

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO SUBSUPERFICIAL O SOMERO EN EL PERÍMETRO URBANO DEL DISTRITO CAPITAL

Convenio de asociación No SDA-CV 20161264

INFORME FINAL: INFORME QUE CONTENGA LA ACTUALIZACIÓN DEL MODELO
HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y DEL MODELO ANALÍTICO DEL ACUÍFERO DE
BOGOTÁ

Noviembre 2018

CONTENIDO

1	ESTADO DEL ARTE.....	1
1.1	La Hidrogeología Urbana en el Siglo XXI.....	1
1.2	Estudios Previos en la Sabana de Bogotá.....	2
1.2.1	Datación del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá y Sus Implicaciones Hidrogeológicas. Geología Colombiana No. 15 (Cesar Rodríguez, 1986.)	2
1.2.2	Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana. VII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería de Colombia. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Sociedad Colombiana de Geotecnia (Alberto Lobo-Guerrero Uscátegui, 1992.)	3
1.2.3	Elaboración del modelo hidrogeológico para los acuíferos de Santa Fe de Bogotá, D.C. Informe Final (PNUD-DAMA-Hidrogeocol, 1999.)	4
1.2.4	Caracterización Geoquímica e Isotópica de los Acuíferos de la Cuenca Alta de la Sabana de Bogotá (Ingeominas, 2001).....	5
1.2.5	Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá (Ingeominas, 2002).....	6
1.2.6	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) – Agencia de cooperación Internacional del Japón (JICA), 2003. Estudio del Desarrollo Sostenible del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá. Informe Final.	9
1.2.7	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) – Agencia de cooperación Internacional del Japón (JICA), 2009. Estudio del Abastecimiento Sostenible de Agua para la Ciudad de Bogotá y Áreas Circundantes basado en el manejo Integrado de Recursos Hídricos en la República de Colombia. Informe Final.	12
1.2.8	Universidad Nacional de Colombia, 2006. Proyecto: Brindar apoyo técnico y actualizar herramientas para la regulación del aprovechamiento de las aguas subterráneas en Bogotá. Contrato Inter-administrativo No. 190/2005. Informe Final.	14
1.2.9	Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), 2013. Subdirección de Recurso Hídrico y del Suelo. Sistema de Modelamiento Hidrogeológico del Distrito Capital. Bogotá.	15
2	OBJETIVOS Y ALCANCE.....	16
3	DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO.....	17
3.1	Morfología e Hidrografía	17
3.1.1	Cuenca del río Salitre	17
3.1.2	Cuenca del río Fucha.....	17
3.1.3	Cuenca del río Tunjuelo	17
3.1.4	Cuenca del río Torca	18
3.2	Hidrología y climatología.....	18
3.2.1	Precipitación.....	20

3.2.2	Temperatura	23
3.2.3	Evapotranspiración potencial	25
3.2.4	Evapotranspiración real.....	26
3.2.5	Balance hídrico anual	28
3.3	Geología	31
3.3.1	Estratigrafía	36
3.3.1.1	Unidades del Cretácico.....	36
3.3.1.2	Grupo Guadalupe	37
3.3.1.3	Unidades del Paleógeno	37
3.3.1.4	Unidades del Neógeno y Cuaternario.....	39
3.3.2	Rasgos Estructurales	40
3.3.3	Fallas Longitudinales	41
3.3.4	Fallas Transversales	42
3.4	Hidrogeología.....	42
3.4.1	Características Hidráulicas	42
3.4.2	Caracterización Hidrogeoquímica.....	47
3.4.2.1	pH.....	47
3.4.2.2	Temperatura	48
3.4.2.3	Conductividad Eléctrica CE	49
3.4.2.4	Cloruros.....	50
3.4.2.5	Tipos de Agua Subterránea	52
3.4.2.6	Perfiles Hidrogeoquímicos	60
3.4.2.7	Análisis de Isótopos	62
4	APORTES METODOLOGICOS	66
4.1	Recopilación de información	66
4.1.1	Información secundaria	66
4.1.2	Información recopilada en campo	76
4.2	Modelación en Elementos Analíticos (AEM) 2D	78
4.2.1	Construcción Geológica de los perfiles.....	79
4.2.2	Definición de parámetros hidráulicos del modelo.....	81

4.2.3	Condiciones de frontera	82
4.2.4	Elementos considerados en la modelación	83
4.2.5	Identificación de zonas de recarga y descarga	84
4.2.6	Análisis de sensibilidad	84
4.2.7	Análisis de resultados del modelo analítico regional	89
4.3	Modelación en Elementos Analíticos (AEM) 3-D	90
4.3.1	Geometría y Dominios	90
4.3.2	Parámetros de los dominios	91
4.3.3	Estado Estacionario pre 1951	92
4.3.4	Modelación suprarregional	93
4.3.5	Condiciones de frontera	94
4.3.6	Resultados	95
4.3.7	Conclusiones	96
4.4	Actualización del Modelo Geológico 3-D	97
4.4.1	Pozo Exploratorio PUJ-SDA en PMZF	106
4.4.1.1	Interpretación de la prueba de bombeo PMZF	108
4.5	Definición del Sistema de Flujo	116
4.5.1	Estimación de la recarga	116
4.5.1.1	Recarga Natural	116
4.5.1.2	Recarga Artificial	119
4.5.2	Conexiones regionales del acuífero	123
5	MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO	125
5.1	Mapa Hidrogeológico	125
5.2	Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular	125
5.3	Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas	125
5.4	Sedimentos y rocas con limitado o ningún recurso de agua subterránea	126
5.5	Zonas de Recarga, Tránsito, Descarga	126
5.6	Análisis de la demanda concesionada	127
5.7	Análisis de los niveles del acuífero somero	130
5.7.1	Análisis puntual de los niveles estáticos del acuífero somero	130

5.7.2	Evolución temporal de los niveles.....	132
5.7.2.1	Grupo 1.....	133
5.7.2.2	Grupo 2.....	134
5.7.2.3	Grupo 3.....	135
5.7.2.4	Grupo 4.....	135
5.8	Estimación de la recarga mediante el método de balance de cloruros.	136
5.9	Relaciones aguas subterráneas-superficiales.....	139
5.9.1	Medición de niveles piezométricos	139
5.9.2	Mapa de isolíneas subsuperficiales	140
5.9.3	Perfiles mapa de isopiezas subsuperficiales	144
5.10	Esquema del Modelo Conceptual.....	147
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	- 153 -
6.1	Construcción del modelo conceptual	- 153 -
6.2	Modelo hidrogeológico conceptual	- 154 -
6.3	Incertidumbre	- 156 -
6.4	Recomendaciones.....	- 157 -
7	ANEXOS.....	- 158 -
	ANEXO A Bases de datos de información secundaria	- 158 -
	ANEXO B-Estudio de magnetotelúrica en el Parque Zona Franca	- 158 -
	ANEXO C-Informe de perforación del pozo profundo.....	- 158 -
	ANEXO D-Mapa modelo hidrogeológico conceptual	- 158 -
	ANEXO E – Salidas Rockworks - 17	- 158 -
8	BIBLIOGRAFIA.....	- 159 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Esquema conceptual del balance hídrico	3
Figura 1-2 Corte hidrogeológico esquemático de la sabana de Bogotá	4
Figura 1-3. Modelo hidrogeológico esquemático de la cuenca de la sabana de Bogotá.	8
Figura 1-4. Balance hídrico a nivel anual de la Sabana de Bogotá	10
Figura 1-5. Estructura del modelo numérico construido por JICA	11
Figura 1-6 Distribución de la recarga en el modelo numérico de JICA	12
Figura 1-7. Límites del modelo numérico de JICA	13
Figura 1-8. Límites del modelo numérico de JICA.	14
Figura 3-1 Cuencas del sistema de drenaje de la ciudad de Bogotá.....	18
Figura 3-2. Estaciones meteorológicas en la zona urbana del distrito capital.....	19
Figura 3-3. Precipitación media, máxima y mínima de las estaciones en el distrito	21
Figura 3-4 Precipitación total mensual media multianual.....	22
Figura 3-5 Temperatura media mensual multianual.....	23
Figura 3-6 Mapa de temperatura media mensual multianual	24
Figura 3-7 Mapa de evapotranspiración potencial total anual media multianual.....	26
Figura 3-8 Mapa de evapotranspiración real total anual	28
Figura 3-9 Representación de la columna de suelo. Adaptado de (Eagleson, 1978)	29
Figura 3-10 Mapa de Escorrentía superficial	30
Figura 3-11 Geología generalizada para la Sabana de Bogotá (modificado del SGC)	32
Figura 3-12. Perfiles regionales AA', BB' y supraregional CC'	34
Figura 3-13. Mapa de Fallas de la Sabana	41
Figura 3-14. Distribución espacial de los valores de pH medida en los pozos	48
Figura 3-15. Distribución espacial de los valores de temperatura medida en los pozos	49
Figura 3-16. Distribución de la Conductividad Eléctrica medida en los pozos	50
Figura 3-17. Representación espacial de los cloruros para las diferentes campañas.	51
Figura 3-18. Medidas de Cl- en las campañas de estudios previos	52
Figura 3-19 Histograma de frecuencias de electroneutralidad	53
Figura 3-20 Representación graficas de los diagramas de Stiff	55

Figura 3-21 Número de pozos que atraviesan las formaciones geológicas.....	55
Figura 3-22 Tipos de agua en los pozos que atraviesan la formación Chía	56
Figura 3-23 Tipos de agua en los pozos que atraviesan la formación Sabana	57
Figura 3-24 Tipos de agua en los pozos que atraviesan la formación Subachoque	57
Figura 3-25 Tipos de agua en los pozos que atraviesan la formación Tunjuelo	58
Figura 3-26 Tipos de agua en los pozos que atraviesan la formación Tilatá.....	59
Figura 3-27 Tipos de agua en los pozos atraviesan el basamento rocoso	60
Figura 3-28 Perfil hidrogeoquímico No. 1	61
Figura 3-29 Perfil hidrogeoquímico No. 2	61
Figura 3-30 Variación altitudinal del contenido isotópico de O18 (‰) y D(‰) respecto a la precipitación.....	62
Figura 3-31 Variación altitudinal del contenido isotópico del O18 (‰)	63
Figura 3-32 Dispersividad del isotópico del O18 (‰) respecto a la profundidad (Clarck 2015) ...	64
Figura 3-33 Dispersión del isotópico del O18 (‰) respecto a la profundidad en los pozos del Distrito y Sabana de Bogotá.....	64
Figura 4-1 Relación entre parámetro recopilado y su fuente.	70
Figura 4-2 Pozos de extracción inventariados en Bogotá D.C.....	70
Figura 4-3 Figura Clasificación de pozos en los depósitos consolidado y no consolidado.....	71
Figura 4-4 Base de datos de puntos de agua clasificados según el depósito de extracción.....	72
Figura 4-5 Normalización y conectores de Base de Datos de puntos de agua en MySql	73
Figura 4-6. Puntos de agua con información de conductividad (K) y transmisividad (T)	74
Figura 4-7 Puntos de aguas con información de pH – Depósito no consolidado.....	75
Figura 4-8 Puntos de agua con información de oxígeno-18 – Depósito no consolidado	76
Figura 4-9. Perfil Geológico corte A-A'	80
Figura 4-10. Dominio y representación del modelo analítico de flujo 2D. Perfil A-A'	80
Figura 4-11. Perfil Geológico corte B-B'	81
Figura 4-12. Dominio y representación del modelo analítico de flujo 2D. Perfil B-B'	81
Figura 4-13 Análisis de Sensibilidad, Perfil A.....	85
Figura 4-14 Análisis de Sensibilidad, Perfil B.	86
Figura 4-15 Variación de tiempos de tránsito Perfil A. Escenario S1.....	88
Figura 4-16 Variación de tiempos de tránsito Perfil A. Escenario S1.....	88

Figura 4-17 Esquema de la geometría del modelo analítico 3D	91
Figura 4-18. Crecimiento Urbano en la Ciudad de Bogotá.	92
Figura 4-19. Expansión histórica en la sabana de Bogotá.....	93
Figura 4-20 Condición de frontera nivel fijo.....	94
Figura 4-21. Esquema de las condiciones de recarga y condiciones de frontera	95
Figura 4-22. Resultado niveles piezométricos estado estacionario.	96
Figura 4-23. Definición de la grilla del modelo geológico 3D.....	97
Figura 4-24. Detalle de los rangos de profundidad con más información respecto al número de perforaciones	98
Figura 4-25. Distribución en superficie de las perforaciones.....	99
Figura 4-26. Diagrama de proceso de construcción del modelo geológico 3D.....	100
Figura 4-27. Leyenda litológica	100
Figura 4-28 Modelo litológico 3D para el área urbana del distrito capital.	101
Figura 4-29. Histograma de distribución para cada uno de los diferentes materiales	102
Figura 4-30. Perfil O-O', exagerado 10 veces en la vertical.....	103
Figura 4-31. Perfil K-K', exagerado 10 veces en la vertical.....	103
Figura 4-32. Modelo estratigráfico exagerado 7 veces en la vertical.....	104
Figura 4-33. Histograma de proporción de las formaciones presentes en el área de estudio	105
Figura 4-34. Columna litológica y estratigráfica pozo PUJ-SDA-PMZF	106
Figura 4-35 Perfiles estratigráficos G-G', J-J', O-O'	107
Figura 4-36: Prueba de bombeo-recuperación. Pozo Parque Metropolitano Zona Franca (PMZF).	109
Figura 4-37: Curva abatimiento (log) vs tiempo (log).	110
Figura 4-38: Curva abatimiento (linear) vs tiempo (log).	110
Figura 4-39: Curvas teóricas abatimiento (linear) vs tiempo (log) para el modelo de Theis (izquierda) y para un modelo con fractura única (derecha). Tomado de: Renard et al.(2009).	111
Figura 4-40: Curvas diagnóstico abatimiento (log) vs tiempo (log, y su respectiva derivada (línea discontinua) para un modelo de doble porosidad. Tomado de: Renard et al.(2009).	112
Figura 4-41: Derivada del abatimiento con respecto al tiempo (log-log) para L=0.5 . Se reporta el correspondiente valor de T basado en el modelo de Theis.....	112
Figura 4-42: Derivada del abatimiento con respecto al tiempo (log-log) para L=0.9. Se reporta el correspondiente valor de T basado en el modelo de Theis.....	113

Figura 4-43: Aplicación del modelo de Cooper-Jacob a los datos de bombeo.	114
Figura 4-44: Aplicación del modelo de Cooper-Jacob a los datos de bombeo.	114
Figura 4-45: Interpretación de la prueba de recuperación.	115
Figura 4-46 Metodología de la aplicación del modelo.....	117
Figura 4-47 Recarga natural (mm/año)	118
Figura 4-48: Fugas en l/s red de acueducto.....	120
Figura 4-49: Exfiltraciones en m3/s de la red de alcantarillado sanitario	121
Figura 4-50: Exfiltraciones en m3/s de la red de alcantarillado pluvial.....	122
Figura 4-51 Recarga artificial en mm/año.....	123
Figura 4-52. Conectividad Regional del acuífero de Bogotá	124
Figura 5-1. Representación espacial de los caudales de explotación en la zona de estudio.....	127
Figura 5-2 Curva de demanda de agua subterránea en los depósitos cuaternarios del Distrito Capital	128
Figura 5-3 Comparación de los niveles estáticos puntuales.....	131
Figura 5-4 Niveles (msnm) interpolados.....	132
Figura 5-5 Sectorización de los niveles en función de los abatimientos.....	133
Figura 5-6. Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 1.	134
Figura 5-7 Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 2	135
Figura 5-8. Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 3.	135
Figura 5-9. Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 4.	136
Figura 5-10. Localización de las estaciones pluviométricas con mediciones de Cl.....	138
Figura 5-11 Variograma clásico diferentes distancias	141
Figura 5-12 Modelos teóricos con independencia espacial mayor a 10 000.....	141
Figura 5-13 Mapa de Isopiezas Subsupeficiales en el Distrito Capital	143
Figura 5-14 Perfil 1 sentido Sur-Norte. Humedal Jaboque y Humedal Juan Amarillo.....	144
Figura 5-15 Perfil 2 sentido Sur-Norte. Canal Jaboque y Humedal Juan Amarillo	145
Figura 5-16 Perfil 3 sentido Sur-Norte. Canal Salitre y Humedal Córdoba.....	146
Figura 5-17 Perfil 4 sentido Occidente Oriente. Canal Río Seco, Canal Albina y Río Fucha.	146
Figura 5-18. Localización de los perfiles hidrogeológicos para la zona de estudio.....	147
Figura 5-19 Representación gráfica del perfil hidrogeológico O-O'	148

Figura 5-20. Representación gráfica del perfil hidrogeológico J-J´	149
Figura 5-21. Representación gráfica del modelo hidrogeológico conceptual.	150
Figura 5-22 Representación gráfica del modelo hidrogeológico conceptual.	151

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1 Relación de estaciones por entidad	19
Tabla 3-2 Columna estratigráfica esquemática en el área de la ciudad de Bogotá	35
Tabla 3-3. Propiedades físicas de las formaciones geológicas de la zona de estudio.	43
Tabla 3-4. Tipos de agua identificados en los depósitos consolidados y no consolidados	54
Tabla 4-1 Resumen Información secundaria recolectada.....	66
Tabla 4-2 Resumen de información principal para la construcción del modelo geológico 3D.....	67
Tabla 4-3 Fuentes de información secundaria - puntos de agua	67
Tabla 4-4 Resumen de actividades realizadas en campo	78
Tabla 4-5 Estadísticos descriptivos de variables hidrogeológicas	78
Tabla 4-6 Parámetros hidráulicos de los dominios Perfil A.....	81
Tabla 4-7 Parámetros hidráulicos de los dominios Perfil B	82
Tabla 4-8 Condiciones de frontera Modelo 2D, Perfil A	83
Tabla 4-9 Condiciones de frontera Modelo 2D, Perfil B	83
Tabla 4-10. Parámetros del modelo estado estacionario	91
Tabla 4-11. Calculo de volúmenes litológicos por formación geológica.....	105
Tabla 5-1. Serie de caudales de pozos concesionados en el Distrito Capital. Depósitos cuaternarios.	129
Tabla 5-2. Datos de lluvia ponderada por el volumen.	137
Tabla 5-3. Valores de cloruros medidos en los manantiales de la cuenca alta del río Bogotá	138

1 ESTADO DEL ARTE

1.1 La Hidrogeología Urbana en el Siglo XXI

En Colombia el agua subterránea representa una gran reserva de abastecimiento, no sólo para consumo humano, sino principalmente para uso agrícola e industrial, especialmente en aquellas zonas donde el recurso hídrico superficial es limitado, ya sea por calidad o por cantidad. En este sentido, la mayoría de los estudios de aguas subterráneas realizados en el país, han sido desarrollados en acuíferos regionales, donde el mayor porcentaje del área es rural. Estos estudios, por lo general, están enmarcados en políticas del manejo integrado de los recursos hídricos, y son fundamentales para llegar a una gestión conjunta del agua en el territorio, a fin de garantizar una explotación sostenible del recurso.

En los últimos años, las investigaciones conducidas en la modelación de acuíferos en el país, ha ido evolucionando, se ha pasado del uso de modelos cualitativos (i.e., conceptuales) a modelos cuantitativos (i.e., numéricos o analíticos), reconociendo que estos últimos permiten una mejor aproximación de la realidad y constituyen la base fundamental para la construcción de herramientas de gestión del acuífero. Sin embargo, hay que señalar que el modelo hidrogeológico conceptual es el punto de partida de cualquier modelo numérico; su construcción debe ser cuidadosa, ya que, puede tener numerosas interpretaciones subjetivas, por lo que la incertidumbre de los modelos conceptuales siempre estará limitada por la información con la que se cuente.

El acuífero de Bogotá D.C., en particular representa un acuífero urbano de gran complejidad, en el que, para llegar a un modelo conceptual adecuado, es requerido considerar los procesos particulares que suceden en acuíferos someros que se extienden bajo un área urbanizada. Estos procesos son afectados por las intervenciones que se realizan en el subsuelo, como la instalación de infraestructura de servicios públicos (acueducto, alcantarillado, energía), la construcción de obras subterráneas, la extracción de agua subterránea en la construcción de sótanos, el cambio del material de los primeros metros para construcción de la malla vial.

Si bien los procesos fundamentales asociados a aguas subterráneas urbanas no son muy diferentes a las rurales, las escalas espaciales y de tiempo suelen ser considerablemente diferentes. Estas escalas tienen especial importancia cuando se quiere gestionar los riesgos inherentes al desarrollo de una ciudad, como el riesgo por contaminación del acuífero ante fugas de hidrocarburos de las Estaciones De Servicio (EDS) y el riesgo por subsidencia ante la constante extracción de agua subterránea en la construcción de edificaciones e infraestructura.

Este proyecto representa entonces, uno de los primeros ejercicios de investigación desarrollados en el país, que busca contribuir al conocimiento y entendimiento de los procesos que tienen lugar en los acuíferos urbanos, en particular, en los acuíferos someros. Los resultados esperados en este proyecto, son muy atractivos de cara a los retos que el país afronta en la urbanización de ciudades intermedias, y renovación urbanística de las ciudades principales. Siempre garantizando una mejor calidad de vida para sus habitantes.

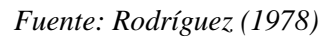
1.2 Estudios Previos en la Sabana de Bogotá

La sabana de Bogotá, que comprende la cuenca alta del río Bogotá y el área del Distrito Capital, es la región más industrializada y poblada de Colombia. Muchas de sus industrias y virtualmente todos los cultivos de flores están soportados por extracciones de agua subterránea. Algunos municipios hacen uso extensivo de este recurso para suministro potable. Desde los años 80-90, paralelamente al desarrollo agro-industrial, en los principales acuíferos de esta región se han registrado importantes descensos de los niveles piezométricos, que han llevado varios expertos a concluir que se está utilizando más agua de la que se recarga y que, en algunos sectores, se deberían limitar futuros aprovechamientos de los acuíferos. Sin embargo, históricamente se han generado opiniones contrastantes sobre el tema de la recarga, cuyas estimaciones han variado por más de un orden de magnitud (desde aproximadamente 0 a 132 mm/año).

A continuación, se relacionan los estudios previos relacionados con el agua subterránea en la sabana de Bogotá:

1.2.1 *Datación del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá y Sus Implicaciones Hidrogeológicas. Geología Colombiana No. 15 (Cesar Rodríguez, 1986.)*

Rodríguez parte del análisis del balance hídrico anual, que arroja un resultado de infiltración próxima a cero, para inferir que la cuenca de la sabana de Bogotá es una cuenca hidrogeológica cerrada, que no tiene ni entradas ni salidas de agua subterránea. Sin embargo, reconoce que los ríos y quebradas del área pueden recibir caudal base (Figura 1-1). Analizando los resultados de isótopos radioactivos (C-14 y Tritio) en muestras de aguas subterráneas tomadas de diferentes pozos de la sabana de Bogotá, se reportan edades del agua subterráneas de hasta varios miles de años (rango: agua moderna – 17,382 años basado en el método de Vogel). Los valores de infiltración, estimados mediante las edades del agua basadas en C-14, la profundidad de la muestra y la porosidad de la roca, resultan ser de unos pocos mm/año, excepto por dos pozos en las zonas de Madrid y Bojacá donde se reportan infiltraciones de 26 y 59 mm/año, respectivamente. Se observa que estos dos pozos se encuentran cerca de los cerros de Madrid y cerca de los cerros occidentales, potenciales zonas de recarga. Rodríguez afirma que las elevadas edades de algunos pozos que captan el Complejo Acuífero Guadalupe y ubicados cerca de la zona de recarga (i.e. pozo Madrid y Cartagenita con edades de aproximadamente 8,000 y 17,000 años), indican que no hay recarga reciente debido a que no hay flujo en este acuífero y que se encuentra saturado desde hace miles de años. Adicionalmente, el autor reporta que todas las muestras de agua tomadas de la Formación Sabana (Cuaternario) presentan edades mayores a 5,000 años y sugiere que son sistemas acuíferos con recarga muy limitada. El reporte concluye que los acuíferos de la sabana de Bogotá están conformados por agua relativamente vieja y que la recarga a estos sistemas no es substancial.



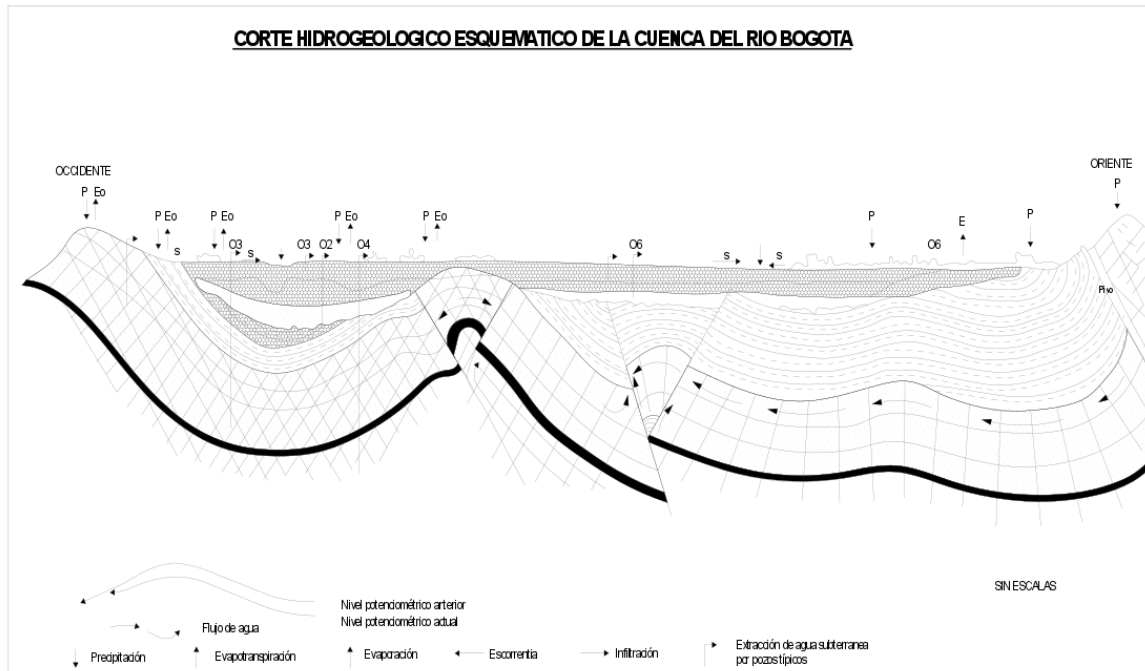


Figura 1-2 Corte hidrogeológico esquemático de la sabana de Bogotá

Fuente: Lobo-Guerrero (1992).

Las principales áreas de recarga de los depósitos cuaternarios eran [y potencialmente son] los abanicos aluviales presentes en las zonas de piedemonte, sin embargo, Lobo-Guerrero considera que con la progresiva urbanización e impermeabilización de la ciudad el rol de recarga de estas franjas ha venido disminuyendo.

1.2.3 *Elaboración del modelo hidrogeológico para los acuíferos de Santa Fe de Bogotá, D.C. Informe Final (PNUD-DAMA-Hidrogeocol, 1999.)*

El objetivo de este estudio fue elaborar el modelo hidrogeológico conceptual y numérico del área de jurisdicción del DAMA (Distrito Capital), sin embargo, la firma consultora Hidrogeocol analizó una zona más grande (2184 km²) para tener en cuenta los aspectos hidrogeológicos regionales. El modelo geológico desarrollado por Hidrogeocol subdivide el área de estudio en 12 bloques tectónicos delimitados por fallas longitudinales y transversales, que pueden comportarse como barreras impermeables o facilitar el flujo de agua a través de ellas. El balance hídrico sugiere que en el área de Bogotá la recarga real y los bombeos de agua subterránea son similares, ambos del orden de 1 m³/s, siendo la recarga potencial del orden de 2 m³/s. La calibración del modelo numérico en estado estacionario (antes de la explotación) se realizó asumiendo que la tabla de agua estuviera cerca de la superficie, mientras que la calibración en estado transitorio se apoyó en datos esporádicos de pozos, aparentemente debido a la falta de una red de monitoreo de agua subterránea. Hidrogeocol considera que los descensos pronunciados de niveles piezométricos que se observan en muchos pozos se pueden explicar con la recarga pequeña, las bajas a media permeabilidades de los acuíferos y su bajo coeficiente de almacenamiento. Las simulaciones numéricas sugieren que los tiempos de tránsito desde la zona de recarga hasta la ciudad son del orden de 10,000 años [lo cual sugiere que agua subterránea con miles de años de edad no necesariamente implica que esta no se mueva, es decir que no haya flujo en el acuífero según el modelo de Rodríguez (1986)]. Hidrogeocol sugiere que para

profundidades mayores a 600m (Acuífero Guadalupe) aún se podría bombear un caudal adicional de 0.5 m³/s, llegando a un total de extracción de 1.5 m³/s.

1.2.4 Caracterización Geoquímica e Isotópica de los Acuíferos de la Cuenca Alta de la Sabana de Bogotá (Ingeominas, 2001)

En este estudio se reportan los resultados de un convenio de cooperación entre **INGEOMINAS** (hoy en día Servicio Geológico Colombiano) y la **CAR** para analizar la hidrogeoquímica (iones mayoritarios) e isotopía (isotopos estables y radioisótopos) de diferentes componentes del ciclo hidrológico en la sabana de Bogotá. Se analizaron muestras tomadas de 95 pozos representativos de los diferentes acuíferos de la región, además se tomaron muestras de lluvia, manantiales, ríos y lagunas. En las zonas de recarga del acuífero Guadalupe, así como en los depósitos cuaternarios de piedemonte prevalecen las facies bicarbonatadas-cálcicas (Ca-HCO₃), mientras que en los pozos profundos del Guadalupe cubiertos por sedimentos cuaternarios y en los mismos sedimentos fluvio-lacustres predominan las facies bicarbonatadas-sódicas (Na-HCO₃). En algunos manantiales con flujos profundos se presentan aguas cloruradas-sódicas (Na-Cl), por ejemplo, en el manantial de Tabio que presenta además temperaturas mayores a 40°C, y cuya alimentación esta posiblemente relacionada con flujos salinos profundos procedentes de la Formación Chipaque (Cretácico Inferior) que aflora en los alrededores. A lo largo del flujo [sectores profundos del acuífero] predomina un ambiente reductor, con presencia de hierro disuelto, sulfatos y manganeso disuelto.

Las conductividades eléctricas (CE) de los sedimentos cuaternarios aumentan desde valores de 10uS/cm en los piedemontes hasta valores de 1,200 uS/cm en el centro de la cuenca de la Sabana de Bogotá, donde el espesor del Cuaternario es mayor. Aguas arriba en el valle de Subachoque se presentan conductividades de hasta 150 uS/cm mientras que aguas arriba del valle de Chicú se presenta una anomalía hidrogeoquímica con CE hasta de 1,500-2,000 uS/cm, las cuales son atribuidas a la influencia de fuentes similares a las que generan los manantiales termales de Tabio. Los cloruros (Cl) aumentan desde los bordes hacia el centro de la Sabana, alcanzando concentraciones máximas de 95.7 mg/L. En algunos sectores se presentan valores considerablemente más altos, notoriamente cerca de Tabio (343.9 mg/L) y arriba de la población de Gachanzipá, en el valle de Bogotá (249,9 mg/L), que se consideran como anomalías hidrogeoquímicas. La presencia de material orgánico en los sedimentos del Neógeno-Cuaternario (turbas) enriquece este acuífero de Carbono Orgánico Disuelto (COD), el cual aumenta progresivamente hacia el centro de la cuenca Cuaternaria, donde se detecta la presencia de metano. El carbono de estos materiales orgánicos representaría la fuente para la formación del metano (CH₄).

Las características geoquímicas del acuífero Guadalupe están controladas por el grado de fracturación, y varía espacialmente. De acuerdo con INGEOMINAS, de forma general, el flujo en esta unidad procede desde las zonas de afloramiento (cerros) hacia las zonas más profundas del acuífero. Lo soportan las bajas CE (<200 uS/cm) en las zonas de piedemonte y en los afloramientos del sector Muña y Facatativá, mientras que, en los sectores más profundos de la cuenca, la CE aparentemente aumenta hasta 600 uS/cm. [se trata de todas formas de valores relativamente bajos de conductividad hidráulica que estarían reflejando, la escasa reactividad de los minerales que componen el Complejo Guadalupe].

El análisis de isotopos estables del agua indica que el sistema de flujo superficial (ríos principales, manantiales de menor altura, aljibes) tienen un rango de ¹⁸O entre -9.0 y -7.0‰ el cual está asociado con las precipitaciones de la zona plana. INGEOMINAS considera que este sistema podría estar hidráulicamente desconectado del sistema profundo, que presenta mayor variabilidad en los isotopos estables y es en general más empobrecido de -9.5 ‰ ¹⁸O, indicando por lo tanto una recarga a mayor

altura. El muestreo de isótopos estables del agua (Deuterio y O-18) se realizó también en los ríos y manantiales de la zona plana durante la estación seca. Los resultados fueron similares para estos dos tipos de cuerpos de agua, indicando que se tiene un componente de la recarga a cotas menores de 2,700m, y esta recarga es la que alimenta el flujo base de los ríos. [esta consideración es muy importante porque estaría soportando la presencia de flujos subterráneos sub-superficiales que forman el flujo base hacia los drenajes principales y estarían desconectados de los sistemas acuíferos más profundos].

Las edades del agua subterránea se calcularon con base en el análisis de C-14, por medio del método de Pearson et al. (1970) para la zona de recarga y del código NETPATH (Plummer et al., 1994) para corregir la determinación de las edades en los sectores con presencia de metano, debido a que el metano disuelto en el agua diluye la concentración de C-14 y produce un efecto de envejecimiento adicional. Las edades de las aguas subterráneas en el Guadalupe varían entre ciento de años en las zonas de recarga hasta más de 15,000 años en pozos del acuífero Guadalupe ubicados en las áreas de piedemonte. La aplicación del programa NETPATH en los sedimentos del Neógeno-Cuaternario en el valle de Subachoque produjo edades entre 7,400 y 25,500 años, con los primeros representativos de la parte media del valle y los segundos de sectores alejados de las zonas de recarga. En el Cuaternario por lo tanto el agua subterránea circula y se renueva muy lentamente. Según Ingeominas, estas consideraciones tienen implicaciones para la regulación del recurso hídrico subterráneo de la unidad cuaternaria que es la más explotada de la región.

1.2.5 Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá (Ingeominas, 2002)

En este reporte los autores reconocen que existen importantes diferencias sobre el modelo hidrogeológico de la región. Rodríguez (1994) insiste que es una cuenca cerrada, mientras que Álvarez (1997) y Van der Hammen (1998) afirman que se está extrayendo más agua subterránea de la que se recarga naturalmente [i.e. la cuenca hidrogeológica no es cerrada]. Por lo tanto, este estudio sugiere la necesidad de ampliar el conocimiento hidrogeológico de la sabana de Bogotá a nivel regional, a partir del conocimiento de su tectónica y geología estructural.

Interpretaron imágenes Landsat a escala 1:100.000, en falso color, para definir el esquema tectónico de la región, y precisar los principales lineamientos tectónicos regionales. La geología estructural se revisó posteriormente con base en los datos del Banco Nacional de Datos Hidrogeológicos de Ingeominas, sondeos eléctricos verticales y estudios de gravimetría realizados por Ingeominas y otras empresas consultoras.

Las fallas regionales cartografiadas en trabajos anteriores tienen esencialmente dirección NE (fallas longitudinales), sin embargo, en este estudio se identifican también algunas fallas regionales con rumbo NW (fallas transversales), que no necesariamente coinciden con las fallas propuestas previamente. Los dos sistemas de fallas forman un reticulado.

Las fallas longitudinales son fallas con mecanismos inversos (fallas de cabalgamiento y retrocabalgamiento) que bordean los cerros y que tienen transporte tectónico hacia NW o SE. El movimiento de estas fallas influyó la morfología que actualmente se observa en la Sabana de Bogotá. Sobre la existencia de las fallas transversales hay opiniones diferentes, sin embargo, el trabajo de Ingeominas se basa en las conjeturas de Gómez (1985 y 1991) y Reyes (1993), además de las observaciones de Velandia (1997), que resaltan la importancia de estas fallas en el esquema tectónico de la sabana de Bogotá. Las fallas transversales son fallas de rumbo que estarían conformando un esquema de bloques tectónicos transversales, a su vez delimitados por fallas longitudinales.

Estos bloques tectónicos pueden estar controlando el comportamiento del agua subterránea, precisamente Ingeominas considera que las fallas con mecanismos inversos (de cabalgamiento) estarían actuando como barreras “impermeables”, aislando las zonas de recarga, mientras que las fallas transversales son consideradas generalmente de carácter distensivo o extensional, que las convierte en excelentes conductoras de agua y propicias para la recarga de acuíferos, especialmente en sectores intensamente fracturados. De acuerdo con este concepto, la Falla de Bogotá (longitudinal) estaría actuando como barrera para la recarga de los acuíferos de los depósitos cuaternarios, recarga que se concentraría a lo largo de las numerosas fallas transversales que afectan los cerros, particularmente las que tienen continuidad hacia NW. Lo demuestra el hecho que es posible encontrar termales asociados a estas fallas transversales [esta última observación está soportada por los perfiles geofísicos del Metro en la zona de piedemonte que muestra, además de la Falla de Bogotá, numerosas fallas transversales a esta].

Para entender mejor la hidrogeología de los depósitos cuaternarios es importante resumir en este documento la evolución de la sedimentación cuaternaria, basada en el estudio de Ingeominas:

La laguna de la sabana de Bogotá se formó al finalizar el Plioceno Medio-Superior, como resultado del levantamiento final de la cordillera oriental, este episodio llevó a la sedimentación de la Formación Tilatá (depósito fluvio-lacustre de canal). Durante el Pleistoceno, la alternancia de épocas frías, húmedas y secas, marcadas por la variación de precipitación anual y periodos glaciales e interglaciales (deshielo), causaron fluctuaciones importantes del nivel de la laguna, que llevo a la deposición de diferentes materiales (capas de turbas intercaladas con arcillas lagunares, sedimentos fluviales y fluvioglaciales). El aporte de las quebradas desde los cerros produjo la formación de depósitos de abanico aluvial [también conocidos como complejos de conos en los cerros orientales]. En la última glaciación (40,000-28,000 años), desapareció completamente la laguna de la sabana de Bogotá y en el periodo postglacial subsecuente, que se extiende hasta el Holoceno (10,000 años-actualidad), se originó un cambio de ambiente lacustre a ambiente fluvial con la depositación de sedimentos aluviales por parte de los principales drenajes.

El modelo hidrogeológico de Ingeominas identifica, a nivel regional, tres unidades hidroestratigráficas principales, que están limitadas lateralmente por la estructura de bloques tectónicos antes descrita:

- (i) Complejo Acuífero de los Depósitos No Consolidados;
- (ii) Complejo Acuitardo del Paleógeno y
- (iii) Complejo Acuífero Guadalupe.

El espesor de los depósitos no consolidados, en la parte central de la cuenca, supera los 500m (sector Funza-Engativá), sin embargo, estos depósitos se caracterizan por cambios bruscos en la litología (variaciones de facies) por lo tanto forman acuíferos locales de extensión limitada y poca importancia hidrogeológica.

El Complejo Paleógeno se considera, a nivel regional, como relativamente impermeable, a pesar de la presencia de pequeños niveles de areniscas en las Formaciones Usme, Bogotá, Guaduas (inferior), siendo la única unidad acuífera la Formación Cacho, presente en el sector centro-oriental de la sabana. Debido a la estructura tectónica de la sabana de Bogotá, el Complejo Paleógeno está ausente en la parte central y occidental de la cuenca artesiana de la sabana de Bogotá.

El Complejo Acuífero Guadalupe aflora en los cerros presentes en los alrededores de la sabana de Bogotá y representa un acuífero de elevada importancia regional, que está confinado abajo por la

Formación Chipaque [considerada como el basamento “impermeable” de la sabana de Bogotá] y registra espesores máximos de 950m.

Para la cuenca de la sabana de Bogotá, Ingeominas considera dos (2) zonas de recarga, una exterior y una interior (Figura 1-3).

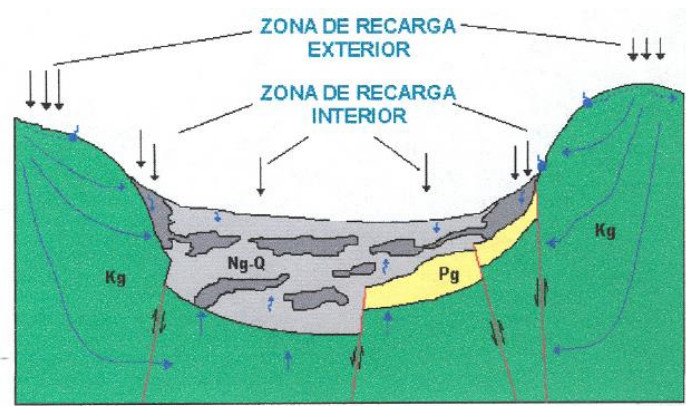


Figura 1-3. Modelo hidrogeológico esquemático de la cuenca de la sabana de Bogotá.

Fuente: Ingeominas (2002)

En la zona interior, la zona plana de la sabana, la recarga se genera por infiltración producto de las precipitaciones [recarga directa], y es mayor hacia las zonas de piedemonte donde la presencia de depósitos no consolidados de grano más grueso facilita la infiltración de la lluvia. INGEOMINAS considera también la recarga por infiltración de las fuentes superficiales (rio Bogotá y sus tributarios) que se concentra en la parte más cercana a los piedemontes por encima de la cota 2600 msnm, debido a que los cauces de la parte plana son pocos profundos y desconectados de los acuíferos principales.

El aporte de los embalses presentes en la sabana (superficie total de 62 km²) es considerado mínimo, porque estos suprayacen rocas sedimentarias del Paleógeno que son de baja permeabilidad. Los balances hídricos diarios realizados por la CAR en estos embalses soportarían estas consideraciones. Ingeominas reconoce también que, dentro la zona de recarga interior, las superficies irrigadas (425 km²) podrían aportar agua a los sistemas acuíferos, sin embargo, no se tenían datos al respecto para este estudio. La zona de recarga exterior (1000 km²) coincide con los afloramientos de las rocas del Complejo Acuífero Guadalupe, donde hay procesos de recarga directa por lluvia, infiltración de corrientes superficiales, y probablemente recarga por fenómenos de condensación del vapor de agua contenido en las fracturas de las rocas como han argumentado algunos autores (Trombe, 1988; Klimochkin, 1978).

Las diferencias altimétricas entre la planicie y las zonas de recarga exterior producen en el Complejo Acuífero Guadalupe sistemas confinados de alta presión, los cuales contribuyen a la alimentación de la parte inferior del sistema Neógeno-Cuaternario (flujos ascendentes), a través de las que Ingeominas denomina “ventanas hidrogeológicas”, por ejemplo, fallas, como lo demuestra la presencia de aguas termales en algunos lugares de la sabana de Bogotá. De acuerdo con la modelación numérica preliminar realizada por Ingeominas, en los depósitos cuaternarios se estarían generando dos tipos de flujos, ascendente desde el complejo Acuífero Guadalupe y descendiente causado por infiltración de las lluvias y aguas superficiales, especialmente en las zonas de piedemonte (Figura 1). La descarga natural de los acuíferos se realizaría a través de manantiales y, secundariamente, a través de las corrientes superficiales en la zona de piedemonte.

El aumento de la extracción de agua subterránea [especialmente a partir de las décadas de los años 80-90], ha causado un descenso de niveles piezométricos que han alcanzado los 70m en el campo de pozos del sector occidental de la sabana de Bogotá, que extrae del Complejo Cuaternario, mientras que otras zonas no han registrado descensos superiores a los 15-20m. Se infiere que esta situación podría haber modificado las relaciones hidráulicas originales entre los complejos acuíferos, existiendo antes de la explotación intensiva un flujo ascendente generalizado desde el Acuífero Guadalupe hacia los depósitos no consolidados y ahora, con el bombeo intensivo de la cuenca artesiana, se puede haber agotado este aporte desde el Guadalupe e invertido el gradiente hidráulico generado un goteo desde los depósitos no consolidados hacia las formaciones rocosas más profundas, que tiene implicaciones para la evaluación de los recursos hídricos subterráneos.

1.2.6 Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) – Agencia de cooperación Internacional del Japón (JICA), 2003. Estudio del Desarrollo Sostenible del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá. Informe Final.

Este estudio fue comisionado por la EAAB y realizado con el apoyo de los expertos de JICA. Este tuvo varios objetivos, a saber: (i) evaluar el potencial de los recursos hídricos subterráneos; (ii) investigar la situación del medio ambiente relacionada con estos recursos, (iii) formular el plan de desarrollo de las aguas subterráneas y, (iv) llevar a cabo la transferencia de tecnología al personal de la EAAB.

El capítulo 4, analiza el potencial de los acuíferos, JICA identifica los posibles mecanismos de recarga del complejo acuífero Cuaternario y del acuífero Guadalupe.

Se infiere que el primero se podría estar recargando de los ríos y los sedimentos de las zonas de piedemonte, mientras que el segundo de las montañas que rodean la sabana de Bogotá [aquí es oportuno resaltar que el estudio difiere de la conceptualización de algunos trabajos (Rodríguez, 1978, 1986) donde se considera la sabana de Bogotá como una cuenca hidrogeológica cerrada].

En este estudio el balance hídrico parte de la estimación de la precipitación y del coeficiente de escorrentía. Es importante anotar que JICA considera el aporte de la descarga de la red de alcantarillado al caudal del río Bogotá y resta este aporte de la escorrentía observada en el río Bogotá para poder estimar el caudal real sin aportes.

La recarga estimada por JICA se basa en una ecuación de balance hídrico que contempla la estimación de la precipitación, evapotranspiración real (estimada a través del balance hídrico del suelo) y la escorrentía total (suma de la escorrentía directa de la cuenca y del caudal base). Cabe anotar que el balance hídrico del suelo se alimentó con datos de precipitación y evaporación total diaria (aproximadamente 8 años de datos). Los resultados sugieren una recarga promedio de 144 mm/año, equivalente al 18% de la precipitación promedio anual. El balance hídrico de JICA se resume en la Figura 1-4.

Artículo	mm/año	m3/año	Tota l%	% de balance de aguas subterráneas
· Precipitación anual	802	108.5	100.0	-
· Evapo-transpiración anual	430	58.0	53.6	-
· Escorrentía superficial anual	228	31.0	28.4	-
· Recarga anual de agua subterráneas	144	19.5	18.0	100.0
- Uso anual de aguas subterráneas	27	3.7	3.4	18.8
- Ingreso anual de aguas subterráneas al Área de Estudio	8	1.1	1.0	5.6
- Salida anual de aguas subterráneas del Área de Estudio	125	16.9	15.6	86.8

Figura 1-4. Balance hídrico a nivel anual de la Sabana de Bogotá

Fuente: EAAB-JICA (2003).

El JICA desarrolló también una simulación de aguas subterráneas con el código Modflow.

Inicialmente se realizó una simulación a nivel regional (32,000 km²), abarcando un área del tamaño aproximado del departamento de Cundinamarca. Con esta simulación JICA identificó una salida de aguas subterráneas hacia el Valle del Magdalena. Sucesivamente realizó una simulación más detallada en el área de la sabana de Bogotá.

Los resultados de las simulaciones sugieren que:

- (i) antes del desarrollo, las aguas subterráneas de la sabana de Bogotá fluyen hacia el valle del Magdalena,
- (ii) después de desarrollo de los acuíferos, se incrementó el flujo hacia los campos de pozos de bombeo,
- (iii) el flujo de agua subterránea no está limitado dentro del área de estudio en el sentido que, a medida que aumenta la extracción, la influencia del bombeo regional se extenderá afuera de los límites del área de estudio.

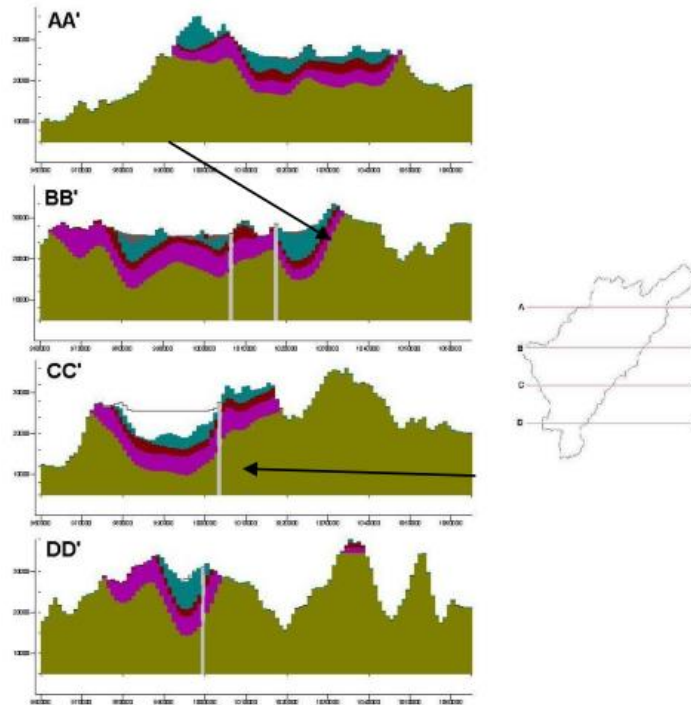


Figura 1-5. Estructura del modelo numérico construido por JICA

Fuente: EAAB-JICA (2003)

La Figura 1-5 muestra la estructura del modelo construido por JICA, que consideró cinco (5) unidades hidrogeológicas, de acuerdo con la clasificación de Ingeominas; mientras que la parametrización del modelo se basó en las estadísticas de los parámetros hidráulicos.

La Figura 1-6 muestra la distribución espacial de la recarga en el modelo. Se observa que en la mayoría del área urbana (excepto el sector sur del distrito), la recarga ingresada al modelo es de cero y que la recarga es mayor en los cerros orientales y occidentales.

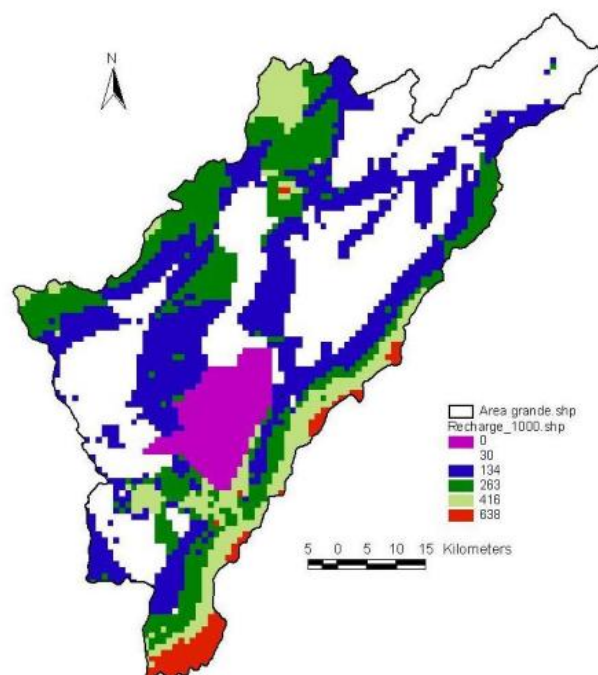


Figura 1-6 Distribución de la recarga en el modelo numérico de JICA

El balance hídrico del modelo de JICA sugiere que la recarga de agua subterránea (144 mm/año) se reparte entre bombeo de los acuíferos (27 mm/año) y salida de agua subterránea del área de estudio (117 mm/año). El modelo de JICA indica también que en el sistema acuífero del Cretáceo se generan importantes salidas de agua subterránea afuera del área de estudio [esta situación es diametralmente opuesta a la inferida por Rodríguez (1987)].

1.2.7 Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) – Agencia de cooperación Internacional del Japón (JICA), 2009. Estudio del Abastecimiento Sostenible de Agua para la Ciudad de Bogotá y Áreas Circundantes basado en el manejo Integrado de Recursos Hídricos en la República de Colombia. Informe Final.

El objetivo principal consistió en desarrollar el Plan Maestro y el Estudio de Factibilidad para el suministro de agua a la ciudad de Bogotá durante situaciones de emergencia, a través del uso del agua subterránea, con miras al año 2020 para su puesta en marcha. El estudio propuso la construcción de 66 pozos de agua subterránea en el acuífero Guadalupe, distribuidos a lo largo de los cerros orientales y del sur de Bogotá [se entiende que, hasta la fecha, la EAAB no obtuvo los necesarios permisos ambientales para la fase exploratoria en los cerros orientales, zonas declaradas reservas forestales, y que logró realizar solo algunos pozos a cotas inferiores caracterizados por rendimientos hídricos inferiores a los esperados].

Este estudio revisa las condiciones naturales del sistema hidrogeológico de la sabana de Bogotá.

Así mismo, los resultados del JICA afirman acerca de posibles infiltraciones de agua al Acuífero Guadalupe, que se generarían por las fugas desde el fondo del embalse San Rafael. JICA reporta que “la infiltración de agua a través del fondo del embalse fue evaluada mediante un cálculo diario entre enero de 1998 y marzo del 2001” y que “de acuerdo a los resultados de los cálculos, el promedio mensual de infiltración de agua proveniente del embalse San Rafael es de 3.7 m³/s.

Dicha cantidad de agua se infiltra al Acuífero Cretáceo de los Cerros Orientales, lo que aumentará el potencial de desarrollo de aguas subterráneas en el área”. No obstante, queda la duda sobre: [nos preguntamos si esta entrada de agua se incorporó luego en el modelo numérico de JICA].

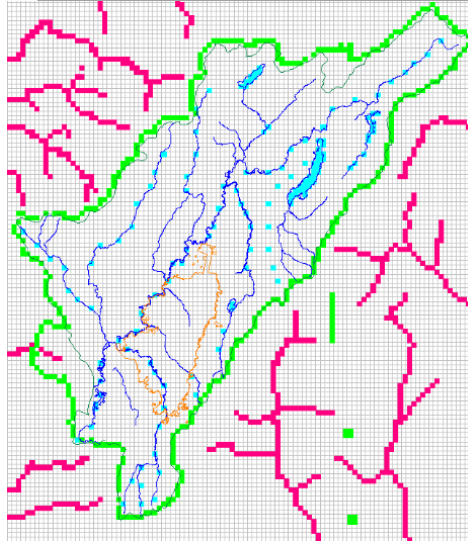


Figura 1-7. Límites del modelo numérico de JICA

En verde: General Head Boundary (GHB); en azul: Constant Head Boundary (CHB); en rojo: drenaje superficial. Fuente: EAAB-JICA (2009).

Se instalaron medidores automáticos de nivel, en el 2001, en 11 pozos del Cuaternario. El informe muestra los resultados del monitoreo de niveles entre el 2001 y el 2008 y concluye que:

- (i) a pesar de que más de 7,000 pozos de agua subterránea fueron perforados en la región, el nivel del agua subterránea no ha disminuido y no disminuirá en un largo período de tiempo,
- (ii) el nivel del agua en el Cuaternario claramente responde a las estaciones y a la infiltración de la lluvia, por lo tanto, concluye que el sistema Cuaternario recibe recarga.

En este estudio se desarrolla una simulación numérica con énfasis en el acuífero Cretácico de los cerros orientales y Sur de Bogotá. En la Figura 1-7 se presentan los límites de este modelo y en la Figura 1-8, la distribución de la recarga por celda [aparentemente diferente de la distribución presentada en el informe de JICA del 2003], que se traduce en una recarga promedio de 132 mm/año.

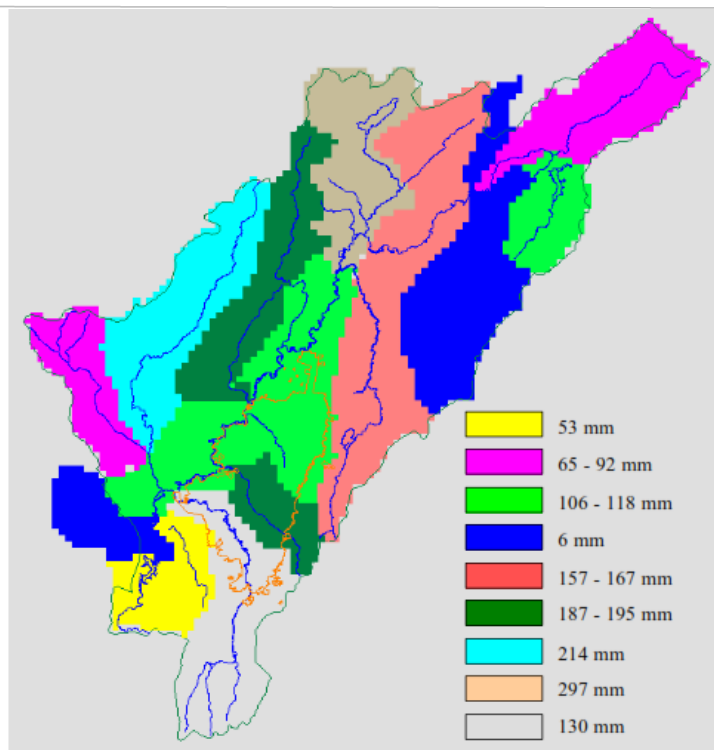


Figura 1-8. Límites del modelo numérico de JICA.

En verde: General Head Boundary (GHB); en azul: Constant Head Boundary (CHB); en rojo: drenaje superficial. Fuente: EAAB-JICA (2009).

1.2.8 Universidad Nacional de Colombia, 2006. Proyecto: Brindar apoyo técnico y actualizar herramientas para la regulación del aprovechamiento de las aguas subterráneas en Bogotá. Contrato Inter-administrativo No. 190/2005. Informe Final.

Este informe realizado por la Universidad Nacional de Colombia para el DAMA (hoy Secretaría Distrital de Ambiente), revisa el modelo hidrogeológico construido por la firma Hidrogeocol Ltda para el DAMA en 1999.

Según los autores este modelo no representa adecuadamente las características hidrogeológicas de los depósitos no consolidados, particularmente en el modelo numérico no se representan las lentes de arena de los acuíferos cuaternarios que alimentan más del 92% de los pozos del Distrito Capital. Se resalta la necesidad de investigar la localización, continuidad lateral y sistema de recarga de estas lentes.

De acuerdo con el modelo conceptual desarrollado por la Universidad Nacional, la recarga al sistema cuaternario es despreciable en términos de balance hídrico, porque las lentes de arena estarían rodeadas por materiales de muy baja permeabilidad (arcillas y limos). Sin embargo, el reporte identifica la necesidad de desarrollar un modelo matemático específico para las lentes de arena del Cuaternario con propósitos de evaluación, gestión y pronóstico del recurso hídrico subterráneo.

1.2.9 Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), 2013. Subdirección de Recurso Hídrico y del Suelo. Sistema de Modelamiento Hidrogeológico del Distrito Capital. Bogotá.

La SDA desarrolla un modelo conceptual del área urbana del Distrito Capital con base en el análisis de variables climatológicas y estimación del balance hídrico, levantamiento geológico de detalle a escala 1:25,000, generación de una mapa de curvas de igual espesor de los depósitos cuaternarios, elaboración de mapas de isopiezas para diferentes temporadas, interpretación de pruebas de bombeo para la estimación de los parámetros y procesamiento de datos hidrogeoquímicos e isotópicos (deuterio, O-18) de diferentes tipos de agua (lluvia, superficial, subterránea).

La recarga viene estimada por tres métodos: ecuación de balance hídrico, mapas de isorecarga potencial y mediante el método de Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1988), arrojando valores promedio para el área de estudio de respectivamente 70 mm/año, 157 mm/año y de 143 mm/año [se observa que estas dos últimas tasas de recarga son similares a la estimada por JICA (2009), que es de 132 mm/año]. Las tasas más altas de recarga se generarían en los cerros orientales, donde se reportan valores mayores a 190 mm/año.

Con base en el análisis de isótopos estables (deuterio, O-18), la SDA concluye que la mayoría de humedales estudiados presentan conexión con aguas subterráneas, caracterizadas por flujos intermedios a regionales, mientras que el humedal Juan Amarillo presenta solo alimentación local por parte del agua de lluvia.

Por otro lado, los pozos y aljibes sugieren mezclas de agua de lluvia (flujo subterráneo local) con agua subterránea con flujo intermedio a regional. [se nota que algunas alturas de recarga reportadas por la SDA exceden considerablemente las elevaciones topográficas registradas en los cerros que rodean Bogotá; es posible que esta aparente inconsistencia sea debida a la ecuación utilizada para la relación del deuterio con la altura (Rodríguez, 2004), sin embargo, se necesita más investigación al respecto].

Finalmente, a la SDA reporta rangos amplios de transmisividad para los diferentes complejos acuíferos, a saber, entre 5.4 y 1064 m²/día para el Acuífero Guadalupe (Cretácico), entre 1.37 y 373 m²/día para la Formación Sabana (Cuaternario) y entre 315 y 1432 m²/día para Formación Chía – Río Tunjuelo (Cuaternario), esta última presente esencialmente en el sector sur del Distrito Capital.

En lo relativo a los descensos de los niveles piezométricos en el último decenio (2000-2010 aproximadamente), se reporta que las zonas más afectadas corresponden a áreas con mayor presencia de industrias que aprovechan el agua subterránea, es decir los sectores de Puente Aranda (descensos de 5-10m), Kennedy (descensos de 20m) y Fontibón (descensos históricos hasta de 12m con recuperaciones locales recientemente) [se destaca que estas tasas de descenso son diferentes de las antiguamente reportadas por Lobo-Guerrero (1992) que son de 5-10 m/año].

2 OBJETIVOS Y ALCANCE

Este informe materializa uno de los primeros ejercicios de investigación desarrollados en el país, que busca contribuir al conocimiento y entendimiento de los procesos que tienen lugar en los acuíferos urbanos, en particular sobre los acuíferos someros del distrito. Los avances técnicos fundamentaron la construcción de modelo hidrogeológico conceptual, referente técnico en hidrogeología, de cara a los retos y desafíos que afronta el país en materia de la gestión del agua para grandes ciudades, ciudades intermedias, y su renovación urbanística asociada, para garantizar la calidad de vida de sus habitantes actuales y futuros.

