Promedio Mensual Noviembre	13/17	1:100.000	0.5x0.6m
	Precipitación Promedio Mensual Diciembre	14/17	1:100.000	0.5x0.6m
	Temperatura Promedio Anual	15/17	1:50.000	1x0.70m
	Evapotranspiración Real Media Anual	16/17	1:50.000	1x0.70m
	Recarga Potencial Promedio Anual	17/17	1:50.000	1x0.70m
Isopiezas	Promedio Total Alta Precipitación	1/4	1:100.000	0.5x0.6m
	Promedio total Baja Precipitación	2/4	1:100.000	0.5x0.6m
	Promedio Total	3/4	1:100.000	0.5x0.6m
	Isopiezas Zona Puente Aranda, Kennedy y Fontibón	4/4	1:100.000	0.5x0.6m
Geología	Geología Sector Norte	1/5	1:25.000	1x1m
	Geología Sector Sur	2/5	1:25.000	1x1m
	Secciones Geológicas ABCD	3/5	1:25.000	0.9x1.1m
	Secciones Geológicas EFG	4/5	1:25.000	1.15x0.9m
	Secciones Geológicas HIJ	5/5	1:25.000	1.3x0.9m
Hidrogeología	Hidrogeología	1/4	1:50.000	0.9x1.6m
	Secciones Hidrogeológicas ABCDE	2/4	1:50.000	0.8x0.9m

Tema	Nombre del Mapa	No. De Mapa	Escala	Tamaño de Impresión
	Secciones Hidrogeológicas FGHIJ	3/4	1:50.000	0.95x0.9m
	Hidrogeoquímico	1/1	1:50.000	1x2.35m
Vulnerabilidad	GOD	1/2	1:50.000	0.7x0.9m
	DRASTIC	2/2	1:50.000	0.7x0.9m