El modelo hidrogeológico conceptual de Bogotá D.C. presentado recoge toda la información secundaria disponible, y propone un esquema conceptual innovador y propositivo que incluye consideraciones de acuíferos localizados en áreas urbanas. Para lo mismo, fue fundamental construir un modelo geológico 3D del acuífero de Bogotá, que incorpore e integre toda la información técnica que permita facilitar el análisis de las interacciones entre los elementos del contexto urbano, con las capas acuíferas someras y a su vez con cuerpos de agua estratégicos del distrito capital.

Sumado a ello, fue indispensable construir un modelo hidrológico que contemple la recarga natural y artificial, esta última asociada a las estimaciones de pérdidas del sistema de acueducto y alcantarillado del distrito, y complementado con el modelo analítico.

Finalmente, se construyó un modelo analítico 2D regional, con el propósito de refinar las condiciones de frontera del modelo hidrogeológico de Bogotá, e identificar las zonas de recarga que se extienden más hacia el occidente y oriente de la divisoria de aguas del Distrito, y las descargas del piedemonte (flujos locales); descargas a través de fallas transversales hacia el Cuaternario con tiempos de tránsito desde cientos de años a miles de años.

Así bien, el modelo permite distinguir flujos regionales, intermedios y locales, con distribución diferente al sur y al norte de la ciudad. Se evidencia la probabilidad de flujos verticales, provenientes de la recarga en los cerros, que viajan a través de los depósitos consolidados, en especial el Grupo Guadalupe y ascienden hasta el cuaternario.

Es importante aclarar, que el modelo cuenta con limitaciones asociadas a incertidumbre en la estimación de la demanda, dada la carencia en la información de los pozos, la profundidad de extracción (para un mismo pozo se reportaban dos o más profundidades), caudales de extracción (gran parte reportados como el caudal concesionado), clasificación de pozos activos y no activos, y la ubicación de los filtros. Por otro lado, y con respecto al balance hídrico global de la sabana de Bogotá, existen incertidumbres relacionadas con el flujo de agua subterránea desde la base del Complejo Neógeno-Cuaternario desde/hacia el complejo Paleógeno o Guadalupe; así como, con la propagación de la infiltración efectiva relacionada con las pérdidas de la red de acueducto y alcantarillado de Bogotá, hacia horizontes más profundos del relleno Cuaternario. Incertidumbres que fueron enfrentadas a través de la modelación analítica en 3D y la modelación 1D de la zona no saturada.

Aunque el presente documento se concentra en la construcción del modelo hidrogeológico conceptual para el distrito capital, perfila la ruta hacia la construcción del modelo numérico que, alimentado con información primaria complementaria, reduce la incertidumbre técnica que permita consolidar una herramienta de soporte de decisiones, y así potencializar los actuales aportes técnicos para la gestión del agua subterránea del distrito.

3 DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

3.1 Morfología e Hidrografía

El Distrito Capital (Bogotá) se encuentra ubicado en la Sabana de Bogotá y limita por el oriente con los cerros de Monserrate (3.152 m.s.n.m.) y Guadalupe (3.260 msnm) que determinan en gran parte las características hídricas de esta área conformando la red hidrográfica de la ciudad.

El drenaje natural de estos cerros en su vertiente occidental se desarrolla a través de una gran cantidad de quebradas que se convierten en los afluentes de los principales ríos de la ciudad: Salitre, Fucha, Tunjuelo Y Torca. Las cuencas de estos ríos drenan el agua de más del 90 % del área urbanizada.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de las cuencas asociadas al área de estudio:

3.1.1 *Cuenca del río Salitre*

La cuenca del río Salitre se encuentra ubicada en el sector centro-norte del Distrito Capital, limita por el norte con la cuenca del río Torca y el humedal La Conejera, por el occidente con el río Bogotá y el humedal Jaboque, al oriente con los municipios de La Calera y Choachí, y por el sur con la cuenca del río Fucha.

La cuenca del Salitre tiene un área de drenaje de 13.964 hectáreas. Posee una longitud de cauce principal de 19,76 km y la pendiente media del cauce es de 3,32 %. Su altura promedio es de 2.870 msnm, donde la cota máxima está por el orden de los 3.200 msnm y la mínima está sobre los 2.540 msnm aproximadamente.

3.1.2 *Cuenca del río Fucha*

La cuenca del río Fucha se subdivide en tres sectores, cuenca alta la cual corresponde a la parte montañosa, cuenca media que inicia a la entrada del río al perímetro urbano de la ciudad de Bogotá hasta la avenida Boyacá y la cuenca baja desde la avenida Boyacá hasta su desembocadura en el Río Bogotá. Está localizada en el sector centro-sur del Distrito Capital, y drena las aguas de oriente a occidente para finalmente entregarlas al río Bogotá.

El río Fucha es uno de los cuerpos hídricos más importantes de la sabana de Bogotá con una longitud de 17,30 km, este nace en los cerros orientales y como producto de la confluencia de las quebradas La Osa y Upata. La cuenca tiene un área total de drenaje de 17.536 Ha, correspondientes 12.991 ha urbanas y 4.545 Ha en la parte rural (correspondiente a los cerros orientales); y una pendiente promedio del 5.3 %.

3.1.3 *Cuenca del río Tunjuelo*

El río Tunjuelo nace a partir de la confluencia de los ríos Chisacá, Mugroso y Curubital en las estribaciones del Páramo del Sumapaz, las cuales convergen al Embalse La Regadera a 2.900 msnm de altitud que tiene la capacidad de contener un volumen de agua de 4 millones de m³. A partir de este embalse se llama río Tunjuelo, donde toma una dirección sur a norte por el valle longitudinal de Usme. Al llegar a la zona urbana sur de Bogotá, donde toma un rumbo norte-oeste y oeste hasta la

confluencia con el río Bogotá. Este río tiene una extensión de 73 km, siendo su área de drenaje urbana 41.427 hectáreas y 4.237 hectáreas rurales.

3.1.4 Cuenca del río Torca

La cuenca del canal Torca tiene un área de drenaje 6.008,69 hectáreas y cuenta con una longitud de 13.06 km. desde el conjunto residencial Bosque de Pinos ubicado en la Carrera 6 con Calle 153 hasta su entrega al río Bogotá. Este río nace en los cerros orientales y desemboca al sistema humedal Torca-Guaymaral a altura de la Autopista Norte, en cercanía a los terrenos del cementerio Jardines de Paz, y a su vez drena al norte de la cuenca media del río Bogotá. La cuenca se conforma por tres subcuencas principales: El Cedro, San Cristóbal y Serrezuela, que se inician en los cerros orientales de la ciudad y cuyos canales se encuentran revestidos.



Figura 3-1 Cuencas del sistema de drenaje de la ciudad de Bogotá.

Fuente: <http://www.idiger.gov.co/riesgo-por-inundacionHidráulica>

3.2 Hidrología y climatología

El Distrito capital, cuenta con información meteorológica a nivel diario y subdiario de estaciones de tipo: sinóptica principal (SP), pluviográfica (PG), pluviométrica (PM), meteorológica especial (ME), climatológica principal (CP), y climatológica ordinaria (CO). Asimismo, cuenta con una red de estaciones hidrológicas clasificadas en limnigráfica (LG) y limnimétrica (LM) dentro de las cuales algunas registran valores diarios o subdiarios.

La mayoría de las estaciones de monitoreo son de tipo convencional y un porcentaje menor tienen un componente electrónico, lo que representa que la mayoría de los registros sea a nivel diario. El monitoreo hidrometeorológico de la ciudad, está a cargo principalmente por la Corporación Autónoma Regional (CAR), de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Se recopiló y unificó la información de 48 estaciones de precipitación de la SDA, IDEAM, FOPAE y EAAB, con el fin de construir una base de datos con registros diarios, con el respectivo sistema de proyección cartográfica de las posiciones geográficas de cada estación.

Tabla 3-1 Relación de estaciones por entidad

ENTIDAD	No de Estaciones
FOPAE	12
SDA	4
EAAB	16
IDEAM	8
CAR	8
Total	48

Por otro lado, se consolidaron los registros de temperatura a partir de la información de registros diarios de 8 estaciones meteorológicas del IDEAM, para el periodo comprendido entre 1980 a 2015.

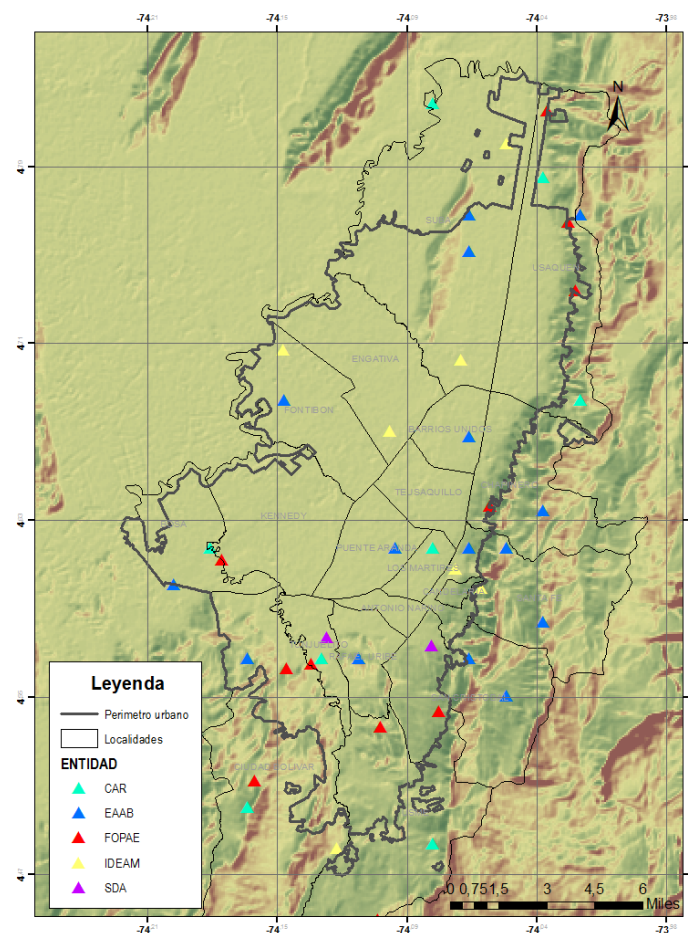


Figura 3-2. Estaciones meteorológicas en la zona urbana del distrito capital

El Balance hídrico en una cuenca o zona definida se establece a través de la ecuación de conservación de masa, así:

Cambio en el Almacenamiento = Entradas – Salidas

Para un río determinado el caudal (Q) en un tiempo dado t , es decir $Q(t)$ es la suma del flujo subsuperficial y la escorrentía superficial. Si adicionalmente se descarta la percolación a acuíferos profundos por ser valores significativamente pequeños en relación al caudal y la evapotranspiración, la ecuación de balance será entonces:

Ecuación 3-1 Balance hídrico

$$\frac{dS(t)}{dt} = P(t) - ETR(t) - Q(t), \text{ para } t > 0$$

Donde:

dS : Cambio en el almacenamiento

P : precipitación (mm)

Q : escorrentía total (mm) (flujo superficial + flujo subterráneo)

ETR : evapotranspiración real (mm) (evaporación + transpiración)

Es indispensable entonces medir o estimar cada uno de los componentes de esta ecuación para establecer el balance del agua en el área de análisis.

3.2.1 Precipitación

Para la generación de los mapas mensuales de precipitación se trabajó con 48 estaciones identificadas en la sección 1 del presente informe de las cuales se tienen datos desde 1980 a 2013. Con estos datos se realizó la agregación mensual y anual para obtener una serie de 12 meses para cada estación correspondiente a la precipitación total mensual media multianual.

En la Figura 3-3 se puede identificar el régimen bimodal de la zona del distrito, destacando allí dos periodos húmedos en los meses de abril a mayo y de octubre a noviembre. Así mismo los periodos más secos son de agosto a septiembre y de diciembre a enero. Los valores medios varían dependiendo el mes de entre 40mm/mes a 110mm/mes.

Con estos datos asociados a cada estación se realizó la especialización de la información de precipitación implementando el método de interpolación IDW en ArcGIS, del cual, se obtuvo 12 mapas de precipitación total mensual media multianual y un mapa de precipitación total anual media multianual.

Estos valores de precipitación también son variables espacialmente, encontrando así, que en el área urbana del distrito la precipitación puede pasar en los periodos secos de 10 mm/mes a 80 mm/mes y en periodos húmedos de 50mm/mes a 170 mm/mes dependiendo el lugar donde se midan los datos. En la Figura 3-4 se presenta el mapa de precipitación total anual media multianual, en este se identifica que la zona oriental de la ciudad es donde predominan los valores más altos de pluviosidad en el perímetro distrital.

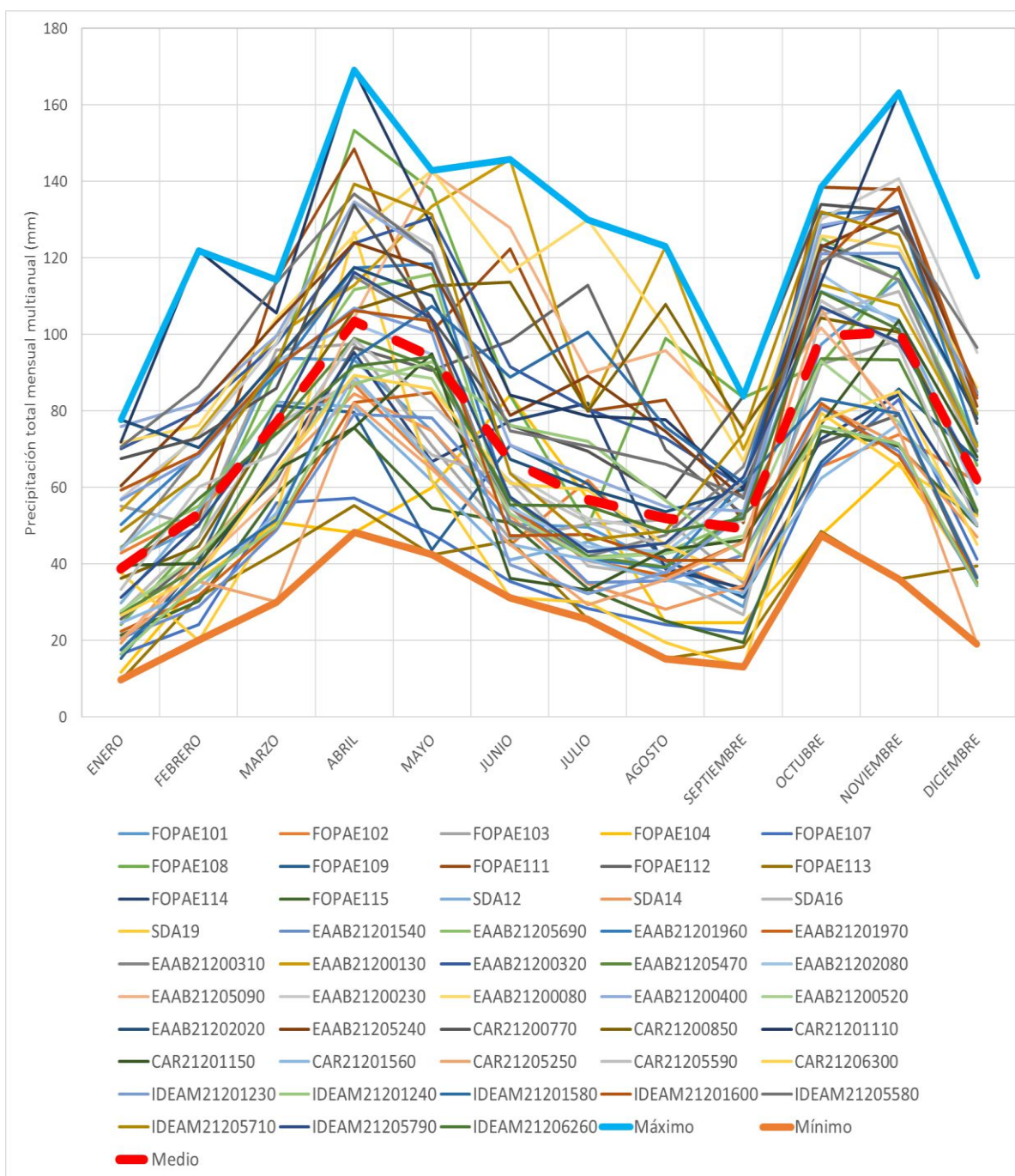


Figura 3-3. Precipitación media, máxima y mínima de las estaciones en el distrito

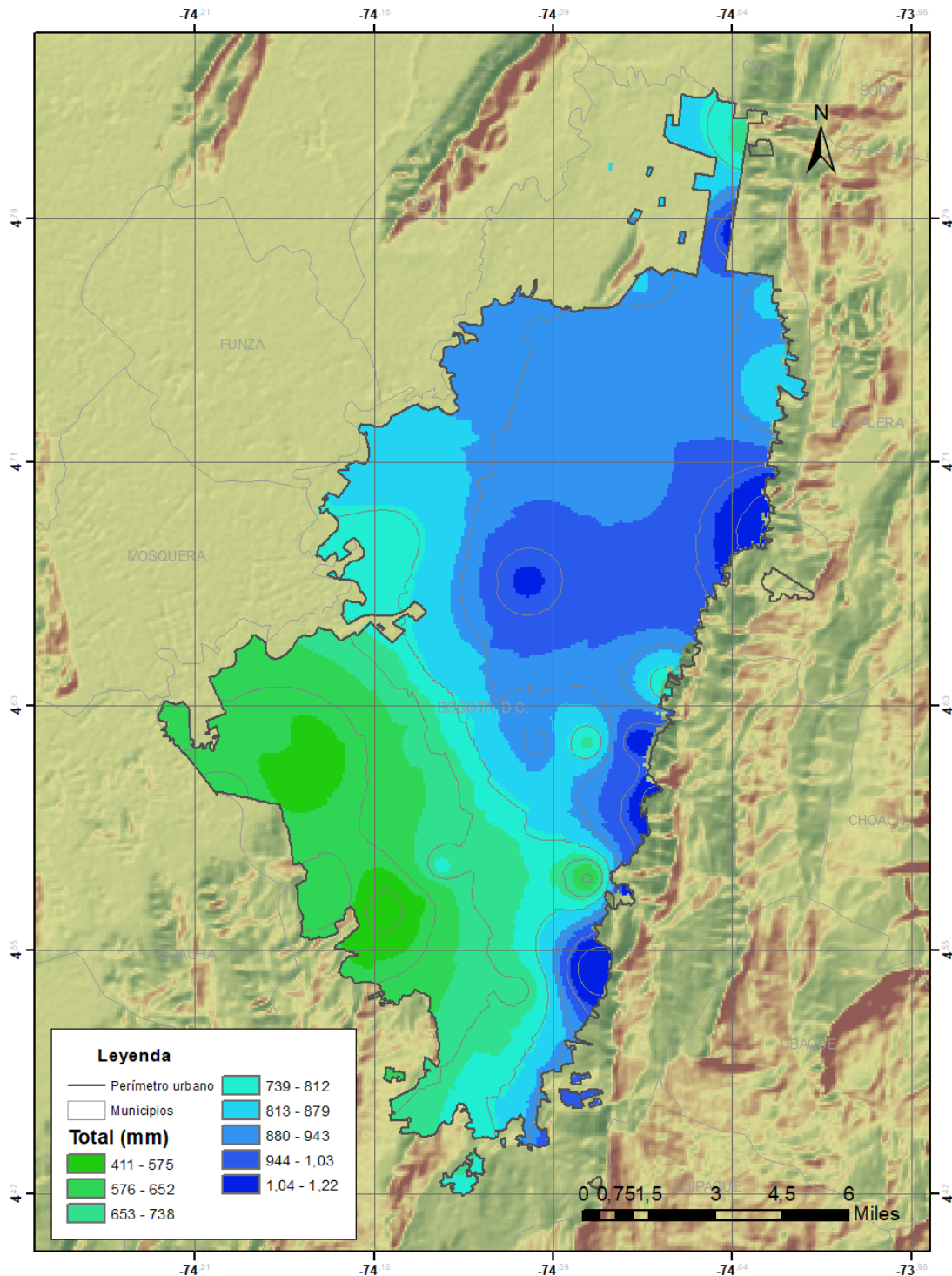


Figura 3-4 Precipitación total mensual media multianual

3.2.2 Temperatura

Para la información de temperatura se contó con información de 8 estaciones climatológicas con series diarias, con las cuales se calcularon los valores medios mensuales multianuales y se elaboró la Figura 3-5, donde se ve que si bien la variación de la temperatura media varia menos de 2 grados a largo del año, el cambio que presenta de un sitio a otro puede ser de hasta 6 grados centígrados, siendo el sector occidental del distrito el que presenta los valores más altos de temperatura media, tal como se aprecia en la Figura 3-6.

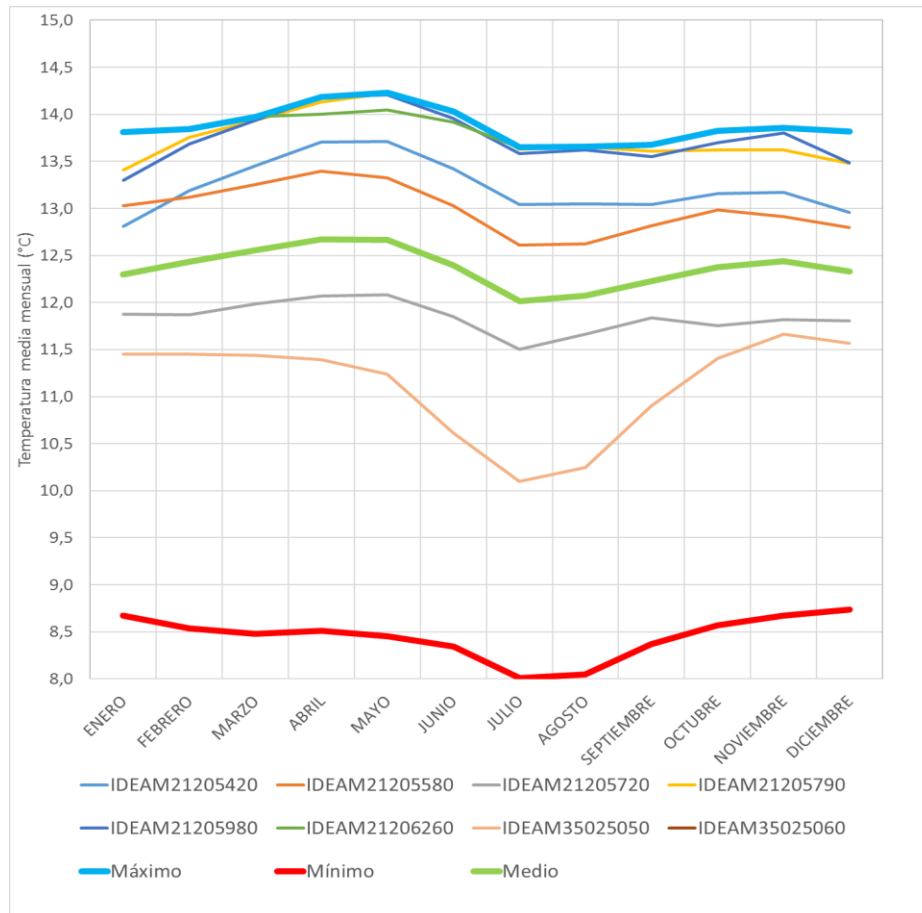


Figura 3-5 Temperatura media mensual multianual

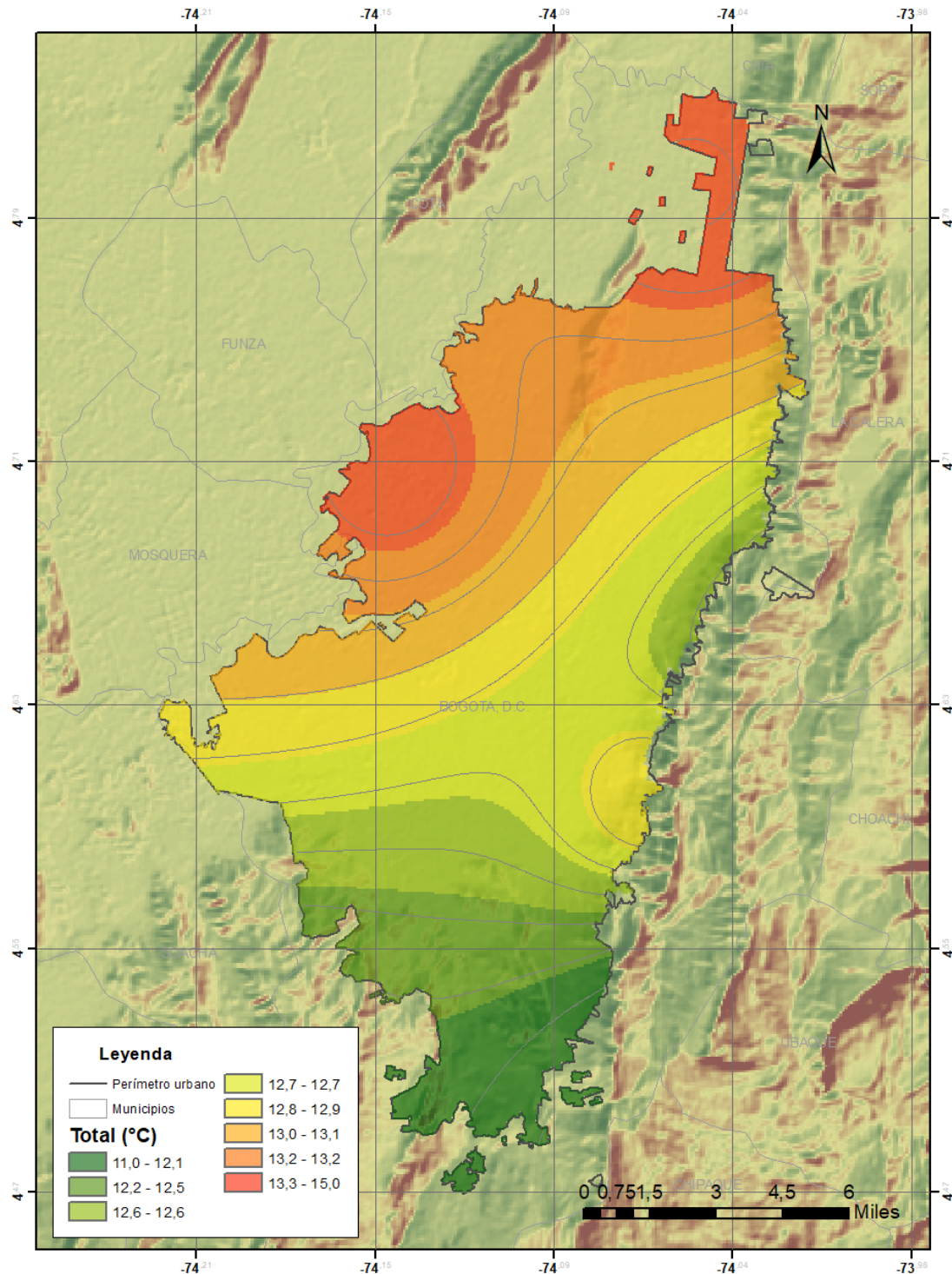


Figura 3-6 Mapa de temperatura media mensual multianual

3.2.3 *Evapotranspiración potencial*

La evapotranspiración potencial es aquella que ocurre en un área si el suministro de agua fuese continuo e ilimitado, por tanto, este valor sirve como referencia como la evapotranspiración máxima que puede llegar a ocurrir y siempre será mayor a la evapotranspiración real.

Existen varios métodos para calcular este parámetro, los cuales se basan en balances energético determinados por información de temperatura, y radiación solar.

El método de Turc está dado por la siguiente ecuación:

$$ETP = K \left(\frac{T}{T + 15} \right) (RG + 50) \quad \text{Ecuación 3-1. ETP Turc}$$

Donde:

ETP: Evapotranspiración

T: Temperatura

RG: Radiación Solar global incidente en el mes dado en cal/cm²/día

K: coeficiente equivalente a 0.4 para meses de 30 o 31 días y 0.37 para febrero

Utilizando como insumo los mapas de temperatura mensual ya calculados se estimó el valor de ETP para los 12 meses y agregando esta información se obtuvo el mapa de la Figura 3-7 correspondiente a la ETP anual multianual en el área urbana del distrito.

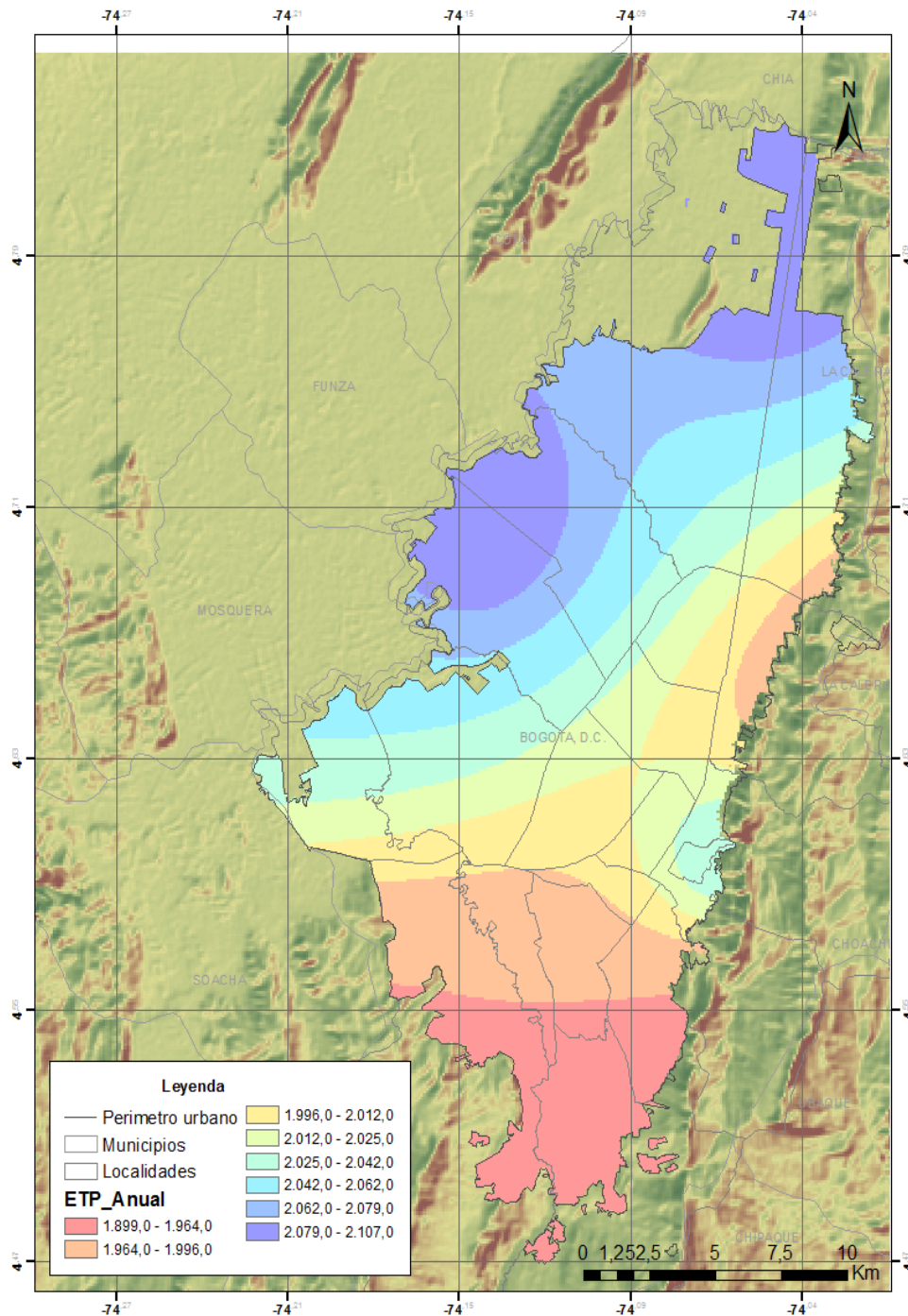


Figura 3-7 Mapa de evapotranspiración potencial total anual media multianual

3.2.4 Evapotranspiración real

El valor de evapotranspiración real corresponde a la ocurrencia real medida o estimada en el área, este parámetro depende del agua disponible en el suelo, por tanto, está directamente relacionado con

la precipitación que se halla acumulada en el tiempo de análisis. Así mismo, está influenciado por las coberturas presentes en el área ya que estas inciden directamente en los volúmenes de agua evapotranspirados. Sin embargo, se han desarrollado aproximaciones de este cálculo basado en la temperatura, la ETP y la cantidad de precipitación caída en el periodo de análisis. Una de estas ecuaciones es la Budyko, la cual nos correlaciona la ETP y la ETR teniendo en cuenta la precipitación. Esta ecuación es:

$$ETR = \left(\left(ETP \cdot P \cdot \tanh \left(\frac{P}{ETP} \right) \right) \left(1 - \cosh \left(\frac{ETP}{P} \right) + \sinh \left(\frac{ETP}{P} \right) \right) \right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 3-1. ET Budiko}$$

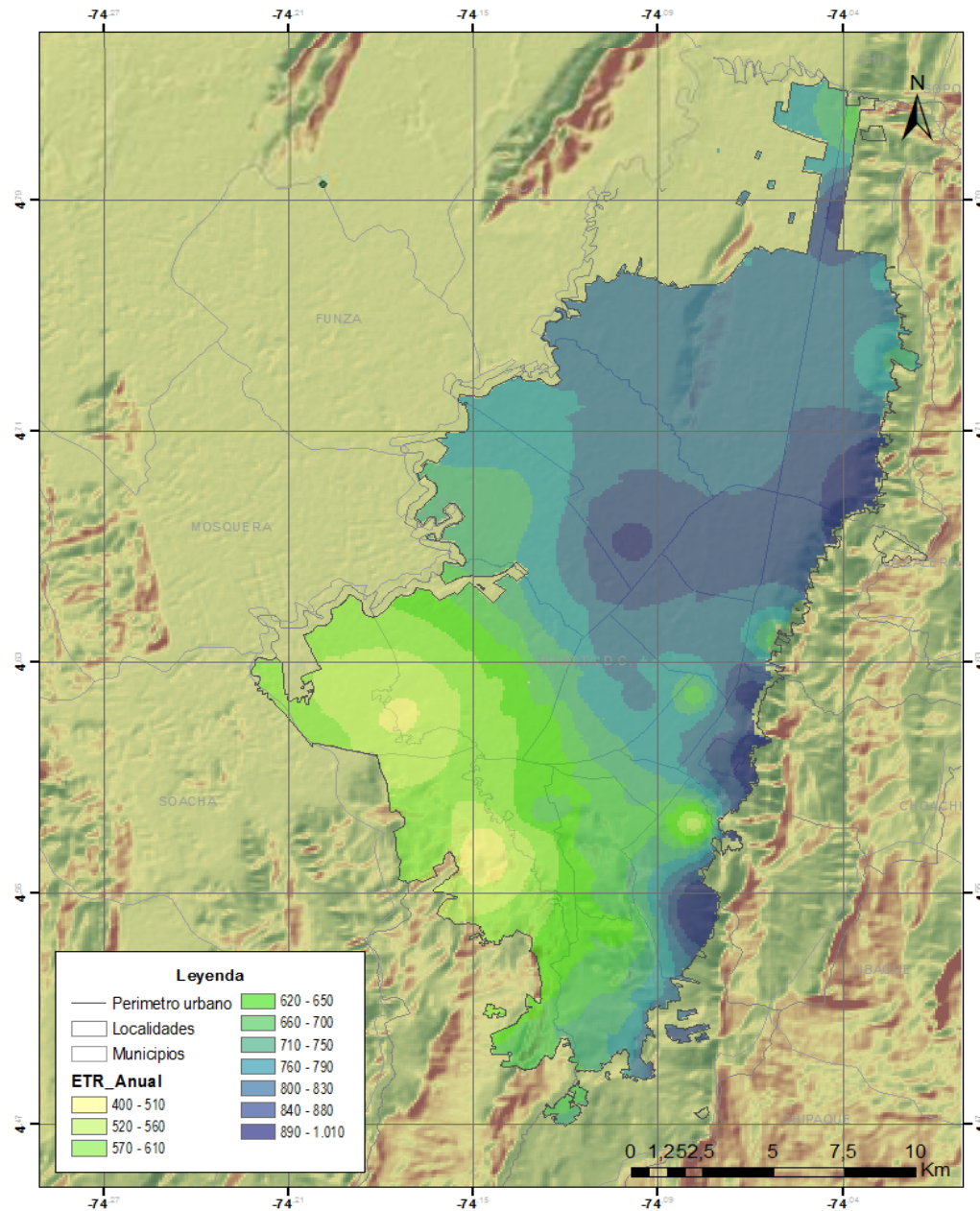
Donde:

ETP: Evapotranspiración real

P: Precipitación

Utilizando esta ecuación se estimaron los valores de ETR para el distrito a nivel mensual y anual multianual, estos resultados se muestran en la Figura 3-8.

Figura 3-8 Mapa de evapotranspiración real total anual



3.2.5 Balance hídrico anual

Para el cálculo del balance hídrico anual, se asume que el volumen de control comprende desde la superficie hasta la máxima profundidad de la zona vadosa, incluyendo el acuífero superficial o poco

profundo, tal como lo propone Eagleson (1978) en el esquema del suelo para balance hídrico superficial, presentado en la Figura 3-9.

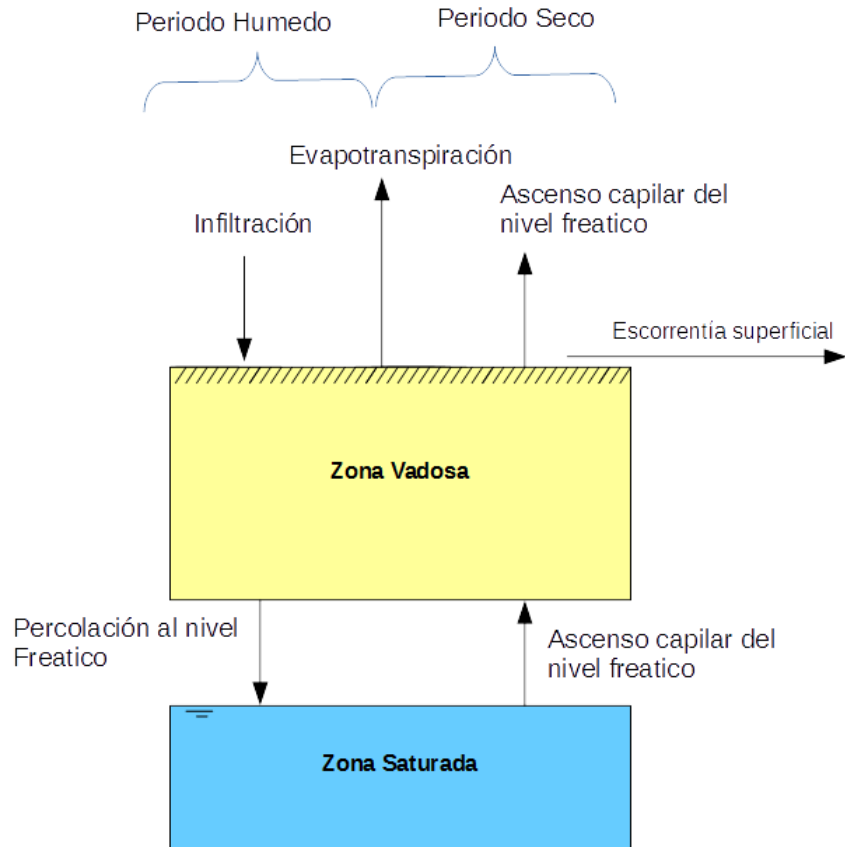


Figura 3-9 Representación de la columna de suelo. Adaptado de (Eagleson, 1978)

En la Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur se indica que, en áreas extensas y en largos periodos de tiempo (anual), se puede utilizar la ecuación de balance hídrico simplificada, considerando que los cambios de almacenamiento tienden a minimizarse y pueden suponerse nulos. Este concepto es utilizado en el Estudio Nacional del Agua ENA 2014 para estimar la escurrimiento en cada una de las subzonas hidrográficas de Colombia.

Teniendo en cuenta esto y aplicándolo a la ecuación de Balance tenemos que:

$$\frac{dS(t)}{dt} = 0 = P(t) - ETR(t) - Q(t), \text{ para } t = 1 \text{ año}$$

Ecuación 3-1. Balance hídrico para un año

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores y el periodo de tiempo del balance tenemos que;

$$Q(t) = P(t) - ETR(t), \text{ para } t > 1 \text{ año}$$

Ecuación 3-2. Balance hídrico

De este modo si tenemos valores anuales de precipitación y evapotranspiración podemos hacer estimaciones de escorrentía superficial, obteniendo así la escorrentía distribuida en el área del perímetro urbano del distrito, como se presenta en la Figura 3-10.

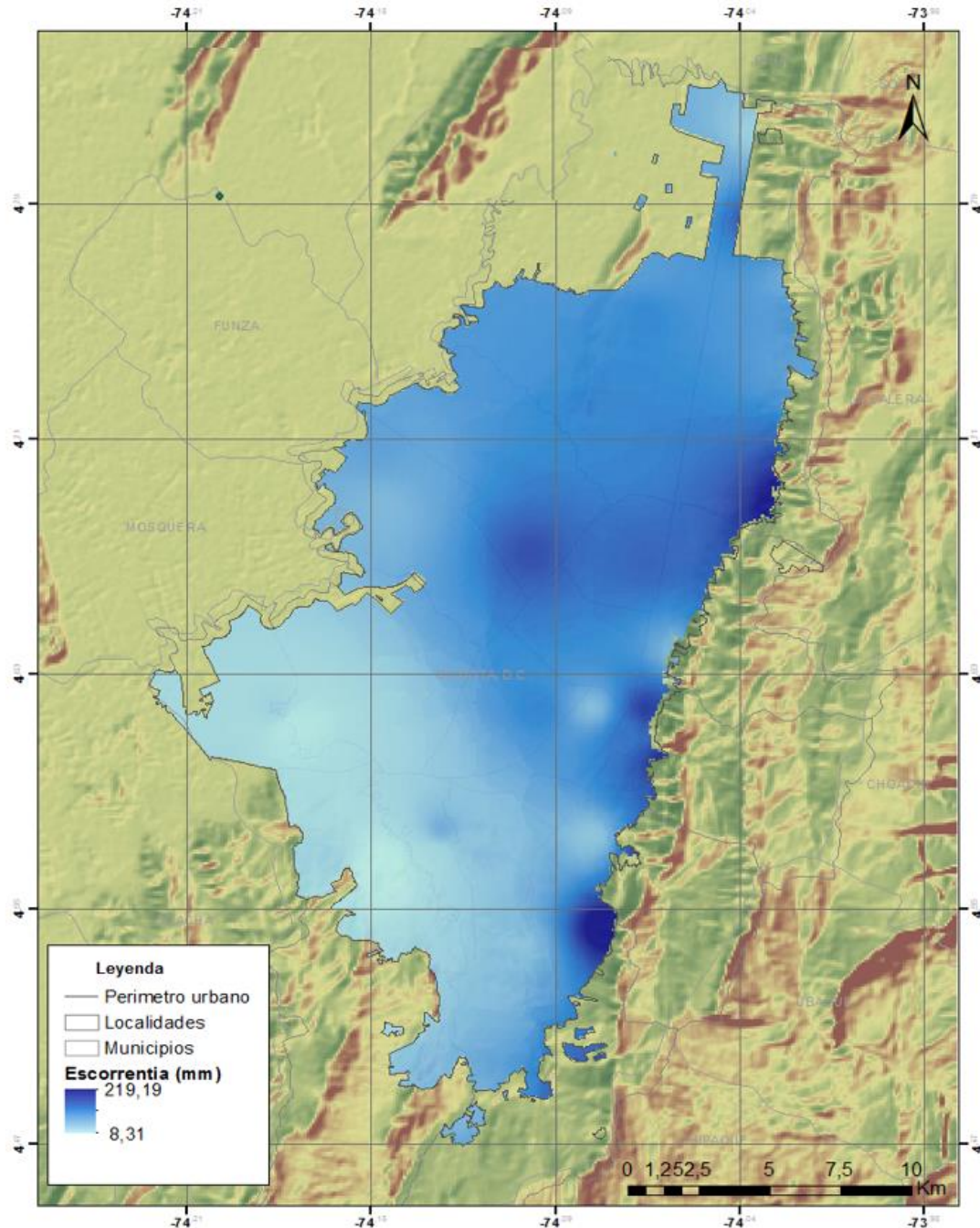


Figura 3-10 Mapa de Escorrentía superficial

3.3 Geología

La ciudad de Bogotá ubicada en la zona central de la Cordillera Oriental de Colombia, se encuentra construida sobre lo que corresponde estructuralmente a una cuenca intramontana o intracordillera de origen tectónico - sedimentario (Velandia & De Bermoudes, 2002). Este lugar se generó como producto del plegamiento y fallamiento asociado al levantamiento de la cordillera, permitiendo acumular sedimentos en este caso que dieron lugar a la Sabana de Bogotá que conocemos en la actualidad, definida después del levantamiento final de los Andes del norte, hace alrededor de 5 millones de años (5Ma) (T. Van der Hammen, Werner, & van Dommelen, 1973). La sabana de Bogotá es conformada por sedimentos no consolidados de edad Neógeno – Cuaternario, con espesores identificados de hasta 601,5m en el Pozo (SDA 01 Suba-Bilbao) perforado en la ciudad, en el sector de Suba-Bilbao, por la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) en predio del acueducto de Bogotá, año 2014.

De acuerdo con (Torres, Vandenberghe, & Hooghiemstra, 2005) del análisis de 586m de testigos de otra perforación, pozo (Funza-2) con denominación de origen, los sedimentos más profundos en esta investigación datan aproximadamente 3,2 Ma con 4 ambientes principales correspondientes a lacustre, pantano, fluvio – lacustre y fluvial. Estos sedimentos se encuentran reposando discordantemente sobre rocas sedimentarias de ambiente Continental a transicional-marino del Cretáceo y Paleógeno (Ingeominas, 2005)

Estas rocas presentan una alta complejidad tectónica manifestada en el intenso fallamiento y plegamiento de los cerros circundantes de la ciudad, conformando generalmente sinclinales amplios y anticlinales estrechos, en ocasiones invertidos, con ejes principalmente en dirección NE. Existen fallas de cabalgamiento que desplazan los contactos entre las unidades con dirección principal NE y fallas de rumbo de dirección NW correspondiente a la tendencia principal de los andes del norte (Velandia & De Bermoudes, 2002). Este autor además sugiere continuidad de algunas fallas bajo la cobertura de edad Cuaternario con efectos recientes sobre los depósitos no consolidados y posibles controles en el comportamiento hidrogeológico del área.

La Figura 3-11 presenta la cuenca sedimentaria de Bogotá con una geología del área simplificada por edades, modificada de la plancha 5-09 del (SGC). En esta figura se observa que la sabana en general está conformada por sedimentos más recientes de edad Neógeno-Cuaternario y encerrada por relieves montañosos los cuales corresponden a rocas sedimentarias de edad Paleógeno como los cerros de Suba, Cretácico como los de Tabio, Tenjo y cerros orientales. Estos cerros se encuentran muy fracturados y plegados producto de los fenómenos compresivos que dieron lugar al levantamiento de la cordillera oriental, de igual manera disectados como sugieren algunos autores por fallas, limitando su extensión por ejemplo al sur en los cerros de Tabio, Tenjo y Suba, fracturas que muy probablemente tengan un papel importante en el sistema hidrogeológico de la región, producto de esto evidenciamos algunos manantiales termales en superficie identificados en la imagen con color rojo.

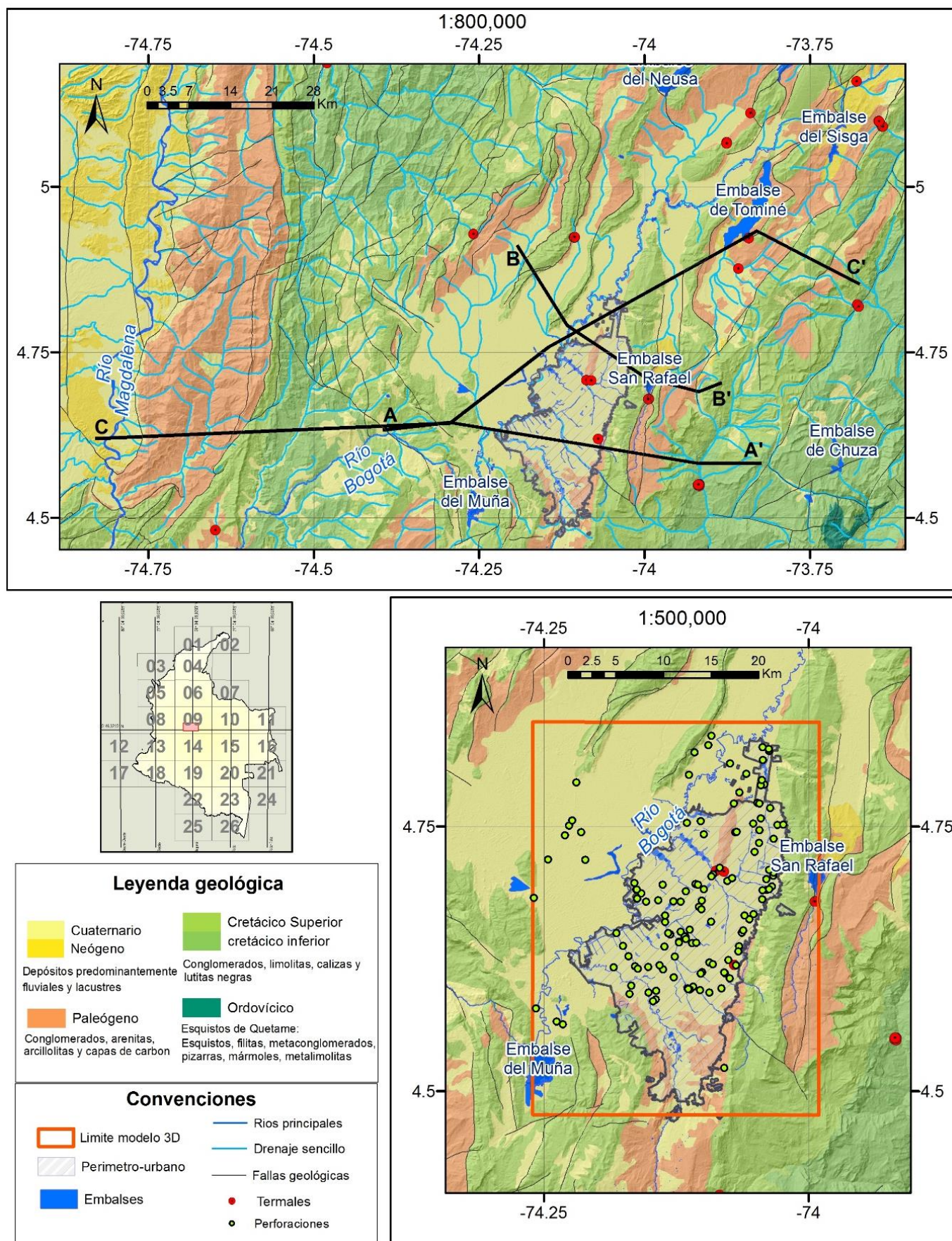


Figura 3-11 Geología generalizada para la Sabana de Bogotá (modificado del SGC)

En el acercamiento se puede apreciar un límite en color naranja que encierra el perímetro urbano de la ciudad el cual comprende la frontera del modelo geológico 3D. los puntos de color verde corresponden a las perforaciones con registros litológicos recopiladas para la construcción de este modelo.

En esta imagen también se ubican 2 perfiles regionales AA' y BB', un tercer perfil de mayor longitud y profundidad denominado en este caso Suprarregional CC', ver Figura 3-12 construidos en el presente trabajo a partir de la interpretación de las planchas geológicas (226, 227, 228, 246 y 247) a escala 1:100.000, producidas y publicadas por (INGEOMINAS) actual Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Es muy importante resaltar que en la construcción respectiva de los perfiles geológicos regionales, nos encontramos con la dificultad de que estas planchas no empalman completamente, por la utilización de nomenclaturas y conceptos geológicos diferentes en cada una de ellas, por los diferentes autores, sin embargo para el área de la Sabana de Bogotá, el SGC en el año 2005 publicó una actualización cartográfica, permitiendo dar claridad en la diferenciación estratigráfica e identificación de estructuras regionales esta zona. Se presentan estos perfiles con el ánimo de brindar una contextualización muy general de la geología y así lograr comprender de una mejor manera desde lo regional a lo local.

Los perfiles regionales A-A' y B-B' presentados en la Figura 3-12 siguen la nomenclatura planteada para este proyecto la cual vemos en la Tabla 3-2 construida y simplificada a partir de la actualización cartográfica de Montoya & Reyes, (2005) y la utilizada en (SDA, 2013). El perfil suprarregional C-C' consta principalmente de una agrupación de las formaciones por edades geológicas según la leyenda de la Figura 3-11 y una profundidad de interpretación hasta el basamento cristalino, soportado por la interpretación de (Graterol, 2008). Estos perfiles son la base de la modelación analítica, con el objetivo de determinar el comportamiento a escala regional de las líneas de flujo y posibles tiempos de tránsito del agua por las diferentes unidades, esto será explicado a mayor detalle en el capítulo de modelación analítica.

Basados en la información litoestratigráfica para la sabana de Bogotá propuesta por (Montoya & Reyes, 2005) y para los depósitos no consolidados por (Thomas van der Hammen & Hooghiemstra, 1997), (Kuhry-Helmens, 1990) y la de (SDA, 2013), se presenta la siguiente tabla resumen de las unidades geológicas principales consideradas en el presente proyecto.

Tabla 3-2 Columna estratigráfica esquemática en el área de la ciudad de Bogotá

Tipo de Sedimento	Edad	Nombre de la Formación	Espe sor [m]	Descripción litológica		
SEDIMENTOS NO CONSOLIDADOS	Cuaternario	Fm. Chía (Qch)	5	Arcillas de inundación, limos fluviales y arcillas con materia orgánica lacustres.		
		Fm. Sabana (Qsa)	Fm. Río Tunjuelito (Qrt)	320	Arcillas, arcillas orgánicas, turba/lignito, arcillas arenosas y arenas arcillosas.	Gravas e intercalaciones de arenas y arcillas verdes
		Fm. Subacho-que (Qsu)		150		
		Plioceno	Fm. Tilatá (TQt)	250	Arcillas arenosas gris o verde, arcillas orgánicas, limos localmente bioturbados, arena arcillosa con local intercalaciones de horizontes de turbas/lignito, arcillas diatomáceas, gravas tamaño guijo y guijarro intercaladas con arenas de grano medio y grueso.	
	ROCA	Mioceno	Indiferenciado	N/A	N/A	
Oligoceno						
Eoceno		Fm. Regadera (Tir)(E2r)	756	Cuarzoarenitas de grano fino intercaladas con arcillolitas blancas y violeta.		
		Paleoceno	Fm. Bogotá (Tib)(E1b)	1095	Arcillolitas grises y violeta intercaladas con arenitas lodosas.	
Fm. Cacho (T1c)(E1c)			172	Cuarzoarenitas de grano muy fino a medio (grueso a muy grueso en la base), intercaladas con arcillolitas grises y violeta.		
Maastrichtiano		Fm. Guaduas (Tkg)(K2E1g)	1090	Arcillolitas grises, lodolitas carbonosas y láminas de carbón intercaladas con cuarzoarenitas de grano fino y medio.		
		Fm. A. Labor-Tierna (Ksglt)(K2t)	300	Cuarzoarenitas de grano muy fino, fino y medio intercaladas con liditas (con foraminíferos silicificados), limolitas y arcillolitas.		
Campaniano-Sup		Fm. Plaeners (Ksgp)(K2p)	187	Porcelanitas, limolitas y arcillolitas con algunas intercalaciones de arenitas.		

Tipo de Sedimento	Edad	Nombre de la Formación	Espe sor [m]	Descripción litológica
	Campaniano -Inf	Fm. A. Dura (Ksgd)(K2d)	450	Cuarzoarenitas de grano muy fino y fino con cemento silíceo o calcáreo, intercaladas con lodolitas físisles negras y limolitas.
	Santoniano	Fm. Chipaque (Ksch)(K2cp)	1000	Arcillolitas y lodolitas, intercaladas con limolitas y arenitas de grano muy fino y fino.
	Coniaciano			
	Turoniano			

3.3.1 Estratigrafía

Los sedimentos no consolidados del área de la Sabana de Bogotá, unidades de principal interés en este trabajo debido a que una gran parte de la explotación del agua subterránea en la ciudad lo hacen de estas formaciones, conciernen a sedimentos que se han depositado desde el mioceno tardío hasta el presente, por este motivo en este trabajo nos limitamos a describir estas formaciones, conformadas por la Formación Tilatá, Formación Subachoque, Formación Río Tunjuelito, Formación Sabana y Formación Chía, las cuales se describen de manera breve a continuación en orden cronológico.

3.3.1.1 Unidades del Cretácico

En las unidades de edad Cretácico se encuentra la Formación Chipaque (Ksch), formación que aflora al oriente de la sabana y al occidente sus correlacionables que se identifican como (Formación Conejo, Formación Frontera y Formación Simijaca) (Montoya and Reyes 2005). Para efectos de la modelación esta unidad fue simplificada, de tal manera que se considera continua de oriente a occidente de la sabana como Formación Chipaque.

Suprayaciendo esta formación, se encuentra el grupo Guadalupe conformado por la Formación Arenisca Dura (Ksgd), Formación Plaeners (Ksgp) y Formación Arenisca Labor-Tierna (Ksglt). A continuación, se describe a mayor detalle

3.3.1.1.1 Formación Chipaque (Ksch)

Se determina como Formación Chipaque a la secuencia de rocas finas que suprayace a la Formación Une e infrayace a la Formación Arenisca Dura y que aflora al Oriente de la sabana. Es considerada en algunos estudios como basamento impermeable sin ser este la excepción por su gran espesor y litología predominante.

A partir de la columna levantada en las veredas de Gazuca y Mulato, se pudo medir un espesor aproximado de 1027m en el que principalmente está constituida hacia la base por arcillolitas grises oscuras con algunos horizontes silíceos de color gris oscuro, hacia el centro y techo de la formación está caracterizado por una sucesión fina principalmente de arcillolitas intercaladas con algunos bancos arenosos de no más de 20m de espesor, hacia el techo aunque siguen predominando las arcillas es la parte más arenosa con laminación interna plano-paralela.

Las areniscas están dispuestas en capas medias y gruesas con contactos ondulosos, continuos, intercaladas con capas de limolitas con laminación lenticular y continua de areniscas de grano fino.

La edad de esta Formación es Cenomaniano Superior- Santoniano, según (Ingeominas 2005)

Según similitudes litológicas y fauna colectada permiten correlacionar esta formación con las Formaciones Simijaca, La Frontera y Conejo, que afloran al Occidente de la sabana.

3.3.1.2 Grupo Guadalupe

El Grupo Guadalupe está compuesto por las Formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna. En la Sabana de Bogotá, este grupo se reconoce por encima de la formación Chipaque y es suprayacida por la Formación Guaduas. Este grupo es de gran importancia hidrogeológica por ser considerado acuíferos y la posible interacción con los sedimentos no consolidados (Ingeominas 2005).

3.3.1.2.1 Formación Arenisca Dura (Ksgd)

Esta unidad litoestratigráfica reposa concordantemente y transicionalmente sobre la Formación Chipaque y es suprayacida por la Formación Plaeners. La sección tipo se localiza en el cerro El Cable (oriente de Bogotá), con un espesor que varía desde 300 a 449m, está constituida por areniscas en un 63% y 37% de limolitas, arcillolitas y liditas. Consta de intercalaciones de capas muy gruesas de areniscas cuarzosas de color gris a blanco, de grano fino a medio, con cementación silícea, bien seleccionadas en capas delgadas a muy gruesas y muy consolidadas, con intercalaciones de capas delgadas de lodolitas limolitas y arcillolitas de colores claros con espesores delgados.

El contacto superior con la Formación Plaeners es concordante y está determinado donde desaparecen los paquetes de areniscas de gran potencia y aparecen los estratos gruesos de limolitas.

La edad es Campaniano Inferior o Santoniano- Campaniano.

3.3.1.2.2 Formación Plaeners (Ksgp)

Esta unidad litoestratigráfica reposa concordantemente sobre la Formación Arenisca Dura y infrayace a la Formación Arenisca Labor, presenta un espesor que varía de 73 a 187m. Consiste de intercalaciones de lodolitas y arcillolitas con gran abundancia de foraminíferos bentónicos en la parte inferior, en la parte media niveles lidíticos y hacia la parte superior intercalaciones de lodolitas y areniscas, la edad es Campaniano Inferior.

3.3.1.2.3 Formación Labor-Tierna (Ksglt)

Su espesor total aproximado es de 157 a 325m y está constituida hacia la base por areniscas cuarzosas, de color gris claro, de grano fino a medio, ligeramente friables, la parte intermedia predominan arcillolitas y el conjunto superior está constituido por areniscas cuarzosas de color gris claras, de grano medio a grueso, con estratificación cruzada.

Los contactos se observan morfológicamente, el límite inferior es transicional rápido y concordante con la Formación Plaeners, pasa de intercalaciones de limolitas silíceas, arcillolitas a capas arenosas con intercalaciones de limolitas y arcillolitas de la Formación Arenisca de Labor-Tierna. El contacto superior con la Formación Guaduas es neto y concordante, al pasar de paquetes arenosos a arcillolitas de la Formación Guaduas. Edad Maestrichtiano Inferior a Medio.

3.3.1.3 Unidades del Paleógeno

3.3.1.3.1 Formación Guaduas (Tkg)

Comprende a la unidad que aflora en la región de Bogotá y que suprayace el grupo Guadalupe en contacto neto y concordante, e infrayace la Formación Bogotá, por intermedio del Horizonte del Cacho que sería la parte más baja del piso de Bogotá, en contacto neto.

El espesor total de la Formación Guaduas es muy variable puede llegar hasta los 1090m (Sarmiento, Van Wess, and Cloetingh 2006).

La unidad está constituida por arcillolitas compactas de color gris en ocasiones rojas, intercaladas con bancos importantes de areniscas cuarzosas de grano fino, matriz arcillosa, con abundantes mantos de carbón en la parte inferior y media.

Esta se depositó en un ambiente de aguas tranquilas (pantanos) y de llanuras aluviales durante el Maastrichtiano Superior (límite superior del Cretácico) y Paleoceno Inferior.

Formación Cacho (T1c)

El horizonte el Chacho corresponde al conjunto inferior ubicado en el piso de la Formación Bogotá, el cual tiene una naturaleza “arenisco ripioso” (Ingeominas 2005) y está constituido por una secuencia de areniscas cuarzosas de color amarillento a rojizo, de grano medio a conglomerático, friables, con abundante cemento ferruginoso, algunas veces interestratificada con arcillolitas grises claras, rojizas y violáceas.

El espesor estimado para esta formación es de unos 100-180m, sin embargo, otros autores reportan espesores menores.

Su ambiente de depositación es debido a corrientes fluviales trenzadas con llanuras de inundación adyacentes. El contacto superior es normal con la Formación Bogotá. Su edad es Paleoceno medio.

Formación Bogotá (Tib)

La Formación Bogotá corresponde a la unidad que suprayace a la Formación Cacho e infrayace a la Formación Regadera en contacto discordante. Consiste hacia la base de arcillolitas grises, blandas y plásticas con intercalaciones de areniscas grises claras a verdosas, de grano fino hacia la base y de grano grueso hacia el tope. El conjunto superior es predominantemente arcilloso. Es la unidad de mayor espesor el cual se estima de 1600m (Julivert 1962) y se considera que la depositación ocurrió en un ambiente de llanura aluvial y de ríos meándricos durante el Paleoceno Superior- Eoceno inferior (Kuhry-Helmens 1990b)

Formación Arenisca Regadera (Tir)

Esta Unidad suprayace a la Formación Bogotá e infrayace a la Formación Usme, esta restringe sus afloramientos al oriente de la Sabana, se encuentra constituida por capas de areniscas de cuarzo y fragmentos líticos, de color gris claro, con abundante matriz arcillosa e intercalaciones de arcillolitas de color gris claro a oscuro, blandas y plásticas; las cuales predominan hacia el tope de la unidad, el espesor total varía aproximadamente entre 400-600m.

Su ambiente de depositación corresponde a corrientes fluviales de carácter trenzado a meandriforme. Su edad es Eoceno medio (Ochoa et al. 2012)

Formación Usme (Tiu)

Secuencia de origen marino que aflora en el sinclinal del Tunjuelo (sinclinal de Usme), representada hacia la parte basal por lutitas de color gris y amarillo rojizo, con intercalaciones de arenisca de grano fino. La parte superior consta de areniscas de color gris claro, cuarzosas, de grano grueso a conglomeráticas.

El espesor aproximado para esta unidad es de 300m- 600m. Su límite inferior con la infrayacente Formación Regadera es discordante, y el superior no se ha establecido por estar cubierto de material no consolidado del Neógeno Cuaternario.

Se considera de ambiente continental lacustre y palustre, con una edad del Eoceno Superior - Oligoceno Inferior.

3.3.1.4 Unidades del Neógeno y Cuaternario

Desde la más antigua a la más reciente:

3.3.1.4.1 Formación Tilatá (TQt)

Descrita originalmente por Scheibe (1933), corresponde a la primera unidad del relleno no consolidado de la Sabana de Bogotá, que reposa discordantemente sobre los sedimentos consolidados.

Compuesta por gravas, con matriz arenosa de grano medio, limo, arcilla y turba. Esta unidad presenta discontinuidad tanto vertical como lateral. Su espesor es muy variable y puede llegar a los 300m (Julivert, 1962).

Su ambiente de sedimentación es fluvio-lacustre; según Helmens & van der Hammen (1994) esta formación fue depositada después del plegamiento de la cordillera oriental, pero antes del levantamiento completo de la misma, marcando el levantamiento de la Sabana desde los 600 msnm hasta los 2600 msnm (Cooper et al., 1995). Esta unidad, con edad del Plioceno-Pleistoceno, aflora en las laderas de la subcuenca del Río Subachoque, alrededor del embalse de Sisga y en los sinclinales de Mochilas y Sisga.

3.3.1.4.2 Formación Subachoque (Qsu)

Esta unidad suprayace la Formación Tilatá definida por T. Van der Hammen, Werner, & van Dommelen (1973) como la unidad intermedia entre las Formaciones Tilatá y Sabana, basado en aspectos generales de litoestratigrafía y perturbación tectónica de las unidades, mostrados por los sedimentos. Consiste en arcillas arenosas y horizontes de turba/lignito que alternan arenas arcillosas o arenas arcillosas y gravas. Sin embargo, esta fracción gruesa de la Formación Subachoque fue interpretada como indicativo de condiciones glaciales, generalmente sus estratos no están tectónicamente alterados. Edad Pleistoceno Temprano.

3.3.1.4.3 Formación Río Tunjuelo (Qrt)

Lobo-Guerrero (1992) define formación río Tunjuelo el complejo de conos fluvio – glaciares del río Tunjuelito, de los Ríos San Cristóbal, San Francisco y Arzobispo, y de las Quebradas Las Delicias, La Vieja, Rosales y Chicó, en el sur y oriente de Santafé de Bogotá, y el cono del Río Subachoque. La parte más antigua de la capital se asienta sobre la formación Tunjuelo.

El cono fluvio glacial de Tunjuelito es un extenso depósito del curso bajo del río Tunjuelito, en el sur de la ciudad, entre el ápice en la quebrada El Aleñadero, 3km al sur de Usme, y su parte distal en los barrios de Bosa, Class, Kennedy, Bavaria y San Rafael. Los sedimentos que constituyen el depósito son bloques hasta de 2m de diámetro, grava, arena, limo y arcilla. Su ambiente es fluvio-glacial.

3.3.1.4.4 Formación Sabana (Qsa)

Esta Unidad fue definida por Hubach (1957) está compuesta en su mayor parte por capas horizontales, poco consolidadas, de arcillas plásticas grises y verdes, en menor proporción por lentes y capas de arcillas turbosas, turbas, limos, arenas hasta gruesas, restos de madera y capas de diatomita. También

hay numerosas capas de cenizas volcánicas, el máximo espesor registrado es de 317m, esta formación suprayace la Formación Subachoque. Su ambiente es lacustre y tiene una edad del Pleistoceno.

3.3.1.4.5 Formación Chía (Qch)

Helmens & van der Hammen (1994), 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 con edades del Holoceno hasta de 16000 años (Van der Hammen, 2005).

3.3.2 *Rasgos Estructurales*

La configuración tectónica para la cuenca en la Sabana de Bogotá debido a su complejidad estructural se difiere mucho entre los autores que la han estudiado, tanto en los trazos de fallas como en los eventos que las originan y por su puesto en los movimientos relativos de las mismas.

En este trabajo se resalta la importancia de las estructuras que propone INGEOMINAS (2002) ver figura Figura 3-13 bajo la cobertura cuaternaria ya que estas pueden ejercer algún control en el comportamiento hidrogeológico, este estudio a partir de interpretación de imágenes satelitales Landsat complementaron las fallas cartografiadas en estudios anteriores, identificando dos principales grupos, las de orientación principalmente NE (fallas longitudinales) y las de sentido NW (fallas transversales). Estos dos sistemas de fallas componen un enrejado en la región de la Sabana, conformando bloques tectónicos que controlan el paleorelieve sobre el que reposan los sedimentos no consolidados, a continuación, se mencionan la mayoría de las fallas limitándonos a las de principal influencia para el presente trabajo y advirtiendo que los nombres usados en estas fallas son provisionales para la mayoría, excepto las ya definidas en las cartografías existentes.

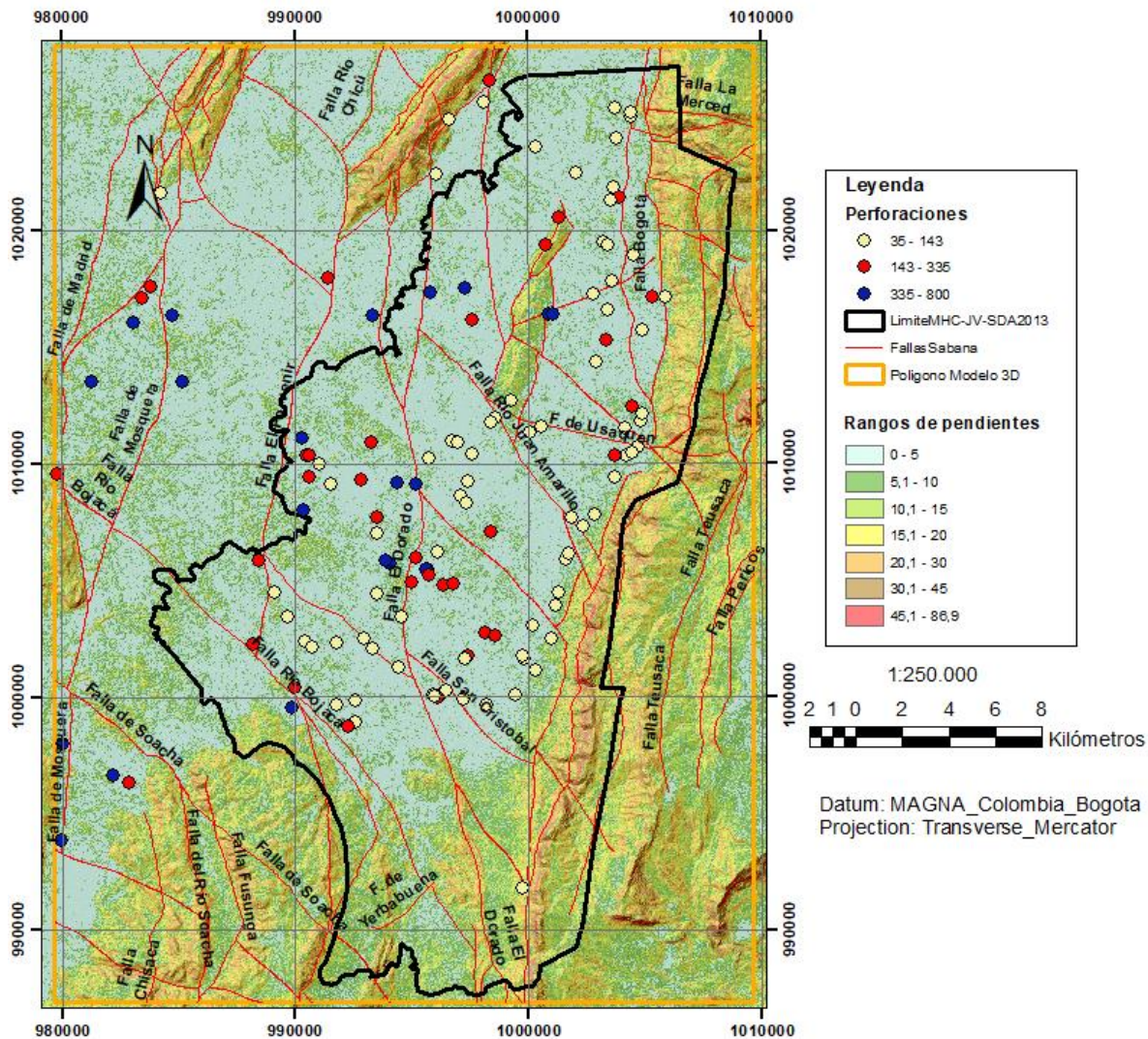


Figura 3-13. Mapa de Fallas de la Sabana

3.3.3 Fallas Longitudinales

Estas se caracterizan en general como fallas de cabalgamiento y retrocabalgamiento, correspondientes con el estilo estructural conocido como “escama delgada o despellejo de piel delgada”, localizando la zona de despegue en las rocas del Cretácico inferior, inclusive con posible incidencia de los depósitos salinos.

La interacción de los movimientos de estas fallas hacia el SE y NW, conformó las alturas y depresiones topográficas que se extienden longitudinalmente en la Sabana, en sentido NE y N-S, esta interacción de estas fallas propicio el máximo abatimiento topográfico entre los cerros de Cota y Tabio-Tenjo, a lo largo de la actual cuenca del Río Chicú, donde se detectaron espesores de más de 586m. A continuación, se mencionan algunas de las Fallas de este tipo

- Falla Bogotá
- Falla El Dorado

- Falla El Porvenir
- Falla de Mosquera

3.3.4 *Fallas Transversales*

Las Fallas transversales son quizás el aspecto que mayor controversia puede generar en una discusión sobre la tectónica de la sabana de Bogotá, inicialmente porque no todos los autores coinciden en sus trazos y tampoco en los mecanismos que la generan y su incidencia en la actual estructura de Sabana.

Básicamente se atribuye a la mayoría de estas fallas un movimiento de rumbo y la conformación de Bloques tectónicos transversales, que a su vez pueden ser subdivididos por fallas longitudinales.

Además, se acepta que, en algunos sectores de la Sabana, las fallas que aparecen como transversales, pueden estar asociadas a fallas longitudinales y actuar como rampas laterales de los cabalgamientos Camargo (1995).

- Falla El Salitre
- Falla Rio Juan Amarillo
- Falla Usaquén
- Falla Fucha
- Falla San Cristóbal
- Falla Rio Tunjuelo
- Falla de Bojacá

3.4 Hidrogeología

Para el análisis hidrológico se tuvo en cuenta la información cartográfica disponible relacionada con: (1) Perímetro urbano, (2) Cobertura vegetal, (3) Uso del suelo, (4) Cuencas del distrito, (5) red troncal de alcantarillado pluvial, (6) Red Troncal Alcantarillado Sanitario.

3.4.1 *Características Hidráulicas*

Con el objetivo de determinar las propiedades hidráulicas (Conductividad Hidráulica K, Transmisividad T, Porosidad ϕ , Coeficiente de Almacenamiento S) de las diferentes formaciones geológicas, se realizó una revisión bibliográfica de la información disponible. Los informes donde se realizó modelación numérica (UNAL 2005)(Hidrogeocol Ltda, PNUD, and DAMA 2000a)(EAAB-JICA 2009) usaron valores tanto obtenidos por medio de pruebas de bombeo como de la literatura.

Por otro lado, el estudio hidrogeológico cuantitativo de la sabana de Bogotá (Ingeominas y CAR, 1991), presentó valores físicos para diferentes formaciones tanto del Neógeno-Cuaternario como del Terciario. En (INGEOMINAS 2002b) se seleccionaron pozos en los cuales se habían realizado pruebas de bombeo y se contaba con los datos primarios de campo. En este estudio, estas pruebas fueron reinterpretadas aclarando que las pruebas se hicieron sin pozos de observación y que la mayoría son pruebas de corta duración. El total de pruebas analizadas fue de 61. Este estudio concluye que el acuífero de los depósitos no consolidados del Neógeno-Cuaternario presenta transmisividades entre 3 y 900 m²/día y las conductividades hidráulicas de 0.01 a mayor de 3 m/día. En la zona de almacenamiento los acuíferos son de tipo semiconfinado a confinado, con coeficientes de almacenamiento en un rango entre 1×10^{-3} y 1×10^{-7} .

Particularmente en la formación Tilatá, con transmisividades entre 150 y 900 m²/día y las conductividades hidráulicas mayores de 1 m/día, es una unidad muy permeable y de alta producción. Los pozos que captan estos niveles en la cuenca del río Subachoque y en el norte de la cuenca artesiana entre las localidades de Briceño y Gachancipa producen caudales hasta los 40 l/seg. o más. Según la información recopilada y procesada en (INGEOMINAS 2002a), los depósitos no consolidados de la parte occidental de la cuenca artesiana limitada por la Falla de Madrid (subcuencas de los ríos Bojacá y Subachoque) son menos (nosotros consideramos que hay un error de escritura y que es lugar de ser menos es más) permeables que los de la parte nororiental y oriental hasta la Falla El Dorado.

En el primer caso, las transmisividades en general no superan 10 m²/día y las conductividades hidráulicas son del orden 0,01 m/día. Desplazándose hacia el oriente se observa un incremento paulatino de los parámetros hidráulicos llegando en el valle del río Bogotá a los valores de las transmisividades hasta los 100 m²/día (valores más comunes entre 30 y 60 m²/día) y las conductividades hidráulicas entre 0.1 y 0.5 m/día. En este mismo estudio, para el complejo acuitardo del paleógeno, se comenta que sus transmisividades, que en general no superan los 5 m²/día, y las capacidades específicas menores 0.05 l/seg./m los caracterizan de baja permeabilidad y poca productividad.

Es de aclarar que para nosotros, el Complejo Paleógeno resulta conformado principalmente por materiales que se comportan como acuitardos, excepto por la Formación Guaduas que puede considerarse como un acuífero muy pobre y la Formación Cacho que se considera como un acuífero de escasa importancia hidrogeológica. Para este complejo, las transmisividades no superan generalmente los 20.4 m²/día y las capacidades específicas son menores a 0.008, por lo tanto, se asocian a unidades de baja conductividad hidráulica y baja productividad. En (INGEOMINAS 2002a) se habla que los caudales de los pozos que captan las capas de los acuíferos confinados (subcuenca del río Subachoque, zona del Distrito Capital) pocas veces superan 1 l/s. Se dice también que las areniscas que componen el horizonte acuífero Cacho son de alta permeabilidad. Su valor promedio de transmisividad es de 200 m²/día, en algunos casos llega hasta 450 m²/día y la conductividad hidráulica varía de 0.3 a 3 m/día. Este horizonte acuífero en general es de tipo confinado al estar cubierto en la mayor parte del área por depósitos arcillosos. La producción de los pozos va desde 0.5 hasta 20 l/s.

Para el complejo acuífero Guadalupe (INGEOMINAS 2002a), comenta que los valores de la transmisividad varían entre 5 y 600 m²/día, la conductividad hidráulica entre 0.02 y 2.0 m/día, la capacidad específica entre 0.05 y 5.5 l/s/m y los coeficientes de almacenamiento más comunes se encuentran en el rango 1x10⁻⁴ y 1x10⁻⁷. El rendimiento individual de los pozos en promedio es de 20-25 l/s.

Por nuestro lado, se analizaron los valores de las propiedades hidráulicas incluidas en la base de datos, tratando de asignarlos a una determinada formación mediante la profundidad del pozo, información de los filtros, descripción litológica, etc. Los resultados son presentados en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Propiedades físicas de las formaciones geológicas de la zona de estudio.

Formación Geológica		Características Hidrogeológicas	Propiedades
Qdp	Depósitos de pendiente	Acuíferos de extensión local, discontinuos, libres a confinados. Conformados por limos a arenas con bloques, depósitos de abanicos aluviales y sedimentos lacustrinos, todos de origen local. De moderada a alta importancia hidrogeológica	Espesor máx. (m): 30*

Formación Geológica		Características Hidrogeológicas	Propiedades
Qch1	Chia	Acuítardo de extensión local conformado por arcillas de inundación, arcillas orgánicas/diatomíticas (Qch1), limos fluviales (Qch2), conforman una cobertera delgada de limos fluviales sobre gravas de la formación Tunjuelo (Qch3). Sin importancia hidrogeológica.	Espesor máx. (m): 10
Qch2			
Qch3			
Qsa1	Sabana	Acuítardo de extensión local, conformado por arcillas lacustres. Sin importancia hidrogeológica.	Espesor máx. (m): 320
Qsa2	Sabana	Acuífero multicapa de extensión regional, conformado por arcillas orgánicas, turbas, arcillas arenosas y arenas (arcillosas) intercaladas. De baja importancia hidrogeológica.	T(m ² /d): 30-204* K(m/d): 1-4* Espesor máx. (m): 320
Qsu	Subachoque	Acuífero multicapa de extensión regional, conformado por arcillas arenosas, arcillas orgánicas y turbas alternando con arenas arcillosas o con arenas arcillosas y gravas.	T(m ² /d): 7-160* K(m/d): 2-8* Espesor máx. (m): 150
Qsm	San Miguel	Acuífero de extensión local, confinado. Conformado por arcillas (limo/arenosas) caolínicas abigarradas y arenas arcillosas que a menudo contienen clastos subangulares muy meteorizados, que alternan con arcillas orgánicas, arenas y gravas. De poca importancia hidrogeológica	Espesor máx. (m): 15*
Qrt	Río Tunjuelito	Acuífero de extensión local, libre a confinado. Conformado por 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. De moderada importancia hidrogeológica.	Espesor máx. (m): 220
TQt	Tilatá	Acuífero de extensión regional, confinado a semiconfinado, conformado por cantos de areniscas o limolitas en matriz arcillo - limosa e interestratificaciones de areniscas conglomeráticas y arcillolitas grises con presencia de lignito en su parte media, de la formación Tilatá. Conductividad hidráulica baja a media. De moderada importancia hidrogeológica.	T(m ² /d): 5.35-870 K(m/d): 0.08 - 6.6 S: 0.0025 CE(L/s/m): 0.6 - 1.5 Q(L/s): 0.1-41 Espesor máx. (m): 200

Formación Geológica		Características Hidrogeológicas	Propiedades
Tma	Marichuela	Depósitos de flujo torrencial (gravas hasta bloques redondeados en matriz arcillosa) o depositos de flujo gravitacional (fragmentos de roca hasta bloques subangulosos en matriz arenosa), alternando con sedimentos fluviales/lacustres (gravas, arenas compactas y arcillolitas(organicas)), colores rojos, localmente con influencia tectonica. espesor conocido 40m. De moderada importancia hidrogeológica	
Trm	Restos de meteorización de areniscas del Grupo Guadalupe	Acuífero de extensión regional, confinado. Conformado por bancos de areniscas desintegradas rodeadas por grandes concentraciones de arcillas caoliníticas limosas y arenosas, con intensos colores rojizos. De moderada importancia hidrogeológica.	K(m/d): 2-8*
Tiu	Usme	Acuitardo de extensión local. Conformado por lodolitas grises claras, con esporádicas intercalaciones de areniscas de cuarzo y feldespato de grano fino. El miembro superior 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. Sin importancia hidrogeológica.	Espesor máx. (m): 300
Tir	Regadera	Acuífero de extensión local, restringido a zonas fracturadas, confinado a semiconfinado, conformado por areniscas de tamaño medio a grueso y conglomerados con intercalaciones de arcillolitas. Conductividad hidráulica baja. De poca importancia hidrogeológica.	T(m ² /d): 9.6 K(m/d): 0.32 CE(L/s/m): 0.005-0.07 Q(L/s): 0.06-4 Espesor máx. (m): 750
Tib	Bogotá	Acuitardo de extensión regional. Conformado por 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. Sin importancia hidrogeológica.	Espesor máx. (m): 1090

Formación Geológica		Características Hidrogeológicas	Propiedades
Tic	Cacho	Acuífero pobre confinado a semiconfinado de extensión regional, conformado por areniscas de grano fino a grueso de color pardo a blanco y rosado, friables, con estratificación cruzada hacia la base de la unidad. Presentan intercalaciones con capas delgadas a medias de arcillas abigarradas. Esta unidad arenosa se destaca por expresiones de relieve formando crestones. De poca importancia hidrogeológica.	$T(m/día)=20.4^{***}$ $CE(L/s/m)=0.08^{***}$ Espesor máx. (m): 172
Tkgs	Guaduas conjunto superior	Acuífero pobre de extensión regional, discontinuo, conformado por secuencias de arcillolitas con intercalaciones de areniscas y mantos de carbón. Generalmente de poca importancia hidrogeológica	$T(m/d): 2.13-20.4$ $S: 1.16E-3 - 7.2E-3$ $CE(L/s/m): 0.008$ $Q(L/s): 0.5-4$ Espesor máx. (m): 1100
Tkgm	Guaduas conjunto medio		
Tkgi	Guaduas conjunto inferior		
Ksglt	Labor y Tierna	Acuífero de extensión regional, confinado, conformado por areniscas blancas y pardo amarillentas, cuarzosas, friables con intercalaciones de capas delgadas de arcillolitas y limolitas. En los cerros occidentales y al sur de la ciudad presenta un afloramiento presentando un comportamiento de acuífero libre estas zonas. De moderada importancia hidrogeológica.	$T(m/d): 16-360$ $K(m/d): 1-8$ $S: 5.9E-3 - 2.5E-4$ $CE(L/s/m): 0.15 - 5$ $Q(L/s): 0.3-33$ Espesor máx. (m): 600
Ksgp	Plaeners	Acuífero de extensión regional, restringido a zonas fracturadas, confinado a semiconfinado, conformados por una sucesión de arcillolitas, limolitas silíceas y liditas, con fracturamiento en las dos direcciones. Conductividad hidráulica baja. De poca importancia hidrogeológica.	$T(m/d): 9.6^{**}$ $K(m/d): 0.32^{**}$ $CE(L/s/m): 0.05-0.07$ $Q(L/s): 0.06-4$ Espesor máx. (m): 100
Ksgd	Arenisca Dura	Acuífero de extensión regional, restringido a zonas fracturadas, confinado a semiconfinado, conformado por una sucesión rítmica de bancos gruesos de areniscas grises, lutitas y arcillolitas. Hacia la parte superior se hallan limolitas silíceas de la Formación Arenisca Dura. De moderada importancia hidrogeológica.	$T(m/d): 22-356$ $K(m/d): 0.8$ $CE(L/s/m): 0.08$ $Q(L/s): 0.5-4$ Espesor máx. (m): 420

Formación Geológica		Características Hidrogeológicas	Propiedades
Ksch	Chipaque	Acuicludo de extensión regional. Conformado por arcillolitas arenosas y arcillolitas carbonosas con intercalaciones limolíticas y niveles de liditas. Se presentan intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano fino y muy fino glauconíticas y fosfáticas. De nula importancia hidrogeológica.	Espesor máx. (m): 1027
Parámetros hidráulicos obtenidos del mapa hidrogeológico sector Tibitó - Salto de Tequendama. Ingeominas - CAR.(1991) * Valores obtenidos de la base de datos de pozos. PUJ-SDA (2017). ** Valores puntuales. ***Valores obtenidos de Modelo Hidrogeológico conceptual de la Sabana de Bogotá, (Ingeominas 2002).			

Es de aclarar que la mayoría de los datos de la tabla anterior en un gran porcentaje son recopilados presentando en algunos casos un rango de variabilidad. Este rango no necesariamente puede ser representativo del comportamiento hidráulico promedio de la unidad a la que haga referencia.

3.4.2 Caracterización Hidrogeoquímica

Para la realización de la caracterización geoquímica de las aguas subterráneas se usaron los datos consignados en la base de datos. Las medidas tomadas abarcan tanto la zona consolidada como no consolidada. El análisis se realizó teniendo presente las unidades hidrogeológicas descritas y la localización de los pozos en donde se concluye que la explotación se da en los sedimentos cuaternarios y en el grupo Guadalupe.

Es de resaltar que como se comenta en Ingeominas (2001), el grupo Guadalupe por su naturaleza fracturada, discontinua y por la tectónica en forma de cuñas levantadas, determinar su sistema de flujo es complejo y como se habla tanto en ese informe como en este documento, se evidencia que el flujo proviene de las partes altas y montañosas hacia el centro de la cuenca y hacia el centro de la sabana. Esto genera tiempos de tránsito largos del orden de los miles de años que generan procesos de intercambio catiónico complejos. Por otro lado, su arquitectura de fallas puede producir flujos verticales volviendo el problema más complejo con las mezclas de aguas.

A continuación, se presenta la caracterización de las aguas subterráneas en la zona de estudio iniciando con sus características principales (pH, T, CE), luego analizando el comportamiento de los cloruros con el objetivo de poder obtener un valor de recarga y finalmente con la identificación de los grupos de las aguas subterráneas con su distribución espacial.

3.4.2.1 pH

En la Figura 3-14 se presenta la distribución espacial de los valores del pH medidos en los pozos de agua subterránea localizados en la zona de estudio. Los valores hacia pH ácidos son representados en tonalidades azules mientras que los pH básicos son representados con tonalidades ocre. El valor más ácido (4.6) fue medido en el pozo Petco el cual tiene una profundidad de 115 metros y que capta ocupando un espacio en el no consolidado y localizado al sur de la ciudad. Este valor no hace parte de la tendencia típica de los pozos que se encuentran en esta zona. El valor más básico (8.6) se localiza al nororiente de la ciudad. De nuevo, este valor no es representativo de los valores de la zona. La distribución espacial del muestreo muestra que los valores entre 5.6 a 8.5 se encuentran dispersos por

todo el dominio. Las zonas donde se tienen los máximos descensos del nivel no presentan ninguna relación con los valores de pH, a excepción de la zona sur donde se encuentra una concentración de pH bajos

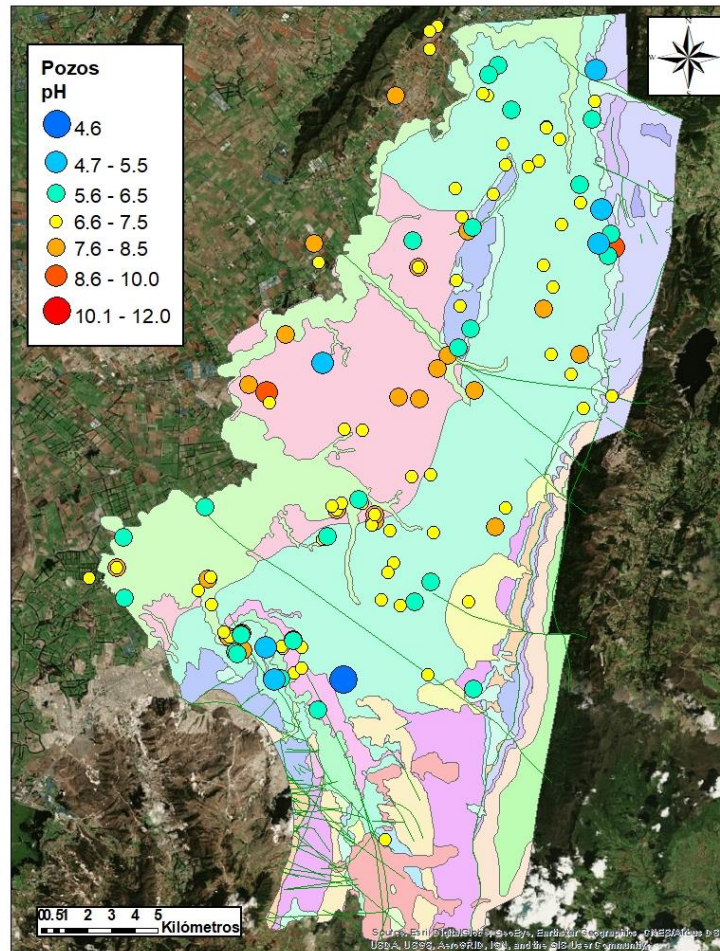


Figura 3-14. Distribución espacial de los valores de pH medida en los pozos

3.4.2.2 Temperatura

La Figura 3-15 presenta la distribución espacial de la temperatura medida en los pozos de agua subterránea en la zona de estudio. La temperatura en el piedemonte y en la zona entorno a esta se mantiene entre los 18°C - 20°C, presentándose un aumento hacia el occidente. Esto debido a que la captación se hace en pozos más profundos. Al sur de la ciudad se tienen dos puntos con temperaturas altas (Carboquímica N4, 34.8°C y Lafayette 27.2°C). Estos puntos coinciden con las mayores explotaciones y los mayores descensos del nivel. Por otro lado, al norte de la ciudad se tienen valores altos de temperatura en el club los Lagartos asociados a un flujo termal ascendente por la falla río Juan Amarillo.

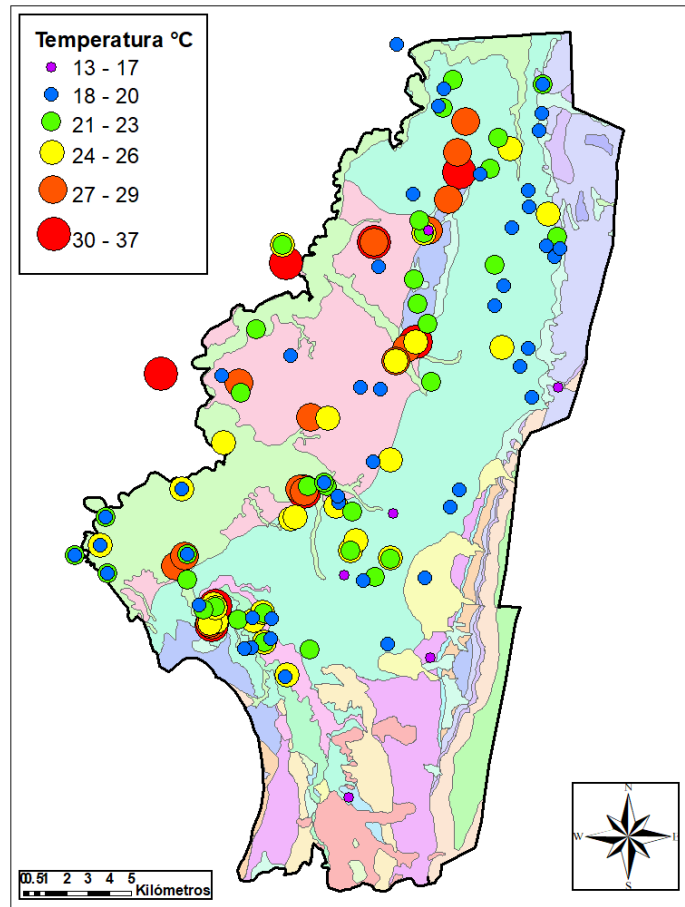


Figura 3-15. Distribución espacial de los valores de temperatura medida en los pozos

3.4.2.3 Conductividad Eléctrica CE

La Figura 3-16 presenta la distribución espacial de la conductividad eléctrica (CE), medida en los pozos de agua subterránea en la zona de estudio. Los valores de CE son más bajos (entorno a $20\mu\text{S}$) en las zonas de piedemonte, presentando un aumento (entorno a los $1850\mu\text{S/cm}$) hacia el oeste de la cuenca. Este comportamiento de la CE es típico de zonas donde el agua de recarga va teniendo un enriquecimiento producto del intercambio catiónico. Básicamente el aumento de la salinidad con el paso del tiempo se da porque el agua disuelve o altera los minerales que encuentra en su recorrido (si tiene un tiempo suficiente para ello), hasta que alcanza el tope marcado por la constante de equilibrio correspondiente. Por lo tanto, ya no disolverá más ese mineral, continuará disolviendo otros minerales con una constante más elevada hasta que de nuevo alcance el equilibrio y así sucesivamente. En nuestra zona de estudio el agua de lluvia contiene HCO_3^- que reacciona en su recorrido con los minerales de la formación liberando sulfatos y transportando los cloruros que el agua lleva en suspensión, produciendo un aumento de la CE. El límite de solubilidad de los carbonatos es mucho más baja que la de los sulfatos, que, a su vez, son menos solubles que los cloruros. Por tanto, primero se alcanza el tope para los bicarbonatos, después (raramente) para los sulfatos, y finalmente (casi nunca) para los cloruros.

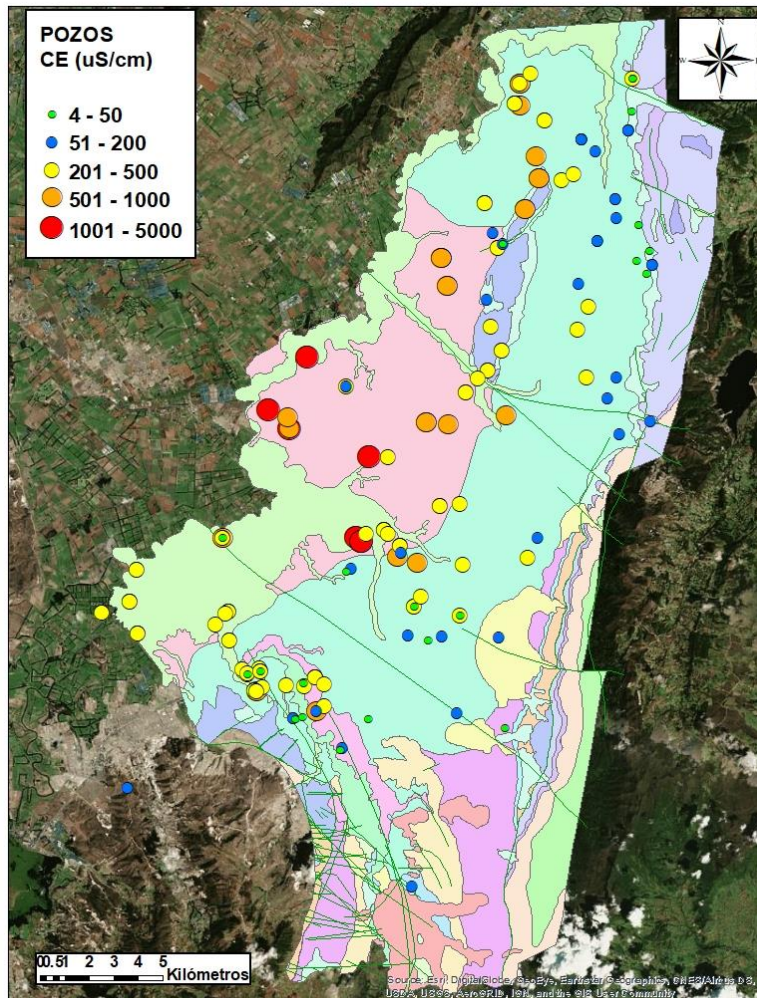


Figura 3-16. Distribución de la Conductividad Eléctrica medida en los pozos

3.4.2.4 Cloruros

Se analizó el comportamiento del Cl^- medido en las aguas subterráneas de los pozos localizados en la zona de estudio. Los datos de cloruros se tomaron de las siguientes campañas: a) (EAAB-JICA 2009); b) (EAAB-JICA 2003); c) (Hidrogeocol Ltda, PNUD, and DAMA 2000b) y d) (INGEOMINAS 2002a).

De la Figura 3-17, se puede observar que no es claro un comportamiento espacial de las concentraciones. Tampoco es claro un enriquecimiento en Cl^- a medida que el agua subterránea va avanzando hacia el interior de la cuenca de la Sabana de Bogotá (esto bajo el supuesto que las líneas de flujo avanzan desde los cerros orientales hacia el occidente). Esta falta de enriquecimiento en la dirección del flujo sugiere que los materiales geológicos de la sabana de Bogotá no son fuentes importantes de este elemento. Los valores altos de Cloruros, probablemente son por actividades antrópicas que están influyendo en los valores y en que se genere esa especie de aleatoriedad espacial en los datos.

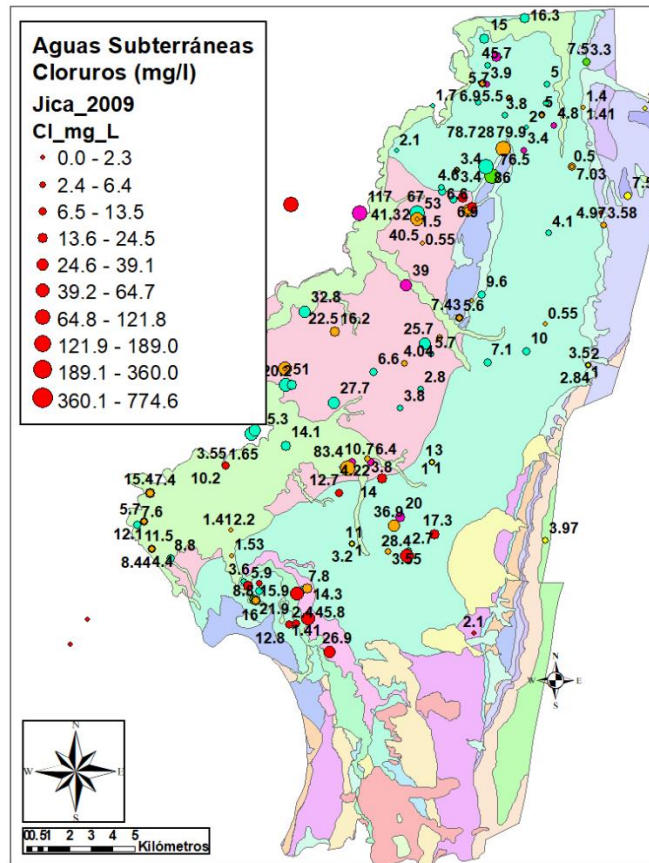


Figura 3-17. Representación espacial de los cloruros para las diferentes campañas.

Se presenta la escala de (EAAB-JICA, 2009) en puntos rojos. Esta escala es la misma para todas las medidas presentadas. (EAAB-JICA, 2003 puntos ocre); (Hidrogeocol Ltda, PNUD, & DAMA, 2000) puntos azules y (Ingeominas 2001) puntos púrpuras y verdes.

La Figura 3-18, presenta las campañas de campo discriminadas por tiempo a) (EAAB-JICA 2009); b) (EAAB-JICA 2003); c) (Hidrogeocol Ltda et al. 2000a) y d) (INGEOMINAS 2002a). Se ha realizado esta discriminación para tratar de dilucidar un patrón de comportamiento espacio-temporal el cual sigue generando muchas dudas. La campaña de (EAAB-JICA 2009) que es la que cuenta con una mayor cantidad de datos parece indicar una relación entre la mayor extracción y las concentraciones más altas de Cl^- . Esto puede generar falsos resultados a la hora de evaluar metodologías como la de la estimación de la recarga mediante el balance de masas de cloruros (CMB). Por este motivo se decidió usar los datos que están más cerca de las estaciones donde se midió el cloruro del agua de lluvia.

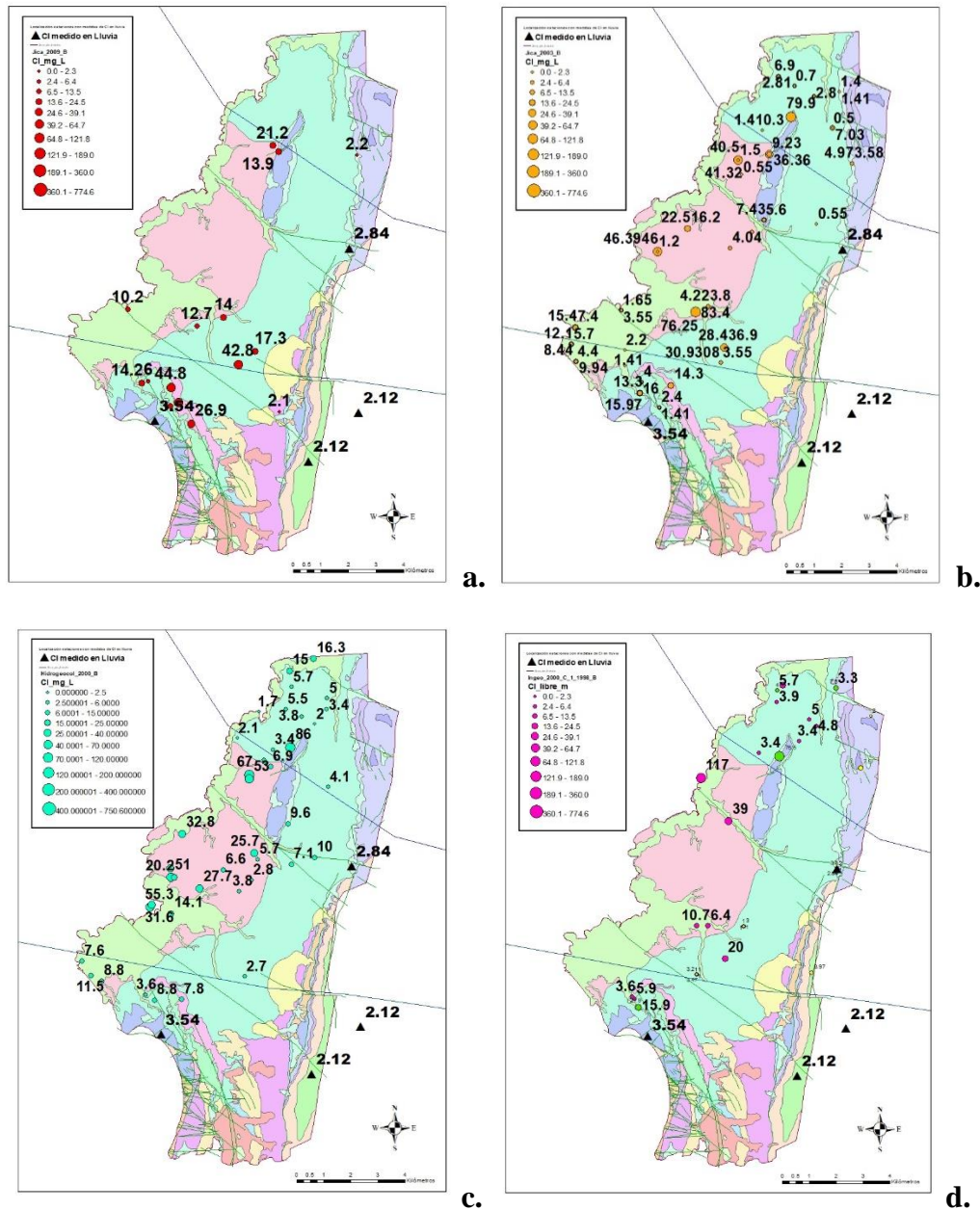


Figura 3-18. Medidas de Cl- en las campañas de estudios previos

a) Jica 2009; b) Jica 2003; c) Hidrogeocol 2000 y d) Ingeominas 1998-2000

3.4.2.5 Tipos de Agua Subterránea

El agua debido a su composición química puede ser un buen solvente, el cual penetra y se moviliza en el subsuelo y surge en otro lugar. Si el agua circulante discurre en una zona de mineralización y particularmente en la zona de meteorización, ciertos elementos presentes principalmente en una fase sólida se disuelven en el agua y pasan a ser transportados por esta. El cambio o la evolución en los diferentes iones (en concentración por volumen de agua) y cómo están distribuidas espacialmente las

concentraciones, da información sobre procesos que pueden ayudar en la interpretación hidrogeológica.

En este estudio se recopilieron 726 muestras de las cuales 627 fueron aptas para realizar el balance iónico. Se decidió dar por aceptadas las muestras que tenían errores en su electroneutralidad menores al 40% (ver Figura 3-19). Aunque este porcentaje está muy por encima de lo recomendado (5%), se decidió, previo consejo de la SDA, aumentarlo para poder tener una muestra representativa en toda la zona de estudio. Se analizaron las muestras con contenidos altos de iones minoritarios con el fin de analizar que implicación podía tener en el balance iónico. Por ejemplo, las muestras con contenidos altos de Fe presentaron errores superiores al 33%. Cambios en la concentración de este ion, condujeron a errores entre un 12% a un 51%. Este resultado resalta la importancia de tener medidas de iones considerados generalmente minoritarios donde se presuma que sus concentraciones son significativas.

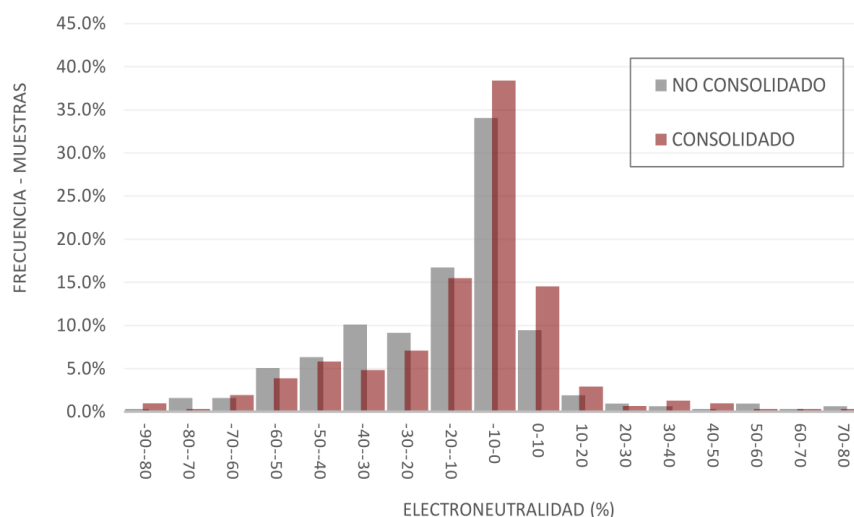


Figura 3-19 Histograma de frecuencias de electroneutralidad

Una vez depurados los valores que cumplen con un error aceptable del balance iónico (40% o menos de electroneutralidad) se identificaron para los depósitos consolidados y no consolidados, los diferentes tipos de agua mediante el software Aquachem (ver Tabla 3-4). Este análisis es realizado identificando la ubicación de los puntos desde los cerros o pie de monte, hasta los valles de la cuenca de la Sabana de Bogotá.

Tabla 3-4. Tipos de agua identificados en los depósitos consolidados y no consolidados

DEPÓSITO	Zona Centro – Valles de la cuenca de la Sabana de Bogotá	Pie de monte y cerros de la cuenca Sabana de Bogotá	Toda la cuenca
NO CONSOLIDADO	Na - NH ₄ - HCO ₃ - Cl Na - NH ₄ - HCO ₃ - SO ₄	Ca - HCO ₃ Ca - HCO ₃ - Cl Ca - HCO ₃ - SO ₄	Ca-Na
	Na - HCO ₃ Na - HCO ₃ - SO ₄ Na - HCO ₃ - Cl	Na - Cl Na - Cl - HCO ₃ Na - Cl - SO ₄	Mg - Ca Mg - Na
	Na - Ca - HCO ₃ Na - Ca - Cl		
CONSOLIDADO	Na - HCO ₃ - Cl Na - HCO ₃ - Cl - SO ₄	Na - K - Mg Na - K - HCO ₃ Na - K - Ca	Mg - Ca
		Na - Ca - Cl Na - Ca - SO ₄ Na - Ca - Mg	Na - Ca - HCO ₃ - SO ₄ Na - Ca - HCO ₃ - Cl
		Ca - Na - Cl Ca - Na - HCO ₃ Ca - Na - Mg Ca - Na - SO ₄	Na - HCO ₃ Na - HCO ₃ - SO ₄
		Ca - HCO ₃ Ca - HCO ₃ - SO ₄ Ca - HCO ₃ - NO ₃ Ca - HCO ₃ - CO ₃ Ca - HCO ₃ - Cl	

Se graficaron los diagramas de Stiff tanto para los depósitos consolidados como no consolidados (ver Figura 3-20) con el objetivo de determinar unas zonificaciones para las diferentes muestras de agua subterránea tomadas en la zona de estudio. Se evidencia un enriquecimiento desde las zonas de los cerros orientales hacia el centro de la cuenca. Durante este enriquecimiento se evidencian un primer sector dominado por aguas Bicarbonatadas-Sódicas y seguidamente, un segundo sector donde predominan las aguas Sulfatadas-Sódicas. Este análisis se realizó para muestras recientes (2006 a 2013) y para la totalidad de las muestras, evidenciando la misma tendencia en ambos casos. En la Figura 3-20 y en la clasificación de los tipos de agua se referencian la totalidad de las muestras recopiladas en los estudios previos.

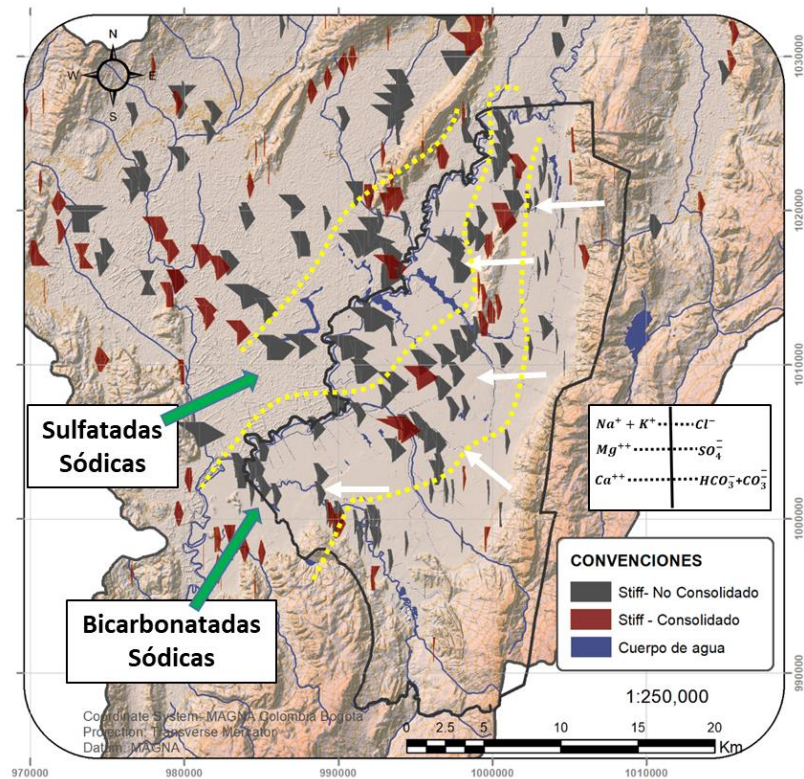


Figura 3-20 Representación graficas de los diagramas de Stiff

La identificación de los tipos de agua asociadas a las formaciones en los depósitos cuaternarios están influenciados por las mezclas que se desarrollan en los diferentes filtros ubicados a lo largo del pozo y el empaque de grava que generalmente recubre el pozo. En este sentido, el análisis de los tipos de agua por formación geológica no garantiza que las muestras sean representativas de un determinado intervalo litológico o de la formación en cuestión, sino que posiblemente el pozo capta agua de todas aquellas formaciones que atraviesa. En la Figura 3-21 se presenta las cantidades de registros de pozos que atraviesan las formaciones presentes en los depósitos no consolidados y en el basamento rocoso.

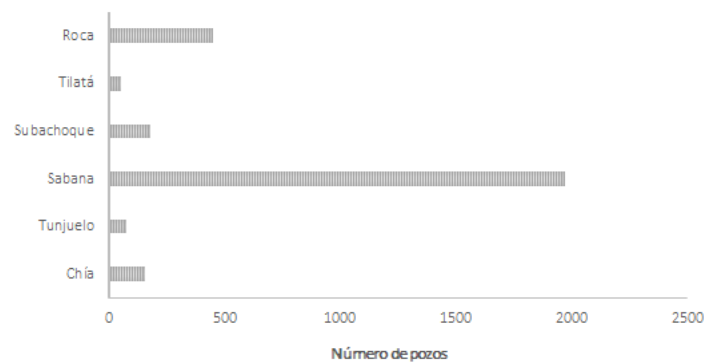


Figura 3-21 Número de pozos que atraviesan las formaciones geológicas

En los pozos que atraviesan la formación Chía, ubicada en las rondas de los ríos principales, se encontraron aguas Bicarbonatadas Sódicas ($\text{HCO}_3\text{-Na}$), con profundidades de extracción promedio de 128m. Esta formación es muy superficial (con profundidades de máximo 10m; el pozo de menor profundidad tiene 25m) por tal motivo no se tienen muestras exclusivas en esta formación. Además de las aguas Bicarbonatadas Sódicas se evidencian dos datos bien diferenciados: una en el río Balsillas justo antes de la desembocadura al río Bogotá ($\text{Ca-Na-HCO}_3\text{-Cl}$ a 180m de profundidad) y la segunda sobre el río Tunjuelito (Na-SO_4 con 175m de profundidad media). Cabe resaltar que estas muestras atípicas presentan electroneutralidades del orden de 32% y 13% (ver Figura 3-22).

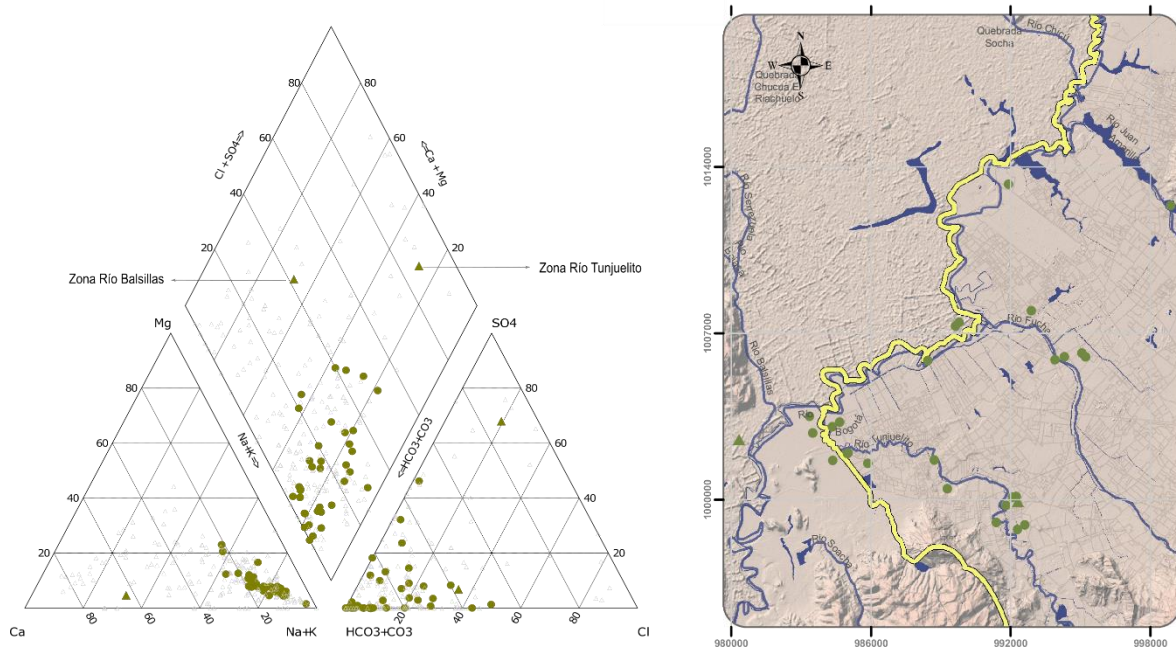


Figura 3-22 Tipos de agua en los pozos que atraviesan la formación Chía

La formación Sabana (320m de espesor máximo en el sector de Funza), es la formación de la cual hay un mayor número de pozos instalados. En esta formación priman las aguas Bicarbonatadas Sódicas (Na-HCO_3 a 199m de profundidad media), seguidas por las Bicarbonatadas Cállicas (Ca-Na-HCO_3 a 232m de profundidad) y unas pocas muestras Sulfatadas Sódicas (Na-SO_4 a 197m de profundidad), estas últimas situadas en la ronda al río Bogotá (Figura 3-23).

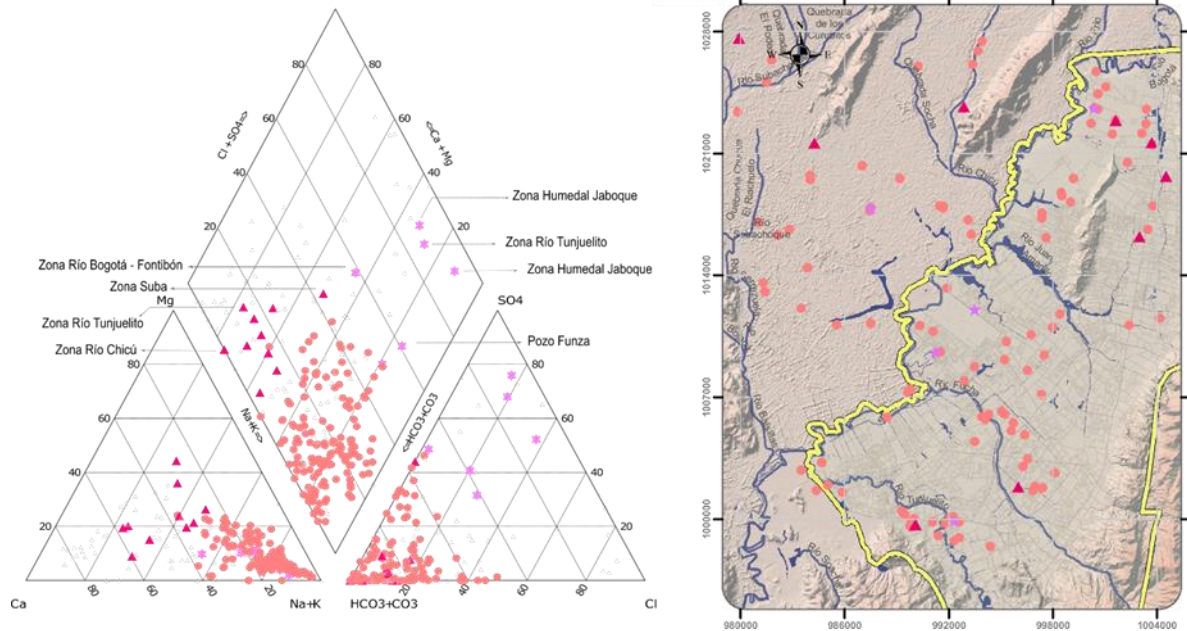


Figura 3-23 Tipos de agua en los pozos que atraviesan la formación Sabana

La formación Subachoque (177m de espesor), ubicada en el centro de la cuenca de la Sabana de Bogotá, se caracteriza por tener aguas de tipo Bicarbonatada Sódica (Na-HCO₃), las muestras con altos contenidos de Sulfatos (SO₄) son pozos que extraen más allá de la formación Subachoque. El pozo de Funza registra muestras de tipo Sulfatada Sódica (Na-SO₄-HCO₃-Cl a 470m de profundidad llegando a la formación Tilatá y electroneutralidad de 39%) (ver Figura 3-24).

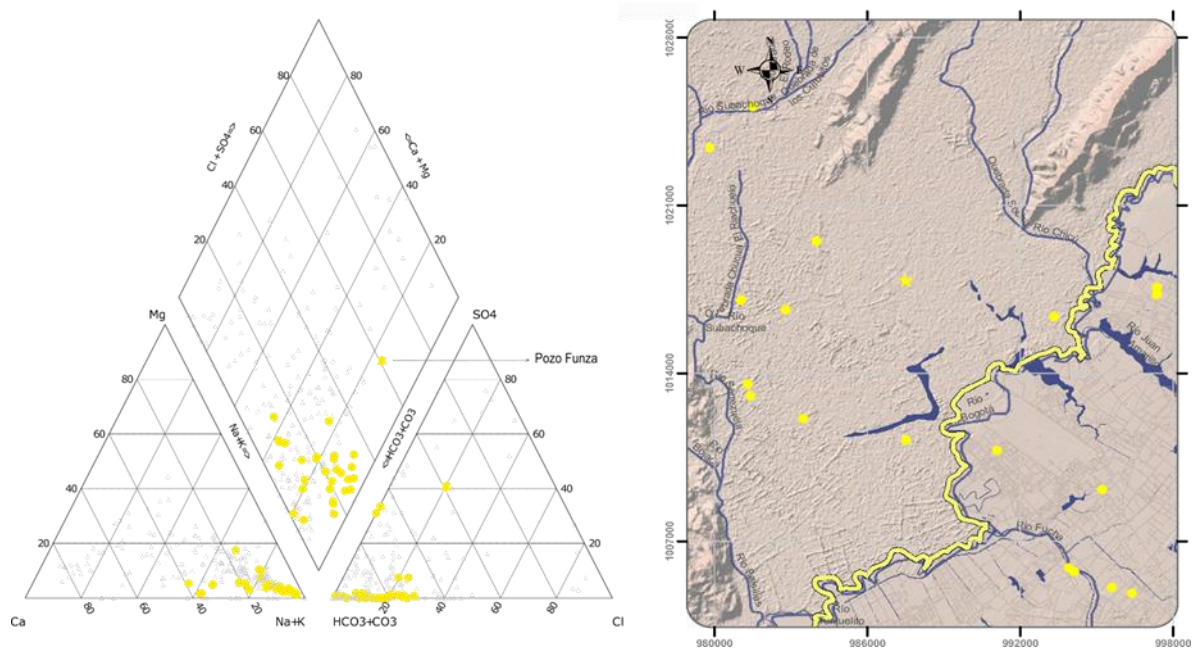


Figura 3-24 Tipos de agua en los pozos que atraviesan la formación Subachoque

La formación Tunjuelo (219m de espesor), ubicada hacia el piedemonte tiene pocos puntos de extracción y la captación no es exclusiva en esta formación. Las muestras son de tipo Bicarbonatadas Sódicas (Na-HCO_3 a 200m de profundidad media) y Bicarbonatadas Cálcidas (Ca-HCO_3 a 300 y 115m situadas sobre el río Fucha) (Figura 3-25).

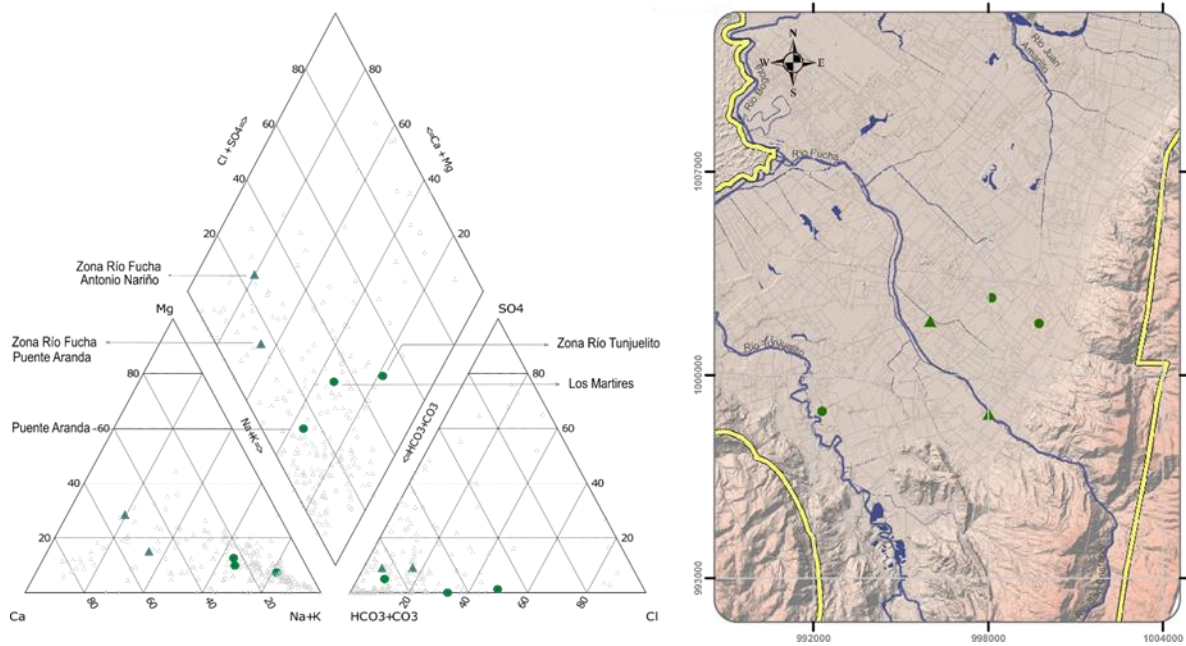


Figura 3-25 Tipos de agua en los pozos que atraviesan la formación Tunjuelo

La formación Tilatá (310m de espesor), tiene puntos de extracción ubicados hacia la zona centro de la cuenca media de la Sabana de Bogotá. Son aguas de tipo Bicarbonatadas Sódicas (Na-HCO_3 a 483m de profundidad); las muestras con altos contenidos de Sulfatos (SO_4) a 526 y 400m de profundidad están ubicadas en Suba y en Cota Figura 3-26.

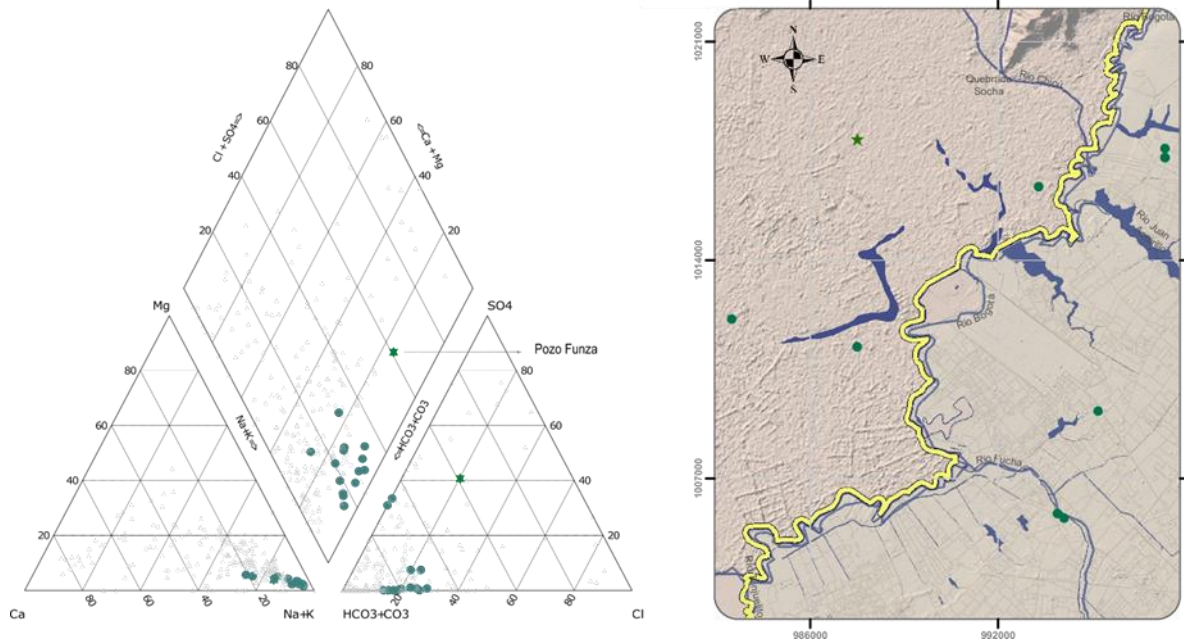


Figura 3-26 Tipos de agua en los pozos que atraviesan la formación Tilitá

En los puntos de agua que llegan a extraer en los depósitos consolidados se encontraron dos grupos de agua principales: tipo Bicarbonatadas Cálcicas (Ca-HCO₃-Cl y Ca-Na-HCO₃ 216m de profundidad media) y tipo Bicarbonatadas Sódicas (Na-HCO₃-Cl y Na-Ca-HCO₃ a 260m de profundidad) situadas en las zonas de pie de monte. Adicionalmente, se encontraron aguas Clorurada Cálcica y Sulfatada (Na-Ca-Cl y Na-Mg-K-SO₄-HCO₃ respectivamente) varios de ellos son manantiales y se encuentran en zona de cerros. Finalmente, aguas Cloruradas Cálcicas (Ca-Cl y Ca-Na-Mg-Cl) entre ellos manantiales, ubicados en zonas de cerros (Figura 3-27).

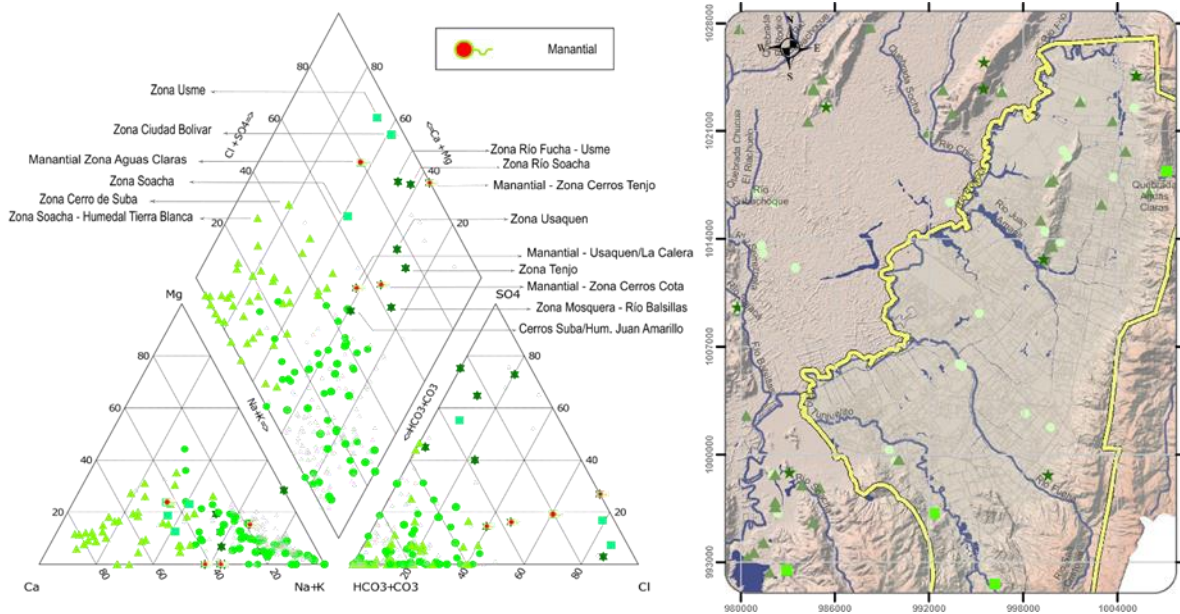


Figura 3-27 Tipos de agua en los pozos atraviesan el basamento rocoso

3.4.2.6 Perfiles Hidrogeoquímicos

Para analizar con mejor detalle la evolución hidrogeoquímica del agua, se realizaron diagramas de Stiff, en los cuales se ve una aparente evolución del agua en dos sentidos: desde aguas arriba hacia aguas debajo de la cuenca del río Bogotá y desde los cerros hacia el centro de la cuenca. De acuerdo con esto, son planteados dos perfiles hidrogeoquímicos: el primero inicia a la altura de los cerros orientales en La Calera y termina en la desembocadura del río Fucha al río Bogotá, y el segundo situado a lo largo del río Tunjuelito, inicia en los cerros orientales y finaliza en la desembocadura al río Bogotá. Las muestras de agua obtenidas de los pozos de explotación se analizaron de forma independiente según el depósito de extracción consolidado y no consolidado; los resultados fueron representados en una gráfica semilogarítmica de concentraciones en función de la distancia en el perfil.

En los depósitos no consolidados, los resultados en el perfil 1 (25 km de longitud) muestran un enriquecimiento importante en Bicarbonato y Sodio (7meq/l y 6meq/l respectivamente), y un incremento menos acentuado en Calcio, Sulfato, Magnesio y Cloruro (del orden de 1 meq/l). Por otro lado, en los depósitos consolidados de este mismo perfil, se observa el mismo enriquecimiento de Bicarbonato y Sodio (8meq/l y 11meq/l) bien diferenciado de los demás cationes y aniones, Cloruros y sulfatos rondan incrementos de 2.5 meq/l y Calcio y magnesio de 1meq/l (Figura 3-28 Perfil hidrogeoquímico No. 1).

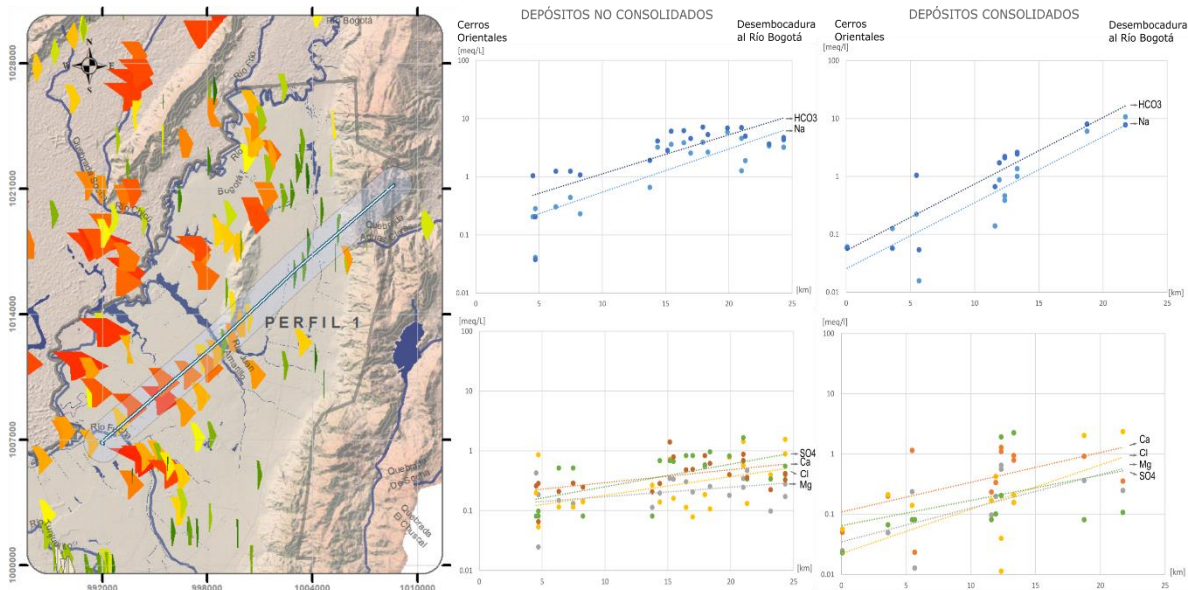


Figura 3-28 Perfil hidrogeoquímico No. 1

En perfil 2 (18 km de longitud) se presentan resultados muy similares a los obtenidos en el perfil 1. Un enriquecimiento importante de Bicarbonato y Sodio (4meq/l y 3 meq/l respectivamente en los depósitos no consolidados y 3meq/l y 2meq/l en los depósitos consolidados). Sin embargo, para el caso del segundo grupo (Ca, SO₄, Mg y Cl) se evidencia una mayor dispersión en los datos y los Cloruros no muestran una tendencia general a incrementar, incluso en los depósitos consolidados, esa tendencia apunta a un descenso en las concentraciones, cabe resaltar que para este análisis se cuenta con una primera muestra en el inicio de perfil 2 y las cuatro restantes están concentradas hacia el km 12, por lo que la densidad de puntos no es adecuada (ver Figura 3-29).

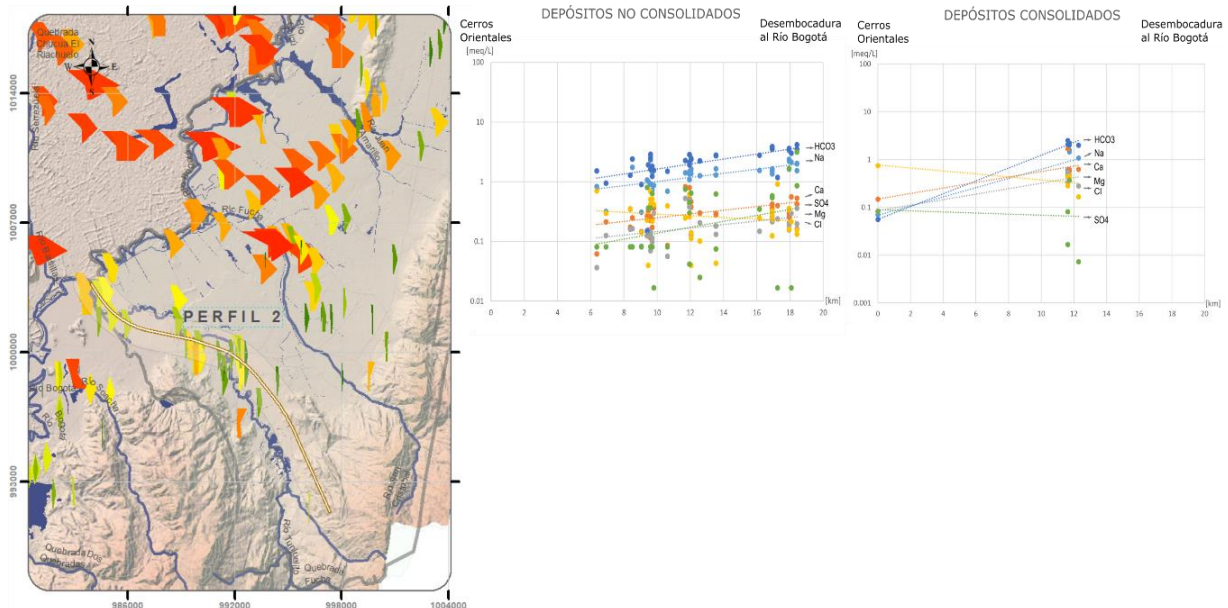


Figura 3-29 Perfil hidrogeoquímico No. 2

3.4.2.7 Análisis de Isótopos

Se realizó el análisis de isótopos a partir de los datos compilados en la base de datos, la cual recoge todos los muestreos que se han realizado en diferentes estudios (EAAB-JICA, 2003; Ingeominas, 2001; SDA, 2013). Se cuenta con un total de 286 registros de mediciones de Oxígeno 18 (O18) y Deuterio (D), entre pozos, aljibes, manantiales, estaciones pluviométricas y ríos.

Para caracterizar la composición isotópica de las muestras respecto a la precipitación, se tomó como referencia la línea meteórica local (LML) propuesta por Rodríguez (1984) y la línea de la sabana de Bogotá (LMS) propuesta por Ingeominas (2001), las cuales son similares, con un cambio no significativo en la pendiente, como se observa en la Figura 3-30. Se incluyó la línea de evaporación de manantiales (SDA, 2013).

De la Figura 3-30, se observa una gran dispersión del contenido isotópico de los pozos que captan de los depósitos consolidados y no consolidado, con una variación del contenido de O18 (‰) entre -12 y -8, para el D(‰) entre -80 y -60. Algunos pozos presentan un comportamiento anómalo, con tendencia al enriquecimiento de Deuterio, señalados por el círculo y la flecha ascendente. Este comportamiento se observa principalmente para los pozos del depósito consolidado. En la reciente literatura (Clark, 2015) se atribuye este efecto a la presencia de CO₂ y CH₄ en el subsuelo. Explicar este fenómeno en los acuíferos de la sabana de Bogotá requiere de mayor estudio, para descartar anomalías en la toma de datos, o propagación de errores entre estudios y transcripciones.

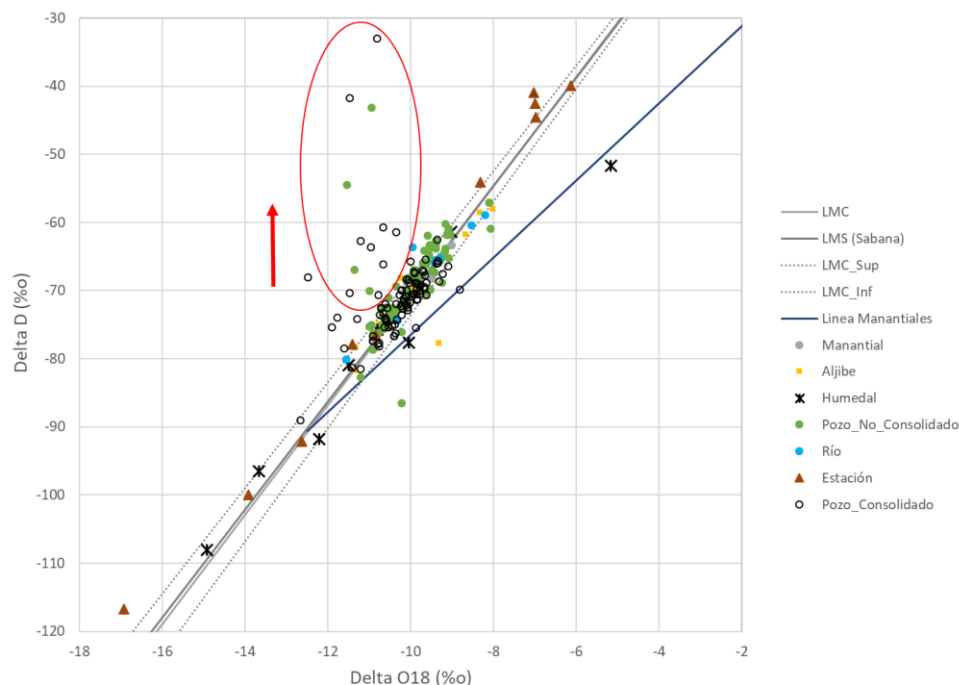


Figura 3-30 Variación altitudinal del contenido isotópico de O18 (‰) y D(‰) respecto a la precipitación

En cuanto al análisis del efecto altitudinal, se graficó el contenido de O18(‰) respecto a la altitud (m.s.n.m) de estación pluviométrica, y de la altitud de la boca del pozo (Figura 3-31). Se construyeron las líneas de tendencia entre las estaciones pluviométricas de acuerdo a los frentes de precipitación en la cuenca de la Sabana, expuestos por Ingeominas (2001). El primer frente en dirección S-N,

proveniente desde el valle del Río Tunjuelo (Sur del distrito); registrada por las estaciones Los Tunjos, El Hato y El Delirio. El segundo frente, en dirección E-W, proveniente de los llanos orientales; registrada por las estaciones El Angulo, El Verjón. Y un tercer frente, con una tendencia menos marcada, sobre la sabana producto de lluvias convectivas, registradas por las estaciones Tibitoc, Santa Ana, Aeropuerto y Casablanca.

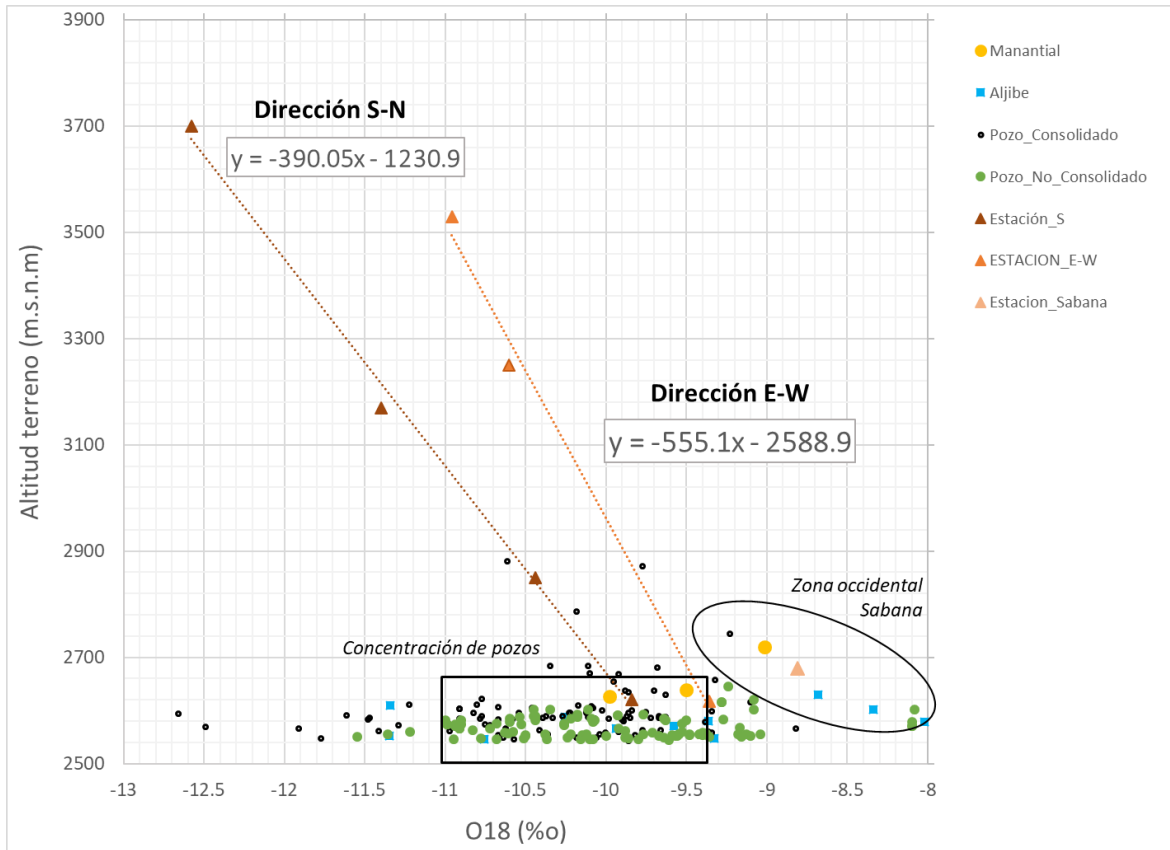


Figura 3-31 Variación altitudinal del contenido isotópico del O18 (‰)

En la Figura 3-31 se observa que no hay una diferenciación entre los pozos que captan de los depósitos consolidados y los del acuífero cuaternario (no-consolidados). Este comportamiento es reiterativo en los análisis hidroquímicos e hidráulicos. Esto obedece a que los filtros de los pozos pueden estar ubicados en ambos depósitos, o bien, el filtro de grava por lo general se encuentra en toda la longitud del pozo, permitiendo la mezcla de agua entre diferentes formaciones. Diferenciar la composición isotópica entre diferentes formaciones requiere de un muestreo fraccionado.

En el recuadro negro (Figura 3-31) con variaciones de O18 (‰) entre -11 y -9.5, se tiene la mayor concentración de pozos (consolidados y no consolidados), con una variación de la altura de recarga entre 2419 – 3059 (m.s.n.m) calculada a partir de la línea de tendencia dirección S-N, que se atribuiría a los flujos provenientes del sur. Y una variación de la altura de recarga entre 2606-3516 (m.s.n.m) referida a la línea de tendencia dirección E-W, que indicaría los flujos provenientes de la zona oriental.

Con el objetivo de correlacionar el origen de la recarga en el distrito, con la el tipo de depósito y la ubicación espacial, se sectorizaron los pozos ubicados en el área del Distrito, diferenciando la zona

sur, oriente, suba y norte. Los pozos restantes localizados en la sabana, se clasificaron de acuerdo al depósito en el que captan (consolidado, no consolidado). Se graficó el contenido de O18(‰) respecto a la profundidad del pozo (m) medida desde el nivel del terreno para medir la dispersión isotópica de acuerdo al tipo de acuífero. La relación expuesta por Clark (2015), señala que para acuíferos profundos la dispersión en el contenido isotópico debe ser menor, y aumenta a medida que se acerca a superficie, ya que se da mayor mezcla con aguas provenientes de otros sistemas u orígenes (Figura 3-32).

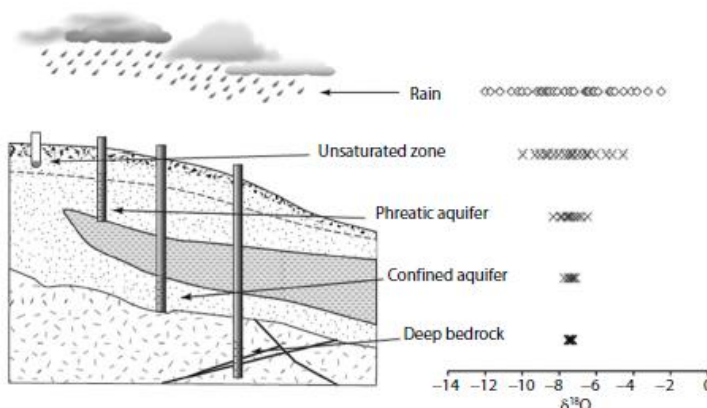


Figura 3-32 Dispersividad del isotópico del O18 (‰) respecto a la profundidad (Clarck 2015)

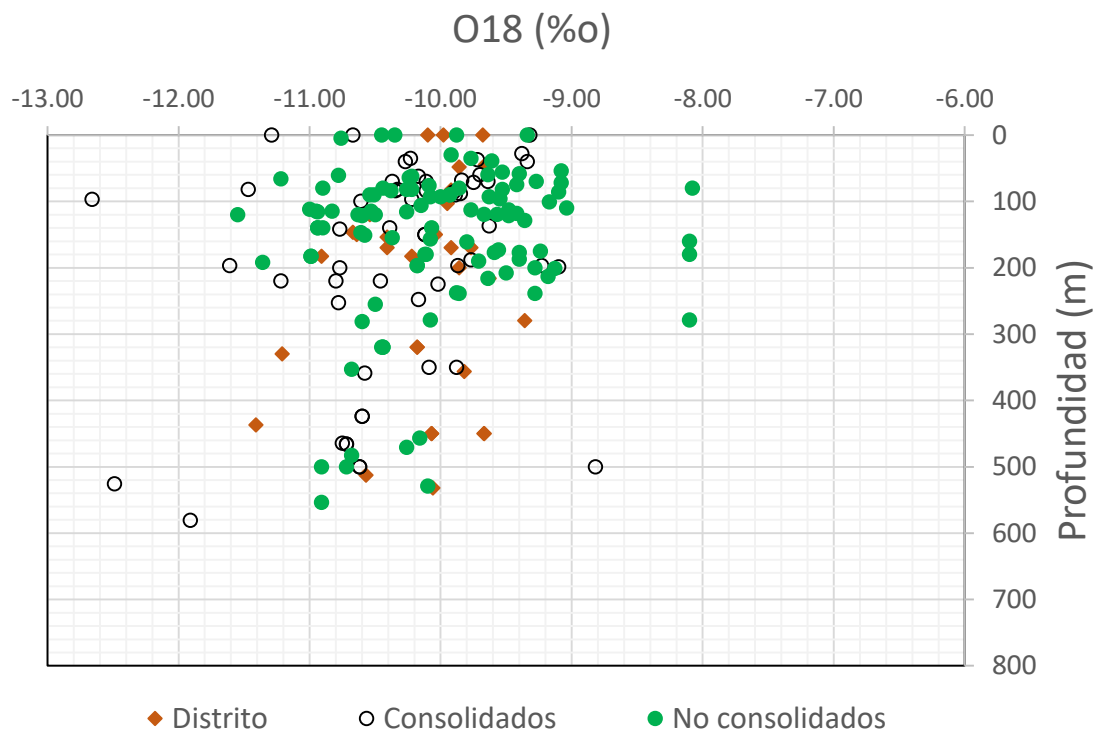


Figura 3-33 Dispersión del isotópico del O18 (‰) respecto a la profundidad en los pozos del Distrito y Sabana de Bogotá

La relación de la dispersión del contenido isotópico respecto a la profundidad en los depósitos consolidados y no consolidados (Figura 3-33), evidencia que las muestras recolectadas en los pozos provienen de mezclas de agua a diferentes alturas de recarga. No se observan diferencias entre los tipos de depósitos, ni tampoco en los pozos ubicados en el distrito. Una vez más se reiteran las afirmaciones realizadas en los diferentes análisis, una en donde se tiene una importante mezcla en los pozos y la segunda que las mezclas son debidas a flujos verticales ascendentes desde los depósitos consolidados.

4 APORTES METODOLOGICOS

En el marco de la gestión de acuíferos urbanos, los objetivos principales de la construcción de un modelo conceptual están relacionados la organización de toda la información de campo y con la simplificación del problema real de tal manera que podamos entender el sistema. En ese orden de ideas, todos los datos de campo e información previa debe ser procesada y ensamblada. Típicamente, la información disponible incluye datos hidrológicos, información geológica e hidrogeológica, resultados de estudios de exploración del subsuelo, pruebas hidráulicas, mapas de uso del suelo, registros de extracción e información asociada a los sistemas de acueducto y alcantarillado. Desafortunadamente, esta información en el contexto colombiano muchas veces es escasa, incompleta y fragmentada por lo que las actividades de procesamiento, depuración e integración representan el punto de partida hacia la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual que contribuya a la gestión adecuada de acuíferos urbanos.

4.1 Recopilación de información

4.1.1 Información secundaria

Para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual del Acuífero de Bogotá, se realizó una revisión de todos los estudios realizados previamente en la zona de estudio y que representan la información (datos) usada para la consolidación de una geodatabase y la información generada como modelos geológicos, modelos hidrológicos, y modelos hidrogeológicos conceptuales y matemáticos que exponen diferentes visiones del comportamiento del sistema.

La información secundaria recolectada en los puntos de agua tales como pozos, aljibes y manantiales ubicados a lo largo de la sabana de Bogotá consiste en puntos que tienen disponibles alguno de los siguientes parámetros: profundidad de extracción, caudal, parámetros hidráulicos, niveles estáticos y dinámicos, hidroquímica e isótopos (ver Tabla 4-1). Se recolectaron 8341 datos correspondiente a 3957 puntos de agua en un periodo de tiempo no continuo de 31 años (1985 a 2015).

Tabla 4-1 Resumen Información secundaria recolectada

TOTAL		Número de pozos/registros con alguno de los parámetros:					
		Profundidad extracción	Nivel estático	Caudal	Hidroquímica	Parámetros hidráulicos	Isótopos
Pozos	3957	2008	1231	1811	236	96	166
Datos	8341	2104	2998	2150	738	209	358

En la Tabla 4-2 se muestra la información más relevante recopilada para la construcción del modelo hidrogeológico. Esta información consiste principalmente de investigaciones del subsuelo, ya sean directas en forma de perforaciones o indirectas en forma de geofísica, llevadas a cabo en la sabana o directamente en el área urbana con diferentes objetivos. Esta información fue procesada y depurada, extrayendo los registros litológicos más completos y detallados que permitieran construir los topes y bases de cada una de las formaciones geológicas, de igual manera la información geofísica fue de gran importancia ya que facilitó la construcción de la superficie de basamento rocoso que limita modelación en la base para así obtener solo una interpolación de la secuencia no consolidada.

Tabla 4-2 Resumen de información principal para la construcción del modelo geológico 3D

Fuente	Año	Tipo	Título de estudio	Aporte	Uso
CAR	1969 1992	PDF	Red de monitoreo de la sabana de Bogotá	Registros litológicos de perforaciones	Modelo Geológico 3D
Ingeominas	1997	PDF	Microzonificación Sísmica de Santa Fé de Bogotá	Geofísica	Modelo Geológico 3D
JICA	2003	PDF	Estudio del Desarrollo Sostenible del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá.	Registros litológicos de perforaciones	Modelo Geológico 3D
Universidad Nacional de Colombia	2006	PDF XLS	Proyecto: Brindar apoyo técnico y actualizar herramientas para la regulación del aprovechamiento de las aguas subterráneas en Bogotá.	Geofísica Registros litológicos de perforaciones	Modelo Geológico 3D
SDA	2013	PDF, JPG	EXPEDIENTES	Registro litológico de Perforaciones	Modelo Geológico 3D
SDA	2013	PDF XLS	Sistema de Modelamiento Hidrogeológico del Distrito Capital Bogotá	Geofísica Registros litológicos de perforaciones Mapa Geológico	Modelo Geológico 3D
Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.	2015	PDF	Diseño para la primera línea del metro del sistema integrado de transporte público-SITP para la ciudad de Bogotá	Registro litológico de Perforaciones Geofísica	Modelo Geológico 3D

Para la recolección de la información se recurrió a las diferentes fuentes disponibles, en especial los estudios previos facilitados por la Secretaría Distrital de Ambiente-SDA. Adicionalmente, una fuente importante de información fue recolectada del SICAT (Sistema de información para el inventario, catalogación, valoración y administración de la información técnico-científica) del Servicio Geológico Colombiano, con medición de niveles desde el año 1985. También, fueron consultados 72 expedientes de aguas subterráneas de la SDA.

Tabla 4-3 Fuentes de información secundaria - puntos de agua

Autor	Año	Fecha de muestra	Tipo	Título del estudio	Aporte*
INGEOMINAS	1988	1985-1988	.pdf	Índice General de Pozos, Aljibes y Manantiales.	P, Q

Autor	Año	Fecha de muestra	Tipo	Título del estudio	Aporte*
Robles, J.	1990	1989-1990	.pdf	Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá - Hidrogeología de la Cuenca del Río Subachoque. Datos de Ensayos de Acuíferos	P,Q,T
INGEOMINAS	2000	1999	.pdf	Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá - Hidrogeología de la Cuenca del Río Subachoque	P, HQ, ITP
Hidrogeocol	2000	1999	.doc	Elaboración del modelo hidrogeológico para los acuíferos de santa fe de Bogotá, D.C.	P, Q, NE, T, HQ
INGEOMINAS	2001	1998-2000	.pdf	Informe Caracterización Geoquímica e Isotópica de los Acuíferos de la Cuenca Alta del Río Bogotá	P, ITP
INGEOMINAS	2002	2001-2002	.pdf	Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá.	P, Q, NE, T
JICA	2003	2000-2003	.doc	Estudio del Desarrollo Sostenible del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá	P, Q, NE, T, HQ, ITP
Universidad Nacional de Colombia	2006	2005-2006	.doc	Proyecto: Brindar apoyo técnico y actualizar herramientas para la regulación del aprovechamiento de las aguas subterráneas en Bogotá	Q, NE, HQ
SIAM	2006		.doc	Inclusión del balance hídrico, implementación del modelo hidrogeológico y capacitación en Modflow	P, Q, NE, T
JICA	2009	2007-2009	.pdf	Estudio de abastecimiento sostenible de agua para la ciudad de Bogotá y áreas circundantes basado en el manejo integrado de	P, Q, NE

Autor	Año	Fecha de muestra	Tipo	Título del estudio	Aporte*
				recursos hídricos en la república de Colombia	
CAR	2012	1998-2012	.xls	Base de datos	P, NE
SDA	2012	2010-2012	.xls	Hoja Maestra	P, Q
SDA	2013		.pdf	Sistema de modelamiento hidrogeológico del distrito capital Bogotá	P, Q, NE, HQ, T, ITP
CAR	2015	2010-2015	.xls	Concesión pozos de la Sabana	P, Q
Expedientes 01	1993-2015		.pdf	Expedientes de pozos	P, Q, NE, T

*P= Profundidad

Q= Caudal

NE= Nivel estático

HQ= Hidroquímica

T= Parámetros hidráulicos (transitividad, conductividad, coeficiente de almacenamiento y capacidad específica).

ITP= Isótopos (oxígeno-18 y deuterio)

En la Figura 4-1 se referencia el parámetro recolectado y su respectiva fuente o autor que realizó la medición y en la Figura 4-2 se encuentra conjunto de los pozos recolectados para el Distrito, sin embargo, esta representación no significa necesariamente que la totalidad de los pozos se encuentren activos (en extracción), esta información no siempre pudo ser registrada.

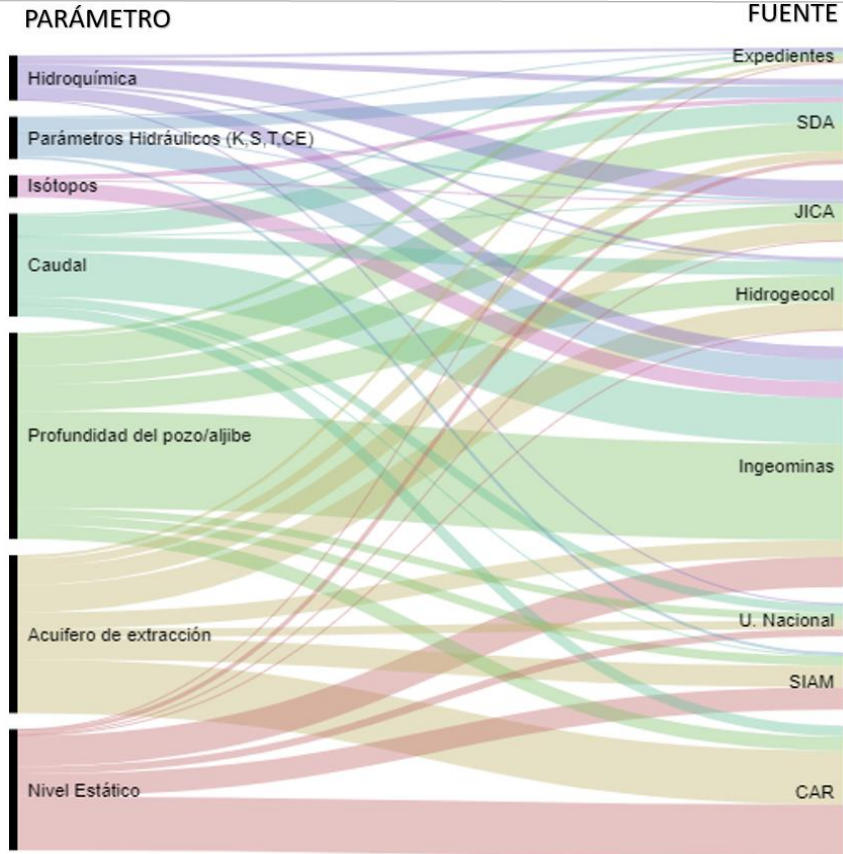


Figura 4-1 Relación entre parámetro recopilado y su fuente.

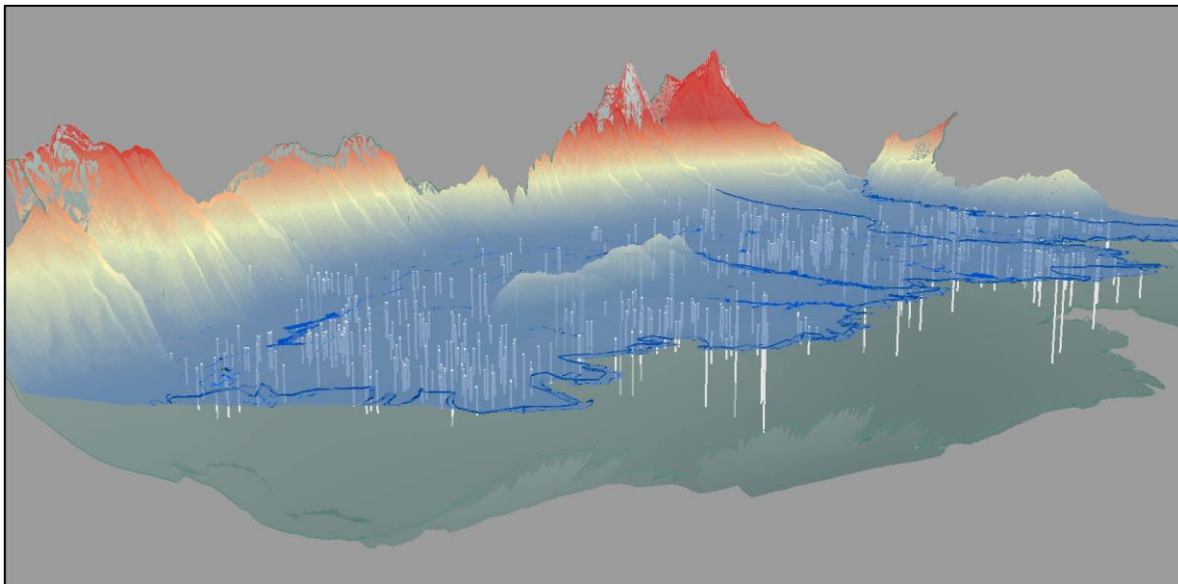


Figura 4-2 Pozos de extracción inventariados en Bogotá D.C.

La respuesta hidráulica de los pozos está sujeta al tipo de depósito del cual se está extrayendo. En este orden de ideas, la clasificación de los pozos se hace para depósitos consolidados (Complejo

Paleógeno y Complejo Acuífero Guadalupe) y no consolidados, superficie definida en este trabajo. Y para la zona de estudio, se establecieron las profundidades de las formaciones que atraviesan los pozos según los topes y las bases definidas en la construcción del presente modelo hidrogeológico.

A partir de la información recopilada no fue posible asignarle una profundidad de extracción a todos los pozos, así las cosas, el orden de prioridades de clasificación se describe en los siguientes puntos y en la Figura 4-3 Figura :

1. En caso de conocer la profundidad de extracción de pozo: según la superficie de espesores del depósito no consolidado definida el presente trabajo con base en las diferentes perforaciones consultadas.
2. En caso de no conocer la profundidad del pozo: según la clasificación hecha por la fuente de donde se tomó la información.
3. En caso de no conocer la profundidad del pozo y su ubicación en superficie está en depósito consolidado: el pozo es clasificado como “consolidado”.

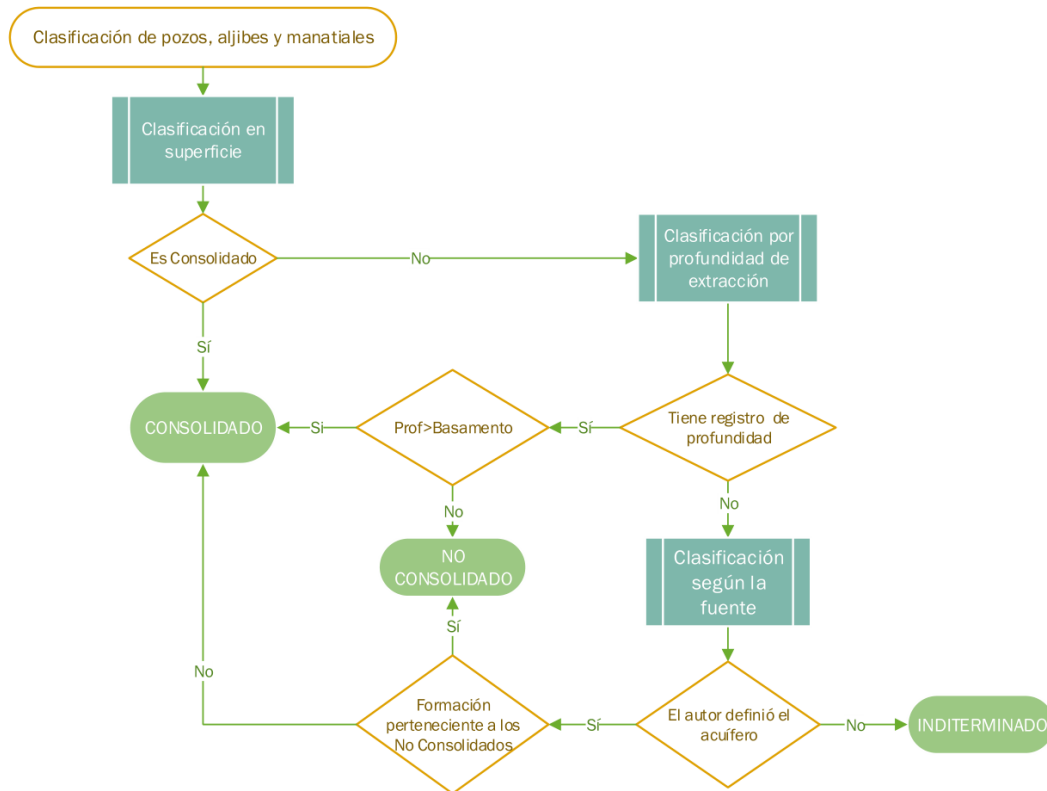


Figura 4-3 Figura Clasificación de pozos en los depósitos consolidado y no consolidado

En la Figura 4-4 se referencia la base de datos recopilada y se indica el respectivo tipo de depósito de extracción de los puntos de agua y en el Anexo A se referencia el archivo Excel de dicha recopilación junto con la versión normalizada en MySQL la cual consta de ocho tablas como se muestra en la Figura 4-5.

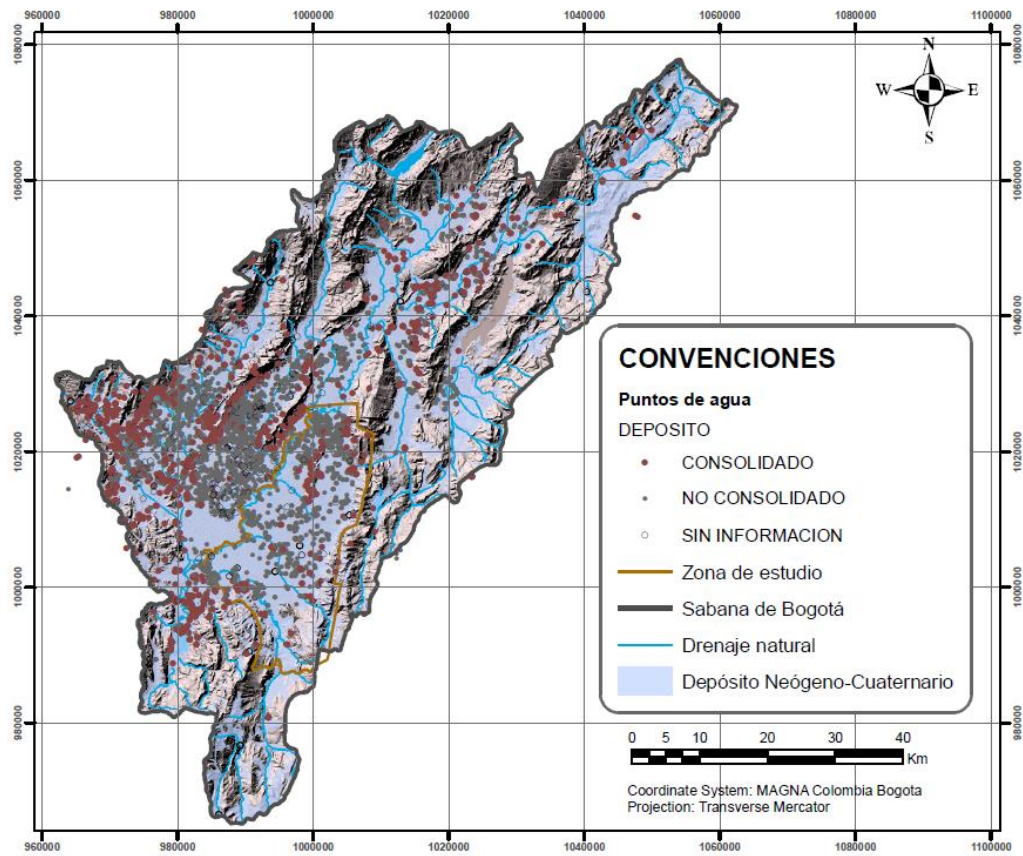


Figura 4-4 Base de datos de puntos de agua clasificados según el depósito de extracción

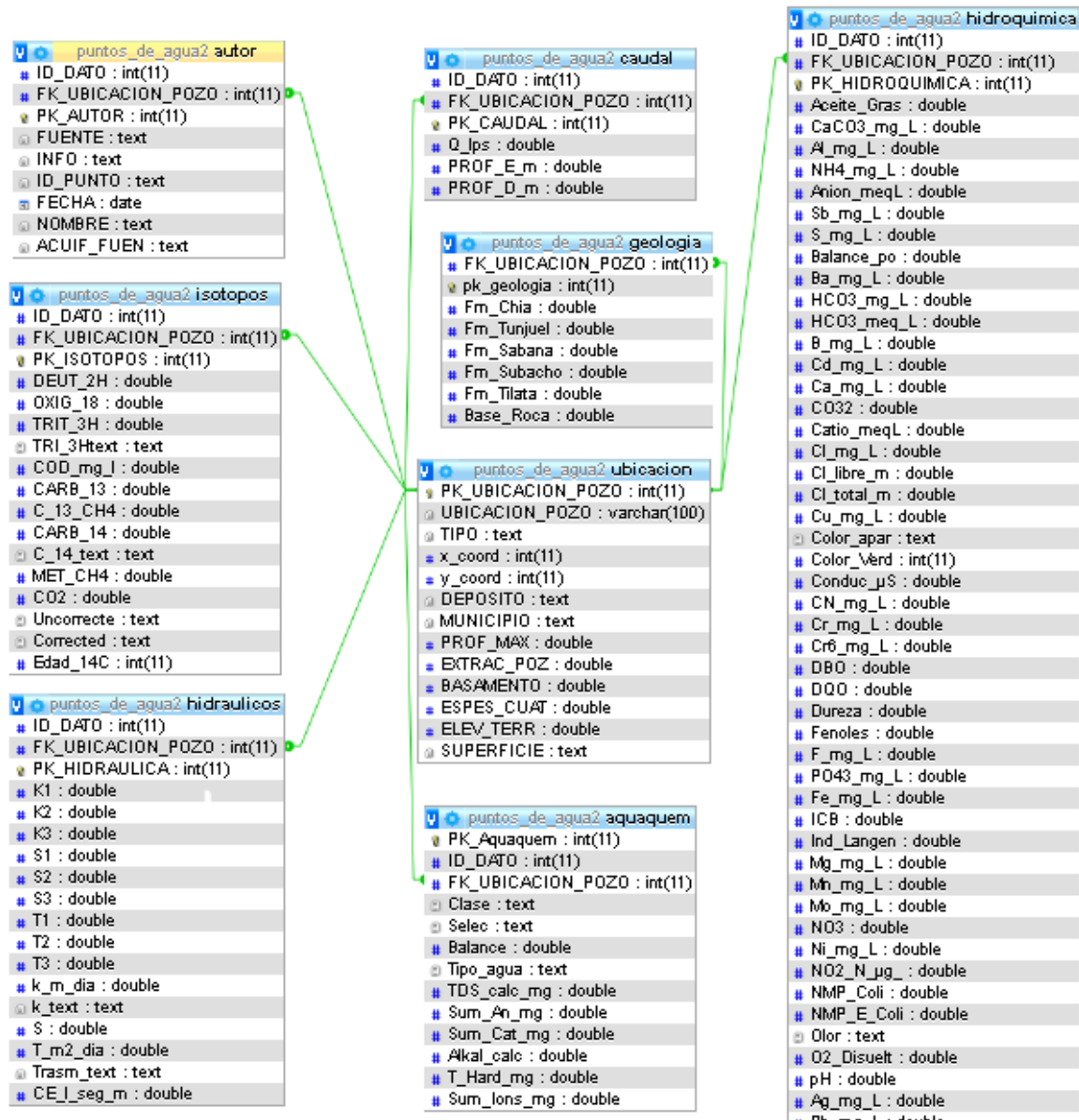


Figura 4-5 Normalización y conectores de Base de Datos de puntos de agua en MySQL

En lo relacionado con información referente a parámetros hidráulicos, se depuraron los valores interpretados de las pruebas de bombeo de transmisividad (T), conductividad (K), capacidad específica (CE) y coeficiente de almacenamiento (S). En la Figura 4-6 se presentan los puntos de agua que extraen del depósito no consolidado con valores de transmisividad y conductividad ubicados en el Distrito Capital.

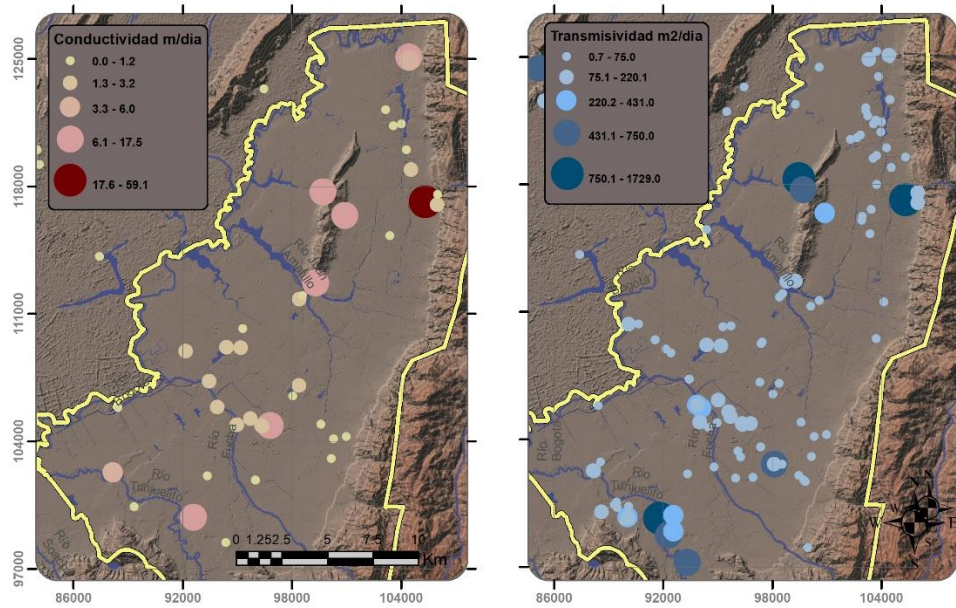


Figura 4-6. Puntos de agua con información de conductividad (K) y transmisividad (T)

La información hidroquímica recolectada incluye hasta 71 parámetros. En la se referencia a modo de ejemplo el pH de los puntos de agua que extraen del depósito no consolidado y en la Figura 4-7 se referencia la proporción de cada uno de los parámetros medidos en los pozos para el depósitos no consolidado, donde se observa que: conductividad, Cl, CaCO₃, Na, HCO₃, Mg, Ca k y pH son los parámetros más comúnmente medidos en la sabana de Bogotá mientras que parámetros como: Cr, NO₂, Cu, B, entre otros, son parámetros de los que se carece registros de medición.

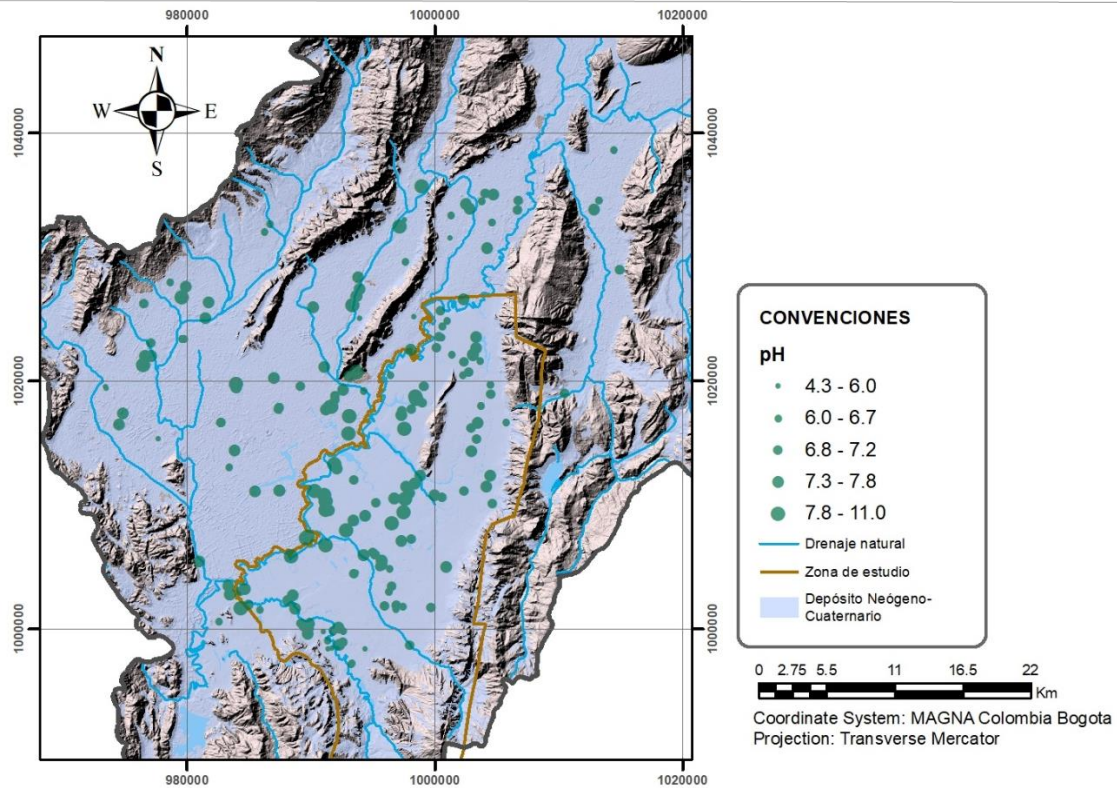


Figura 4-7 Puntos de aguas con información de pH – Depósito no consolidado



Figura 4-8 Proporción de parámetros hidroquímicos en el depósito no consolidado

En lo que respecta a investigaciones, isotópicas, se recolectaron mediciones de oxígeno-18, deuterio, carbono-14, carbono-13 y tritio. De manera ilustrativa se presentan en la Figura 4-8 los valores de oxígeno-18 de los pozos de agua que extraen del depósito no consolidado.

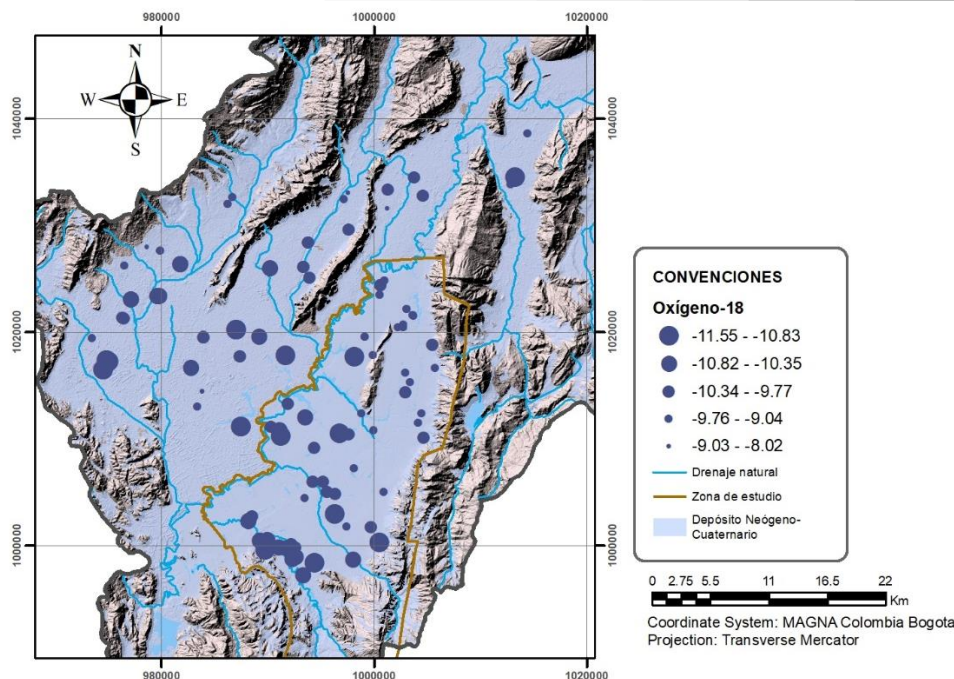


Figura 4-8 Puntos de agua con información de oxígeno-18 – Depósito no consolidado

4.1.2 Información recopilada en campo

A continuación, se presenta un resumen de la metodología y algunos resultados encontrados en la fase de campo realizada en el marco del convenio.

A. Recopilación de información de estaciones de servicio (EDS), existentes en la zona de estudio

A partir de la información suministrada por la SDA, se elaboró un mapa con la localización de cada una de las EDS en la zona de estudio, con el fin de realizar la selección de las EDS para el trabajo de campo.

B. Selección de EDS para trabajos de campo

En desarrollo del estudio, se realizó la selección de estaciones de servicio de suministro de combustible, para la medición de niveles y ejecución de pruebas de slug en pozos de monitoreo.

C. Revisión de expedientes de la SDA, con información de las EDS seleccionadas

Se seleccionó y digitó la información relacionada con pozos de monitoreo existentes en las EDS seleccionadas, de los expedientes previamente revisados en la SDA.

D. Programación de estaciones de servicio (EDS), para la medición de niveles y ejecución de pruebas de slug.

Se elaboró un cronograma con la respectiva programación de estaciones de servicio (EDS), para la medición de niveles y ejecución de pruebas de slug.

E. Toma de datos en campo

El trabajo de campo, estuvo orientado a realizar la medición de niveles piezométricos, detección del espesor de producto libre, y ejecución de pruebas de slug.

La información de cada estación y de cada uno de los pozos encontrados fue recopilada en un formato elaborado con tal fin por la Universidad.

Los datos de campo generados durante la ejecución de las pruebas de slug, fueron registrados automáticamente por medio de dataloggers.

Los datos de las pruebas de slug, se interpretaron con el software AquiferWin32, y se estimó la conductividad hidráulica en cada uno de los pozos de monitoreo.

Las principales limitaciones para la interpretación de las pruebas de slug, radicó en la falta de información confiable de los pozos existentes en las estaciones de servicio visitadas, en especial la correspondiente a litología, diseños y profundidades de cada uno de los pozos. Por otra parte, la información disponible en los expedientes revisados de los pozos, en la mayoría de los casos no coincide con las características de los pozos encontrados durante las visitas.

Durante la revisión de los pozos de monitoreo, se evidencio la presencia de lodos en el fondo de algunos de ellos, posiblemente por falta de limpieza y purga después de construidos, lo cual puede incidir en la estimación de la conductividad hidráulica. En algunas estaciones se encontraron pozos sellados con concreto, y otros que de ninguna forma se pudieron abrir.

F. Interpretación de resultados

Para la interpretación de las pruebas de slug, se utilizó el método de Hvorslev, mediante la utilización del Software AcuíferWin 32.

La información cruda extraída de los dataloggers, fue sometida a un proceso de revisión, selección y corrección de los datos utilizados para el cálculo de la conductividad hidráulica.

Para la interpretación de las pruebas, se realizó una regresión lineal en aquellos puntos de datos cuyo desplazamiento normalizado varía de 0.15 a 0.25 (Butler, 1998).

G. Síntesis de resultados

En la Tabla 4-4, se presenta el resumen de las EDS visitadas, los niveles piezométricos medidos y las pruebas de slug test realizadas.

Tabla 4-4 Resumen de actividades realizadas en campo

EDS visitadas	178
Niveles medidos en pozos de monitoreo (PM)	569
Niveles medidos en pozos de observación (PO)	384
Número de pruebas de SLUG TEST realizadas	243

En la Tabla 4-5 se presenta estadísticos descriptivos de los niveles estáticos medidos y las conductividades hidráulicas estimadas.

Tabla 4-5 Estadísticos descriptivos de variables hidrogeológicas

Variable	Mínimo	Máximo	Promedio	Media geométrica
Conductividad hidráulica (m/s)	1.38E-09	3.75E-05	6.02E-06	8.51E-07
Niveles estáticos (m)	0.05	9.24	2.22	1.91

Teóricamente, un modelo hidrogeológico conceptual es mejor en la medida que sea muy cercano al sistema real, sin embargo, en la práctica en el contexto de ejercicios de construcción de sistemas de soporte de decisiones que contribuyan a la gestión integral de sistemas acuíferos es necesario mantener el modelo tan simple como sea posible garantizado que todos los procesos y características relevantes son conservadas (e.g. Hill, 2006). En ese sentido, el desarrollo de un modelo conceptual para un acuífero urbano como el de Bogotá debería incluir la definición de:

1. Los límites del acuífero y sus condiciones de frontera
2. Las unidades hidrogeológicas más relevantes de tal manera que se represente la variabilidad espacial de los materiales que conforman estas unidades y las propiedades hidráulicas asociadas.
3. Sistema de flujo que permita entender el movimiento del agua en el sistema acuífero, así como sus interacciones con la superficie, las zonas de descarga y las conexiones con otros acuíferos.

4.2 Modelación en Elementos Analíticos (AEM) 2D

En el marco de la construcción del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero objeto de estudio se realizó una modelación analítica regional que permite definir las condiciones de frontera del modelo y determinar la conectividad del sistema acuífero regional.

El método de los elementos analíticos tradicionalmente se ha usado con éxito para flujo en acuíferos simples 2D, esencialmente para modelos regionales en régimen estacionario. La reciente introducción de pasos de tiempo en diferencias finitas y fuentes de recarga espacialmente variables, así como de subdominios ha permitido extender el método a dominios multicapas, heterogéneos, anisotrópicos y en régimen transitorio (Fitts 2010).

Este método tiene grandes bondades entre ellas la no necesidad de generar una malla estructurada. En muchos casos solo la construcción de la malla hace que el tiempo que debería ser usado en la modelación hidrogeológica sea invertido en la construcción de la geometría. Por otro lado, la inclusión de pozos, ríos, fallas y otros elementos propios de un modelo hidrogeológico, se hace de una forma muy simple.

Con el fin de investigar la conectividad del acuífero de Bogotá en el contexto regional y así definir su dominio y sus condiciones de frontera, se usó un esquema de modelación de perfiles 2D ampliamente usada para el estudio del flujo regional de agua subterránea para una sección transversal de un modelo conceptual o matemático 3D establecido (Cardenas 2008; Freeze and Witherspoon 1966). Es una importante herramienta para tener un entendimiento general del movimiento del agua subterránea. Estos modelos permiten apreciar las localización y extensión de las zonas de recarga y descarga, la dirección y velocidad del flujo en cualquier punto en la región, y establecer balances de masa (Tóth 1963).

En este sentido, la modelación analítica se realizó con dos perfiles geológicos regionales de la zona de estudio, con el fin de determinar el comportamiento a escala regional de las líneas de flujo y establecer las zonas de recarga y descargas. A partir de la simulación del tránsito de partículas, estimar de los tiempos de viaje de una partícula desde la zona de recarga hasta la zona de descarga.

Esta información es relevante para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual, ya que permite el entendimiento de las direcciones de flujo, la definición de zonas de recarga y descarga, así como establecer posibles mezclas de aguas provenientes de diferentes zonas y determinar tiempos de tránsito.

El desarrollo de un modelo analítico a su vez representa una herramienta complementaria de tal manera que se pueda conceptualizar de mejor manera las dinámicas regionales de los acuíferos por lo que es fundamental realizarla de forma paralela a la construcción del modelo hidrogeológico conceptual.

La metodología empleada para construir el modelo analítico regional de los perfiles 2-D se describe a continuación:

4.2.1 Construcción Geológica de los perfiles

Para construir el modelo analítico se construyeron dos perfiles regionales A-A' y B-B' (Figura 3-11) con dirección E-W principalmente y con una extensión de aproximadamente 60 km. Los perfiles se realizaron a partir de la cartografía base de las planchas geológicas (227, 228, 246 y 247) a escala 1:100000 del Servicio Geológico Colombiano y con la interpretación de estudios adicionales como INGEOMINAS (2002).

Como se mencionó anteriormente, los modelos analíticos no requieren la creación de mallas (i.e. discretización del dominio), únicamente la discretización de las condiciones de frontera del dominio y la definición de los parámetros de cada subdominio. Para ello es importante realizar como primera medida, la esquematización de los diferentes elementos que serán incluidos en el modelo. Para el perfil A-A' la geología se simplificó a cinco unidades (Depósitos del Neógeno-Cuaternario, Complejo Paleógeno, Formación Labor Tierna, Formación Plaeners y Formación Arenisca Dura)(Figura 4-10), siguiendo como criterio la permeabilidad de las formaciones. Estos serán denominados en el modelo analítico como subdominios.

El dominio externo del modelo fue delimitado por la Formación Chipaque, caracterizada en literatura como una formación de muy baja permeabilidad, es decir impermeable para efectos de modelación hidrogeológica numérica (basamento impermeable de la cuenca hidrogeológica de la sabana de Bogotá).

De acuerdo con el perfil geológico A-A', en el modelo analítico se consideraron únicamente las fallas transversales F. Bojacá (Río Tunjuelo) y F. San Cristóbal, reportadas como fallas abiertas (Velandia

Figura 4-11. Perfil Geológico corte B-B'

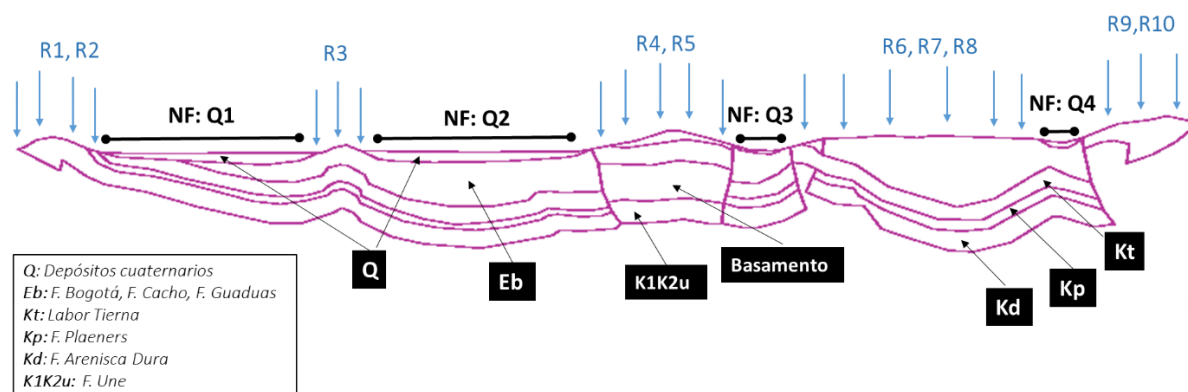


Figura 4-12. Dominio y representación del modelo analítico de flujo 2D. Perfil B-B'

4.2.2 Definición de parámetros hidráulicos del modelo

Los parámetros hidráulicos fueron asignados de acuerdo con lo reportado por estudios previos (CAR 2008; Ingeominas 1991; PNUD, DAMA, and Hidogeocol 1999) y con los valores reportados en los pozos, de acuerdo con la formación geológica de captación.

Conductividad Hidráulica

Para los depósitos del Neógeno-Cuaternario, se consideró una anisotropía de la conductividad hidráulica horizontal (K_h) respecto de la conductividad hidráulica vertical (K_v) $K_h/K_v=10$, característica de materiales aluviales sueltos o poco consolidados, este valor se dejó constante en los depósitos ante mencionados.

Para las otras formaciones se definió un intervalo de anisotropía (k_h/k_v) entre 2 y 10, de acuerdo con lo reportado en la literatura, para materiales rocosos fracturados (Maréchal, Wyns, et al. 2004; Maréchal, Dewandel, and Subrahmanyam 2004). En particular se asume una anisotropía de 2 dada la condición de alto fracturamiento de los depósitos no consolidados, reportados en Estudio de la Fase I del Metro de Bogotá, análisis de las líneas sísmicas. En donde se registran un espesor fracturado de hasta 350 m en los depósitos triásicos y cretácicos.

En el perfil A, una condición de anisotropía fue asignada en la zona de los cerros orientales, ante la disposición de las capas rocosas con un buzamiento regional aproximado 50° N-E, que hacen parte del anticlinal volcado de Bogotá. Esta condición se asigna en AnAqSim con la rotación de la componente principal de la conductividad (K_h) respecto al eje x, la segunda componente (K_v) permanece siempre perpendicular a esta. Los parámetros asignados a cada subdominio se presentan para el Perfil A en la Tabla 4-6 y para el perfil B en la

Tabla 4-7.

Tabla 4-6 Parámetros hidráulicos de los dominios Perfil A

Formación Geológica	Dominio Anaqsim	K (m/s)	K_h_{min} (m/d)	K_h_{max} (m/d)	Anisotropía (K_h/K_v)	Pe_{min}	Pe_{max}
Depósitos Cuaternarios	1. Q	5.79E-07	0.05	0.5	10	0.05	0.10

Formación Geológica	Dominio Anaqsim	K (m/s)	Kh_min (m/d)	Kh_max (m/d)	Anisotropía (Kh/Kv)	Pe_min	Pe_max
F.Bogotá F.Cacho F. Guaduas	2. Eb	5.79E-07	0.01	0.05	2 - 10	0.05	0.07
Labor Tierna (Guadalupe) F. Arenisca Dura (Guadalupe)	3.Kd	1.16E-05	1	4	2 - 10	0.05	0.10
F. Plaeners (Guadalupe)	4. Kp	1.16E-06	0.1	0.4	2 - 10	0.05	0.10
Fallas transversales Falla R. Bojacá Falla R. San Cristóbal	5. FallasT	5.79E-05	5	5	0	0.10	-
Anticlinal (-50° a eje x)	6. Anticlinal	5.79E-06	0.500	1.0	2 - 10	0.05	0.10

Tabla 4-7 Parámetros hidráulicos de los dominios Perfil B

Formación Geológica	Dominio Anaqsim	K (m/s)	Kh_min (m/d)	Kh_max (m/d)	Anisotropía (Kh/Kv)	Pe_min	Pe_max
Depósitos Cuaternarios	1. Q	5.79E-07	0.05	0.5	10	0.05	0.10
F.Bogotá F.Cacho F. Guaduas	2. Eb	5.79E-07	0.05	0.08	2 - 10	0.05	0.07
Labor Tierna (Guadalupe) F. Arenisca Dura (Guadalupe)	3. Kd	1.16E-05	1	4	2 - 10	0.05	0.10
F. Plaeners (Guadalupe)	4. Kp	1.16E-06	0.10	0.4	2 - 10	0.05	0.10
F. Une	5. K1K2u	1.16E-07	0.01	0.1	2 - 10	0.05	0.10
Chipaqué	6. Basamento	1.16E-09	0.0001	0.0001	-	0.05	0.10

Porosidad efectiva

Se asignaron valores entre el 5% y el 10% de acuerdo con lo reportado en la literatura. Álvarez (1997), referenció un valor del 9% para la formación Arenisca de Labor, y un 5% asignado a todos los acuífero, para el cálculo de reservas. Por su parte la SDA (2013), en el cálculo de reservas del distrito, asignó un valor de rendimiento específico del 6% para el Grupo Guadalupe y del 3% para los depósitos no consolidados.

4.2.3 Condiciones de frontera

A continuación, se describen las condiciones de frontera que fueron usadas para el perfil A y el Perfil B. Los valores asignados se presentan en la Tabla 4-8 para el Perfil A y en la Tabla 4-9 para el perfil B.

No Flujo: En todo el límite inferior del modelo, en el contacto con la formación Chipaqué, considerada por como un contacto impermeable que no permite el paso del agua subterránea.

Nivel Fijo: En los modelos de perfil 2D, el nivel del agua es generalmente la condición de frontera en la parte superior del modelo, también es posible establecer un flujo de recarga a lo largo de todo el nivel del agua. Sin embargo, es necesario por lo menos asignar una elevación aproximada del nivel del agua para localizar una frontera que responda a las condiciones reales, de lo contrario el modelo calculará valores de nivel freático fuera de los límites esperados.

En este sentido, en todas las líneas de fronteras externas con depósitos cuaternarios se asignó una carga hidráulica constante.

Flujo: En las zonas de pendiente, con depósitos consolidados se asignó una condición de frontera de flujo, para representar la recarga natural, calculada en la modelo hidrológica realizada en este proyecto, la cual fue descrita en la sección de hidrología.

Tabla 4-8 Condiciones de frontera Modelo 2D, Perfil A

Geometría AnaqSim	Ubicación	Condición de frontera	Unidad	Valor min.	Valor máx.
K2E, Kp4, Eb2	Cerros Orientales, Monserrate	Flujo- Recarga	mm/año	100	200
Ktw_1, kpw_2, ktw_3, kpw4_ktw5, kpw6, kdw7, wsalida	Cerros Occidentales	Flujo- Recarga	mm/año	50	100
Q	Cuaternario	Nivel Fijo	msnm	2540	-
BASAMEMTO	No Flujo				

Se consideró una recarga mínima y una recarga máxima, el intervalo corresponde a la heterogeneidad espacial reportados en el modelo hidrológico. Se consideraron los dos escenarios, uno de baja recarga y otro de alta recarga para validar a su vez la modelación hidrológica.

Q (Perfil A) y Q1 y Q2 (Perfil B), fueron calculados a partir de la base de datos de pozos compilada en este proyecto. El promedio se realizó con el nivel freático estático para los pozos que tenían reportado este valor. Q3 se asignó el valor del nivel del agua en el Embalse de San Rafael (La Calera). Q4 nivel del agua en la quebrada Quisquiza (vertiente del Río Negro).

Tabla 4-9 Condiciones de frontera Modelo 2D, Perfil B

Geometría AnaqSim	Ubicación	Condición de frontera	Unidad	Valor min.	Valor máx.
R10, R9	Cerros Orientales Siecha	Flujo- Recarga	mm/año	80	130
R6,R7,R8	Cerros Orientales La Calera	Flujo- Recarga	mm/año	10	30
R4,R5	Cerros Orientales - Mirador	Flujo- Recarga	mm/año	30	80
R3	Cerros Suba	Flujo- Recarga	mm/año	10	10
R1,R2	Cerros Occidentales	Flujo- Recarga	mm/año	30	70
	Basamemto	No Flujo		0	-
Q4	Cuaternario _ (Quebrada Quisquiza)	Nivel Fijo	msnm	2800	-
Q3	Embalse San Rafael	Nivel Fijo	msnm	2782	-
Q2	Cuaternario _ Bogotá	Nivel Fijo	msnm	2540	-
Q1	Cuaternario _ Bogotá	Nivel Fijo	msnm	2540	-

4.2.4 Elementos considerados en la modelación

Para la modelación analítica 2D perfil geológico A-A', se consideraron únicamente las fallas transversales F. Bojacá (Río Tunjuelo) y F. San Cristóbal, reportadas como fallas abiertas. La definición de las fallas se realizó como un dominio de mayor conductividad, con un ancho de 30m.

Por otra parte, en la modelación de un perfil 2D con ancho unitario asume que no hay flujo a través del ancho del perfil, por eso no es posible simular un flujo radial de un pozo de bombeo o flujo 3D

alrededor de una fuente o sumidero u otros efectos de flujo 3D (Anderson, Woessner, and Hunt 2015). Por tal razón, no se incluyeron los pozos en la modelación analítica de los perfiles A y B.

4.2.5 Identificación de zonas de recarga y descarga

Para analizar los tiempos de viaje de las zonas de recarga a la zona de descarga, identificar flujos regionales y locales, y estimar la edad del agua en los depósitos cuaternarios, se usó la metodología de movimiento de partículas (*particle tracking*). En particular, se localizaron partículas en las zonas de recarga constituidas por los cerros orientales y cerros occidentales y se simularon para diferentes tiempos de tránsito según el escenario en estudio.

4.2.6 Análisis de sensibilidad

Se realiza un análisis de sensibilidad para observar la respuesta del modelo (dirección del flujo, tiempos de tránsito, zonas de descarga y extensión de la descarga, niveles piezométricos en los cerros) ante la variación de la porosidad efectiva (parámetro importante en el transporte de partículas), conductividad hidráulica horizontal, anisotropía y valor de la recarga (Figura 4-13 y Figura 4-14). Para el análisis se generaron diferentes escenarios, para todos los casos el número y ubicación de las partículas arrojadas permaneció constante. Y se simuló un tiempo de 1000 años. Los parámetros asignados a cada escenario, son los presentados en las tablas de parámetros hidráulicos y condiciones de frontera para cada perfil (Tabla 4-7, Tabla 4-8, Tabla 4-9). En total se simularon 6 escenarios.

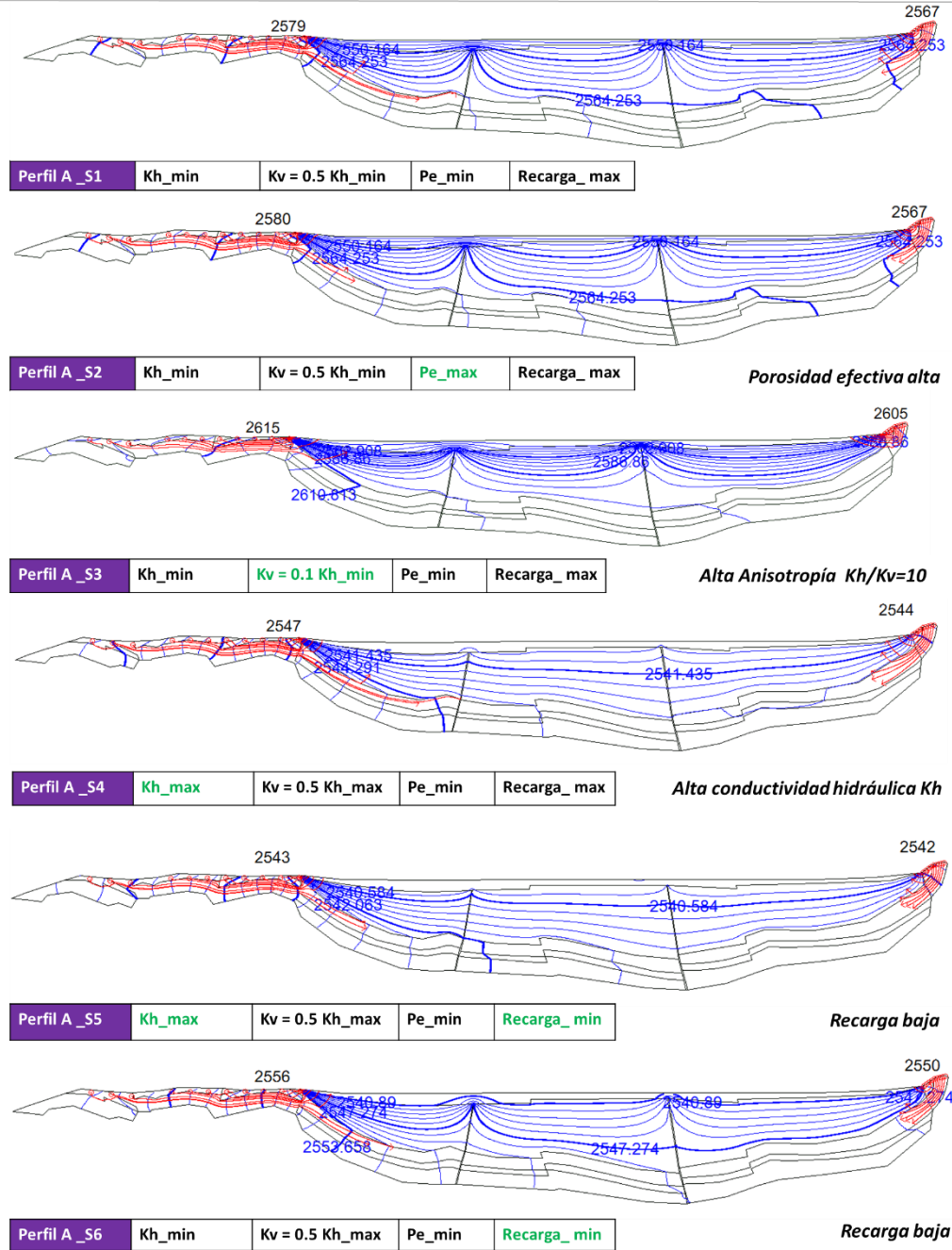


Figura 4-13 Análisis de Sensibilidad, Perfil A.

 Tiempo de simulación a 1000 años para todos los escenarios.

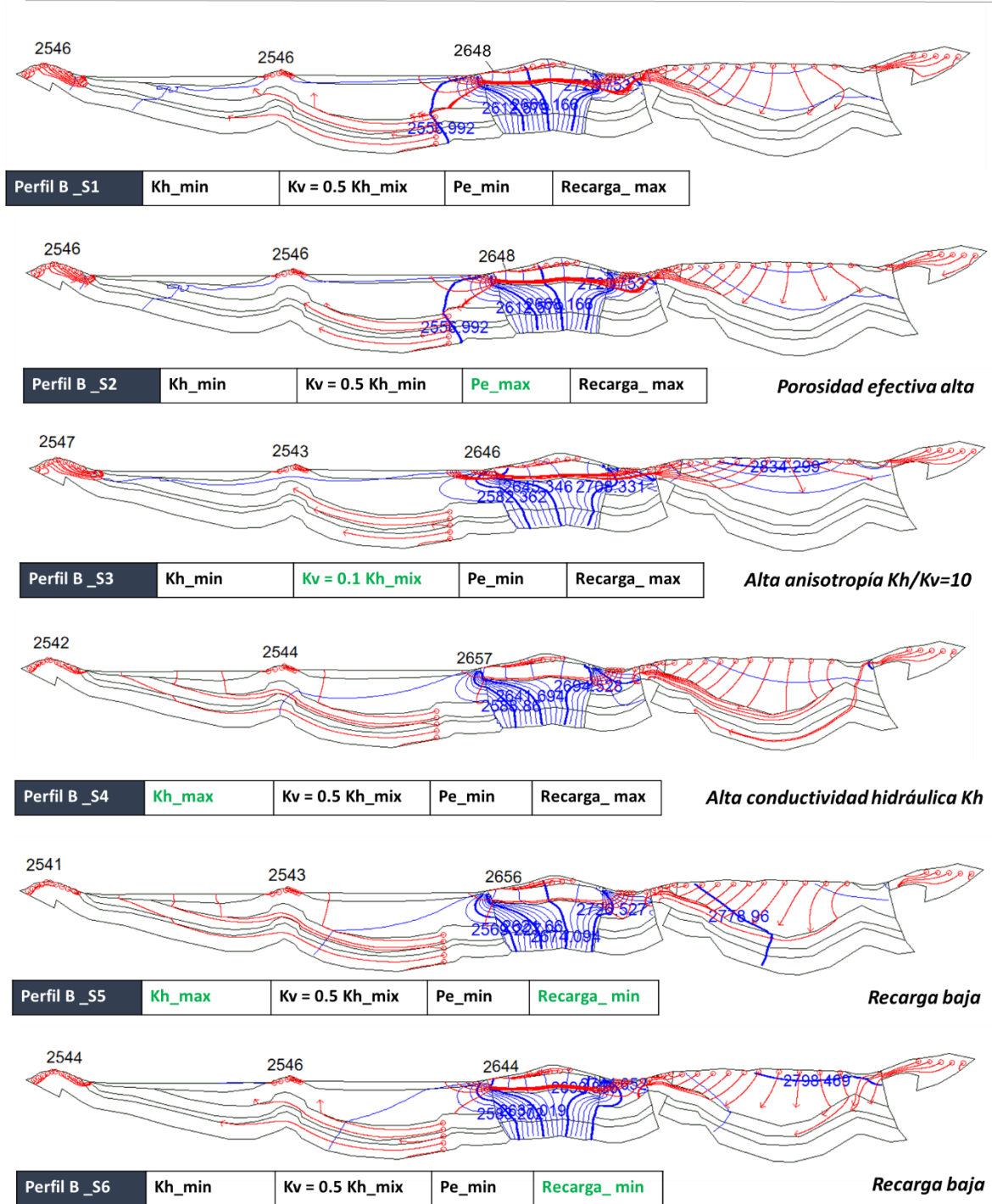


Figura 4-14 Análisis de Sensibilidad, Perfil B.
Tiempo de simulación a 1000 años para todos los escenarios.

A continuación se realiza un análisis de los resultados de las simulaciones del análisis de sensibilidad para los parámetros estudiados, teniendo como referencia las Figura 4-13 y Figura 4-14.

Porosidad efectiva (S2): Se analizaron dos escenarios de porosidad efectiva, uno para 0.05 y otro para 0.1. Como es de esperarse a mayor porosidad efectiva, la velocidad de viaje se reduce, y por tanto recorridos más cortos de las partículas, en consecuencia, tiempos de viaje más largos. Sin embargo, tanto para el Perfil A (S1 y S2) como el Perfil B (S1 y S2), no se observa una diferencia significativa en los tiempos de tránsito. Los niveles y las direcciones de flujo no varían.

Anisotropía (S3): Se varió el coeficiente de anisotropía (K_h/K_v) entre 2 y 10. En general, para ambos perfiles (A y B) se observa un aumento de los niveles piezométricos en los cerros, para el Perfil A este aumento es más significativo, e.g. en los cerros orientales el nivel varió de 2567 a 2578 m.s.n.m, escenarios S1 y S3 respectivamente. Debido a la restricción del flujo vertical, se generan mayores niveles piezométricos en estas zonas. Una anisotropía de 2 favorece el flujo vertical desde los depósitos consolidados hacia el depósito cuaternario. Los tiempos de tránsito no aumentan considerablemente, pero si se observa menores distancias de recorrido para valores de anisotropía de 10.

Conductividad Hidráulica (S4): La variación de la conductividad hidráulica genera a su vez una variación en los niveles piezométricos, sin embargo, el efecto más importante se evidencia en los tiempos de viaje, evidentemente las partículas viajan más rápido a través de los depósitos más permeables. Así, por ejemplo, se observa en el Perfil B escenario S4, que las partículas ascienden desde el grupo Guadalupe hasta el depósito cuaternario al cabo de 1000 años. Al oriente, en este mismo perfil, se generan flujos hacia el occidente, con importantes trayectos verticales.

Recarga (S5y S6): El aumento o disminución de la recarga incide principalmente en los tiempos de viaje de las partículas, una recarga más alta se traduce en un aumento del caudal y por tanto la velocidad. La variación de los niveles piezométricos ante diferentes escenarios de recarga es mínima para altas conductividades hidráulicas (S4 y S5), para los escenarios con menor conductividad hidráulica, se da una mayor variación de los niveles piezométricos.

Para realizar un análisis de los tiempos de tránsito, se simuló un escenario de cada perfil a diferentes tiempos, 500, 1000, y 5000 años. En las Figura 4-15 y

Figura 4-16, se observan las posiciones y trayectorias de las partículas para los tres periodos de tiempo simulados. En el tiempo de simulación de 500 años, ya se diferencian dos comportamientos en las trayectorias de las partículas, que indican dos tiempos de tránsito. El primero, un tiempo de tránsito corto, con descarga en el depósito cuaternario cercano a las zonas de pendiente. El segundo, tiempos de tránsito más largos, de partículas ubicadas en las zonas más distales al occidente y oriente, que siguen su trayectoria por la F. Labor Tierna.

Para 1.000 años, ya se observan flujos ascendentes en el perfil A y B. Para el perfil A, las partículas viajan más rápido en el sentido W-Centro del perfil, por lo que las partículas llegan primero a la Falla R. Bojacá, además que la anisotropía asignada en los cerros orientales, genera tiempos de viaje mayores para la zona oriental. Caso contrario al Perfil B, donde los flujos tienen preferencia E-W, dado que se genera un mayor gradiente en esta dirección.

En 5.000 años, ya se diferencia con claridad los flujos locales, cercanos a las zonas de pendiente; flujos regionales, provenientes de los cerros occidentales y orientales y, flujos intermedios, que ascienden a través de las brechas de falla.

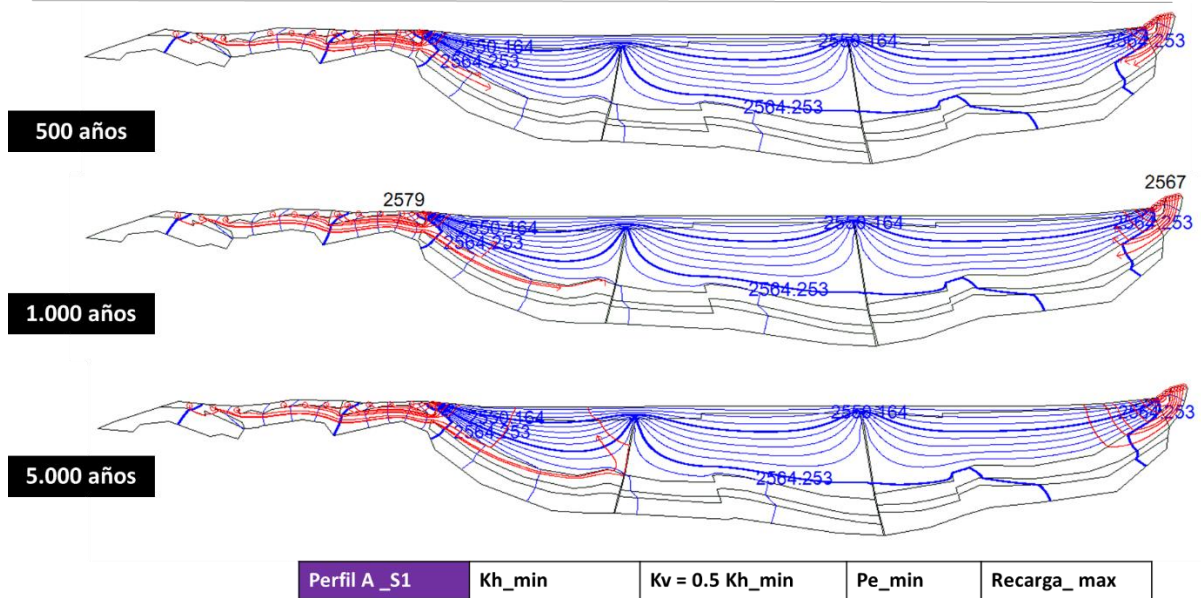


Figura 4-15 Variación de tiempos de tránsito Perfil A. Escenario S1

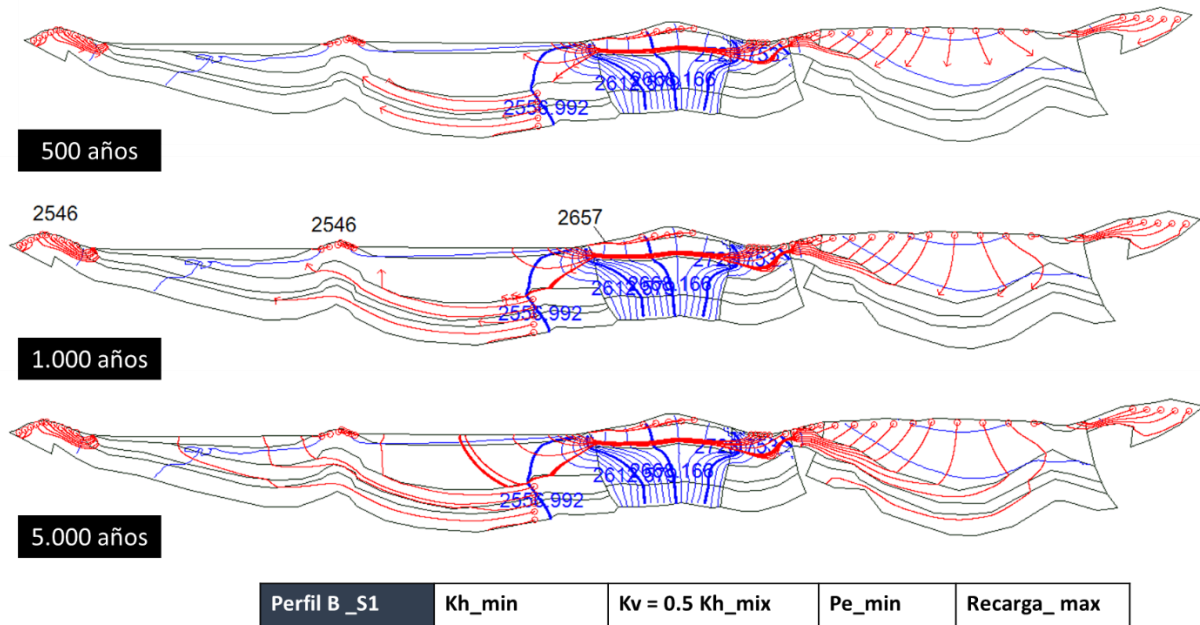


Figura 4-16 Variación de tiempos de tránsito Perfil A. Escenario S1

4.2.7 *Análisis de resultados del modelo analítico regional*

Los resultados del modelo analítico regional representan el insumo fundamental para la definición del dominio del modelo y de las condiciones de frontera.

En lo relacionado a las zonas de recarga, la modelación evidencia que la zona de recarga se extiende más allá de los límites del distrito tanto al oriente como al occidente, por lo que se debe analizar todo contexto regional de tal manera que podamos garantizar las condiciones de frontera del modelo local. En particular, al sur de ciudad (Perfil A) la zona de recarga se extiende en el oriente hasta los cerros de Monserrate, hasta el afloramiento de la formación Chipaque, al occidente hasta la Falla Santa Bárbara. Al norte de la ciudad, la zona de recarga en el oriente se extiende hasta los cerros de Siecha, y al occidente hasta los cerros de Suba, flanco este.

Por otra parte, a partir del análisis de todos los escenarios analizados se distinguen las siguientes zonas de descarga: i) para el perfil A y B en todas las zonas de piedemonte, el flujo que descarga en cada zona, depende directamente de la recarga a los cerros próximos ii) para el perfil A, se da una descarga hacia el cuaternario en el contacto con las fallas transversales, en particular se tienen mayores flujos en la Falla R. Bojacá. iii) en el perfil B, se descarga en los depósitos cuaternarios del distrito, al oriente y occidente de los cerros de Suba, los flujos provienen de los cerros orientales (Siecha) con largos recorridos.

Si bien la esquematización del modelo analítico se realizó como una cuenca hidrológicamente cerrada, es decir, no se definió ninguna condición de frontera que asumiera una salida de flujo, el modelo muestra que existen zonas de descarga, principalmente en el piedemonte como flujo que descarga en el contacto con los depósitos cuaternarios.

Otra zona de descarga mostrada en el modelo analítico, Perfil B, se da en los cerros orientales (Torca) y cerros occidentales (Cota), en los depósitos consolidados, lo cual se evidencia en los mapas del Ingeominas (1991), con manantiales reportados a estas alturas.

La simulación también nos permitió mostrar que se pueden tener flujos de agua con tiempos de tránsito que van desde cientos de años a miles de años. Es evidente que la recarga en los cerros, favorece la recarga de los depósitos de pendiente, principalmente en la zona oriental del Distrito. Se tienen entonces flujos regionales, intermedios y locales, con una distribución diferente al sur y al norte de la ciudad.

Para todos los perfiles se observan flujos verticales, provenientes de la recarga en los cerros, que viajan a través de los depósitos consolidados, en especial el Grupo Guadalupe y ascienden hasta el cuaternario. Estos flujos verticales se evidencian principalmente en el Perfil A, a través de las fallas transversales

Los parámetros más sensibles son la conductividad hidráulica y las condiciones de recarga en la zona de los cerros, estas variables tienen importante influencia en los tiempos de tránsito de las partículas e influyen en los niveles piezométricos sobre los cerros. La conductividad hidráulica es uno de los parámetros sobre los cuales se tiene una mayor incertidumbre, ya que los valores disponibles para las formaciones han sido tomados a partir de datos puntuales, o bien en las pruebas hidráulicas realizadas se capta agua de diferentes formaciones.

4.3 Modelación en Elementos Analíticos (AEM) 3-D

La modelación analítica 3D tiene por objetivo contribuir a la construcción del modelo hidrogeológico conceptual del Distrito Capital. De la misma manera que para la modelación 2D, se aborda la modelación 3D desde una mirada regional, en la cual se considera toda la extensión de los depósitos Neógenos-cuaternarios. Como se evidenció en el modelo geológico, la formación sabana, la cual se encuentra en toda la extensión de los depósitos Neógenos-Cuaternarios, presenta intercalaciones de lentes de arena con importante conectividad horizontal; así mismo, la formación Tilatá y Subachoque se extienden más allá del límite del Distrito Capital. De tal forma que los flujos subterráneos del Distrito responden a las dinámicas presentes en toda la cuenca hidrogeológica de los depósitos neógenos-cuaternarios de la Sabana.

En este capítulo se presenta la modelación analítica 3D en estado estacionario, aunque la modelación se realiza para toda la cuenca hidrogeológica de los depósitos neógenos-cuaternarios de la Sabana, se hace especial énfasis en los resultados esperados para el Distrito Capital, por ser el objeto del presente trabajo.

Es importante resaltar que el objetivo principal de la modelación analítica en el estado estacionario en la construcción del modelo conceptual, es el entender el funcionamiento general del sistema a partir de explorar las entradas y salidas en una condición de pre-bombeo, la cual se ha definido antes del año 1951.

4.3.1 Geometría y Dominios

El límite del modelo fue definido por el límite de los depósitos Neógenos-Cuaternarios, con excepción de los sinclinales de Suesca y Checua, ubicados en la zona Nor-Oriental, como se explicará más adelante en las condiciones de frontera (Nivel fijo).

Para la representación de la profundidad de los depósitos, se crearon dominios concéntricos de acuerdo con el espesor de los depósitos presentado en el modelo geológico, el cual se esquematiza en la Figura 4-17. Cada uno de los dominios es dividido en el número de capas o formaciones presentes (Conos, Formación Subachoque, Formación Tunjuelo, Formación Subachoque, Formación Tilatá o Formación Guaduas).

En la Figura 4-17 se presenta de forma esquemática el corte del modelo analítico en el sentido W-E, a partir de esta figura se determinan los nombres de los dominios, por ejemplo, el anillo de 450m occidental de profundidad tiene tres dominios, el primero corresponde a la Formación Sabana (Q450W_Q1sa), el segundo a la Formación Subachoque (Q450W_Q1su), y el tercero a la Formación Tilatá (Q450W_N2t).

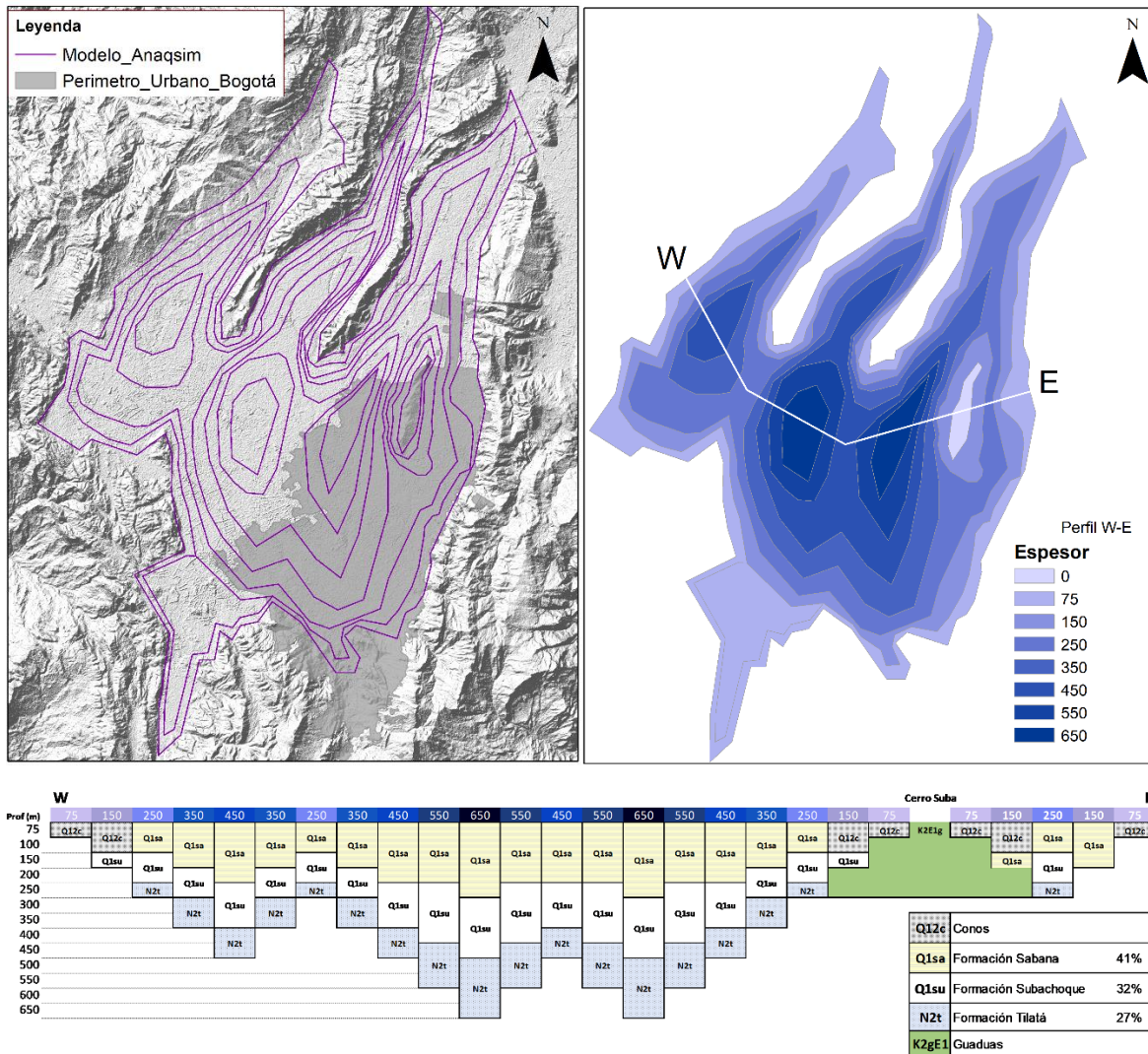


Figura 4-17 Esquema de la geometría del modelo analítico 3D

4.3.2 Parámetros de los dominios

Los parámetros de conductividad fueron asignados de acuerdo con los valores reportados en el Mapa hidrogeológico sector Tibitó –Salto de Tequendama (Ingeominas-CAR, 1991), en el Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá (Ingeominas, 2002) y, en la base de datos recopilada en el desarrollo del presente proyecto.

Tabla 4-10. Parámetros del modelo estado estacionario

Formación	K_horizontal (m/d)	Kh/Kv
Sabana	0.08	10
Subachoque	0.4	10
Tilatá	3	10
Conos	1	10
Tunjuelo	2	10

Guaduas	0.002	10
---------	-------	----

4.3.3 Estado Estacionario pre 1951

La modelación en estado estacionario es aquella condición en la cual el sistema está en equilibrio, es decir las entradas y salidas de agua del sistema son iguales, por lo cual los niveles piezométricos no varían y no se generan almacenamientos.

Se consideró que la condición estacionaria debía corresponder a una época pre-urbanización de la ciudad de Bogotá, en la cual la extracción no fuese significativa, pero considerando la existencia de aljibes como práctica habitual de una población en expansión y en la cual, la cobertura de acueducto no estaría cubierta en su totalidad.

En un estudio de crecimiento urbano de la Ciudad de Bogotá (Rojas 2017), se evidencia como el crecimiento urbanístico de la ciudad inició en el año de 1951, a partir del cual la tasa de urbanización incrementa considerablemente (ver Figura 4-18) . Por otra parte, en la Figura 4-19 se observa que para el año 1960 no se tenía aún una expansión de la sabana de Bogotá, representada como los asentamientos urbanos en la sabana. Este análisis permite concluir que el periodo pre-bombeo debe ser definido antes de 1951. Esta consideración es importante para la simulación futura del modelo en estado transitorio.

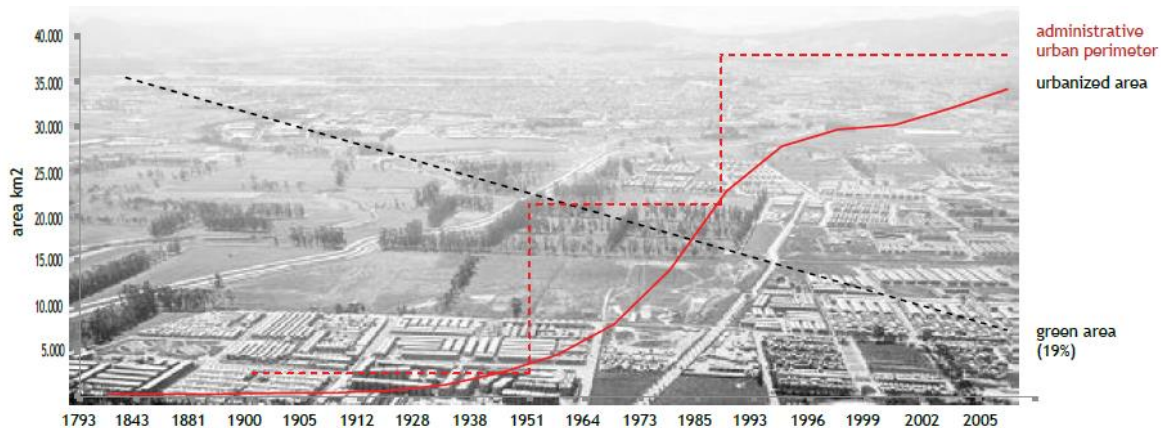


Figura 4-18. Crecimiento Urbano en la Ciudad de Bogotá.

Tomado de *Settling with waters. A landscape urbanism investigation in the Sabana Bogotá*. Claudia Lucia Rojas Bernal. 2017.

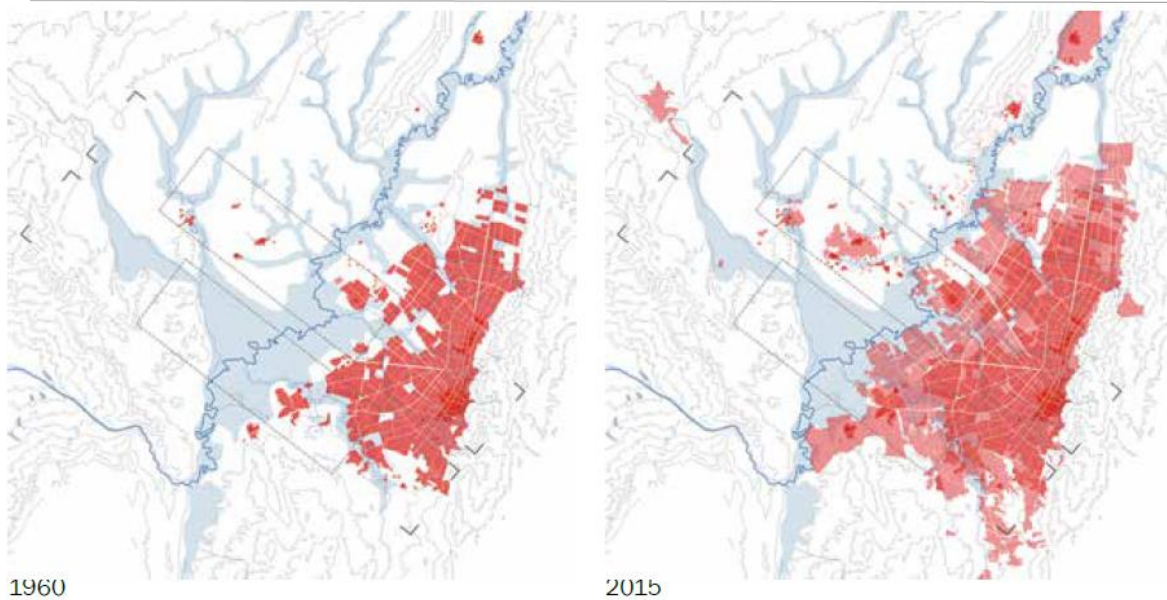


Figura 4-19. Expansión histórica en la sabana de Bogotá.

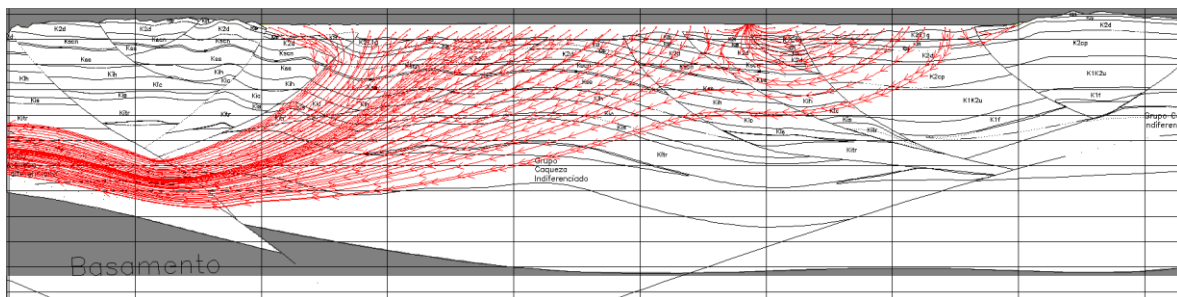
Tomado de Settling with waters. A landscape urbanism investigation in the Sabana Bogotá. Claudia Lucia Rojas Bernal. 2017.

4.3.4 Modelación suprarregional

Se realizó un modelo simple a nivel suprarregional para simular el modelo de flujo regional propuesto por Tóth (1999). Este modelo indica que en un sistema pueden existir flujos regionales, intermedios y locales, en este caso, se entienden flujos regionales como aquellos que puede salir de la cuenca hidrogeológica hacia otra cuenca.

La geometría del modelo y la discretización de las formaciones se realizó a partir del perfil suprarregional geológico, presentado en el capítulo de la descripción geológica del área de estudio. Se hizo la modelación como un medio homogéneo dada las altas diferencias en las conductividades hidráulicas entre las diferentes formaciones. Se asignó una conductividad promedio de 0.012 m/d.

Este ejercicio no sigue la rigurosidad de una modelación, tiene únicamente el objetivo de generar hipótesis sobre la salida de flujos de la cuenca hidrogeológica de la sabana de Bogotá hacia la cuenca del Río Magdalena. La modelación indica que estos flujos descargan en varios de los Ríos se encuentran en dirección al Río Magdalena.



4.3.5 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera y de recarga fueron asignadas de acuerdo con los resultados de la modelación hidrológica y modelación analítica 2D. A continuación, se describen cada una de las condiciones impuestas en el modelo.

Nivel fijo: Se impuso una frontera de nivel fijo en el perímetro noreste del modelo, este nivel indica la recarga proveniente de los depósitos neógenos cuaternarios que se encuentran en el sinclinal de Checua y de Suesca y que no fueron incluidos como límite del modelo. Esta condición se esquematiza en las Figura 4-20 y Figura 4-21.

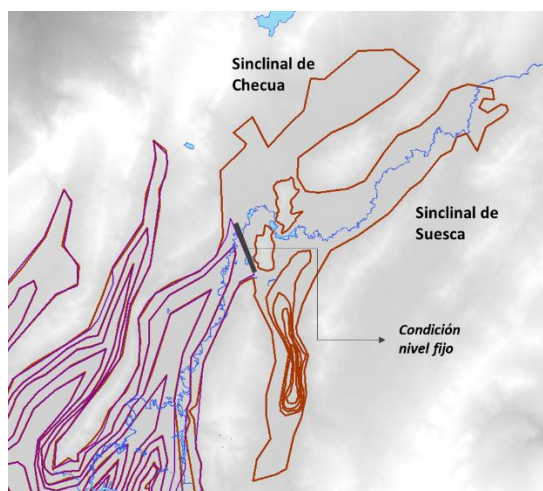


Figura 4-20 Condición de frontera nivel fijo

Flujo: Se asignaron condiciones de flujo a lo largo de todo el límite del modelo para representar la recarga proveniente de los cerros orientales y occidentales (Figura 4-21), con excepción del segmento de condición de frontera de nivel fijo ya mencionada. Los valores asignados fueron obtenidos de la modelación analítica 2D, con la estimación de los flux (L^2/T) que descargan en el contacto de los depósitos consolidados con los depósitos Neógeno-cuaternarios, es decir en el piedemonte (ver capítulo de modelación analítica 2D). En el límite sur-occidental del modelo se asignó una condición de salida de flujo, para simular la salida de agua de la cuenca en el sentido del flujo del Río Bogotá, considerando que a la altura del Salto de Tequendama se presenta una configuración tectónica asociada al Sistema de Fallas de Facatativá.

Recarga: La condición de recarga fue subdividida en 3 grupos de polígonos, el primero para asignar la recarga de la zona rural caracterizada por una baja urbanización. El segundo, para asignar la recarga urbana, abarca todo el Distrito Capital y considera un estado de urbanización que afecta la infiltración en el subsuelo, y el tercero los polígonos que representan las salidas del modelo hacia la cuenca del Río Magdalena (ver Figura 4-21).

Ríos: En la modelación se incluyeron los principales ríos de la Sabana: Río Subachoque, Río Bogotá, Río Chicó, Río Juan Amarillo, Río Socha, Río Frío y Río Fucha. Se ingresaron al modelo como condición de río, la cual requiere asignar el valor de la conductancia para cada río. Adicionalmente se permite la entrada de agua desde el acuífero y la salida de agua hacia el acuífero.

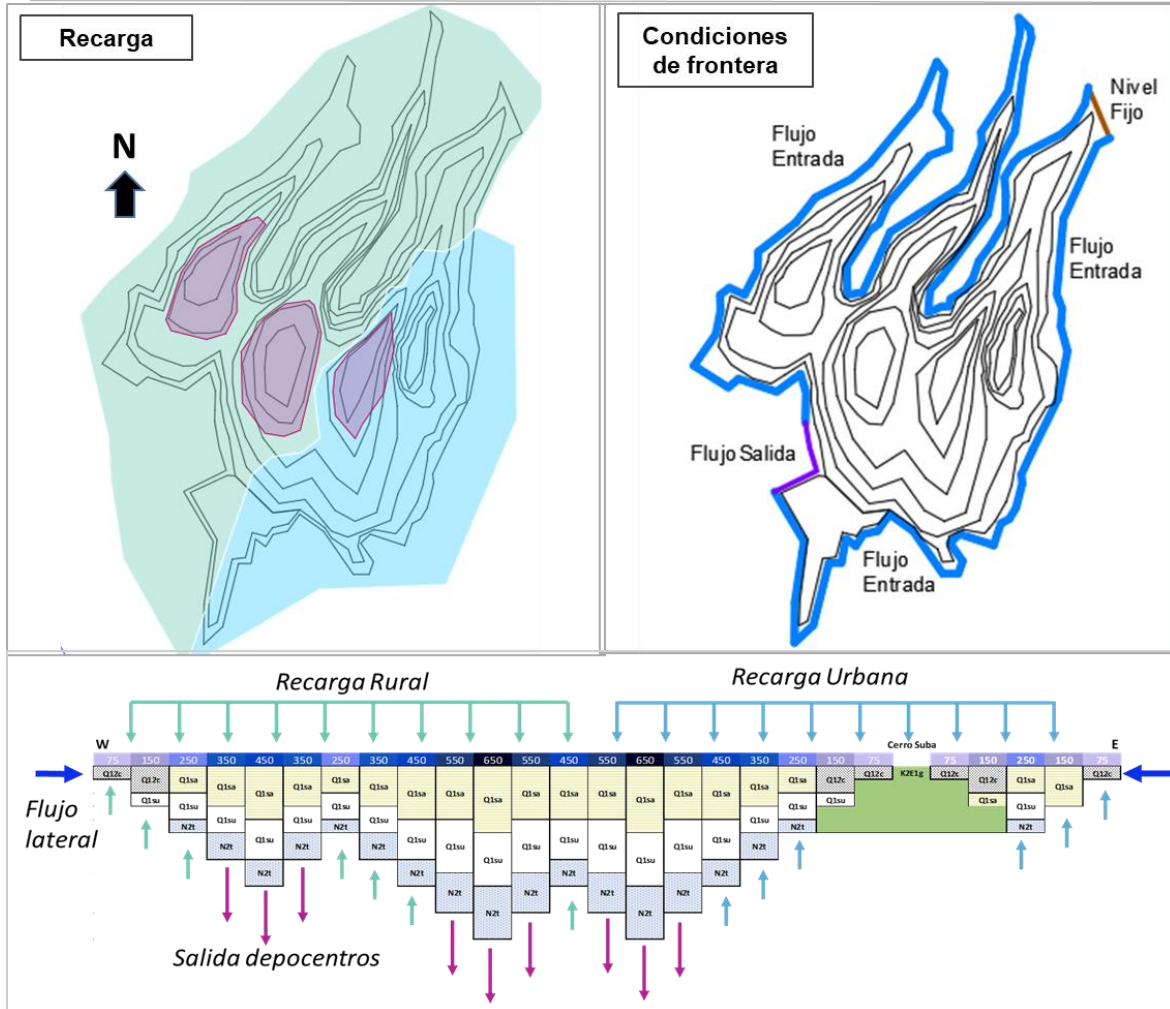


Figura 4-21. Esquema de las condiciones de recarga y condiciones de frontera

Pozos: En el periodo de 1951, establecido como año de pre-bombeo, se ingresaron al modelo las extracciones de los aljibes reportados en la base de datos hasta la fecha (2018), bajo el supuesto que en 1951 se debieron realizar un gran número de extracciones en aljibes pero que no fueron registrados. En total se ingresaron 205 puntos de agua, con un total de extracción de 11.454 m³/d, de los cuales 188 se ubican en la Sabana y 17 en el Distrito Capital.

4.3.6 Resultados

Niveles piezométricos

Se realizó una comparación de los niveles piezométricos simulados con los niveles esperados (Figura 4-22). Como niveles esperados, se asumió que para la época pre-bombeo el nivel piezométrico del primer nivel (formación conos y sabana) se encontraba 5m debajo del nivel del terreno, esto no indica que sea el nivel subsuperficial del que se habla a lo largo de este estudio. La comparación de los niveles arroja un error medio cuadrático de 6.13, si bien no es el óptimo, se considera aceptable para los objetivos del estudio.

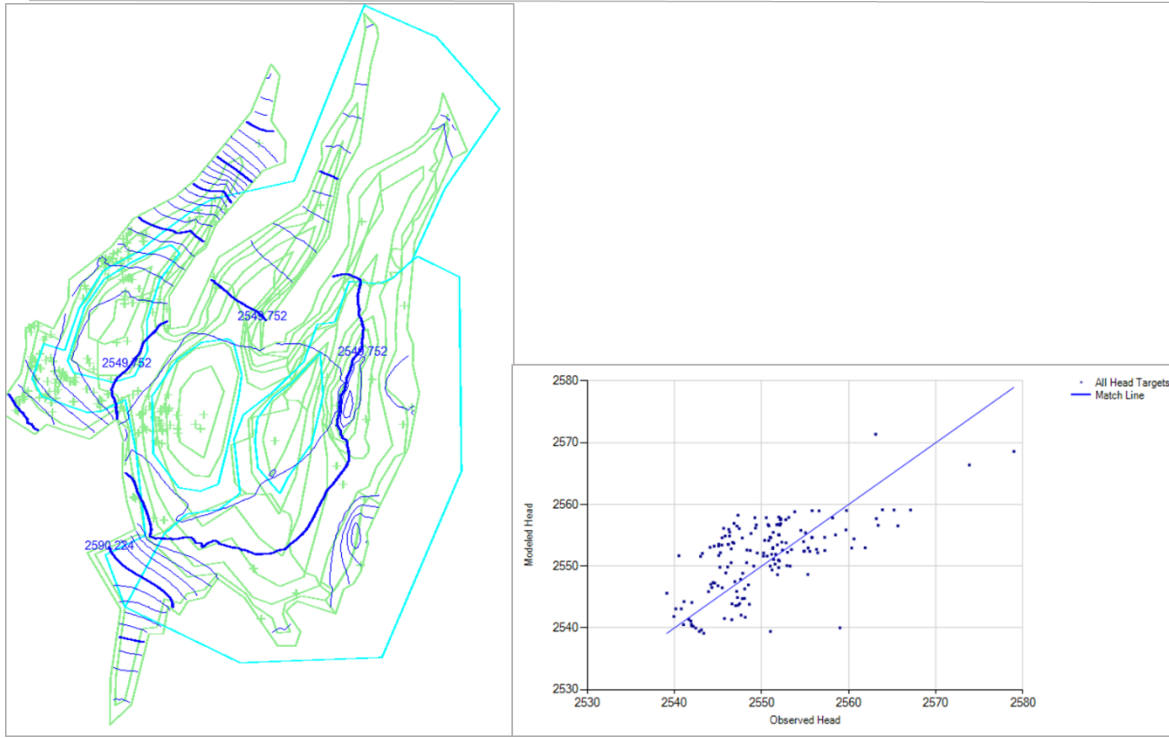


Figura 4-22. Resultado niveles piezométricos estado estacionario.

4.3.7 Conclusiones

A pesar de no estar incluida en el alcance del presente convenio, se realizó una modelación analítica preliminar 3D (en elementos analíticos o AEM) en estado estacionario por medio de la herramienta AnAqSim. El modelo 3D fue útil para explorar: (i) si el sistema Neógeno-Cuaternario del Distrito Capital está conectado hidráulicamente con el resto de la sabana, según indicaciones previas del modelo geológico 3D, (ii) si, previo al desarrollo del bombeo (estado estacionario), el sistema Neógeno-Cuaternario podía recibir recarga natural, (iii) potenciales salidas del sistemas hacia otros sectores del valle superior de la cuenca del Río Magdalena, notablemente sectores ubicados a elevaciones topográficas más bajas, en dirección del Río Magdalena.

El modelo 3D sugiere que:

- El sistema estacionario era compatible con una recarga directa baja, del orden de 20-30mm en promedio, a lo largo de toda la sabana.
- El sistema tiene entradas laterales y por debajo debido a los aportes de agua de las zonas de los cerros y de los piedemontes.
- Sin embargo, hacia las partes más profundas del relleno Neógeno-Cuaternario, es posible que el sistema pierda agua hacia sectores del valle superior de la cuenca del Río Magdalena ubicados a cotas más bajas o a través de zonas de fallas.
- Si no se incluyen entradas y salidas al sistema, de acuerdo con lo inferido anteriormente, no es posible generar una superficie piezométrica que refleje el comportamiento esperado en la región, y que refleje un equilibrio hidrodinámico antes del bombeo intensivo de aguas subterráneas.

El modelo analítico 3D se ha mantenido simple para explorar mejor las hipótesis alrededor del funcionamiento del sistema. En este sentido, esta herramienta tiene que interpretarse solo como un apoyo a la modelación conceptual y no puede ser utilizada para realizar predicciones del sistema antes presiones futuras. Para construir una herramienta de gestión es necesario escalar la modelación realizada.

4.4 Actualización del Modelo Geológico 3-D

El presente capítulo es un breve resumen de la geología de la ciudad de Bogotá, con principal enfoque en los sedimentos no consolidados sobre los que está construida. La estructura y terminología usada en este capítulo están planteadas para que sean de fácil entendimiento a la mayor parte de la comunidad involucrada con la administración y gestión del agua subterránea en el distrito.

En este trabajo se realizó un modelo geológico 3D con la herramienta RockWorks v17. El objetivo de este modelo es encontrar una representación espacial de las formaciones principales que representan la cuenca intramontana. Este modelo se encuentra guiado en superficie por la cartografía geológica propuesta por (SDA, 2013) a escala 1:25000. La disposición y continuidad de las diferentes unidades en profundidad se encuentran orientadas por la evolución geológica de la cuenca y columna estratigráfica esquemática propuesta por (Thomas van der Hammen & Hooghiemstra, 1997) y (K. Helmens, 1990), así mismo, por la interpretación litológica de los registros litológicos recopilados para este trabajo. Sin embargo, temas de principal debate en la actualidad como conceptos relacionados a la extensión, continuidad y espesores de formaciones de principal interés hidrogeológico como la Formación Tilatá, autores como (A. S. Lobo-Guerrero, 1996), (Álvarez, 1998) y (Torres et al., 2005) fueron de gran importancia para determinar estos temas en el modelo.

El modelo corresponde inicialmente al cubo delimitado por las coordenadas Xmin: 979650, Ymin: 986927, Xmax: 1009713, Ymax: 1027899 Datum MAGNA Colombia Bogotá. Este presenta un área en superficie de 1247,8 Km², con definición de grilla de 250m en el eje X, 250m en el eje Y y 5m en el eje Z; para un área por celda de 62500m² (Figura 4-23).



Figura 4-23. Definición de la grilla del modelo geológico 3D

Este modelo fue construido a partir de perforaciones seleccionadas previamente, filtradas por contenido de información del subsuelo detallada y confiable, todas estas tomadas de los antecedentes (CAR, SDA, UNAL, METRO DE BOGOTÁ). Se integró un total de 152 perforaciones con rangos de profundidades que van desde 32m hasta 615m. La distribución de las profundidades investigadas se observa en la Figura 4-24.

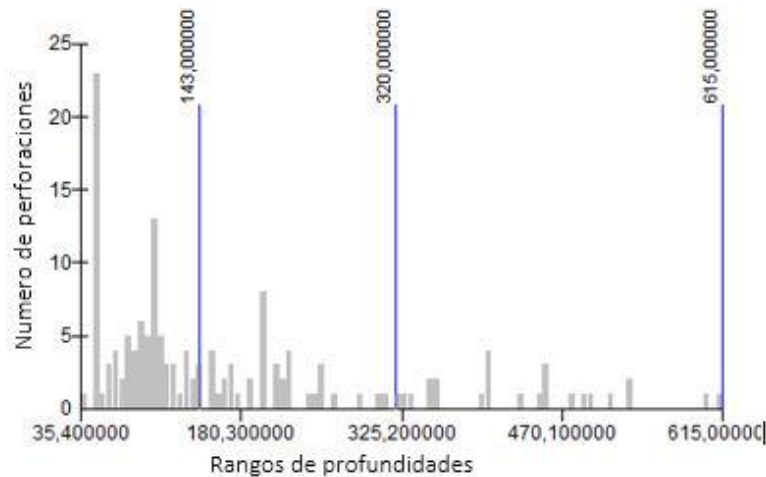


Figura 4-24. Detalle de los rangos de profundidad con más información respecto al número de perforaciones

Estas perforaciones se encuentran distribuidas en superficie como se muestran en la Figura 4-25

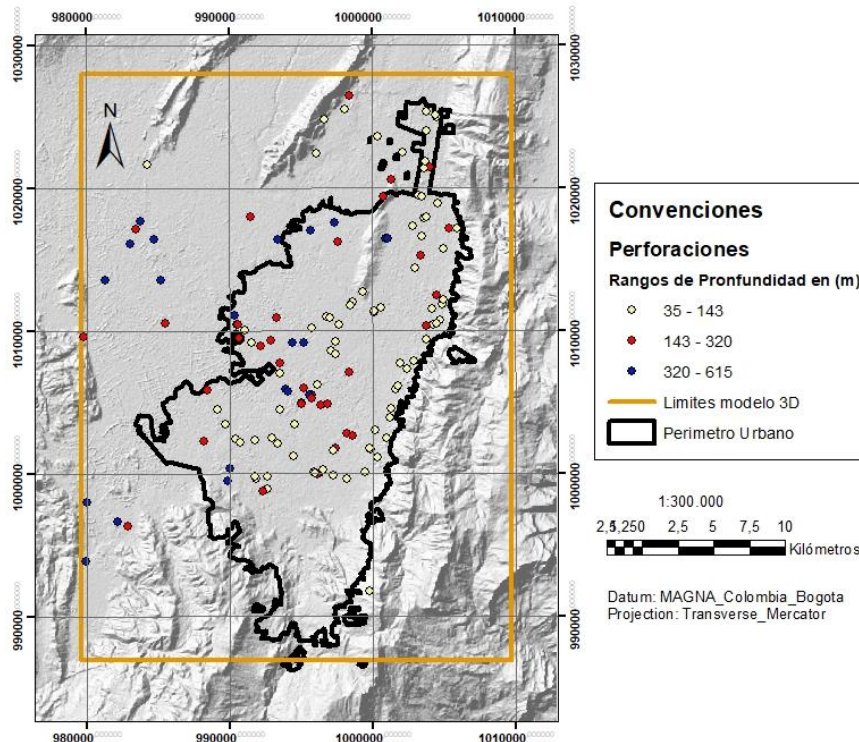


Figura 4-25. Distribución en superficie de las perforaciones.

Estas perforaciones fueron usadas para la construcción del modelo 3D

La elaboración de este modelo parte de la recopilación de registros litológicos, mapas geológicos, geofísica, topografía y niveles freáticos, brindados por las diferentes entidades, los cuales fueron analizados en función de obtener calidad de datos para definir los materiales que conforman estos sedimentos, a continuación, se presenta un diagrama el cual resume este proceso de modelado y los resultados que aporta el mismo.

Es muy importante tener presente que este modelo fue realizado tratando de representar los diferentes conceptos geológicos que han descrito los autores mencionados como antecedentes en este diagrama. Sin embargo, cabe resaltar que a pesar de ser una aproximación puede llegar a tener mucho éxito a la hora de predecir una secuencia litológica o estratigráfica en determinado punto, convirtiéndolo en una herramienta muy útil para la gestión del recurso hídrico subterráneo, afinándola con la inserción continua de perforaciones ya que esta es la fuente fundamental del modelo.

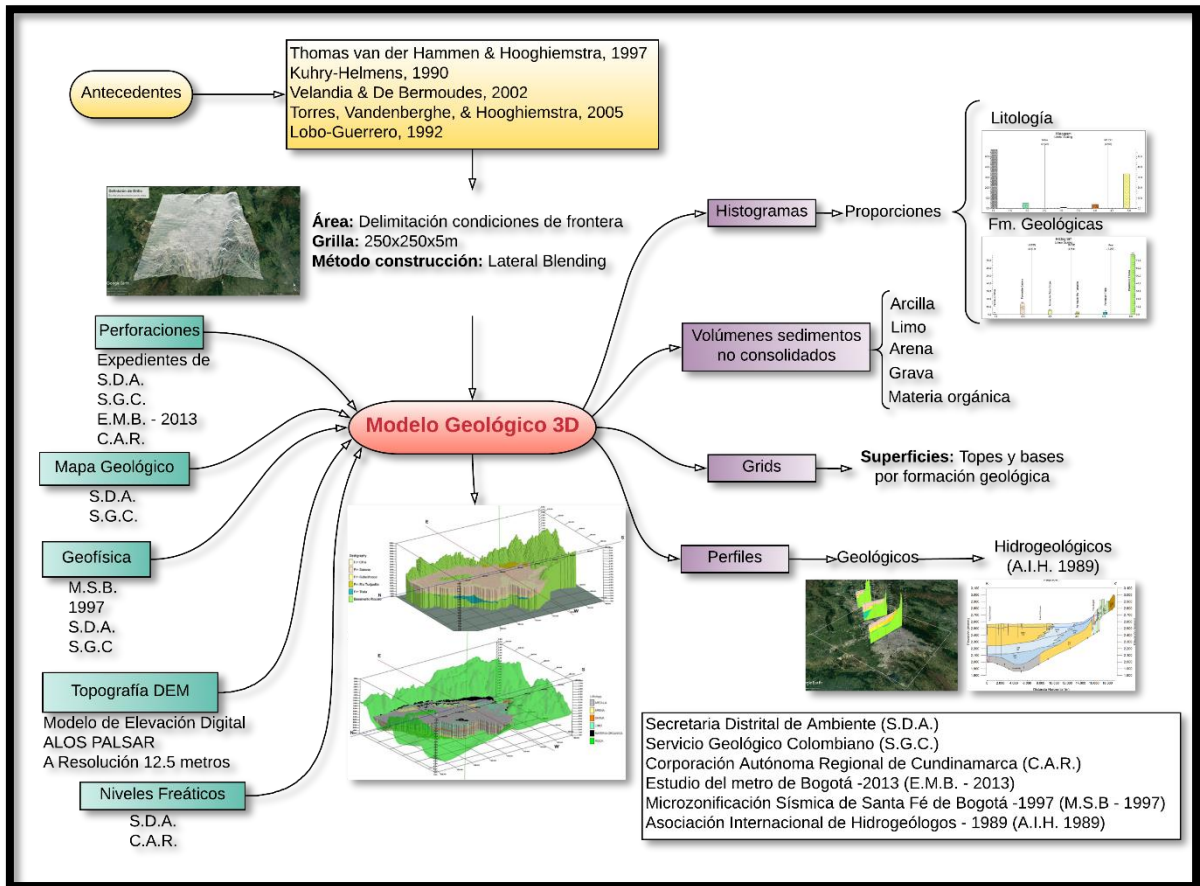


Figura 4-26. Diagrama de proceso de construcción del modelo geológico 3D

Los registros litológicos de las perforaciones fueron simplificados en términos de 6 unidades litológicas principales, cada una con un valor numérico (G-Value) el cual fue usado para la correlación de las unidades lateralmente por medio de unos de los algoritmos que integra el software de modelado. Figura 4-27

G-Value	Keyword	Pattern
1,0	ARCILLA	[Pattern]
5,0	ARENA	[Pattern]
4,0	GRAVA	[Pattern]
2,0	LIMO	[Pattern]
3,0	MATERIA ORGÁNICA	[Pattern]
6,0	ROCA	[Pattern]

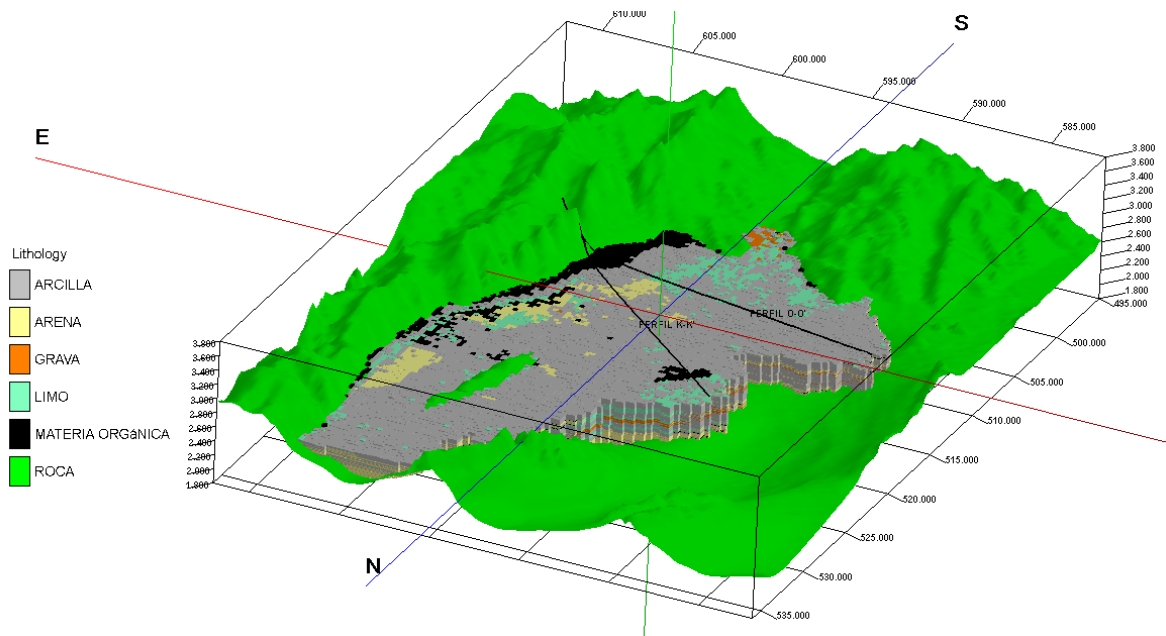
Figura 4-27. Leyenda litológica

Este algoritmo denominado (Lateral Blending); es usado para correlacionar litologías a través de perforaciones. Las ventajas de este método es que reproduce correlaciones transgresivas y regresivas

similares a lo que un geólogo dibujaría a mano con relación a los ambientes geológicos de depositación conocidos para estos sedimentos, también para obtener resultados semejantes a los producidos por las fluctuaciones del nivel del antiguo lago.

Posteriormente a la correlación, este modelo es filtrado por encima con la superficie topográfica y por debajo con la superficie de basamento rocoso, esta última superficie, es producto de la interpretación de la geofísica recopilada en estudios anteriores como (INGEOMINAS, 1997), (SDA, 2013) y (INGEOMINAS, 2002) complementandola con las perforaciones recopiladas recientes que reportan el contacto con roca, todo esto contribuyo al trazado de curvas interpretadas por parte del equipo y de esta manera tener un límite inferior, que pudiera limitar la correlación solo a los sedimentos no consolidados de la cuenca, es decir no involucrar roca.

Luego fue cortado verticalmente con el polígono que limita el modelo hidrogeológico del presente trabajo.



*Figura 4-28 Modelo litológico 3D para el área urbana del distrito capital.
Exagerado 7 veces en la vertical*

Como resultado de esta primera modelación se calculó la cantidad de cada tipo de material que posiblemente componen la cuenca como lo muestra la (Figura 4-29) en la que en el eje vertical se ubica un valor porcentual para cada tipo de material y en el eje horizontal el correspondiente valor numérico (G- Value) de cada unidad.

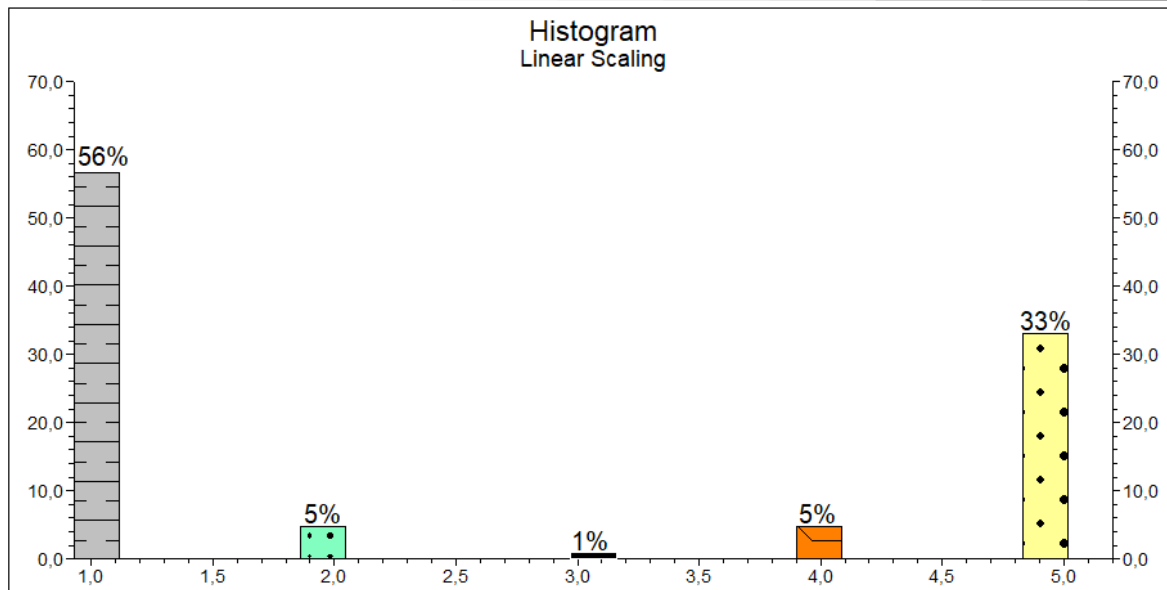
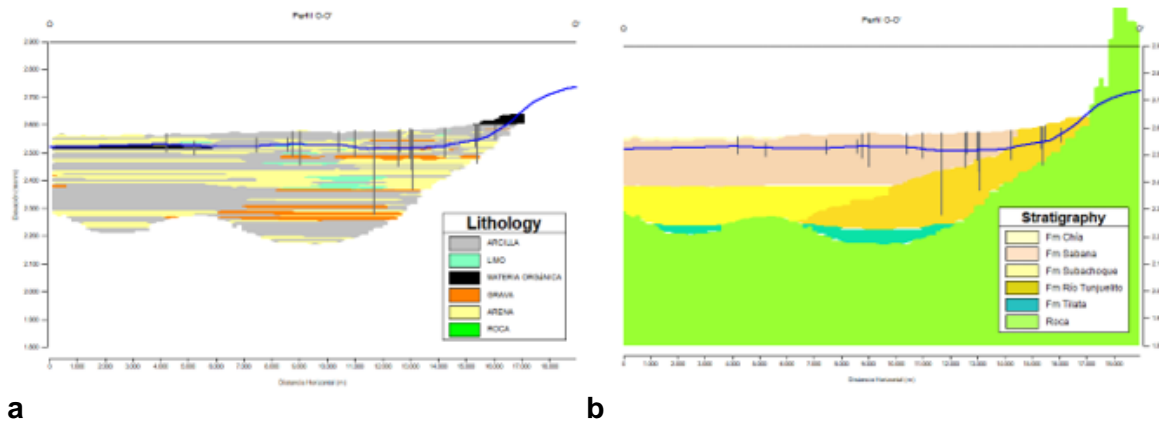


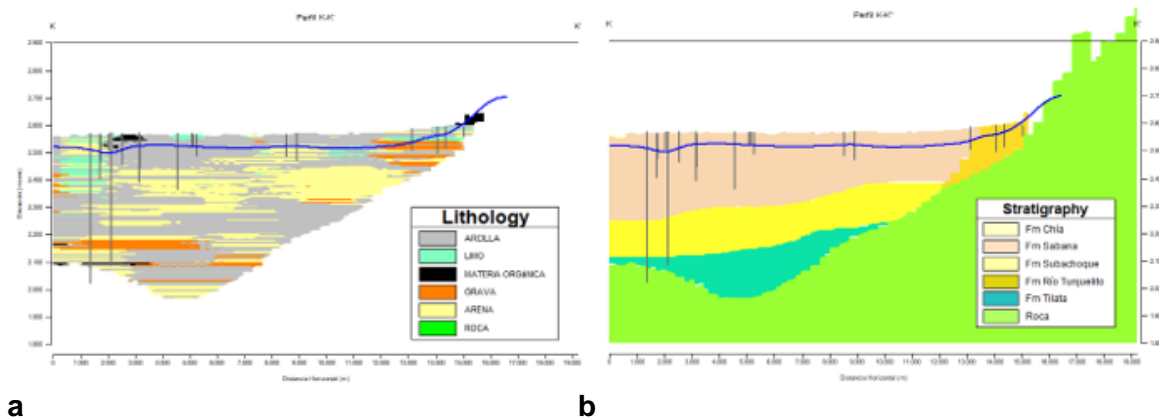
Figura 4-29. Histograma de distribución para cada uno de los diferentes materiales

Se puede entonces observar que considerando como 100% el total de sedimentos no consolidados del Neógeno-Cuaternario en el área de este trabajo, aproximadamente un 57% corresponde a Arcilla, 33% Arena, 5% Limo, 5% Grava y 1% Materia Orgánica (Turba). Sin embargo, estos resultados podrían variar ampliamente teniendo en cuenta los criterios de descripción litológica para cada una de las perforaciones con las cuales se construyó este modelo, de igual forma por el nivel de detalle que se tenga en cada perforación.

Una vez construido el modelo litológico se realizaron algunas secciones ver (Figura 4-30 y Figura 4-31) para tratar en identificar patrones de distribución de facies litológicas y/o ambientes que permitieran la construcción de las superficies de topes y bases para cada formación y de esta manera conformar el modelo estratigráfico soportado en las evoluciones propuestas por los antecedentes (ver Figura 4-32).



*Figura 4-30. Perfil O-O', exagerado 10 veces en la vertical
a) Corte litológico; b) Corte estratigráfico. Fuente: elaboración propia.*



*Figura 4-31. Perfil K-K', exagerado 10 veces en la vertical
a) Corte litológico; b) Corte estratigráfico. Fuente: elaboración propia.*

En estas secciones ejemplo, figuras anteriores, se muestra la relacion en la que se identificaron los topes y bases de las formaciones geológicas que conforman la cuenca, principalmente un analisis de distribucion litologico pero bastante fundamentado en los antecedentes por los autores quienes han definido espesores para cada una de estas. Es importante tener presente que la roca allí en verde no se encuentra diferenciada por formaciones, podriamos tener la presencia de formaciones terciarias y/o cretácicas, igualmente muy fallada y el relieve bajo esta cobertura posiblemente mas abrupto, quizas conformado por valles y crestas mas estrechos, para los perfiles hidrogeologicos esta roca se diferenció basados en (INGEOMINAS, 2002), con la intencion de asignarle una importancia hidrogeologica.

Estas unidades se encuentran guiadas por la geología en superficie y la evolución geológica propuesta por los autores mencionados e interpretacion del equipo tecnico que conforman este proyecto. De igual forma la construccion de la superficie de basamento rocoso que se encuentra justo debajo de los

sedimentos no consolidados, la cual cumple un papel muy importante ya que determina con una alta incertidumbre el espesor de dichos sedimentos en la cuenca.

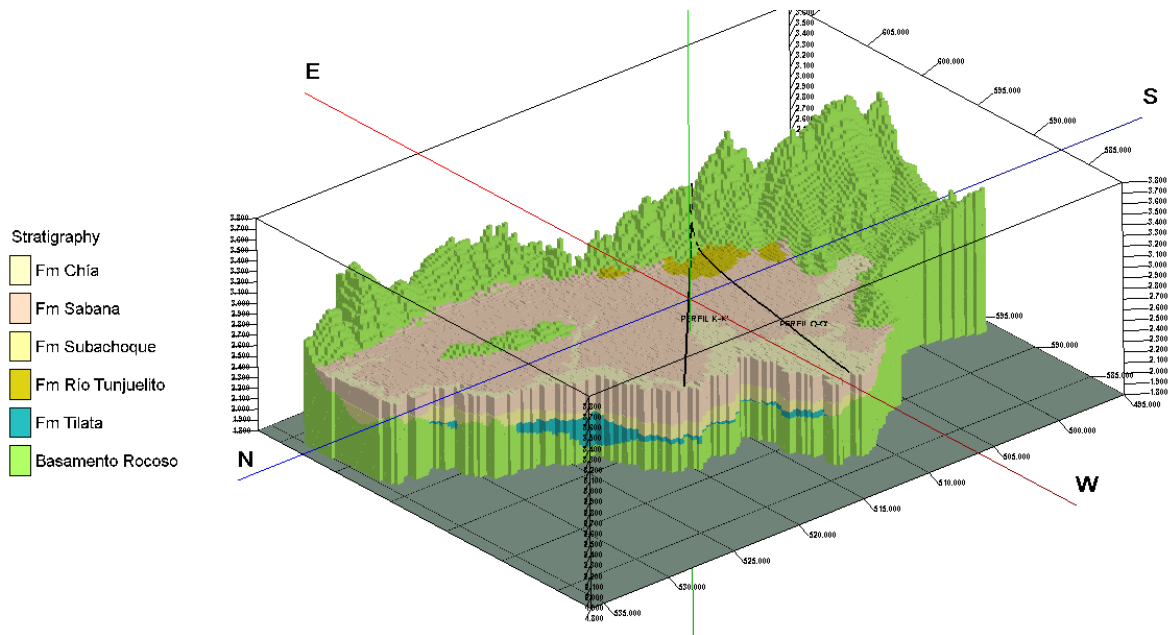


Figura 4-32. Modelo estratigráfico exagerado 7 veces en la vertical

Los colores presentados en la columna estratigráfica propuesta por Helmens & van der Hammen (1994) para estas formaciones no consolidados se mantienen en este modelo por permitir diferenciar de manera más clara entre formaciones cuaternarias, corresponde a los colores propuestos por la comisión internacional de estratigrafía (ICS). Así mismo aclaramos que la zona consolidada fue considerada para esta modelación en general como Roca (color verde) sin diferenciar, dado el objetivo principal de este trabajo.

Como resultado de este modelo estratigráfico se obtiene una distribución en proporción de las formaciones (ver Figura 4-33).

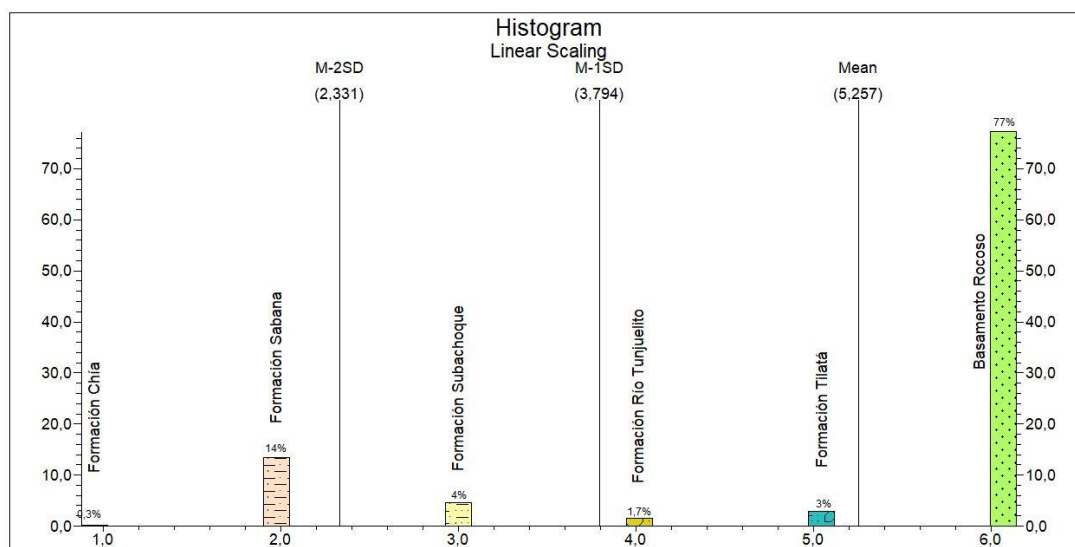


Figura 4-33. Histograma de proporción de las formaciones presentes en el área de estudio

La grafica anterior muestra que considerando como 100% el total del relleno sedimentario no consolidado, la Formación Sabana ocupa un 61%, la Formación Subachoque 17%, Formación Tilatá 13%, Formación Río Tunjuelito 8% y Formación Chía 1%. Sin embargo, algunas formaciones como los depósitos de pendientes que presentan importancia hidrogeológica no fueron incluidos en este modelo por su pequeña extensión lateral impidiendo ser modelado a esta definición de grilla.

Un resultado interesante, es el cálculo de espesores promedio para cada una de las formaciones el cual se obtuvo lo siguiente, para la Formación Sabana el espesor promedio en el distrito es de aproximadamente 176m, para la Formación Subachoque es de 95m, Formación Tunjuelo 92,7m y para la Formación Tilatá 103m.

Cálculo de volúmenes por formación y volúmenes de cada uno de los tipos de sedimentos considerados en este modelo, información de mucha relevancia para los análisis hidrogeológicos, ver la siguiente tabla.

Tabla 4-11. Calculo de volúmenes litológicos por formación geológica

Formación Geológica	Arcilla [km³]	Arena [km³]	Limo [km³]	Grava [km³]	Materia orgánica/Turba [km³]	Total [km³]
Formación Chía	0,818	0,009	0,021	N.A.	N.A.	0,849
Formación Sabana	38,1	18,9	3,1	1,9	0,73	62,82
Formación Subachoque	13,81	6,58	0,59	0,42	0,039	21,45

Formación Río Tunjuelo	3,228	1,629	1,035	1,268	0,175	7,337
Formación Tilatá	4,986	7,041	0,348	0,60	0,123	13,10

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede decir que la cuenca intramontana solo en el área límite del presente trabajo presenta un total estimado de 105,56km³ de material no consolidado, de los cuales 57,7% equivale a arcilla, 32,3% de arena, 4,82% de limo, 1,01% de Materia orgánica/Turba y 3,96% de grava.

4.4.1 Pozo Exploratorio PUJ-SDA en PMZF

Esta perforación (PUJ-SDA-PMZF) se llevó a cabo en el Parque Metropolitano Zona Franca localidad de Fontibón costado occidental del distrito, aledaño al Río Bogotá con una profundidad total de 700m como parte del convenio de asociación entre la Secretaria Distrital de Ambiente (SDA) y la Universidad Pontificia Javeriana (PUJ) con el objetivo de suplir de información esta zona y así afinar el modelo geológico en la Figura 4-34 se puede apreciar la columna litológica generalizada y su respectiva interpretación estratigráfica como resultado de esta exploración.

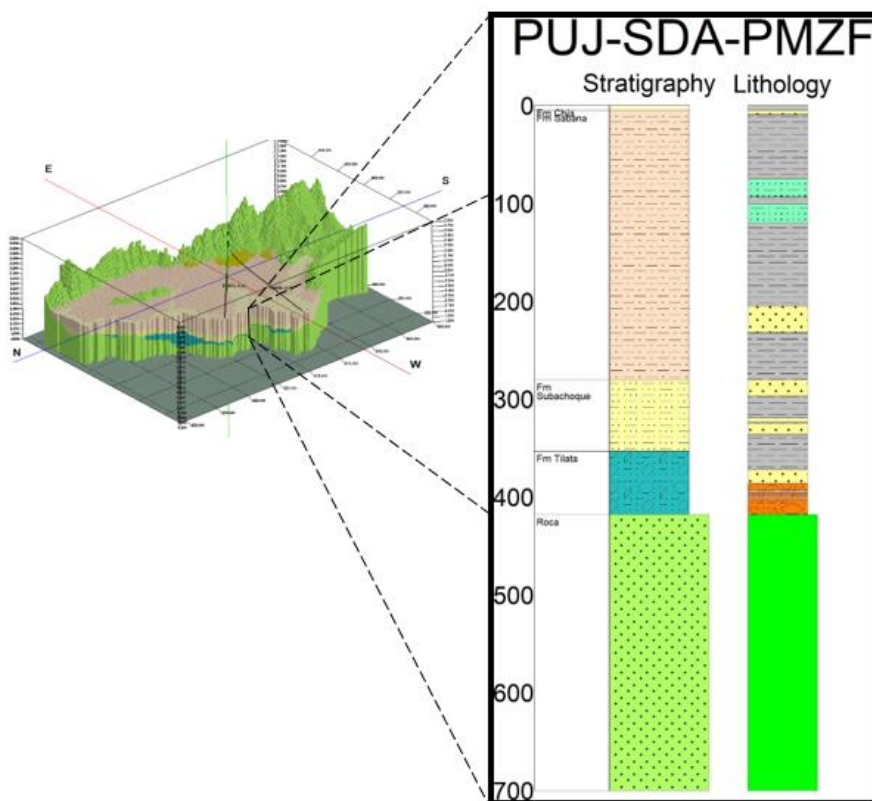


Figura 4-34. Columna litológica y estratigráfica pozo PUJ-SDA-PMZF

Previo a este registro litológico se desarrollaron 5 puntos de magnetotelúrica (Anexo B), buscando tener una idea de las formaciones existentes en el subsuelo del Parque Zona Franca.

Este registro litológico ilustra de manera muy simplificada los principales contrastes de materiales que se encontraron en esta perforación una primera capa de alrededor de 5m que corresponde a los materiales de inundación del Río Bogotá denominada Formación Chía, una siguiente unidad de 5 a 280m correspondiente a una sucesión de arcillas arenosas o limosas intercaladas capas de arcillas orgánicas o turbas con lentes arenosos que en ocasiones estos lentes podría alcanzar espesores de 2 a 7m. Por debajo de esta unidad se encontraron intercalaciones de arenas finas a muy finas con arcillas grises y múltiples niveles de materia orgánica el cual se relacionó con la Formación Subachoque. Por debajo de esta última antes del contacto con roca se encontró un nivel muy importante de arenas medias a gravas (gránulos <3mm) compuesto por material transportado perteneciente a fragmentos líticos subredondeados el cual se identificó como Formación Tilatá

Para encontrar más detalle de estos trabajos exploratorios, esta información se puede revisar en el informe 5 del presente convenio “resultados de exploración profunda” y sus respectivos anexos.

A continuación, se muestran algunos cortes geológicos superpuestos sobre la imagen de google earth, que enseñan parte de los resultados de la modelación 3D como la distribución en profundidad de estas unidades y el paleorelieve interpretado sobre el que reposan los sedimentos no consolidados (ver Figura 4-35).

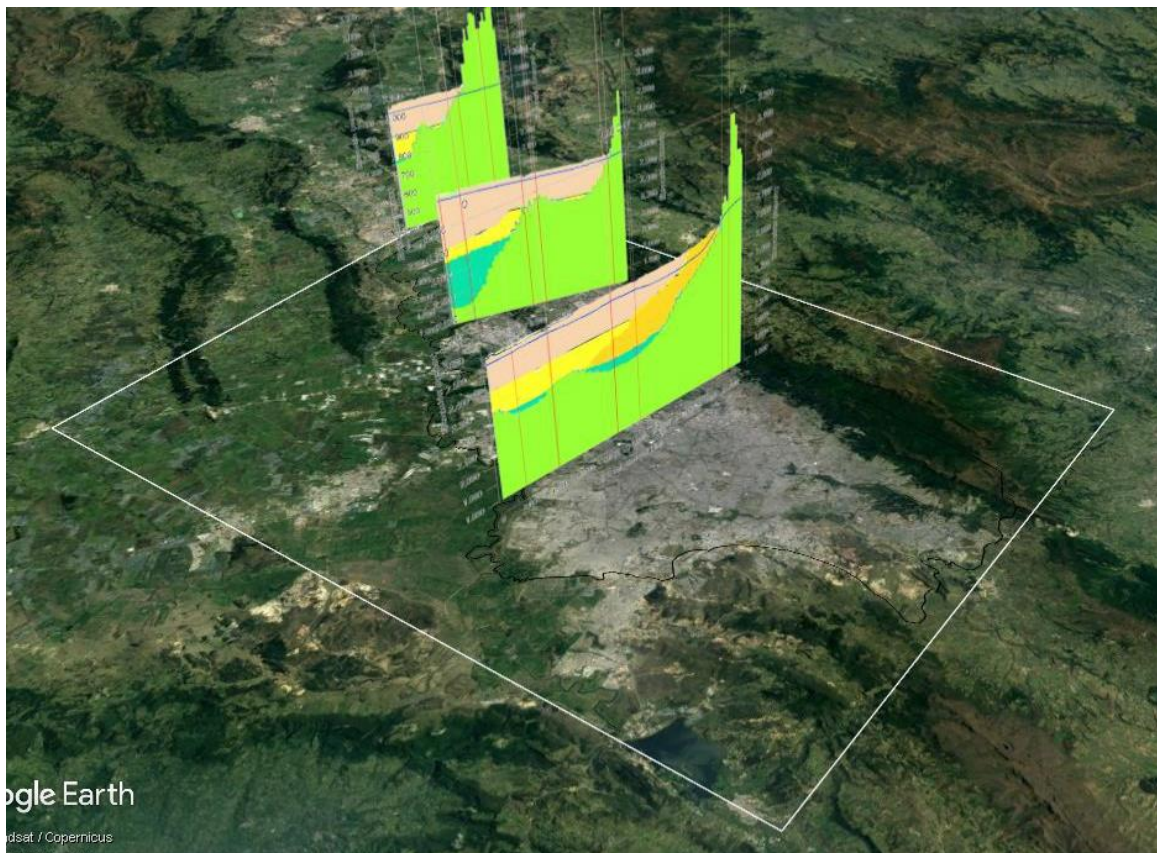


Figura 4-35 Perfiles estratigráficos G-G', J-J', O-O'

Exagerados 10 veces en la vertical superpuesto sobre imagen de Google earth.

Es importante mencionar que este modelo está sujeto a mejoras en la medida que se involucre mayor cantidad de perforaciones e información del subsuelo, que permitan tener mayor detalle del contacto con roca a lo largo del distrito, para de esta manera definir con mayor precisión el espesor de estos depósitos, también los registros litológicos para dar un mejor seguimiento a estas correlaciones.

Se desconoce en gran parte el papel de las fallas geológicas sobre estos depósitos, por tanto, se sugiere estudios concretos de neotectónica que permitan precisar hasta qué punto estas fallas podrían interferir en la continuidad de las unidades más inferiores.

4.4.1.1 Interpretación de la prueba de bombeo PMZF

La prueba de bombeo-recuperación en el Pozo Metropolitano Zona Franca (PMZF) fue llevada a cabo entre el 25 y el 27 de octubre de 2018 por la firma Llanopozos S.A. El Anexo C (Informe Técnico Final de Llanopozos S.A.) contiene detalles sobre la perforación, diseño del piezómetro y modalidad de la prueba.

La prueba fue diseñada para investigar la transmisividad (T) y la Conductividad Hidráulica (K) de la Formación Tilatá. Este diseño no permite la estimación del coeficiente de almacenamiento del acuífero (S) debido a que no se disponía de pozos de monitoreo ubicados dentro del radio de influencia del bombeo. El bombeo tuvo una duración de 48h, con un caudal promedio de 2.83 L/s, mientras que la recuperación del 100% del nivel inicial se logró en aproximadamente 44 horas.

Durante la prueba el caudal varió entre 2.70 y 2.93 L/s, presentando una variación total inferior al 10%. En este sentido, la prueba se considera válida para ser interpretada con métodos tradicionales de caudal constante.

4.4.1.1.1 Análisis General de los Datos

Los resultados de la prueba se muestran en la Figura 4-37. La gráfica indica, en los primeros 30 segundos, un rápido abatimiento del nivel en el pozo de bombeo desde los 54m hasta los 58m de profundidad, después gradual hasta los 59m aproximadamente. Es posible que este rápido abatimiento inicial (4m) sea indicativo de la presencia de una o más fracturas en el substrato rocoso (medio fracturado) que infrayace directamente a la Formación Tilatá. Experiencias del grupo de trabajo de la PUJ en medios fracturados y los resultados de otros experimentos en medios similares (i.e. Rushton & Weller, 1985) soportan esta hipótesis de trabajo.

El abatimiento final es de 5.27m y, considerando un caudal promedio de 2.83 L/s, se obtiene una capacidad específica de 0.54 L/s/m, que está en línea con el límite inferior de capacidad específica reportado en la literatura para esta formación (0.6 L/s/m).

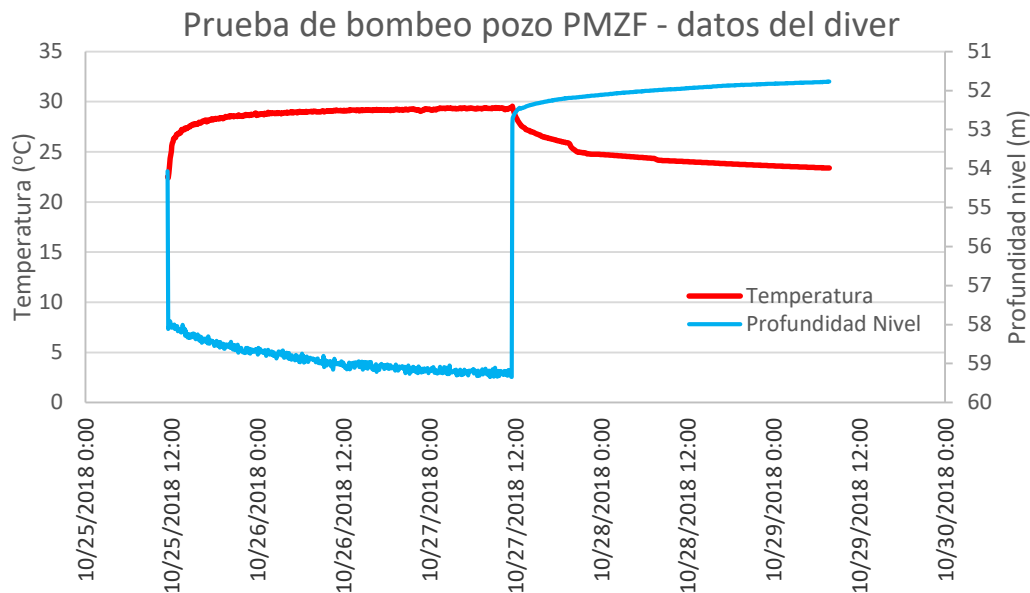


Figura 4-36: Prueba de bombeo-recuperación. Pozo Parque Metropolitano Zona Franca (PMZF).

Escrutinio de la Figura 4-37 revela un comportamiento peculiar de la temperatura registrada por el diver instalado por Llanopozos SA. Al comienzo de la prueba de bombeo, la temperatura es de 22.5°C, la cual aumenta rápidamente en los primeros 30-35 minutos de la prueba hasta 26 °C, para después aumentar más lentamente hasta un máximo de 29.4 °C -al finalizar la prueba de bombeo. Durante la recuperación, la temperatura vuelve progresivamente a un valor de 23.4 °C, próximo al registrado al comienzo de la prueba. Una variación de casi 7.0 °C durante una prueba de bombeo es rara. Una plausible explicación, que sin embargo necesita análisis adicionales para ser comprobada, es que exista una fuente de agua más caliente (aguas abajo del pozo de bombeo) y que el bombeo realizado en el pozo esté invirtiendo el gradiente hidráulico atrayendo más agua caliente de esta fuente. En condiciones normales esta fuente no estaría influyendo tan marcadamente sobre la temperatura del agua del pozo: lo demuestra la prueba de recuperación durante la cual la temperatura vuelve progresivamente a su valor inicial de aproximadamente 23 °C, i.e. en condiciones de gradiente natural (no invertido por el bombeo).

Las consideraciones anteriores son muy interesantes puesto que tienen implicaciones sobre la conectividad hidráulica entre la Formación Tilatá (depósitos no consolidados) y el substrato rocoso por debajo de esta (depósitos consolidados), soportando la teoría de que el Neógeno-Cuaternario esté hidráulicamente conectado al substrato rocoso por medio de zonas fracturadas correspondientes a zonas de falla.

4.4.1.1.2 Comparación con Curvas Teóricas y Análisis de Derivadas

Para este propósito se grafican los resultados de la prueba de bombeo (abatimiento vs tiempo) en escala logarítmica (Figura 4-37) y semilogarítmica (Figura 4-38).

Pozo PMZF - prueba de bombeo (log-log)

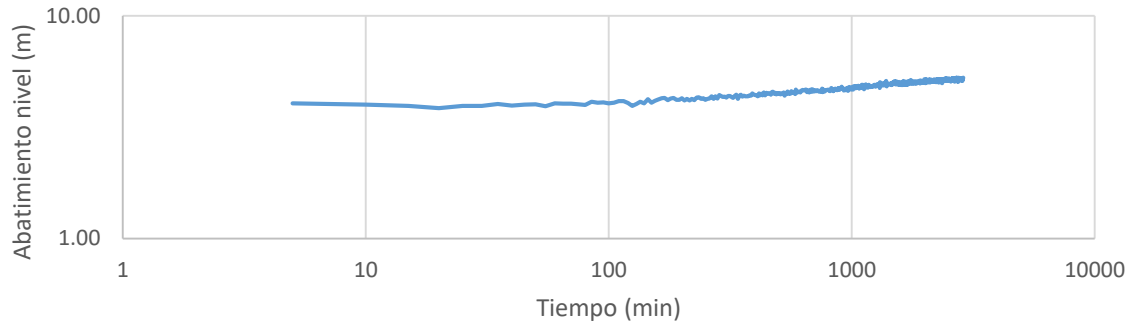


Figura 4-37: Curva abatimiento (log) vs tiempo (log).

Pozo PMZF - prueba de bombeo (semilog)

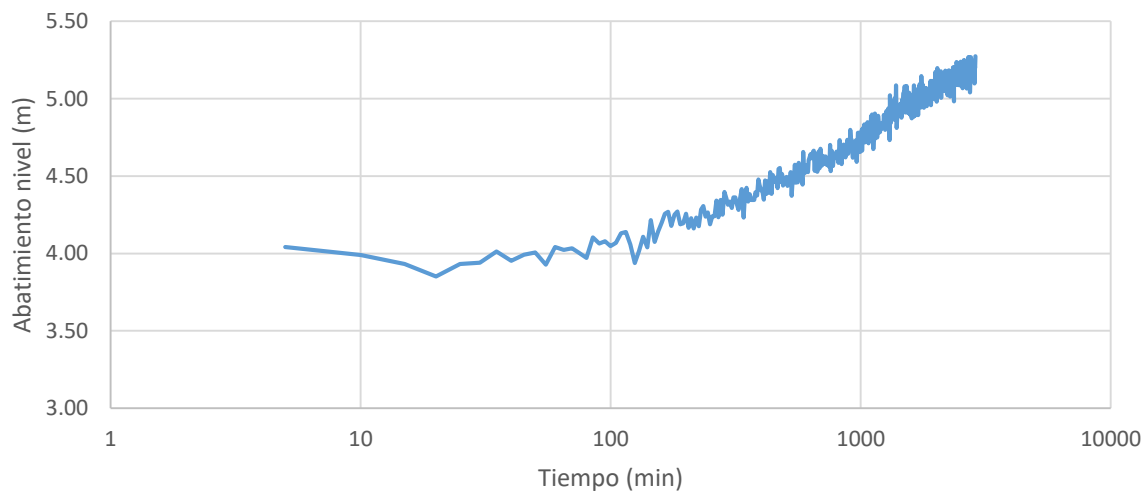


Figura 4-38: Curva abatimiento (lineal) vs tiempo (log).

Comparación con las curvas diagnóstico publicadas por Renard et al. (2009) sugiere que la curva de campo log-log no se parece a ninguna de las curvas teóricas publicadas por estos autores, sin embargo, la curva en escala semilogarítmica es más parecida a las dos curvas teóricas en escala semilogarítmica para acuíferos infinitos bidimensionales (modelo de Theis) y para fractura única (Figura 4-40).

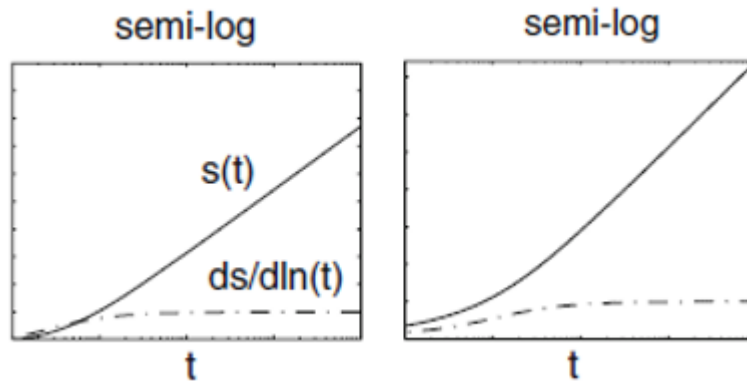


Figura 4-39: Curvas teóricas abatimiento (linear) vs tiempo (log) para el modelo de Theis (izquierda) y para un modelo con fractura única (derecha). Tomado de: Renard et al.(2009).

El análisis de la derivada del abatimiento con respecto al logaritmo natural del tiempo ($ds/d\ln t$) es una herramienta de diagnóstico que puede ser útil para identificar regímenes de flujo o condiciones de frontera. Con respecto a las gráficas tradicionales abatimiento-tiempo, la derivada tiene la ventaja que es muy sensible a pequeños cambios en el régimen de flujo. El cálculo de la derivada de los datos de campo, así como la estimación de la Transmisividad del acuífero, se realizó mediante el software AquiferWin32 v5.

En las figuras teóricas anteriores se observa que la derivada del abatimiento con respecto al logaritmo del tiempo se estabiliza para tiempos de bombeo largos. Si comparamos la derivada de los datos de campo calculada sobre diferentes intervalos (parámetro $L=0.5$; $L=0.9$), Figuras 6 y 7, con las figuras anteriores se observa que, también para los datos de campo, la derivada se estabiliza para tiempos de bombeos largos.

Mirando más detalladamente la curva de la derivada se nota también que, para determinados intervalos de tiempo, la derivada presenta unos valles. Este comportamiento sugiere alguna similitud con modelos de doble porosidad donde al agua se mueve a través de poros y de fracturas (Figura 4-41). Estos valles de la derivada se notan principalmente para valores más bajos de L ($L=0.5$), sin embargo, son todavía evidentes para valores de $L=0.9$, que producen una mayor suavización de la derivada (Figura 4-43).

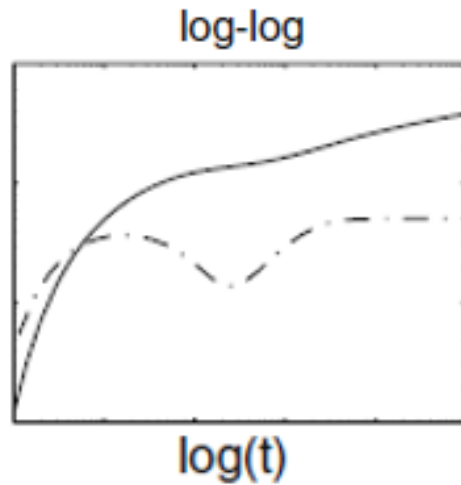


Figura 4-40: Curvas diagnóstico abatimiento (log) vs tiempo (log, y su respectiva derivada (línea discontinua) para un modelo de doble porosidad. Tomado de: Renard et al.(2009).

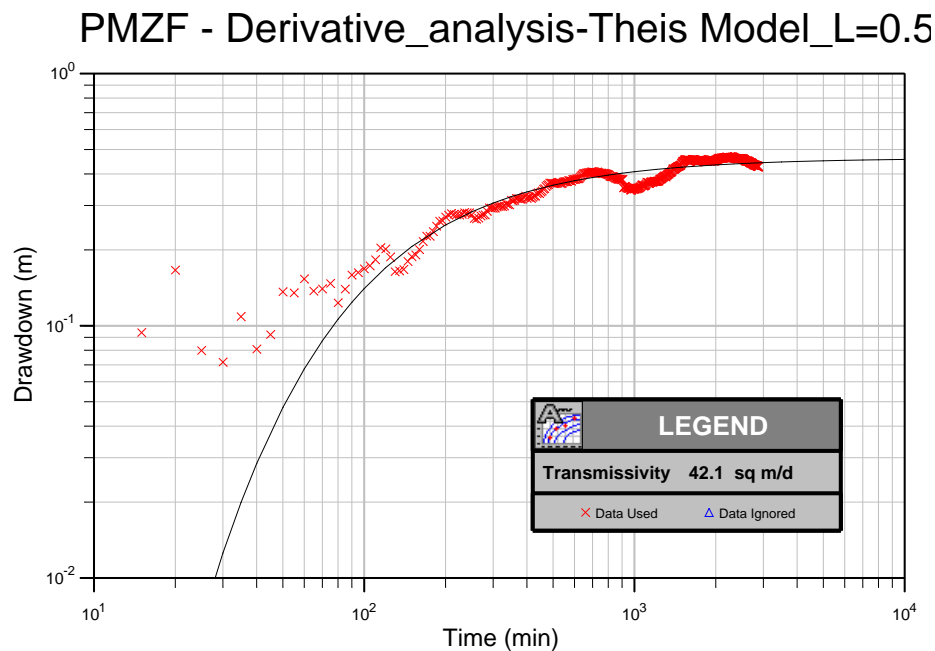


Figura 4-41: Derivada del abatimiento con respecto al tiempo (log-log) para $L=0.5$. Se reporta el correspondiente valor de T basado en el modelo de Theis.

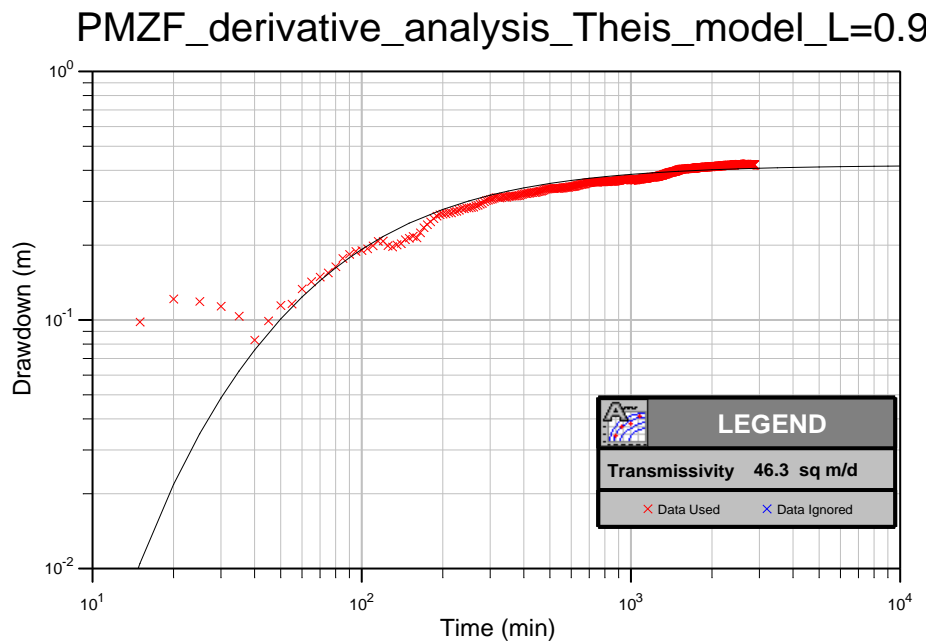


Figura 4-42: Derivada del abatimiento con respecto al tiempo (log-log) para $L=0.9$. Se reporta el correspondiente valor de T basado en el modelo de Theis.

Las curvas diagnóstico de las derivadas sugieren que, en términos generales, los datos de la prueba se ajustan al modelo de Theis, aunque se infieren también algunas similitudes con modelos de fractura única y de doble porosidad, debido a la vecindad del substrato rocoso (la Formación Tilatá en el sitio es solo 30m espesa y suprayace rocas del Terciario). Estas curvas confirman las observaciones de campo, es decir que el acuífero de la Formación Tilatá es confinado por debajo de las formaciones Subachoque y Sabana. El valor de la Transmisividad estimado con base en el ajuste entre los datos de campo y la curva diagnóstico teórica está en el rango de 42.1-46.3 m²/d (Figuras 4-42 y 4-43).

Debido a la dificultad de aplicación de modelo específicos para medios de doble porosidad, para la interpretación de la prueba de bombeo se escoge el modelo de Jacob-Cooper para tiempos de bombeos largos.

4.4.1.1.3 Modelo de Cooper-Jacob

La aplicación del modelo de Cooper-Jacob a los datos de bombeo se muestra en las Figuras 4-44 y 4-45, donde se seleccionan diferentes intervalos de tiempo para la aplicación de este método. En ambos casos, se obtienen valores de Transmisividad parecidos y en el rango 44.9-50.9 m²/d. Estos valores son muy similares a los reportados en el apartado anterior.

PMZF-Cooper and Jacob

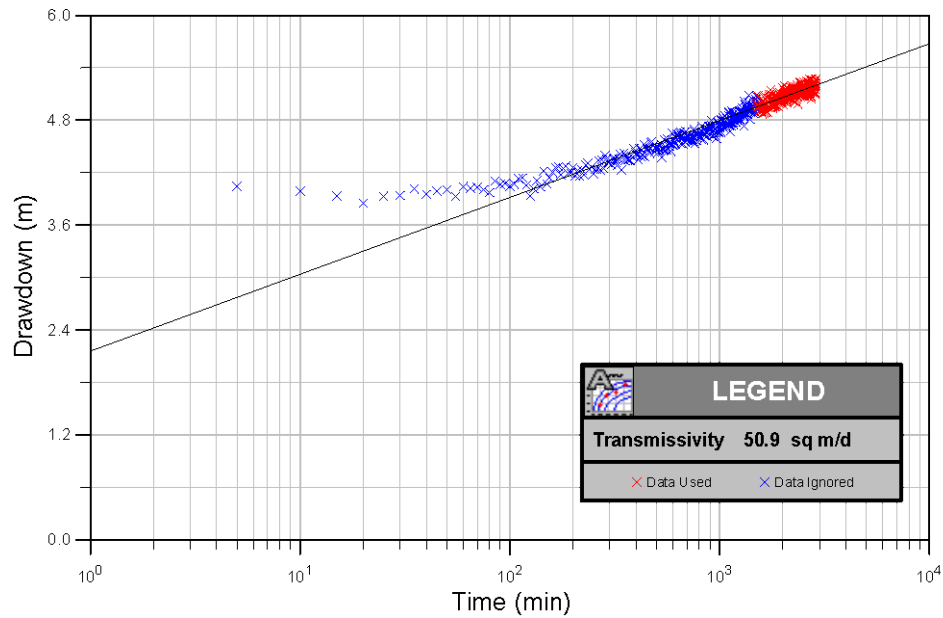


Figura 4-43: Aplicación del modelo de Cooper-Jacob a los datos de bombeo.

PMZF-Cooper and Jacob

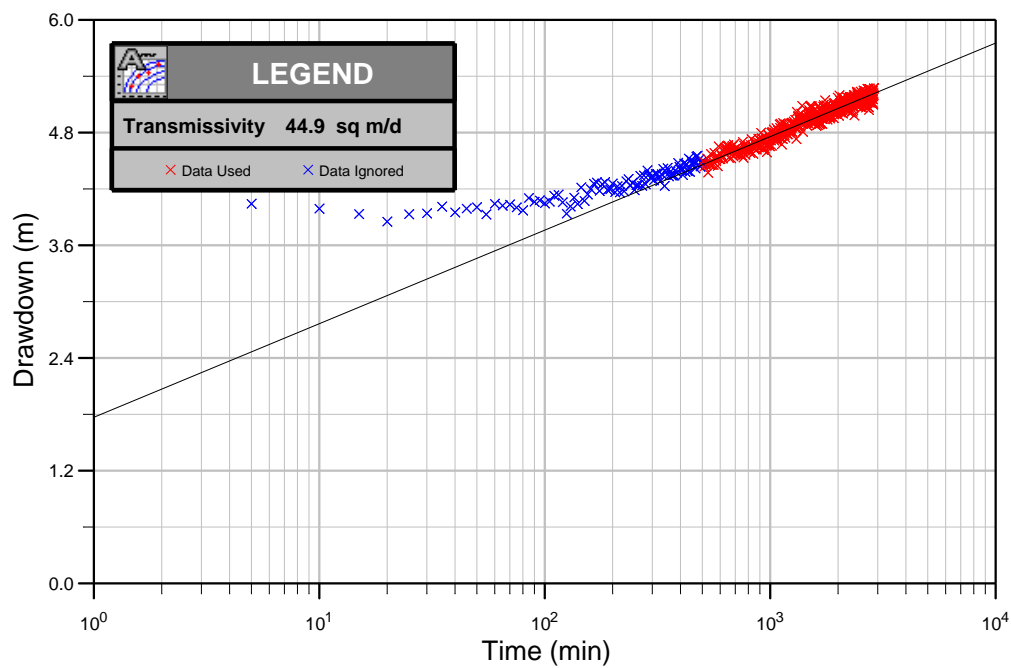


Figura 4-44: Aplicación del modelo de Cooper-Jacob a los datos de bombeo.

Los resultados suministrados por Llanopozos SA indican una T de 44.3 m²/d, que es consistente con los resultados obtenidos en este anexo.

4.4.1.1.4 Interpretación Prueba de Recuperación

La interpretación de la prueba de recuperación se realizó mediante la solución de Theis (1935), interpretando los datos de abatimiento residual. El método es incluido en AquiferWin32 y los resultados de la interpretación se muestran en la Figura 4-46.

La Transmisividad (T) estimada es del orden de 44 m²/d, que es consistente con los resultados de la prueba de bombeo que muestran un rango de T de 42-51 m²/d. La interpretación se realizó tomando solo en consideración los datos tardíos de recuperación, de acuerdo con lo recomendado para esta solución. Los resultados suministrados por Llanopozos SA para la prueba de recuperación indican una T de 86.4 m²/d, sin embargo, este valor fue estimado ajustando todos los datos de la recuperación.

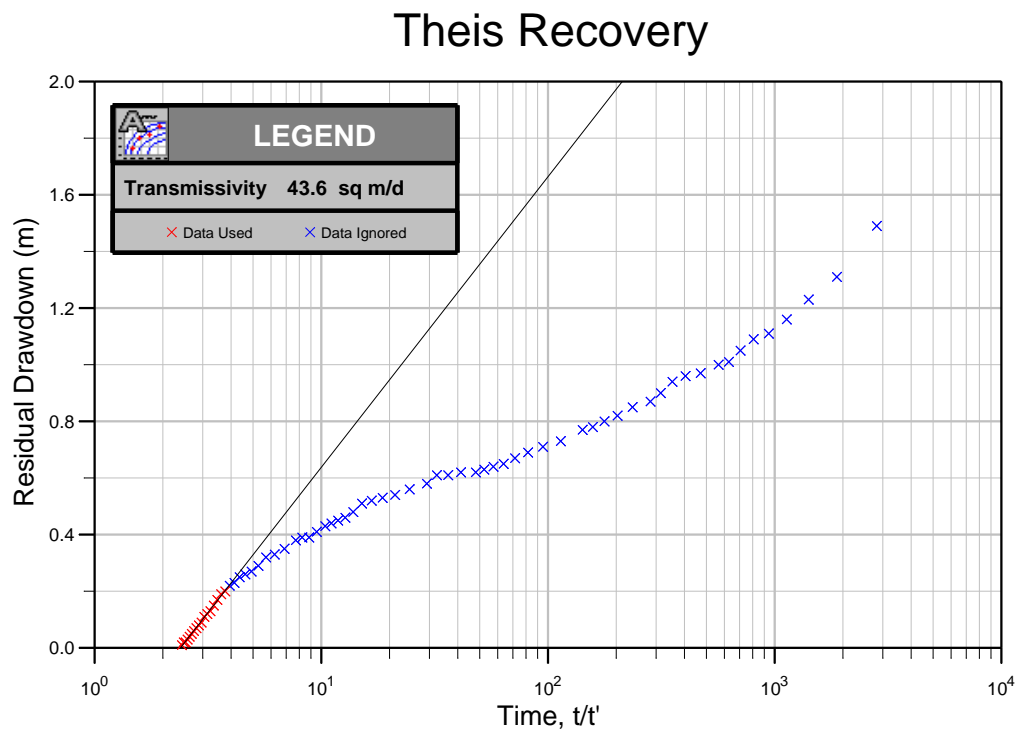


Figura 4-45: Interpretación de la prueba de recuperación.

4.4.1.1.5 Conclusiones de la Prueba de Bombeo-Recuperación

A continuación, se resumen los principales resultados de la prueba y sus implicaciones hidrogeológicas:

- La Transmisividad (T) estimada mediante el análisis de las pruebas de bombeo y de recuperación está en el rango de 42-51 m²/d.

- Considerando un espesor de tubería ranurada de 30m, la conductividad hidráulica (K) se estima en el orden de 1.4-1.7 m/d (1.6-2.0 E-05 m/s), que es consistente con el rango de valores de K reportados en la literatura para la Formación Tilatá (0.08-6.6 m/d).
- La comparación con curvas diagnóstico permitió la identificación de regímenes de flujo que, además de los modelos clásicos de interpretación (modelo de Theis para acuíferos confinados) sugieren alguna contribución del substrato rocoso fracturado, presente en los alrededores del pozo, por debajo de la Formación Tilatá.
- Lo anterior, junto a la interpretación de la variación de la temperatura durante la prueba de bombeo-recuperación medida por el diver (22.5-29.4 Celsius), con máximos valores de 30.4 Celsius corroborados en campo mediante sonda multiparamétrica, sugiere conectividad hidráulica local entre la base del Neógeno-Cuaternario (Formación Tilatá) y las discontinuidades/fallas del substrato rocoso Terciario presente alrededor del pozo, con potencial circulación preferencial, en estas últimas, de agua más caliente (agua termal) procedente de mayores profundidades y movilizándose rápidamente a través de estas zonas de falla. Esta hipótesis requiere análisis adicionales para ser comprobada.
- El caudal promedio que se pudo bombear del pozo fue de 2.83 L/s, lo cual fue limitado por el tamaño de la bomba. Sin embargo, con un pozo de mayor diámetro y una bomba de mayor capacidad se espera un caudal de bombeo significativamente mayor.

4.5 Definición del Sistema de Flujo

En la definición del sistema de flujo del acuífero de Bogotá, es necesario considerar, por una parte, las interacciones del acuífero con la superficie, que incluyen para un acuífero urbano como el de Bogotá no solo la recarga natural sino también la recarga inducida por las pérdidas asociadas a los sistemas de acueducto y alcantarillado. Por otra parte, es indispensable analizar las conexiones del acuífero de estudio en el contexto regional para lo que se usa, como se describió previamente, el modelo analítico regional.

4.5.1 Estimación de la recarga

La metodología para la estimación de recarga del sistema acuífero somero del área urbana del distrito capital se dividió en dos etapas: (1) la implementación de modelos- lluvia escurrientía que permitan estimar la recarga debida a la infiltración en las cuencas naturales (recarga natural), y (2) la implementación de ecuaciones del cálculo de fugas y exfiltraciones de las redes de acueducto y alcantarillado.

4.5.1.1 Recarga Natural

Para el cálculo de la recarga natural, se realiza el análisis de las precipitaciones sobre las cuencas del distrito capital y los procesos hidrológicos de intercepción, escurrientía y finalmente el cálculo de la infiltración que forma parte de la recarga potencial del sistema acuífero somero. Para los fines pertinentes, se coleccionan todos los datos disponibles de la zona de estudio y se identifican los requerimientos de registros climatológicos que requiere los modelos como: *WEAP: Water Evaluation and Planning System*, *SWAT: Soil and Water Assessment Tool*, *HEC-HMS: Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*, *PMRS: Precipitation-Runoff Modeling System*, *TOPMODEL: Modelo hidrológico basado en topografía*, *IHACRES: Identification of unit Hydrographs and Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data*, *DHSMV: Distributed Hydrology Soil Vegetation Model*.

Se concluye que SWAT es el modelo que mejor se ajusta a los propósitos de implementación de la investigación, ya que es exigente en la cantidad de información, permite obtener mediante cálculos basados en la información existente, parámetros con los que no se cuentan.

La construcción del modelo hidrológico SWAT inicia con la recopilación de información cartográfica y climática de la zona de estudio. Una vez se tiene la información se generan los archivos de entrada al modelo y se integran siguiendo una secuencia lógica que se asemeja a la del proceso natural. En la Figura 4-46 se puede observar la metodología de aplicación del modelo.

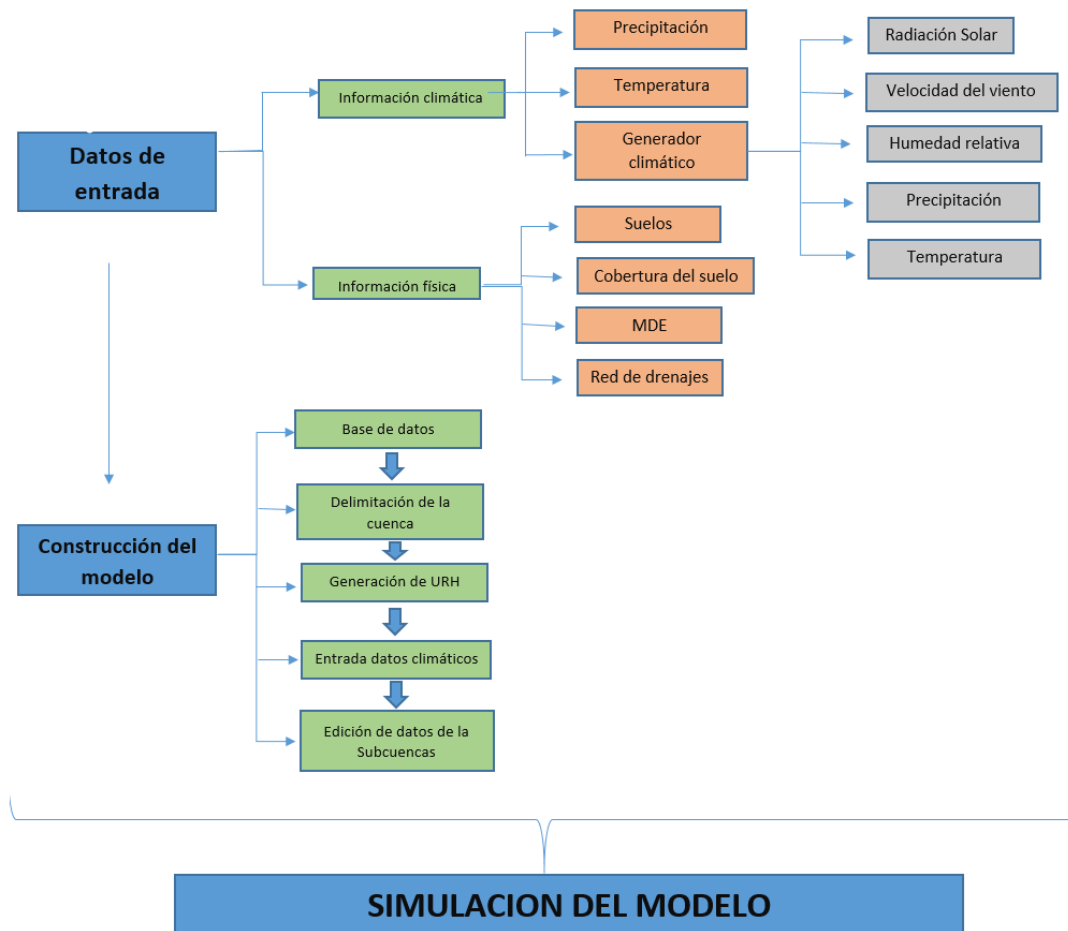


Figura 4-46 Metodología de la aplicación del modelo

Fuente: Javeriana, 2017

El balance hídrico realizado con SWAT se calculó con una escala temporal diaria, ya que el modelo del número de curva está concebido para ello, sin embargo, los resultados de la recarga natural se generaron agregando una escala anual, pues esto permite manejar los mismos ordenes de magnitud utilizados en el modelo hidrogeológico conceptual para el cual se realiza la estimación de la recarga.

La unidad mínima espacial de análisis del modelo SWAT son las Unidades Hidrológicas de Respuesta – UHR, por tanto, el balance de los componentes del balance hídrico en el suelo se calcula con esta resolución espacial generando un dato por cada componente del balance para cada UHR. En la Figura 4-47 se presentan los valores de la recarga natural del acuífero somero.)

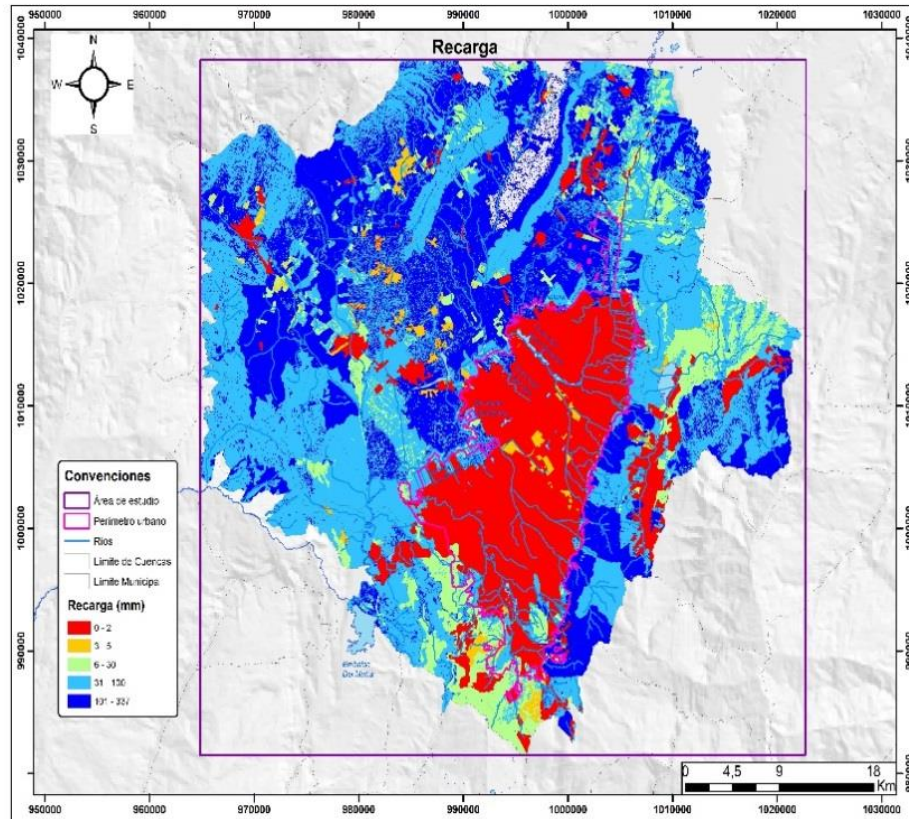


Figura 4-47 Recarga natural (mm/año)

Se puede observar que en la zona dentro del perímetro urbano de la ciudad la recarga es en su mayoría cercana a cero, debido a la impermeabilización del terreno producto de la urbanización, sin embargo, se presentan algunos pocos lugares que son zonas verdes en la ciudad en los que se aprecia una recarga mayor. En particular, la mayor recarga que asciende a valores entre 100 mm y 337 mm se presenta en la zona no urbanizada del oriente y sur de la ciudad, donde se encuentran zonas boscosas y de pastos ubicadas en la parte alta de los cerros.

La recarga natural está determinada por la precipitación, cobertura y tipo de suelo, por lo cual, existen zonas en las cuales a pesar tener coberturas de pastos y bosques la recarga es baja, esto se debe a que la precipitación en estos lugares está por debajo de los 700 mm al año.

En la zona urbana del distrito, los valores de recarga natural son bajos, debido al efecto de impermeabilización del suelo que genera la pavimentación y urbanización del territorio. En esta misma zona la escorrentía es alta, ya que, al disminuir la infiltración, la precipitación de exceso o precipitación efectiva se incrementa y el volumen de agua es captada y conducida por los sistemas de alcantarillado pluvial. La cobertura vegetal densa de pastos y bosques favorece el proceso de retención de la cuenca, disminuyendo la generación de precipitación de exceso y favoreciendo la infiltración en el terreno.

4.5.1.2 Recarga Artificial

En la segunda etapa se realiza el cálculo de las posibles fugas y exfiltraciones que puedan presentar las redes de acueducto y alcantarillado y que están directamente relacionadas con las presiones y consumos de los usuarios del distrito capital. Para obtener la recarga artificial en zonas urbanizadas se utilizó la información proveniente de las redes de acueducto y alcantarillado que se encuentran en el perímetro urbano del distrito capital.

Las pérdidas de agua presentes en los sistemas de distribución de agua potable se encuentran en su mayoría compuestas por pérdidas reales, es decir, por fugas. Esto ocurre debido al gran número de uniones existentes en la red, las cuales poseen determinadas condiciones mecánicas que propician la aparición de nuevas fisuras en las tuberías, aumentando así el volumen perdido por fugas. Además de lo anterior, el poco control sobre el sistema y la forma en que se gestionan las presiones pueden agudizar el problema.

De acuerdo con estudios desarrollados en Alemania y Portugal, el volumen de fugas es mucho mayor en las redes secundarias que en las matrices debido a que en las primeras la aparición de nuevas fisuras, por kilómetro de tubería, es mucho mayor. Por su parte, en el caso de las redes matrices se estimó que las fugas empiezan a ser considerables cuando la densidad de conexiones a dicha red está alrededor de 20 por kilómetro de tubería.

Dado lo anterior, dentro de los factores más importantes que influyen la presencia de fuga se encuentran:

- **Número de Conexiones de Servicio:** Son puntos críticos de las redes donde estas suelen ser vulnerables. Se caracterizan por presentar flujos de larga duración.
- **Condiciones del Suelo:** Como consecuencia del movimiento del agua subsuperficial, se puede presentar corrosión en las tuberías. Asimismo, los suelos granulares no permiten la detección de fisuras en los conductos de la red.
- **Estado de Presiones en la Red:** Dado que el caudal de fugas es dependiente de la presión, a medida que esta aumenta, las fugas también lo hacen.

La modelación matemática de las fugas se realiza a través de emisores, los cuales son dispositivos asociados a los nudos de la red que permiten modelar el flujo de salida a través de un orificio, siendo este dependiente de la presión que se tenga disponible. El caudal de fugas se describe a través de la siguiente ecuación en donde P corresponde a la presión en el nudo medida en metros, β es el coeficiente del emisor y α es el exponente del emisor.

$$Q = \beta P^{\alpha}$$

El parámetro β representa el deterioro de las tuberías y las uniones, caracterizándose por presentar una tendencia creciente en el tiempo, siendo este influenciado principalmente por la edad de las tuberías, su diámetro, su longitud y su material. Por su parte, el parámetro α se ve determinado por la forma y área de la fisura que genera la fuga. Este exponente va a variar entre 0.5 y 2.5 dependiendo de la mezcla de los tipos de fugas presentes y cuál de estos es el dominante, en donde se tiene que $\alpha = 0.5$ cuando se trata de fisuras simples, $\alpha = 1.5$ para rupturas longitudinales y $\alpha = 2.0 - 2.5$ para fisuras de apertura radial con crecimiento lineal. Utilizando la metodología anterior y asumiendo un valor del coeficiente $\beta = 0.008$ y $\alpha = 0.9$ se obtiene las fugas para la red de distribución de Bogotá como se muestra en la Figura 4-48.

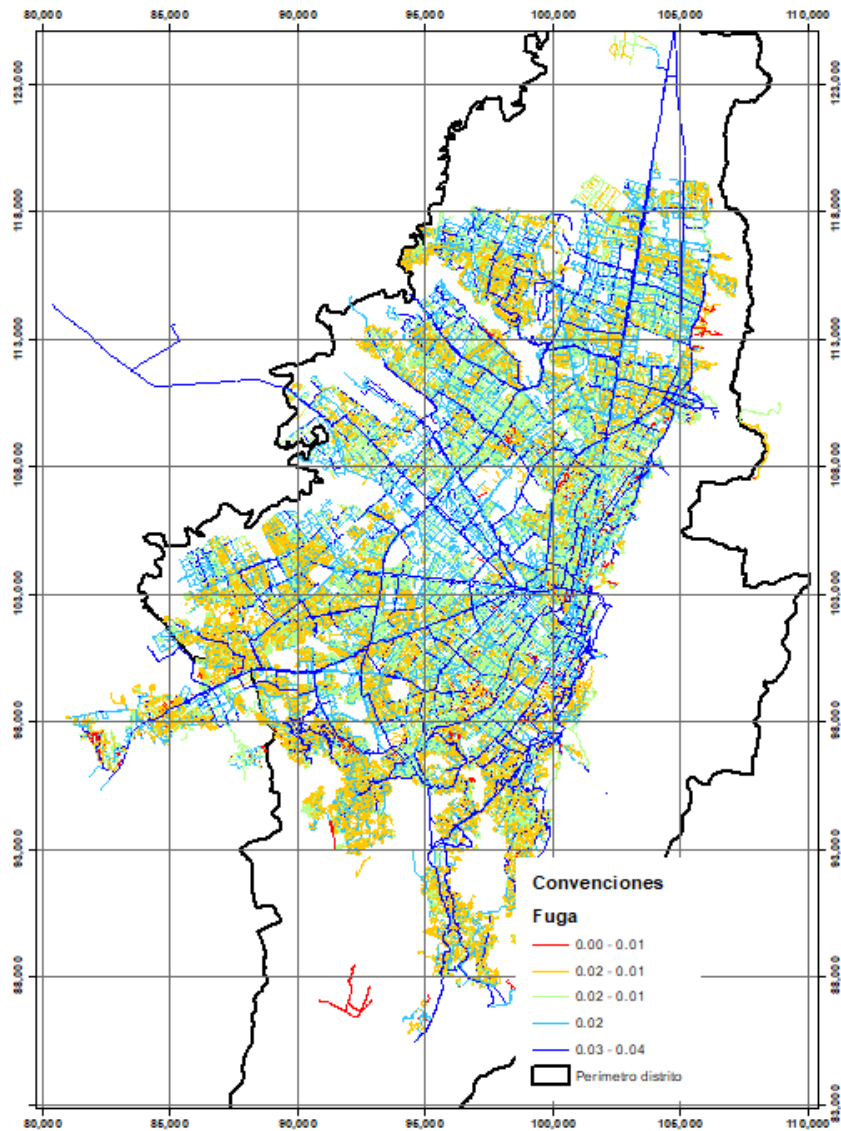


Figura 4-48: Fugas en l/s red de acueducto

Para obtener el caudal exfiltrado por las tuberías de la red de alcantarillado sanitario se usa una expresión derivada de la ecuación de flujo uniforme de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} * \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} * S^{1/2}$$

La anterior expresión es el caudal total que puede llevar cada tubería de la red de alcantarillado sanitario, sin embargo, para el cálculo de la exfiltración se asume que la red mantiene un flujo del 0.02% y de este porcentaje solo el 7% es exfiltrado. Los resultados se presentan en la Figura 4-49

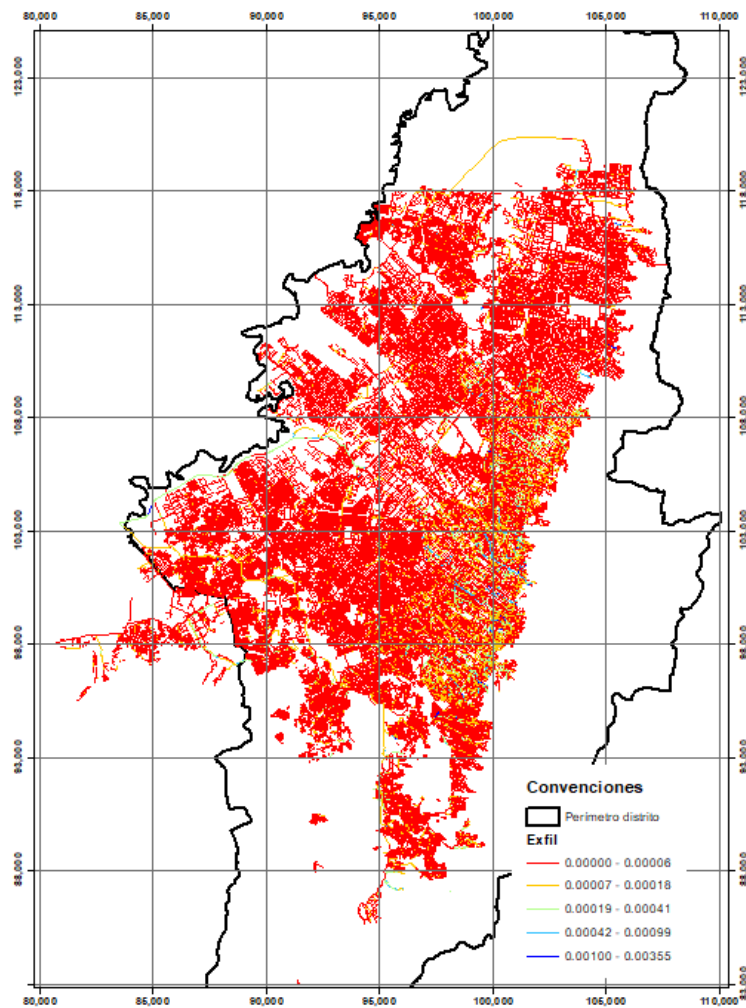


Figura 4-49: Exfiltraciones en m³/s de la red de alcantarillado sanitario

Para el cálculo de exfiltraciones de la red de alcantarillado pluvial se siguió la misma metodología que se utilizó para el cálculo de exfiltraciones de la red de alcantarillado sanitario. Los resultados se presentan en la Figura 4-50.

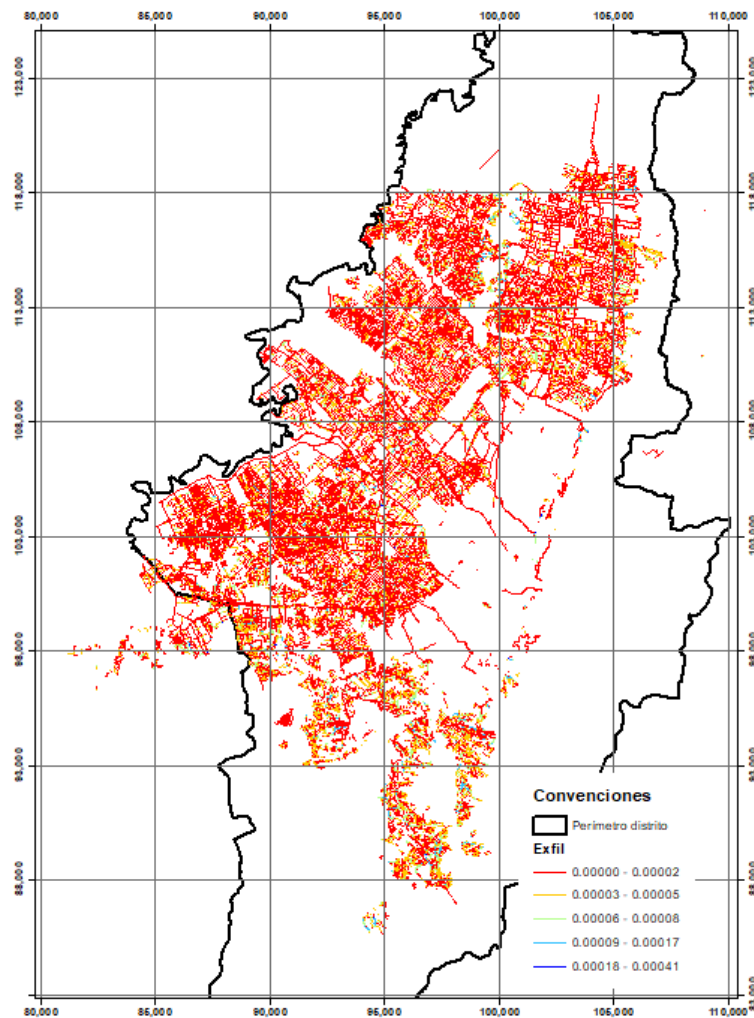


Figura 4-50: Exfiltraciones en m³/s de la red de alcantarillado pluvial

Finalmente, se combinan las pérdidas del sistema de acueducto con las del alcantarillado sanitario y pluvial y se espacializan usando las Unidades de Gestión de Alcantarillado (UGA). El resultado de la recarga artificial en mm/año se presenta en la

Figura 4-51.

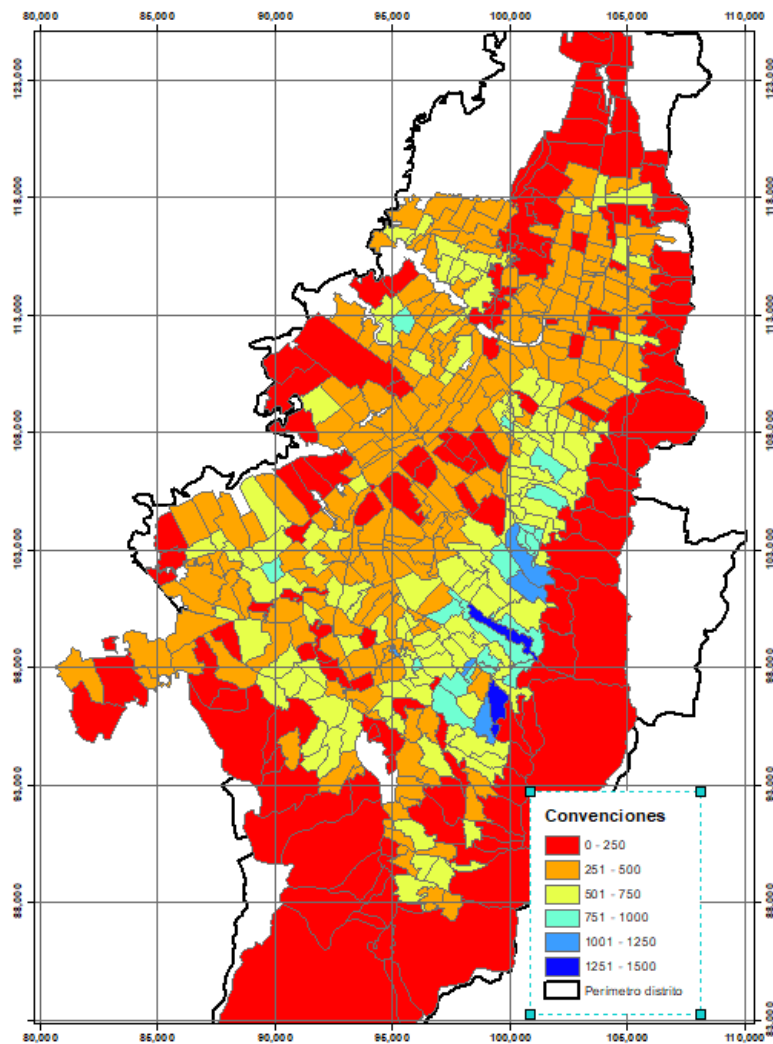


Figura 4-51 Recarga artificial en mm/año

Como se puede observar en la Figura 4-51, según la metodología propuesta, en la mayoría del dominio de estudio se estiman unas pérdidas mayores a 250 mm, con algunas zonas con infiltraciones mayores a 500 mm. en algunas zonas muy puntuales con valores superiores a 750 mm. Estos valores tienen órdenes de magnitud similares a los presentados por diferentes autores y compilados por García-Fresca & Sharp (2005) en ciudades latinoamericanas como Lima, Perú (Foster, 1996), Sao Paulo, Brasil (Menegasse et al. 1999), Mérida, México (Foster, 1996), Aguascalientes, México (Lara y Ortiz, 1999) y Santa Cruz, Bolivia (Foster, 1996).

4.5.2 *Conexiones regionales del acuífero*

De acuerdo con los resultados de la modelación del perfil regional usando la aproximación analítica se pudo establecer que la zona de recarga se extiende más allá de los límites del distrito tanto al oriente como al occidente. En particular, al sur de ciudad (Perfil A-A', Figura 3-11) la zona de recarga se extiende en el oriente hasta los cerros de Monserrate, hasta el afloramiento de la formación Chipaque,

al occidente hasta la Falla Santa Bárbara. Al norte de la ciudad (Perfil B-B'), la zona de recarga en el oriente se extiende hasta los cerros de Siecha, y al occidente hasta los cerros de Suba, flanco este. Desde esta perspectiva, en la construcción del modelo hidrogeológico conceptual y su correspondiente modelo analítico resulta fundamental tener en cuenta esta conectividad.

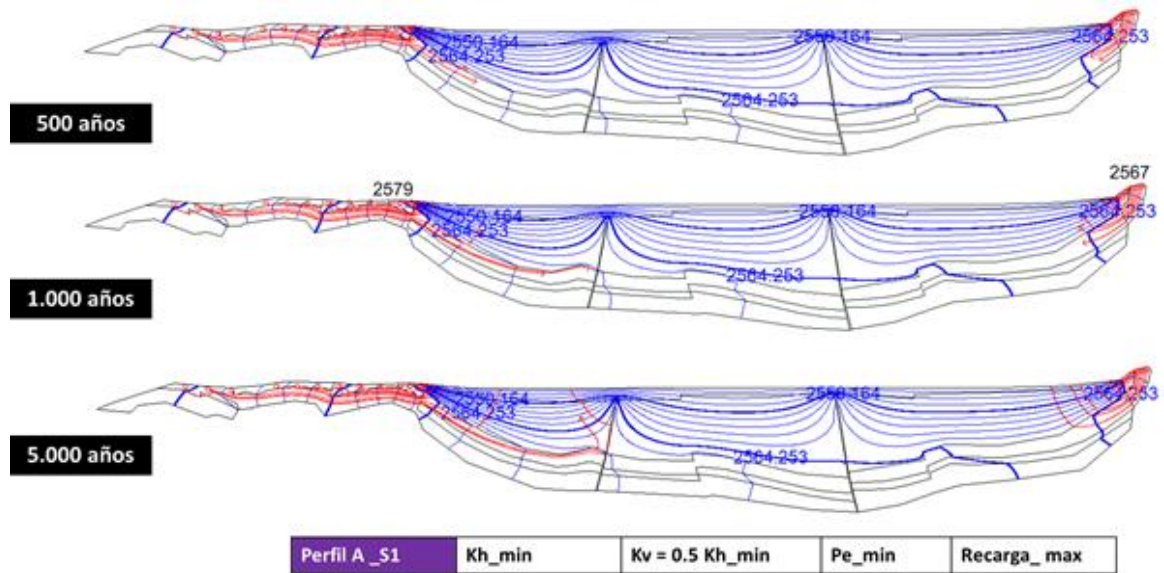


Figura 4-52. Conectividad Regional del acuífero de Bogotá

5 MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO

En este capítulo se exponen los principales componentes que están involucrados en el modelo conceptual y que explican los procesos y mecanismos que tienen lugar en el Acuífero Somero del Distrito Capital. En primera medida, se presenta el Mapa Hidrogeológico del perímetro Urbano del Distrito Capital, con 10 perfiles hidrogeológicos en donde se describen las diferentes unidades hidrogeológicas. Se describen las zonas de recarga, tránsito y descarga, fundamentales para definir el manejo de estas áreas, y se explica la posible conexión del agua subterránea con los cuerpos de agua superficial. Así mismo, se describe la evolución natural de la calidad el agua en su tránsito por los diferentes depósitos y finalmente se presenta el esquema del Modelo Conceptual en un bloque diagrama y algunos perfiles conceptuales que permiten un mejor entendimiento de los componentes descritos.

5.1 Mapa Hidrogeológico

El mapa hidrogeológico se construyó a partir de la interpretación hidrogeológica dada a las diferentes formaciones geológicas. La representación está en función de la leyenda internacional para mapas hidrogeológicos propuesta por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH 1995). Esta representación agrupa las diferentes formaciones de acuerdo a su facilidad de movilizar y almacenar agua con el objetivo de obtener las unidades hidroestratigráficas que conforman el mapa hidrogeológico.

5.2 Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular

A este primer grupo pertenecen los acuíferos que están conformados por sedimentos poco a medianamente consolidados, con porosidad primaria. Está representado por:

- Restos de meteorización de areniscas del Grupo Guadalupe (Trm).
- Formación San Miguel (Qsm).
- Depósitos de pendiente (Qdp).
- Formación Tilatá (Tma).
- Formación Río Tunjuelito (Qrtsa).
- Formación Sabana (Qsa2).

5.3 Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas

Se incluyen en este segundo grupo a las rocas sedimentarias consolidadas que constituyen acuíferos donde el agua subterránea esta almacenada en poros, fracturas y diaclasas. Está representado por:

- Formación Cacho (Tic).
- Formación Labor y Tierna (Ksglt).
- Formación Plaeners (Ksgp).
- Formación Guaduas conjunto Inferior, medio y superior (Tkgi, Tkgm, Tkgs).

- Formación Arenisca Dura (Ksdg).
- Formación Regadera

5.4 Sedimentos y rocas con limitado o ningún recurso de agua subterránea

En este último grupo se encuentran aquellas rocas que, por su composición litológica de granulometría fina a muy fina, carecen de capacidad para almacenar y transportar agua subterránea en cantidad importante, de tal manera que pueda ser utilizada a través de una explotación. En el área de estudio están representados por:

- Formación Usme (Tiu).
- Formación Sabana (Qsa1).
- Formación Chía (Qch1, Qch2, Qch3)
- Formación Bogotá (Tib).
- Formación Chipaque.

5.5 Zonas de Recarga, Tránsito, Descarga

La Figura 5-1 presenta la distribución espacial de los caudales de extracción en la zona de estudio (delimitada con línea negra) y en la sabana de Bogotá. Con un óvalo rojo se circunscribe las zonas de máxima explotación. La extracción en la zona no consolidada, las máximas extracciones se concentran en 3 grupos. El primer grupo en el norte de la ciudad a la altura de la calle 230 con autopista y concretamente donde se encuentran los pozos del Colegio San Viator, Compensar, Andino, El Jardín. Un segundo grupo se encuentra localizado en la zona industrial entorno a la avenida Boyacá y Avenida 68. Algunos pozos de esta zona son, el pozo manufacturas Eliot, Asitex, Hilacol, Carulla. El tercer grupo está localizado al sur de la ciudad en Bosa. Algunos pozos de esta zona son Hilat, Apogeo, frigorífico Guadalupe.

Para los pozos localizados en la zona consolidada, se tiene dos grupos principales que coinciden con los pozos de la zona norte y sur de Bogotá.

El grupo 1 y grupo 2 de la zona no consolidada coincide con las formaciones más permeables como la Tilata. Mientras que el grupo 1 de la zona consolidada tiene una alta permeabilidad debido a que por esta zona pasa la falla Bojaca, que, si bien es una falla de rumbo, limita la cuenca intramontana.

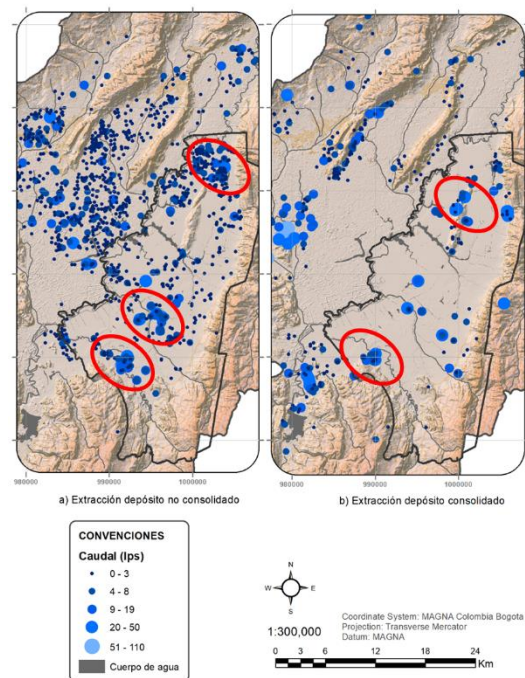


Figura 5-1. Representación espacial de los caudales de explotación en la zona de estudio.

5.6 Análisis de la demanda concesionada

En este apartado se realiza el análisis de la demanda de agua subterránea concesionada, a partir de la información contenida en la Hoja Maestra (a 31 de enero de 2018) de la SDA. La Hoja Maestra proporciona información sobre el propietario, información de contacto, fecha de inicio de la concesión y el seguimiento de esta, registro de la vigencia, cierre temporal o definitivo del pozo, georreferenciación del pozo, diámetro, profundidad, cota de la boca del pozo y caudal otorgado. Adicionalmente, se identifican los pozos inexistentes, con cambio de jurisdicción y en permiso de exploración.

Se realizó una depuración de los datos contenidos en la Hoja Maestra, la cual consistió en:

- Eliminar los pozos inexistentes y duplicados.
- Selección de los pozos que captan agua de los depósitos cuaternarios del Distrito Capital.
- Depurar la fecha de inicio de concesión, y definir la fecha de fin de operación a partir de las actuaciones reportadas por la SDA (sellamiento). Estas fechas se asumieron como el inicio y finalización del bombeo.
- Unificar las coordenadas al sistema de coordenadas MAGNA_Colombia_Bogota (EPSG:3116).
- Completar datos faltantes de caudal, diámetro de la captación y profundidad máxima. Estos datos se complementaron con información contenida en otros estudios hidrogeológicos de la sabana que recopilaron información de campo y que fueron condesados en la GDB transferida

a la SDA en el marco de este proyecto, también se revisó la base de datos de la red de monitoreo de caudales de la SDA (a 2017).

- Revisión y asignación de las unidades hidrogeológicas donde se capta el agua (F. Sabana, F. Tunjuelo, Conos, F. Subachoque y F. Tilatá). La asignación de las unidades para los pozos sin información se realizó con el apoyo del modelo geológico 3D.

El resultado de este ejercicio es una base de datos que consolida la siguiente información del pozo: nombre de la captación, código asignado por la SDA, Formación hidrogeológica, Coordenadas (X,Y), Radio del pozo, caudal de extracción, Fecha de inicio y fin del bombeo, profundidad del pozo.

A partir de la base de datos depurada, se realizó la serie de datos temporal del caudal concesionado en pozos que captan sobre los depósitos cuaternarios en el Distrito Capital (1992 a 2017). En la Figura 5-2 se presenta la curva de demanda de agua subterránea en los depósitos cuaternarios del Distrito Capital. La curva de demanda de agua subterránea muestra cuatro puntos de inflexión importantes, los cuales reflejan dinámicas de crecimiento urbano e industrial y actuaciones por parte de las autoridades ambientales.

En el Punto1 (1996) de la Figura 5-2, se observa un incremento abrupto de los caudales concesionados. Esta demanda puede ser atribuible a un incremento de la población en el Distrito Capital, sin embargo, cuando se observa la Figura 4-18 (Crecimiento Urbano en la Ciudad de Bogotá), en el año 1996 se tiene una disminución de la tasa de crecimiento urbano, caso contrario al comportamiento de la demanda. Otra posible causa, es la falta del registro de las concesiones de pozos durante los años anteriores, con lo cual, la curva tendría un ascenso más constante desde los años 90, sin marcar este año en particular.

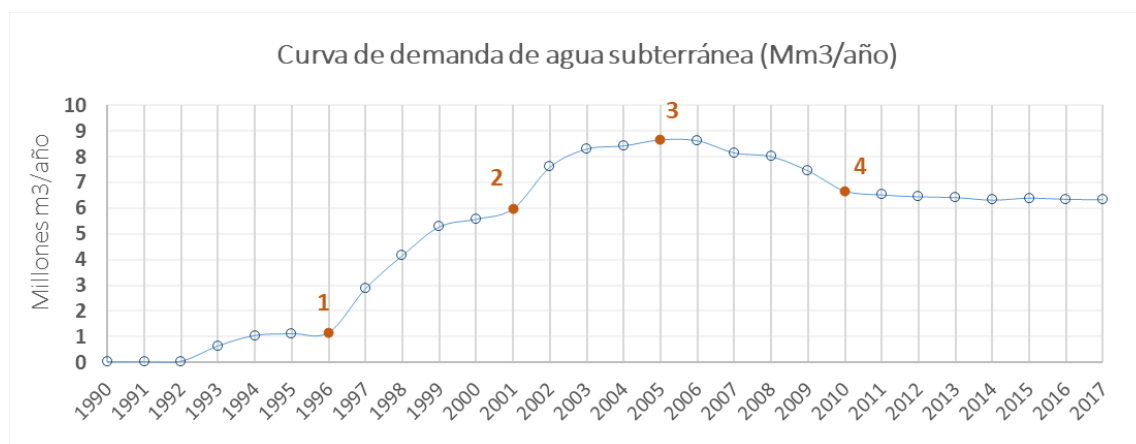


Figura 5-2 Curva de demanda de agua subterránea en los depósitos cuaternarios del Distrito Capital

En el punto 2 (2001), incrementa nuevamente la tasa de caudal concesionado hasta llegar al pico en el año 2005. Este comportamiento es similar al reportado por el informe de la SDA (2009), en el que se muestra el caudal concesionado para los pozos que extraen de los depósitos consolidados y no consolidados (2000-2009), en el que para los años comprendidos entre 2000 y 2007 se tienen los mayores caudales de extracción (Figura 5-2). Para este caso si coincide el comportamiento de las concesiones de agua subterránea con el incremento de la tasa de crecimiento en la Ciudad de Bogotá

(Figura 4-18). Es justamente en 2005 el que se declara la “Zona Crítica” de la Sabana en jurisdicción de la CAR, conformada por municipios de la sabana de Bogotá en los que estaba comprometida la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo (Acuerdo 31 de 2005).

Finalmente, a partir del punto 4 (2010) se estabilizan las concesiones, con una demanda aproximada de 6.3 Mm³/año, alrededor de 90 pozos de bombeo.

Los valores reportados en el estudio de la SDA (2013), no son exactos, pero si mantienen los mismos órdenes de magnitud y el mismo comportamiento. La diferencia en el valor del caudal puede corresponder a los criterios de depuración definidos o las bases de datos usadas para el análisis. La estimación de la demanda realizada en este estudio requiere de la validación por parte de la SDA, por cual este estudio no representa cifras oficiales de la entidad.

Tabla 5-1. Serie de caudales de pozos concesionados en el Distrito Capital. Depósitos cuaternarios.

Datos Curva demanda Distrito Capital (PUJ-SDA-2017-2018)				SDA (2013)	SDA (2009) Consolidado y NoConsolidado
Año	N. pozos	Q (L/s)	Q (m3/año)	Q (m3/año)	Q (m3/año)
1991	1	0.29	9,235		
1992	4	1.17	36,938		
1993	13	20.11	634,304		
1994	19	32.96	1,039,576		
1995	22	35.19	1,109,834		
1996	23	36.57	1,153,196		
1997	53	91.07	2,871,952		
1998	134	131.88	4,158,959		
1999	159	167.36	5,277,840		
2000	170	176.66	5,571,009		9,574,717
2001	170	189.49	5,975,662		10,425,324
2002	175	241.03	7,601,073		11,866,659
2003	179	263.48	8,309,239		11,615,390
2004	180	267.40	8,432,828		8,813,691
2005	169	274.77	8,665,084		9,092,442
2006	152	273.68	8,630,691		9,436,082
2007	141	258.70	8,158,381		8,758,326
2008	134	254.04	8,011,260	7,806,625	7,423,087

Datos Curva demanda Distrito Capital (PUJ-SDA-2017-2018)				SDA (2013)	SDA (2009) Consolidado y NoConsolidado
2009	126	236.46	7,456,978	7,816,451	7,378,056
2010	116	211.60	6,672,868	7,801,149	
2011	109	206.78	6,520,971	6,911,302	
2012	108	204.46	6,447,971	6,494,846	
2013	109	203.44	6,415,574	6,056,061	
2014	96	200.31	6,316,847	6,215,614	
2015	96	202.77	6,394,628		
2016	91	201.26	6,346,813		
2017	91	200.67	6,328,344		

5.7 Análisis de los niveles del acuífero somero

Para realizar el análisis de los niveles del acuífero somero se usaron los datos de los siguientes reportes: (SDA 2013) (EAAB-JICA 2009), (EAAB-JICA 2003)(SIAM 2006) (UNAL 2005) (INGEOMINAS 2002a). Con estos datos se realizó un análisis espacio-temporal del comportamiento de los niveles en la zona de estudio.

Si bien, el análisis se realizó con los niveles estáticos reportados, es de aclarar que estos pueden estar siendo subestimados conduciéndonos a interpretaciones erróneas. Normalmente, para obtener la medida de los niveles estáticos, se realiza un cese del bombeo por 24 horas luego de las cuales se procede a realizar la medida (se considera que las 24 horas son suficientes para que el nivel regrese a suposición en estado estacionario). Al tener un medio tan heterogéneo en el cual prevalecen las zonas de baja permeabilidad, esas 24 horas puede que no sean suficientes para su recuperación total. Por este motivo se iniciará a evaluar en magnitud el comportamiento de estos para luego si desarrollar la interpolación de los niveles.

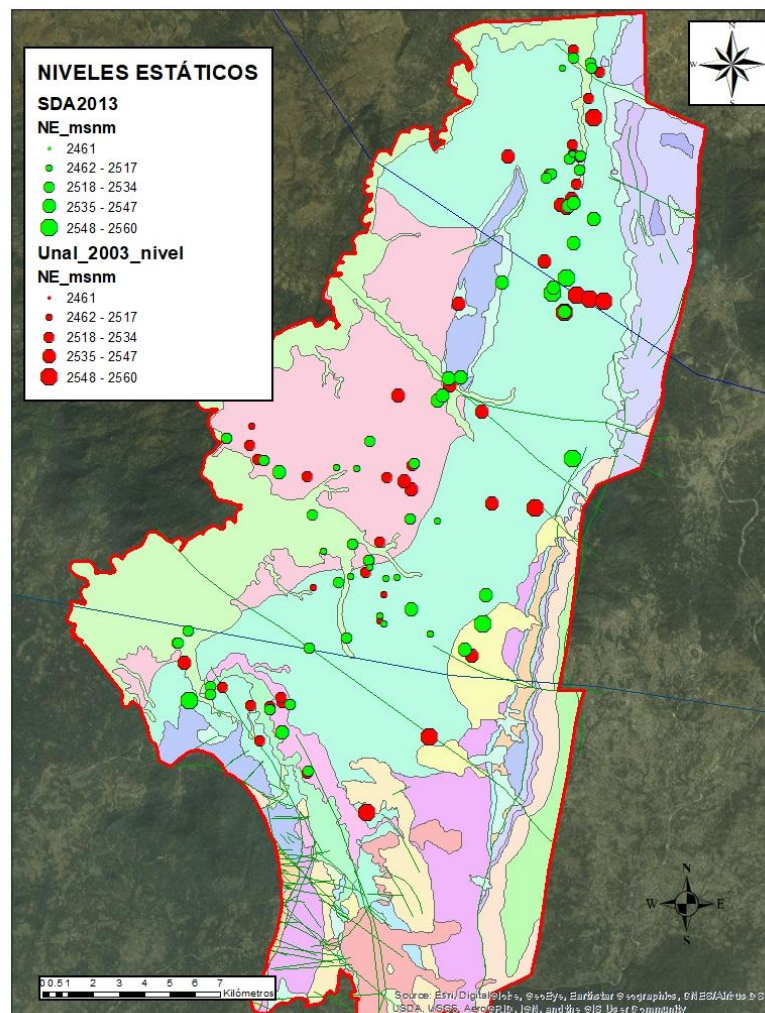
5.7.1 Análisis puntual de los niveles estáticos del acuífero somero

El comportamiento temporal y el análisis espacial de los niveles en el acuífero permiten identificar tendencias, afectaciones, zonas deprimidas, conexiones, sobre explotaciones, etc. En el área de estudio, los niveles tienen cambios debidos principalmente a las extracciones las cuales son reguladas por la SDA.

Para realizar el análisis espacio temporal de los niveles del acuífero somero se usaron los datos de los siguientes reportes: (SDA, 2013) (EAAB-JICA, 2009), (EAAB-JICA, 2003) (SIAM, 2006) (UNAL, 2005) (INGEOMINAS, 2002a). Si bien, el análisis se realizó con los niveles estáticos reportados, es de aclarar que estos pueden estar siendo subestimados conduciéndonos a interpretaciones erróneas. Normalmente, para obtener la medida de los niveles estáticos, se realiza un cese del bombeo por 24 horas luego de las cuales se procede a realizar la medida (las 24 horas pueden que no sean suficientes

para que el nivel se estabilice). Al tener un medio tan heterogéneo en el cual prevalecen las zonas de baja permeabilidad, esas 24 horas puede que no sean suficientes para su recuperación total.

Se graficaron los datos disponibles para los estudios mencionados anteriormente. Por un lado, los datos de (EAAB-JICA, 2009) y (EAAB-JICA, 2003) no permiten obtener ninguna conclusión por la ausencia de datos. (SIAM, 2006) e (INGEOMINAS, 2002a) tienen datos, pero concentrados al noreste de la zona de estudio. Por la cantidad y por la distribución espacial de los datos, las campañas de (SDA, 2013) y (UNAL, 2006) permitieron realizar un análisis espacio-temporal teniendo en cuenta los 8 años que separan estas dos campañas. La Figura 5-3 compara estas dos campañas permitiendo observar que, en el distrito, no se ha dado un cambio significativo en los descensos y se han mantenido prácticamente constantes.



*Figura 5-3 Comparación de los niveles estáticos puntuales.
Reportes SDA 2013 y UNAL 2003*

Se realizó una interpolación de los niveles usando los datos de (SDA 2013) y (UNAL 2006) mediante un krigado simple con la herramienta geoestadística del ArcGis (Figura 5-4). La zona sur oriental,

se presenta en una tonalidad gris debido a la ausencia de datos para la interpolación. En esta figura se puede ver que los abatimientos más grandes se encuentran localizados en torno al área de Puente Aranda desplazándose hacia el aeropuerto El Dorado.

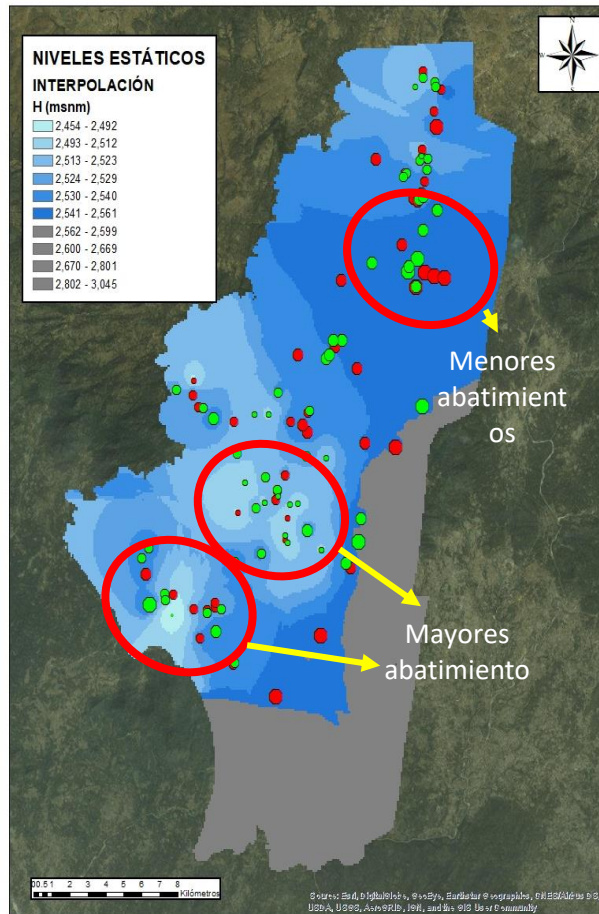


Figura 5-4 Niveles (msnm) interpolados

Datos de los reportes (SDA 2013 y, UNAL 2003) usando un krigeado simple con la herramienta geoestadística de ArcGis.

5.7.2 Evolución temporal de los niveles

En función de la densidad de los pozos (Figura 5-4) se decidió realizar una sectorización la cual da 4 grupos (Figura 5-5). Para los pozos de cada grupo se graficó la evolución temporal del nivel con el objetivo de comparar tendencias y magnitudes

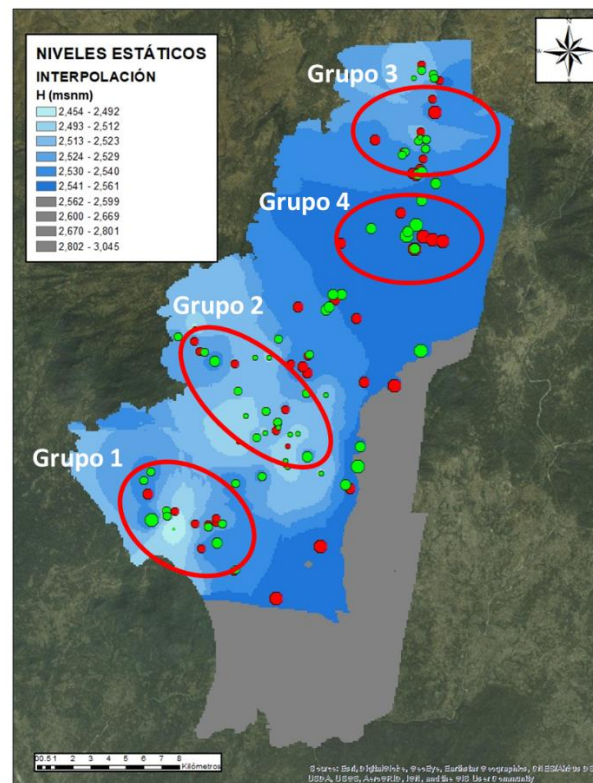
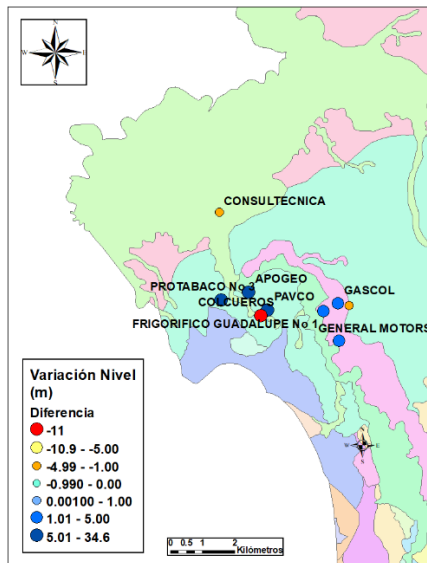


Figura 5-5 Sectorización de los niveles en función de los abatimientos.

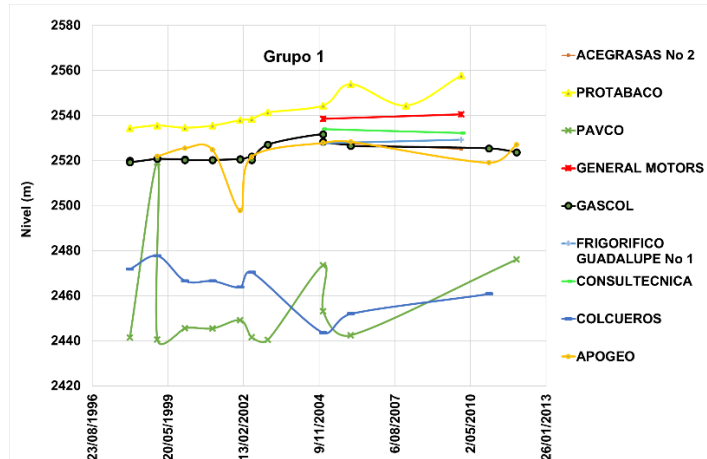
Esto se hace para realizar el análisis de la evolución temporal del nivel.

5.7.2.1 Grupo 1

La Figura 5-6 presenta para el grupo 1, A). la localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). presenta la evolución temporal de los niveles. El pozo Colcueros ha tenido un descenso de los niveles de 11m durante el periodo (1998-2011). El máximo registrado en la zona. Por otro lado, el pozo PAVCO para el mismo periodo de tiempo ha tenido una recuperación de 34.65m. El máximo registrado en la zona. La gran heterogeneidad se ve reflejada en estos dos pozos los cuales son los más cercanos y los que presentan la máxima diferencia. Con estos datos puntuales (a diferencia de los pozos mencionados anteriormente) se puede inferir que en esta zona los niveles están teniendo un comportamiento constante tendiendo a la recuperación.



A)



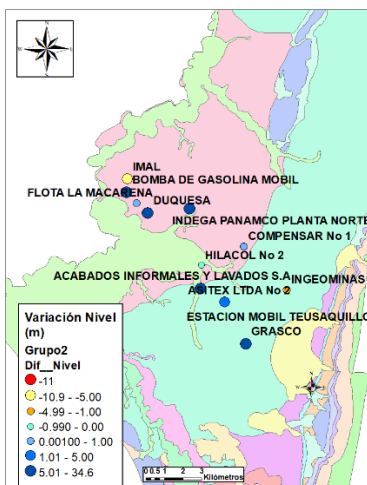
B)

Figura 5-6. Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 1.

A). Localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). Evolución temporal de los niveles.

5.7.2.2 Grupo 2

La Figura 5-7 presenta para el grupo 2, A). la localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). presenta la evolución temporal de los niveles. La tendencia general de la zona es a presentar una recuperación de los niveles. El valor máximo se presenta en el pozo Grasco con un valor de 27.61m (1998-2012). El mayor abatimiento se presenta en el pozo IMAL con 6 m (2005-2017)



A)

B)

Figura 5-7 Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 2

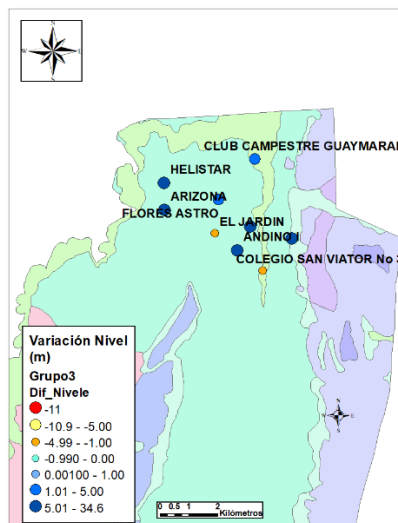
A). Localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). Evolución temporal de los niveles.

5.7.2.3 Grupo 3

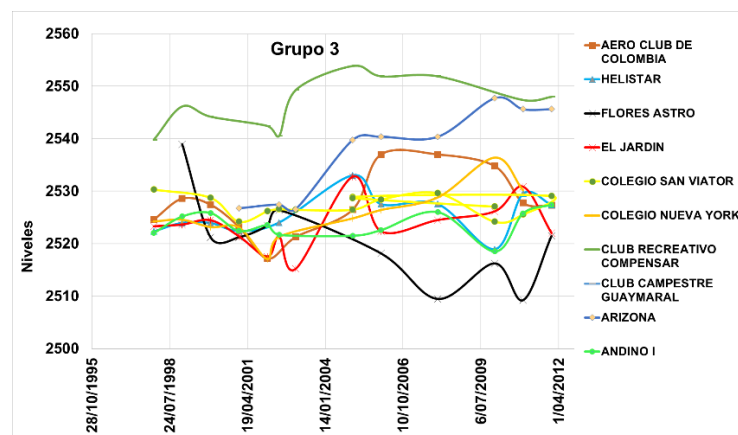
La Figura 5-8 presenta para el grupo 3, A). la localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). presenta la evolución temporal de los niveles. El máximo abatimiento se presenta en el pozo Flores Astro con un valor de 17.52m (1999-2012). Junto a este pozo se tiene el pozo El Jardín el cual también tiene un descenso de 1.6m para el mismo periodo de tiempo que además muestra de un cono de abatimiento en esta zona. La mayor recuperación de nivel se tiene en el pozo Arizona con 18.91 m (2010-2012). En general se puede decir que se tiene una recuperación de los niveles hacia el norte de la ciudad.

5.7.2.4 Grupo 4

La Figura 5-9 presenta para el grupo 4, A). la localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). presenta la evolución temporal de los niveles. El máximo abatimiento se presenta en el pozo Uniagraria con un valor de 8.05m (1998-2012). La mayor recuperación de nivel se tiene en el pozo Country Club con 25.75 m (2000-2012). La distribución espacial de los niveles no permite inferir una tendencia clara de comportamiento.



A)



B)

Figura 5-8. Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 3.

A). Localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). Evolución temporal de los niveles.

(Lobo-Guerrero 1992) comenta que el nivel potenciométrico del agua subterránea de la cuenca artesiana de la Sabana de Bogotá, está descendiendo a tasas entre 3 y 5 m/año. Esto proviene del

estudio nacional de aguas preparado para el Departamento Nacional de Planeación, en donde se mencionaron casos de descensos del nivel en la zona industrial de Bogotá (la serie de datos va hasta 1992). Los resultados obtenidos y presentados en los ítems anteriores permiten vislumbrar una recuperación de los niveles.

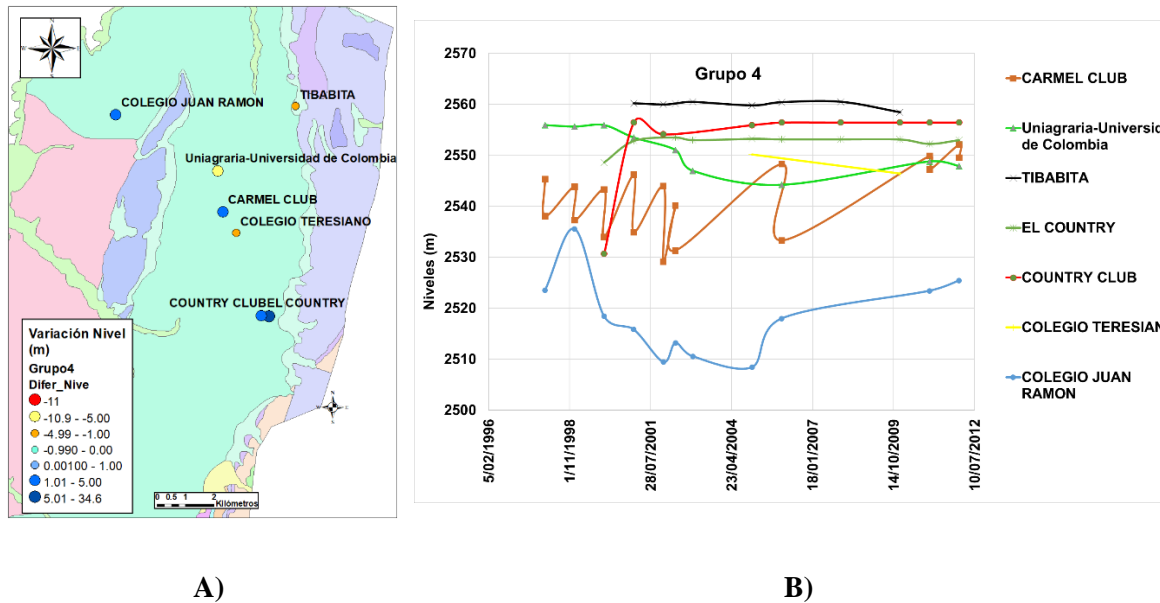


Figura 5-9. Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 4.
A). Localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). Evolución temporal de los niveles.

5.8 Estimación de la recarga mediante el método de balance de cloruros.

Como se sabe, el cálculo de la recarga de agua al acuífero debido a la precipitación es esencial para la evaluación de las aguas subterráneas, con vistas a su conservación, explotación, gestión y consideración de su papel ambiental. Para el acuífero de Bogotá, la recarga ha sido un gran tema de debate puesto que en los diferentes modelos conceptuales se habla de que no existe una recarga (Rodríguez, C.O; Jiménez 1986) o por el contrario donde se tienen recargas de hasta 250mm/año (Hidrogeocol Ltda et al. 2000a)(EAAB-JICA 2009). Estudios recientes en cuanto a hidrogeología urbana en donde se concluye que existe un aporte muy significativo a la recarga debido a las redes de acueducto y alcantarillado presentes en la ciudad (Garcia-Fresca & Sharp, 2005; Hibbs & Sharp, n.d.; Lerner, 1988; Vázquez-Suñé, Carrera, Tubau, Sánchez-Vila, & Soler, 2010). Si se analiza el caso de Bogotá, en donde las pérdidas en la red de acueducto y alcantarillado son considerables es posible tener un volumen adicional de agua que estaría entrando al sistema. Es de aclarar que este volumen es función de la resistencia vertical que produce la Formación Sabana debido a la frecuente presencia de capas arcillosas.

Como se puede leer, para este proyecto, la recarga es un fenómeno complejo que entraña una notable incertidumbre, por lo que hay que abordar su evaluación, en lo posible, mediante diversas técnicas simultáneas, lo más independientemente posible entre sí.

Entre las diversas técnicas existentes se tiene el método del balance de masa de cloruro (CMB) (Custodio, 2010). Para ello se requiere conocer la deposición atmosférica media de cloruro y la salida del suelo como recarga y escurrimiento, al no tener datos de escurrimiento con respecto a caudales y cloruros en las zonas altas o de piedemonte, esta no se está considerando motivo por el cual los valores estimados de recarga tienen que entenderse como límites superiores al valor de la recarga.

El balance medio plurianual es:

$$P \times Cl_p = R \times Cl_r$$

Donde P es la precipitación, R la recarga, Cl_p y Cl_r son las respectivas concentraciones de cloruro en la precipitación y en la recarga. Es también oportuno considerar que el método aplicado a la zona saturada proporciona estimativos regionales de la recarga, mientras que en la zona no saturada proporciona estimativos locales.

Los valores de la concentración de Cl^- fueron obtenidos de (Ingeominas, 2001) en el cual midieron la geoquímica del agua de lluvia en la cuenca alta del río Bogotá. Para el análisis de la información de lluvias se tomaron los datos en 8 estaciones pluviométricas con muestreos mensuales de iones mayoritarios e isótopos estables. En este informe los análisis de lluvia se ponderaron mensualmente por el volumen para cada estación. Cabe anotar que el método se aplica a escala anual por tal motivo los valores de pp(mm) se multiplicaron por 12. Estos son presentados en la Tabla 5-2. De todas las estaciones pluviométricas, solo 4 pueden ayudar a la estimación de esta recarga (Santa Ana, El Delirio, Casa Blanca y el Verjón) por encontrarse en la zona de estudio(Figura 5-10).

Tabla 5-2. Datos de lluvia ponderada por el volumen.

Medidos en el Cuenca alta del río Bogotá en (Ingeominas 2001). La precipitación p, se reporta en el estudio de Ingeominas como un promedio mensual.

Estaciones pluviométricas	Norte x	Este Y	Altitud (msnm)	P(mm)	Cl (mmol/l)	Cl(mg/l)
Los Tunjos	986100	966500	3700	1457	0.08	2.84
El Hato	989200	976700	3170	948	0.07	2.48
casa Blanca	990500	997400	2620	778	0.1	3.55
El Verjon	1005994	998000	3250	1493	0.06	2.13
El delirio	1002200	994300	2850	1339	0.06	2.13
El angulo	1023400	1016200	3530	2095	0.05	1.77
Tibitoc	1012786	1041991	2680	846	0.06	2.13
Santa Ana	1005300	1010500	2710	797	0.08	2.84

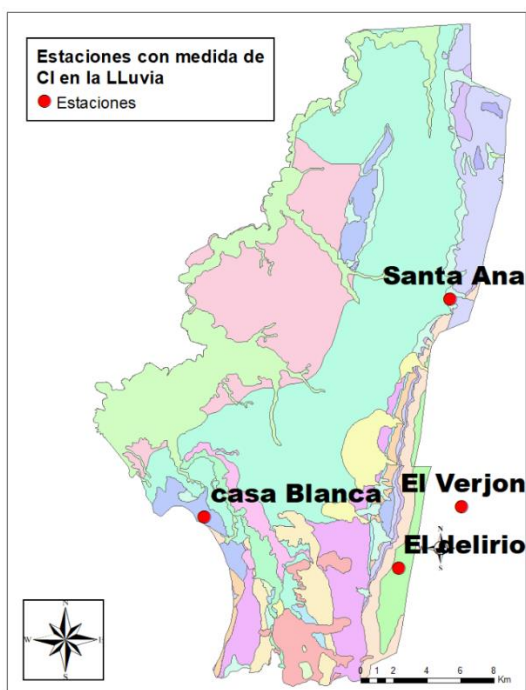


Figura 5-10. Localización de las estaciones pluviométricas con mediciones de Cl.

Paralelamente se analizaron los datos de cloruros medidos en los manantiales los cuales fueron presentados en (Ingeominas 2001) y se presentan en la Tabla 5-3. Valores de cloruros medidos en los manantiales de la cuenca alta del río Bogotá

Fuente: Ingeominas (2001). Estos manantiales se encuentran localizados en la cuenca alta del río Bogotá. No fue posible presentarlos en un mapa pues no se encontraron las coordenadas de estos. El valor promedio de recarga sin tener en cuenta la escorrentía es de 422mm/año. Si suponemos una escorrentía del 65% la recarga sería de 143mm/año.

Tabla 5-3. Valores de cloruros medidos en los manantiales de la cuenca alta del río Bogotá

Fuente: Ingeominas (2001).

Sitio	Cl (mmol/l)	Cl(mg/l)	Recarga(mm)
Los Volc	0.13	4.6	346
Los Volc	0.16	5.7	281
CasaD.I.3	0.07	2.5	643
	0.13	4.6	346
El Cortijo	0.23	8.2	196
Aposentos	0.13	4.6	346
Molinitos	0.13	4.6	346
Sta Rosa	0.08	2.8	562
Floresta	0.06	2.1	750

Lavadero	0.11	3.9	409
El Ratón	0.15	5.3	300
Margarita	0.06	2.1	750
Lavadero	0.1	3.5	450
Pradera	0.14	5.0	321
	0.1	3.5	450
	0.14	5.0	321
San Jorge	0.07	2.5	643
	0.08	2.8	562
	0.23	8.2	196
Yerbab.1	0.11	3.9	409
	0.41	14.5	110
Quilpué	0.2	7.1	225
P.d.Buey	0.06	2.1	750
	0.13	4.6	346
	0.16	5.7	281
Miravalle	0.06	2.1	750
S.Méd	0.42	14.9	107
Caballo	0.21	7.4	214
Promedio			407

5.9 Relaciones aguas subterráneas-superficiales

En orden de establecer posibles conexiones con los cuerpos de agua superficial en el distrito, se elaboró un mapa de isopiezas subsuperficiales a partir de la medición del nivel en los pozos de las EDS del Distrito. El término subsuperficial hace referencia al nivel piezométrico a poca profundidad (en el distrito no mayor a 8m). Sobre el mapa de isopiezas subsuperficiales, se trazaron diferentes perfiles perpendiculares a la dirección de los cuerpos de agua con el fin de generar secciones transversales, que permitieran observar el comportamiento de los niveles freáticos respecto al nivel del agua superficial.

A continuación, se describen particularidades sobre la medición de los niveles piezométricos en los pozos para la construcción del mapa y secciones, se hace un análisis de la interacción agua superficial – agua subsuperficial y se describen las limitaciones del análisis y se dan algunas recomendaciones.

5.9.1 Medición de niveles piezométricos

En desarrollo de las visitas a las estaciones de servicio (EDS) realizadas en este convenio, se midieron con sondas multifase, los niveles piezométricos en diferentes pozos (monitoreo y observación), localizados en la estación y en sus inmediaciones, la profundidad de cada uno de ellos, y el espesor de producto en fase libre en algunos pozos con evidencias de contaminación. Es importante aclarar que en cada EDS se tienen instalados pozos de observación y de monitoreo. Los pozos de observación

se ubican en el perímetro de los tanques de almacenamiento del hidrocarburo, estos están cercados por una zanja de gravas, por lo que los niveles medidos en estos pozos no representan el comportamiento del nivel freático de la zona.

En total se visitaron 178 EDS, se realizaron 837 mediciones de nivel, de las cuales, 486 se realizaron en pozos de monitoreo (PM) y 351 en pozos de observación. Durante la medición se evidenciaron importantes diferencias de nivel entre pozos de monitoreo cercanos, este comportamiento no corresponde a un gradiente del flujo generado en la zona. Las grandes diferencias de nivel se pueden atribuir a la probable alteración del pozo por extracción de agua (por parte del operador de la EDS) previa a la medición.

5.9.2 *Mapa de isolíneas subsuperficiales*

Para eliminar la interferencia de datos anómalos en la generación de las líneas piezométricas, se escogió un punto por EDS, correspondiente al mayor nivel reportado en los pozos de monitoreo (aquellos con profundidades menores a 6 m). De allí se obtuvieron 120 puntos para la interpolación de los niveles.

Los datos de las cotas de pozos y láminas de agua están referidos al DEM (1x1m), el cual presenta afectación por infraestructura urbana y diferencias significativas hasta de 30 m con el modelo ALOS PALSAR. Con el fin de realizar una mejora a los valores en la vertical del DEM se realizó un levantamiento topográfico con un GPS de doble frecuencia RTK (Real Time Kinematic), se tomaron coordenadas (x, y, z) de 500 puntos en donde se registró el valor de boca del piezómetro, así como la altura de la lámina de agua para los humedales Juan Amarillo, Jaboque, Córdoba, La Vaca y Santa María del Lago. Esta información contribuyó a una mejora en la precisión de la altura en el Modelo de Elevación Digital de 1 metro, lo cual se evidencia en el análisis de los perfiles que se muestran a continuación.

El mapa de isopiezas subsuperficiales para el Distrito se presenta en la (Figura 5-13). El método de interpolación utilizado fue Kriging ordinario, con el cual se buscó minimizar el error de predicción eliminando valores anómalos máximos y mínimos, generando un suavizado en la estimación de los valores.

Para ejecutar la interpolación inicialmente se escogió una función para el modelo de ajuste, teniendo en cuenta la variabilidad y correlación espacial de los datos, para lo cual se generó un semivariograma, con el que fue posible estimar la varianza poblacional e identificar el tipo de distribución de los datos. Se estableció un modelo tipo esférico para la interpolación de los datos dándoles un peso a cada dato y finalmente se ajustaron los datos a través de una validación cruzada.

Para realizar la validación del método de interpolación con mayor ajuste se realizó un análisis exploratorio de los datos y su relación con el espacio, el cual permitió identificar la tendencia, media, varianza y si existe o no heterocedasticidad en los datos.

Se realizó un análisis estructural el cual consistió en estimar y modelar una función que reflejara la correlación de la variable regionalizada a partir de la hipótesis de un tipo de comportamiento de los datos teniendo en cuenta su variabilidad. Para establecer el tipo de comportamiento de los datos se realizaron diferentes semivariogramas mediante un estimador clásico y uno robusto, tomando diferentes distancias, esto con el fin de detectar una estructura lineal en los datos y que permita un mejor ajuste en los modelos de semivariograma.

Una selección correcta del modelo y parámetros del semivariograma es uno de los principales puntos para una interpolación adecuada, permitiendo generar una estructura espacial que represente la naturaleza de los datos. Se realizó la estimación del semivariograma clásico a diferentes distancias, con el fin de identificar a que distancia los datos mostraban una estructura que podría ser modelada con alguno de los semivariogramas teóricos existentes. A continuación, se muestran estas estimaciones.

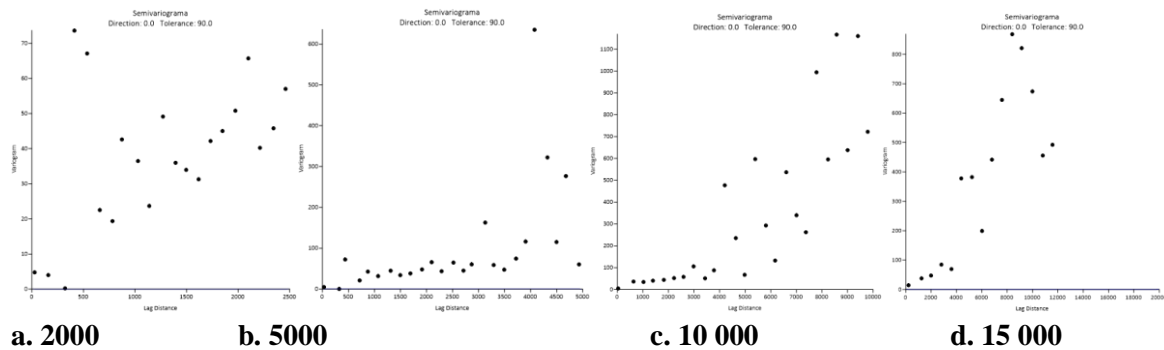


Figura 5-11 Variograma clásico diferentes distancias

Con los anteriores semivariogramas se escogió el realizado a una distancia de 10000, ya que a esta distancia se puede observar una estructura donde tiende a estabilizarse y que podría ser modelado con alguno de los semivariogramas teóricos existentes. A continuación, se muestran los modelos teóricos que tuvieran una independencia espacial después de un valor de 10000, siendo modelos que representen procesos estacionarios de segundo orden.

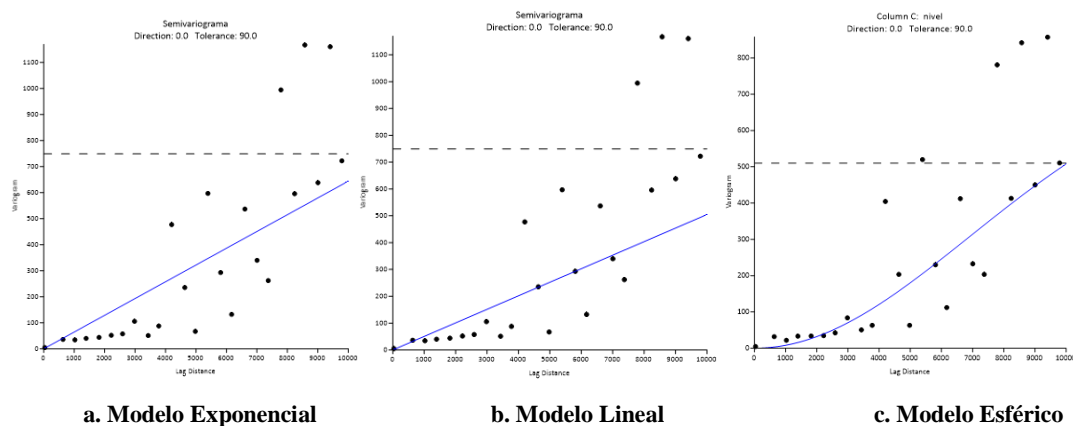


Figura 5-12 Modelos teóricos con independencia espacial mayor a 10 000

Posterior al ajuste de los modelos al semivariograma se observó que el modelo esférico es el que tiene un mejor ajuste, para ello se ajustó a los valores experimentales y dejando fijo el valor del efecto pepita, lo que permite mejor ajuste en los primeros valores del semivariograma. Cabe mencionar que en ninguno de los modelos empíricos ajustados se observó un efecto pepita mayor al 30%, lo que indica que las distancias de muestreo son óptimas para posteriormente realizar las predicciones.

Con este modelo ajustado se procedió a realizar la interpolación con el método Kriging e IDW, con el fin de identificar que método de interpolación tiene mejor ajuste, para ello se realizó una validación

cruzada entre los datos registrados y los estimados. A continuación, se muestra la sumatoria del valor absoluto del error seleccionando el método con el menor seleccionando el método con el menor error acumulado.

Método	Error
IDW	3.36
Kriging	2.82

Teniendo en cuenta lo anterior se realizó la interpolación de los niveles subsuperficiales con la metodología Kriging, a la cual se le realizó un ajuste con el semivariograma ya anteriormente seleccionado. Finalmente, con el campo interpolado se generó un mapa de contornos de isopiezas subsuperficial, el cual se observa a continuación.

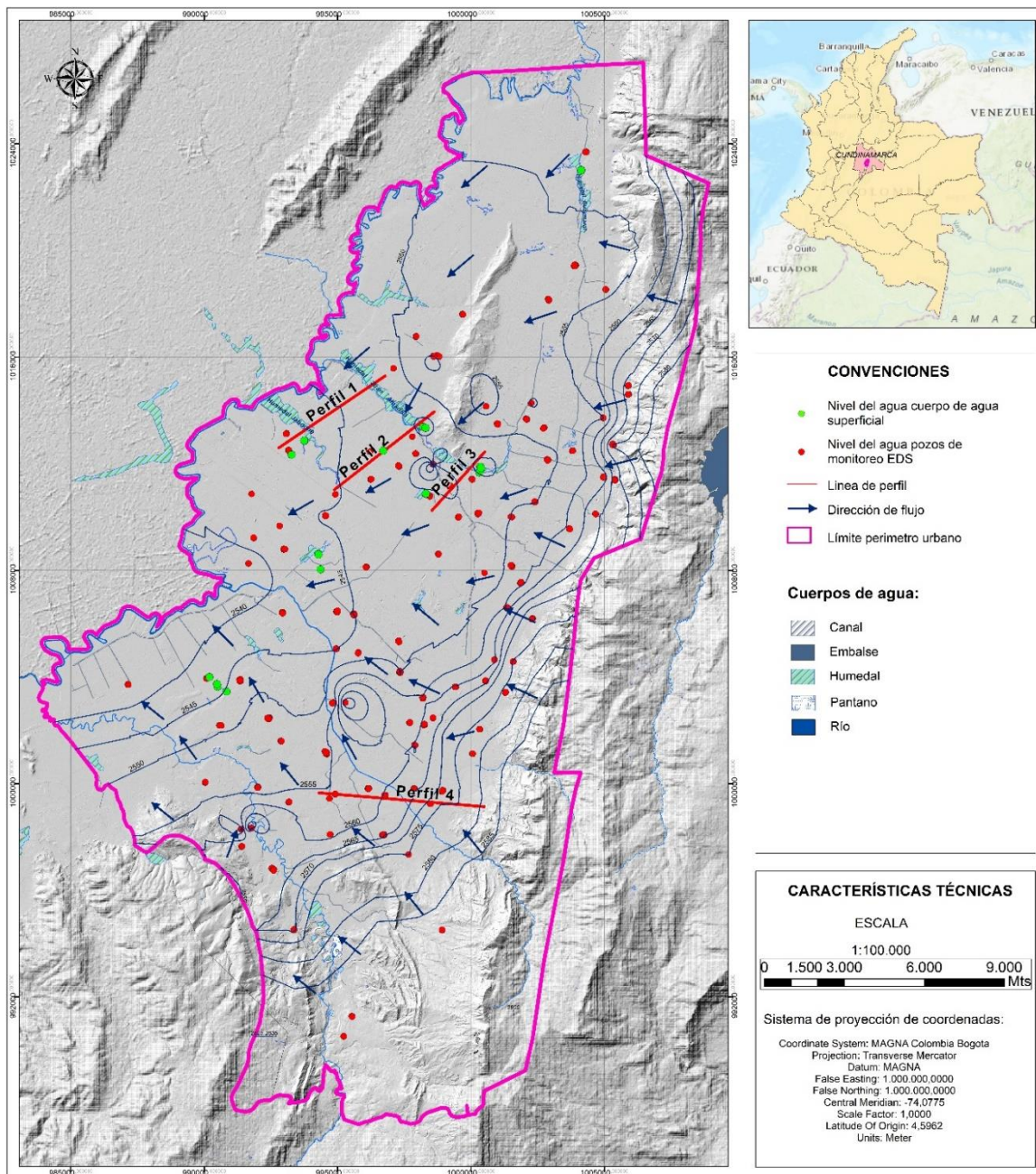


Figura 5-13 Mapa de Isopiezas Subsuperficiales en el Distrito Capital

A partir del mapa de isopiezas subsuperficiales, se observa un flujo regional en dirección E-W, con tendencia hacia el centro de la cuenca en dirección al Río Bogotá. Este mapa sigue la tendencia de la dirección regional del acuífero de los depósitos Neógenos-Cuaternarios, presentado en el mapa hidrogeológico del Acuífero de Bogotá D.C, producto de este convenio.

5.9.3 Perfiles mapa de isopiezas subsuperficiales

Para analizar la interacción entre el agua superficial y subsuperficial en diferentes zonas del Distrito, se trazaron 4 perfiles perpendiculares a los cuerpos de agua (humedales, ríos, canales) de lecho natural y con revestimiento.

En los perfiles se muestra el nivel del terreno, la línea piezométrica y el nivel del agua en el cuerpo de agua superficial. Para evidenciar los resultados de la corrección del DEM (1x1m), se presenta el perfil antes y después de dicha corrección. Se aprecian cambios menores en el perfil del terreno, pero importantes cambios en la línea piezométrica.

En los perfiles elaborados a partir del DEM inicial (antes de la corrección), se observa un error generalizado en el nivel de la línea piezométrica, esta se ubica muy cercana a la línea del terreno y en ocasiones hasta 1 o 2 m sobre el nivel del terreno. Este es el resultado de no tener precisión en la cota de la boca del piezómetro, ocasionado por el ruido de la infraestructura que rodea el punto.

En general la interpolación tuvo una mejoría y esto se evidencia en que el nivel freático ahora se localiza por debajo de la cota topográfica. Se tiene casos puntuales como en el perfil 1 (humedal Juan Amarillo) y en perfil 3 (humedal Córdoba) donde el nivel piezométrico está claramente por encima del nivel del humedal. Esto es debido a que entorno a estas zonas no se levantaron puntos con el equipo GPS-RTK, mas sin embargo el nivel si está obedeciendo a la deriva presentada por el terreno.

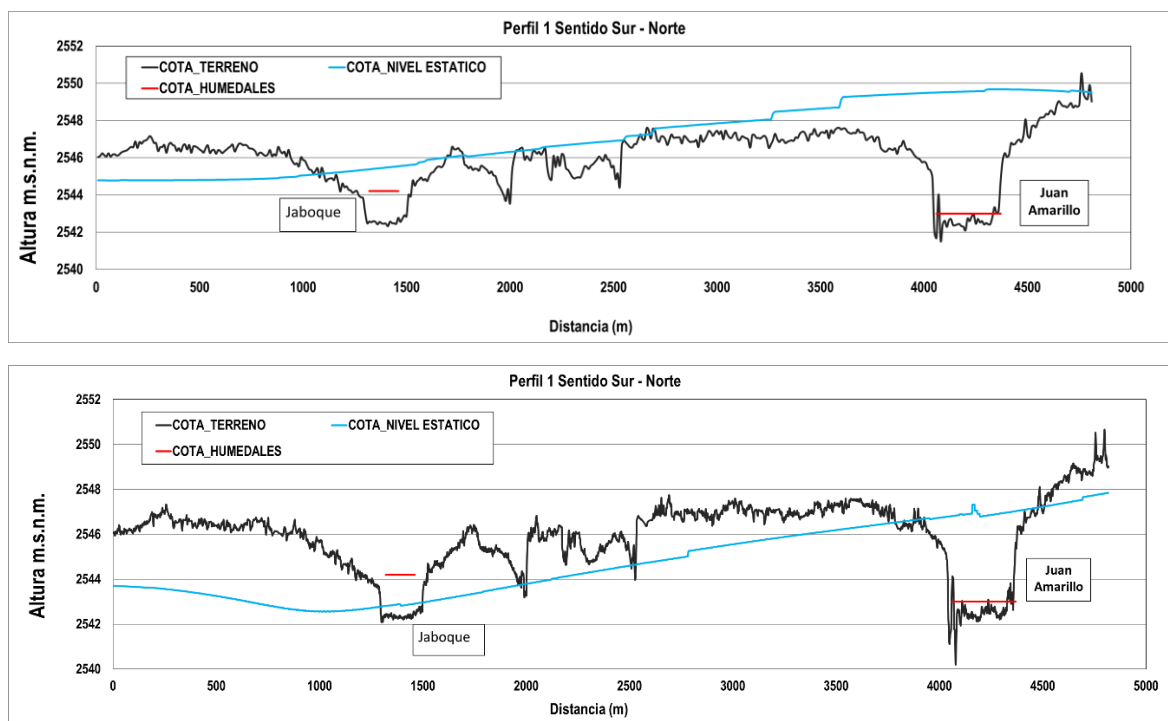


Figura 5-14 Perfil 1 sentido Sur-Norte. Humedal Jaboque y Humedal Juan Amarillo
A) DEM inicial B) DEM corregido.

Para el perfil 1, se evidencia una correlación entre el nivel con el humedal Jaboque y Juan Amarillo. Haría falta tener unos puntos de referencia entorno al Humedal Juan Amarillo que mejoren la interpolación y permitan dilucidar una mejor conexión.

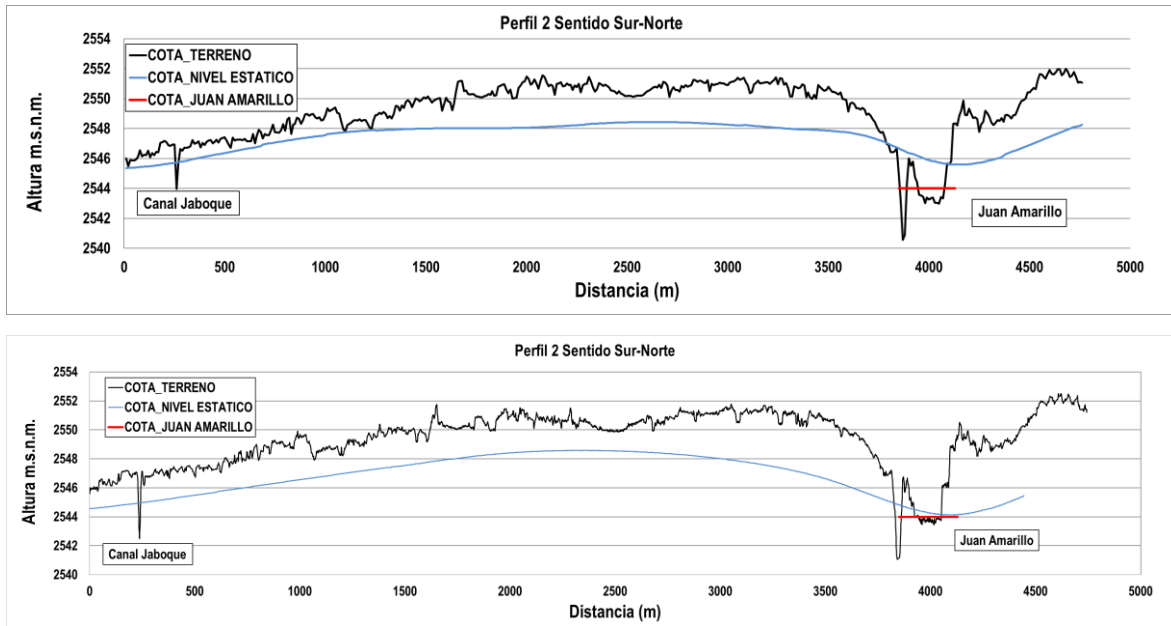
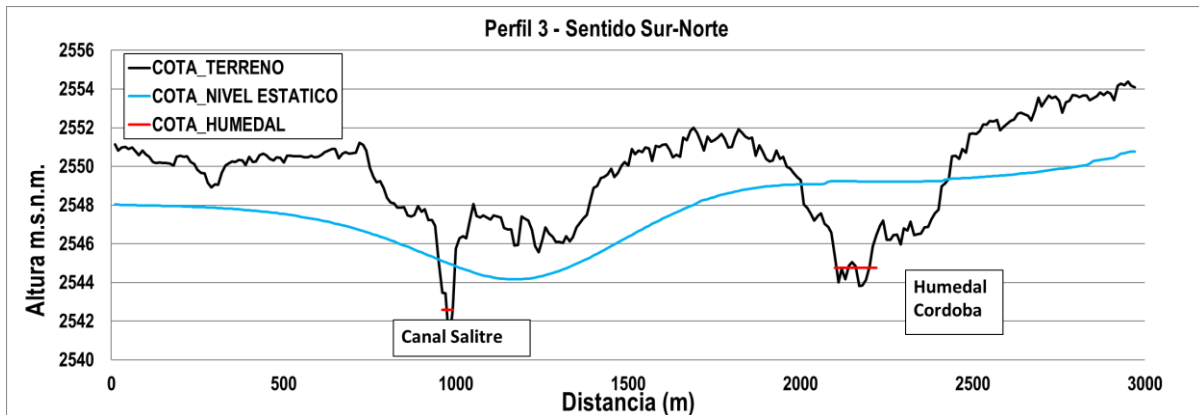


Figura 5-15 Perfil 2 sentido Sur-Norte. Canal Jaboque y Humedal Juan Amarillo

A) DEM inicial B) DEM corregido.

El perfil 2 muestra mucho mejor la conexión existente con el Humedal Juan Amarillo y es grato resaltar la buena tendencia presente con la cota topográfica. En este perfil de nuevo se sigue viendo la no interacción con el canal Jaboque.



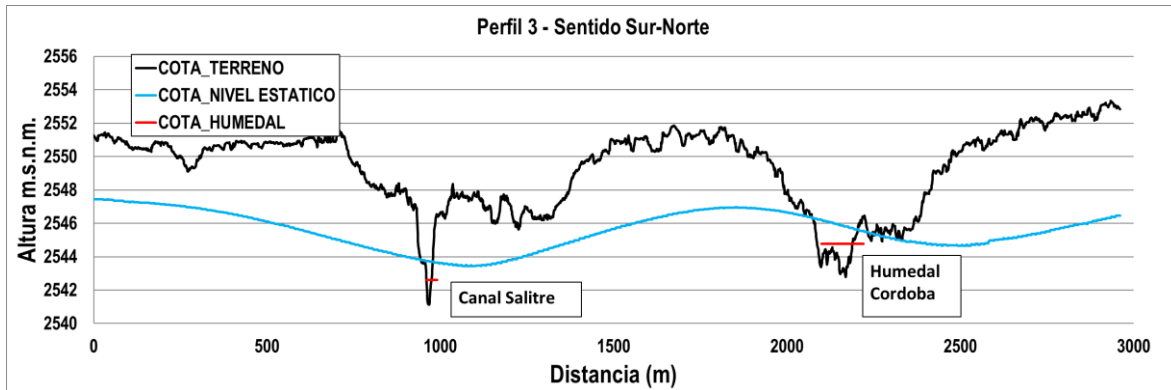


Figura 5-16 Perfil 3 sentido Sur-Norte. Canal Salitre y Humedal Córdoba.
A) DEM inicial B) DEM corregido.

En el perfil 3, se vislumbra una interacción entre el nivel con el humedal Córdoba respetándose la tendencia. De nuevo en este punto la falta de tener nuevos puntos levantados con el equipo RTK no permite tener una mejor interpretación.

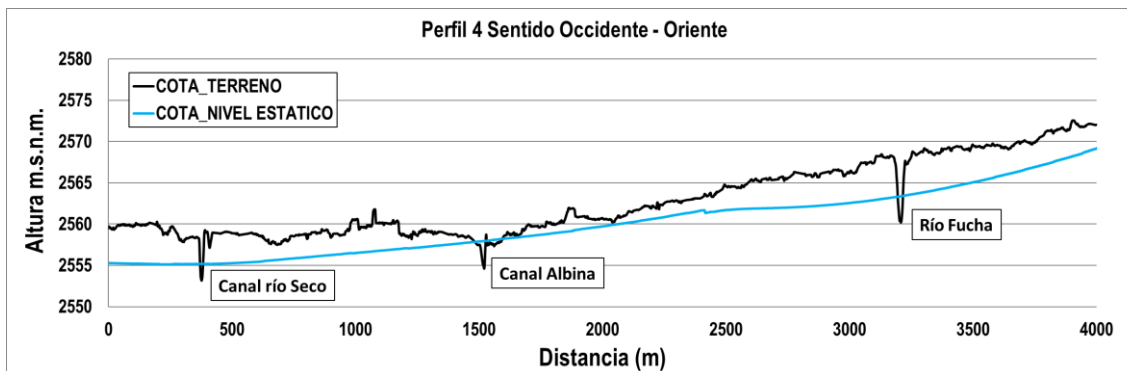
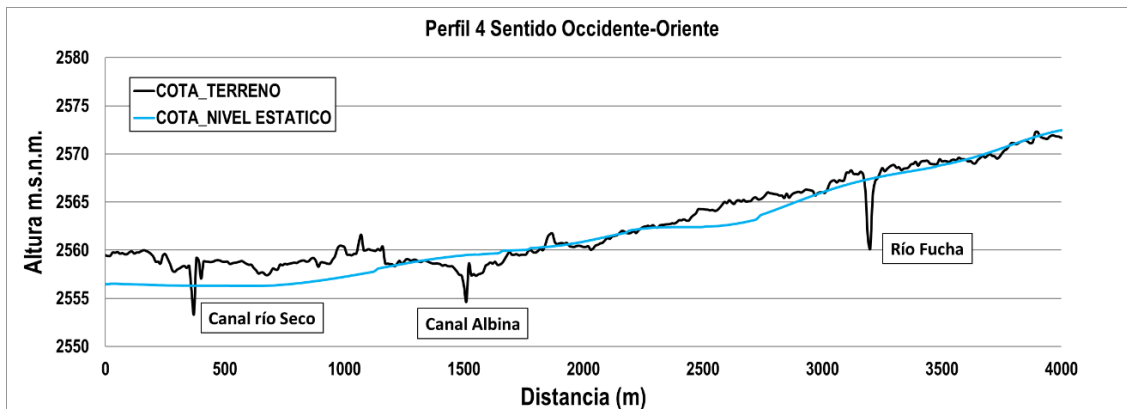


Figura 5-17 Perfil 4 sentido Occidente Oriente. Canal Río Seco, Canal Albina y Río Fucha.
A) DEM inicial B) DEM corregido.

Finalmente, en el perfil 4, los niveles mantienen la deriva señalada por la cota topográfica señalando una dirección clara de las cotas más altas a las más bajas. El perfil sugiere que existe una conexión de los niveles con el río Fucha y al parecer esta conexión está presente con el canal río Seco.

Con relación a los canales, debido a su impermeabilización es de esperar que no se vislumbre una interrelación entre el nivel piezométrico y el nivel presente a superficie libre en el canal. En efecto, en el Perfil 3 y 4, no se evidencia una relación directa en estos niveles, presentándose diferencias en torno a los 2 metros.

5.10 Esquema del Modelo Conceptual

En la zona de estudio, en función de la arquitectura geológica, la hidrología, la hidráulica y la hidrogeología, se seleccionaron 10 perfiles los cuales se presentan en Figura 5-18. En función de la descripción hidrogeológica detallada en la sección 4.1 se construyeron 10 perfiles hidrogeológicos. A continuación, se describen los perfiles O-O' y J-J'.

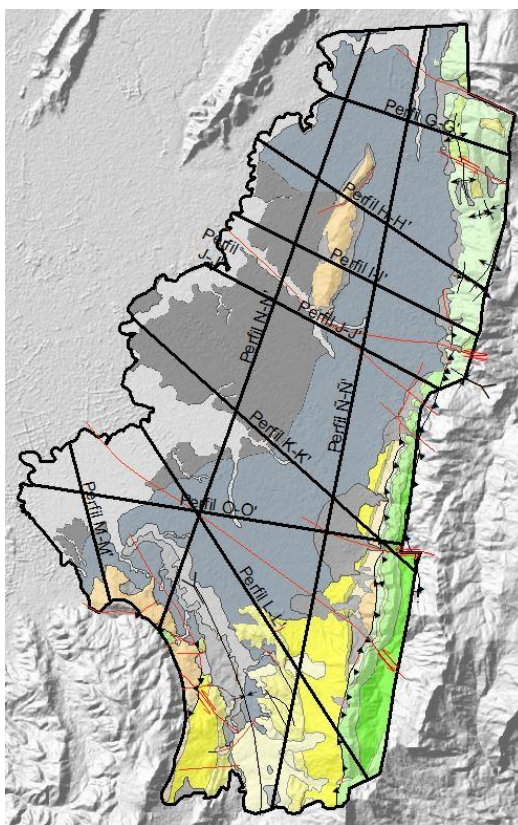


Figura 5-18. Localización de los perfiles hidrogeológicos para la zona de estudio.

El perfil O-O' (Figura 5-19) atraviesa la zona de estudio desde los cerros orientales a la altura del cerro de Monserrate hasta el occidente a San Bernardino XII-río Bogotá en Bosa. Como entradas se tiene una recarga en el pie de monte producto de la precipitación directa y escorrentía-infiltración en sectores no urbanizados, una recarga natural producto de la precipitación en la ciudad (la cual es muy baja a nula) y una recarga que percola a través de la zona no saturada producto de las pérdidas de la

red de acueducto y alcantarillado. Esta última recarga se tendrá que analizar más a fondo mediante simulaciones numéricas 1D de la zona no saturada con el objetivo de cuantificar el efecto que tiene la estratificación arcillosa en el volumen de infiltración.

Una importante entrada al sistema proviene de la recarga en el piedemonte y que se desarrolla en la formación Río Tunjuelito. El agua es movilizada principalmente por la formación Sabana y la formación Subachoque. En el piedemonte de la formación Río Tunjuelito se presenta un flujo local, mientras que el flujo intermedio se desarrolla entre esta formación y la formación Sabana. El desarrollo de flujos regionales se da principalmente entre la formación Río Tunjuelito y la formación Subachoque los cuales se pueden ver afectados por las fallas transversales San Cristóbal Y Bojacá. La subdivisión de los sistemas de flujo se hace con respecto a la escala del problema analizado, en este caso el perfil O-O'. En estas zonas posiblemente se tenga la presencia de flujos verticales con su consecuente mezcla de aguas. Esta mezcla de aguas puede causar datos anómalos en cuanto a química y puede arrojar edades del agua inconsistentes con los flujos conceptualizados. En este perfil no se tienen pozos de explotación, por este motivo no se analiza el comportamiento de los niveles piezométricos.

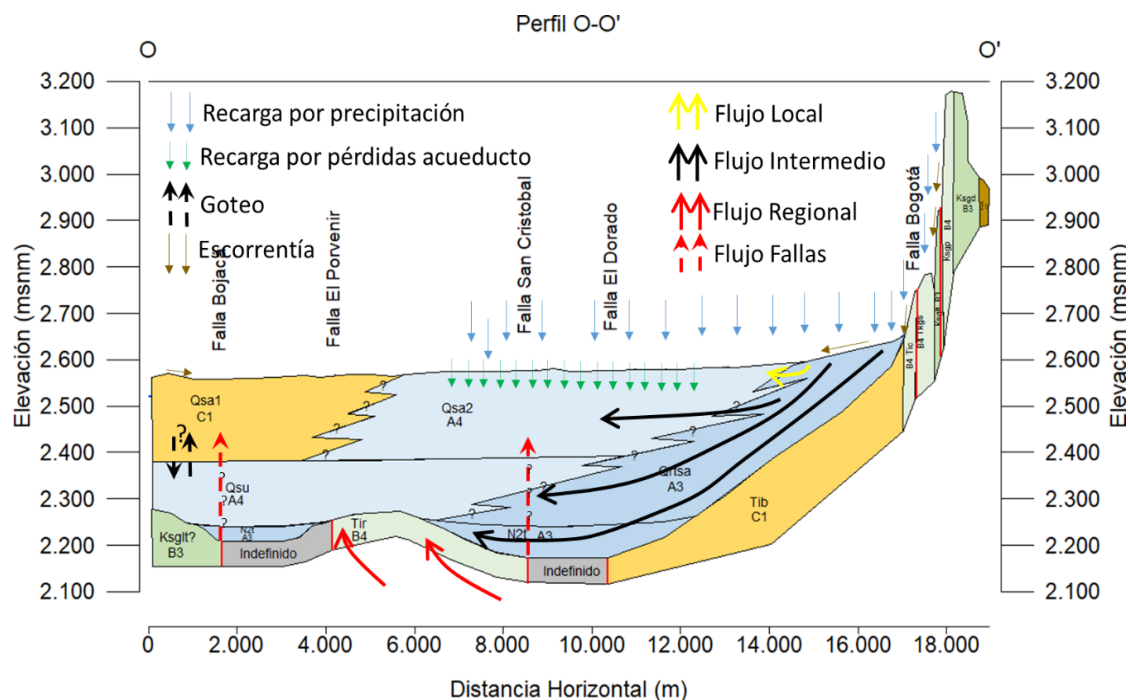


Figura 5-19 Representación gráfica del perfil hidrogeológico O-O'

El perfil J-J' (Figura 5-20) atraviesa la zona de estudio desde los cerros a la altura de los bosques de Bellavista (aprox. Calle 99 con Cr 3) hasta la sabana de Tibabuyes con el río Bogotá (aprox. Cr 150 con Calle 143). Al igual que en el perfil anterior, las entradas están dadas por la recarga natural debido a la precipitación y por las pérdidas del sistema de acueducto y alcantarillado. Similarmente, una entrada importante al sistema se da por el piedemonte donde se tienen flujos locales y su evidencia se ve reflejada en los pozos artesianos presentes en la zona. Los flujos intermedios se desarrollan en la formación Sabana y los flujos regionales abarcan la formación Sabana, Subachoque y Tilatá. Existe un flujo regional de poca importancia con respecto a las velocidades de Darcy que abarcan las

formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Guaduas y finalmente la formación Labor y Tierna. Al mismo tiempo en esta zona el intercambio vertical de agua con el sistema Neógeno-Cuaternario no es de mucha menor magnitud que el flujo subhorizontal que se desarrolla en esta zona. En este perfil se evidencia la presencia de pozos de bombeo los cuales están todos localizados en la formación Sabana (Qsa2). La formación Sabana (Qsa1) que se aflora en la parte final del perfil y que presenta una baja permeabilidad incide en que el flujo sea redireccionado hacia la formación Subachoque. El agua disponible en esta formación (Qsa1) es producto del goteo desde la formación Qsa2 y la Subachoque

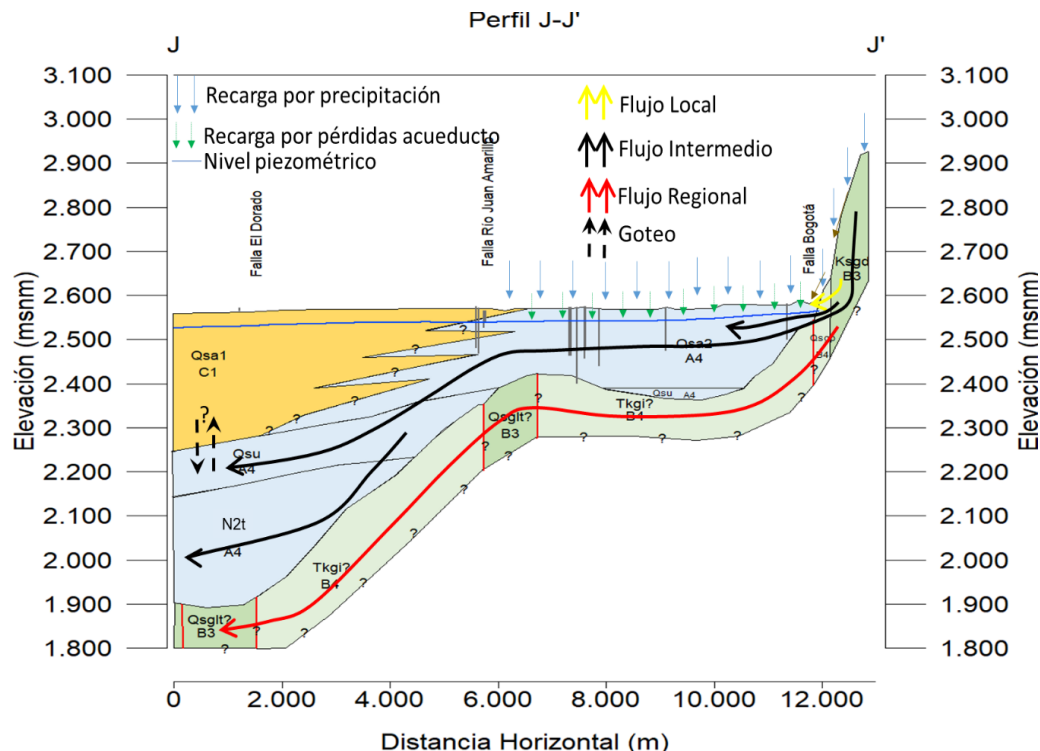


Figura 5-20. Representación gráfica del perfil hidrogeológico J-J'

Como se comentó anteriormente, se usó el software RockWorks para generar un modelo 3D geológico. Este modelo fue usado para representar esquemáticamente como es el funcionamiento hidrogeológico (entradas, salidas, almacenamientos) de la zona de estudio. El sistema hidrogeológico del distrito de Bogotá es complejo debido a su arquitectura geológica, la presencia de fallas y su régimen hidrológico. Las diferentes depositaciones de material, generaron una anisotropía muy marcada en el sentido vertical y esto se ve reflejado en la presencia de los diferentes estratos. Los cuales presentan variaciones en permeabilidades de varios órdenes de magnitud.

Con el análisis de la geología a escala regional (Para el acuífero somero) se puede intuir que la recarga en el sistema es poco probable, pero, al analizar más a detalle, se encuentra esta continuidad lateral que se desarrolla hasta los límites del distrito y que finalmente permite concluir que se tiene una presencia de lentes acuíferos. Es así, que el agua que se recarga en los cerros orientales alimenta estos lentes y son los que permiten tener un balance con las extracciones. Esto se ve reflejado en que, para el régimen de explotación actual, los niveles en la mayoría de los casos están presentando una leve recuperación. Con excepciones puntuales (descrito en el apartado 5.7.2).

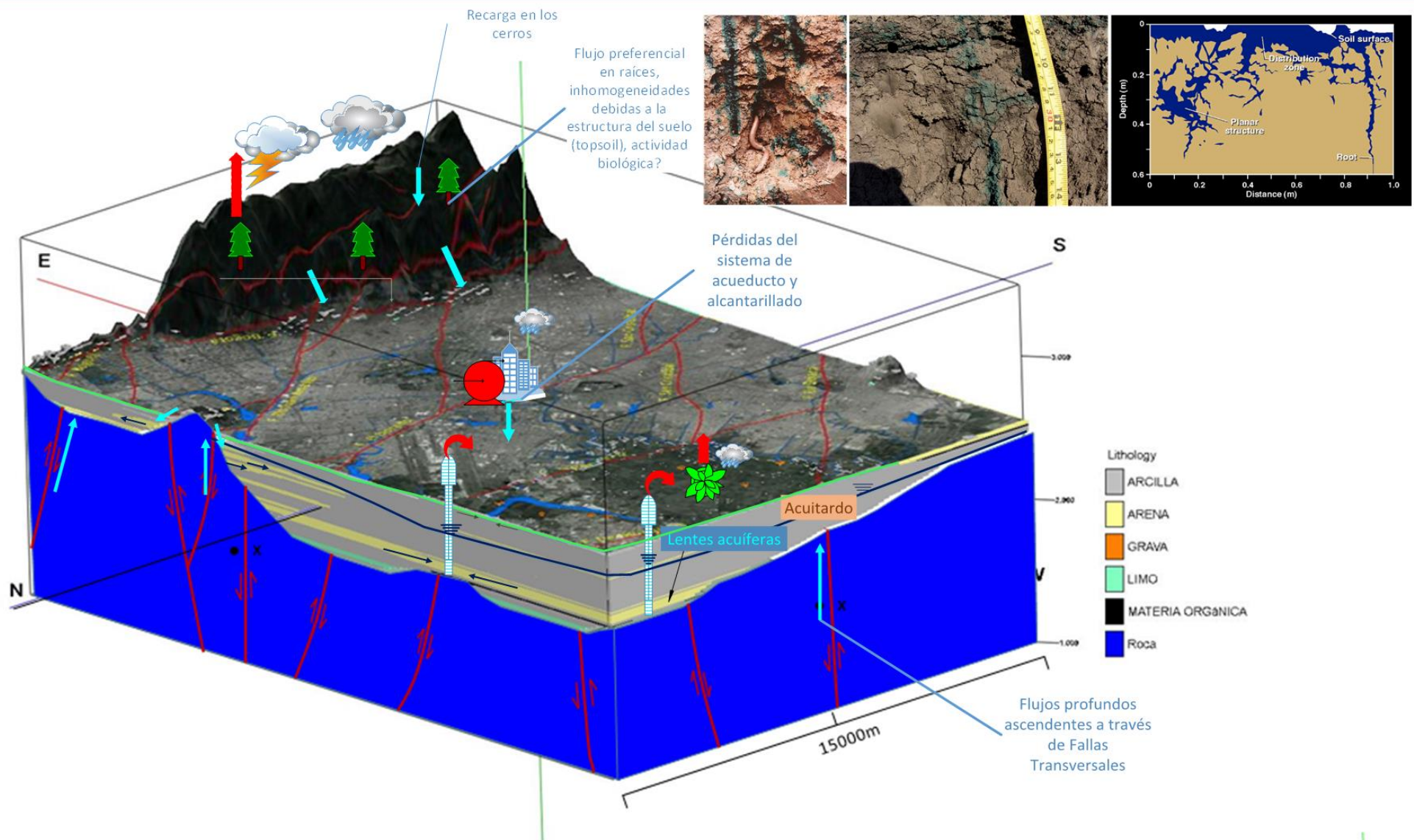


Figura 5-21. Representación gráfica del modelo hidrogeológico conceptual.

BOGOTÁ

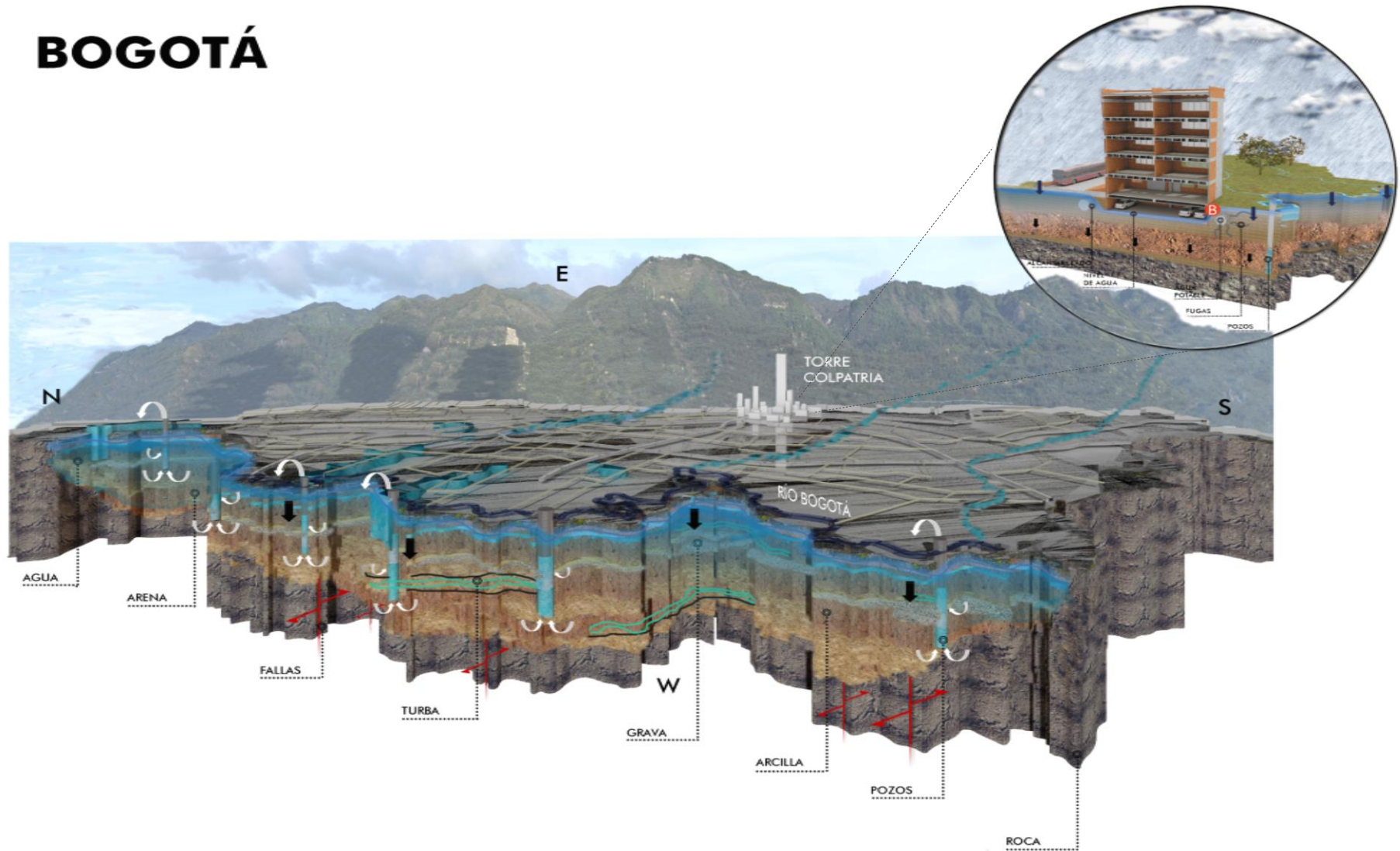


Figura 5-22 Representación gráfica del modelo hidrogeológico conceptual.

Las entradas al sistema vienen condicionadas por el régimen de precipitación y por el tipo de formación geológica presente. Las litologías que más permiten la recarga son los afloramientos de las formaciones Labor – Tierna y la formación Arenisca dura, esto, debido a su nivel de fracturamiento. La formación Sabana permite una recarga en su afloramiento y permiten un mayor tránsito del agua sin dejar de tener presente que lo hace con unas velocidades de Darcy bajas. La formación Guaduas que aflora al sur oriente del distrito permite también una recarga al sistema. A una escala local se puede decir que por su litología (muchísima arcilla) la sabana presenta bajas tasas de recarga, sin embargo, a nivel regional (mirando toda la sabana), si se multiplica estas tasas por la extensión total de la sabana resulta que esta recarga se convertiría en uno de los componentes principales de la recarga asociados al sistema regional de la sabana. Esto debido a que los afloramientos de roca permeables son limitados con respecto a toda la sabana.

Si bien, en el perímetro urbano, se tiene una recarga muy baja o nula debido a la impermeabilización causada por las obras civiles, se debe analizar si existe un aporte debido a las pérdidas del sistema de acueducto y alcantarillado. Las pérdidas del sistema para el distrito se estiman entre 300mm/año y 600mm/año por este motivo es importante realizar un modelo 1D en donde se evalué para una estratigrafía dada cuanto volumen puede finalmente entrar al sistema como recarga.

Como salidas del modelo se tiene caudales de extracción de los pozos concesionados y una aparente pérdida potencial del sistema Neógeno-Cuaternario hacia el complejo Guadalupe, esto soportado en la aparente diferencia de niveles piezométricos. Las tendencias analizadas en el apartado 5.7.2 (aparente recuperación de niveles en algunos sectores del distrito capital), parece indicar que la recarga del sistema en estos sectores está siendo mayor a las salidas y producto de esto se está presentando una leve recuperación de los niveles (se aclara que este análisis se realiza puntualmente y con series de datos cortas en el mayor de los casos). Según las interpolaciones de niveles realizadas (Figura 5-4) la descarga se estaría dando hacia el occidente del distrito.

La presencia de fallas transversales como la falla río Bojacá y la falla San Cristóbal, pueden permitir un flujo ascendente el cual generaría una mezcla de aguas entre los flujos regionales, intermedios y locales. Este flujo ascendente es evidente en el club Los Lagartos en donde se tiene una medida anómala de temperatura.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente modelo 3D fue concebido como una aproximación de la “realidad” ~~o hidrogeología~~ teniendo en cuenta que incluyó las perforaciones con información del subsuelo existente, por tanto se recomienda la incorporación de mayor cantidad de pozos que permitan tener mayor detalle del contacto con roca a lo largo del distrito y de esta manera definir con mayor precisión el espesor de estos depósitos no consolidados, y los registros litológicos para monitorear las correlaciones obtenidas.

Se desconoce en gran parte el papel de las fallas geológicas sobre estos depósitos, por tanto, se sugiere estudios concretos de neotectónica que permitan precisar hasta qué punto estas fallas podrían interferir en la continuidad de las unidades más inferiores y también la interacción de los diferentes cuerpos de agua producto de esta actividad.

6.1 Construcción del modelo conceptual

- Se revisó la información disponible con el objetivo de recopilar las propiedades de las diferentes formaciones geológicas. Estas se incluyen en la leyenda del mapa hidrogeológico (Anexo D).
- Con respecto a la distribución de los valores de pH en las aguas subterráneas del distrito, el valor más ácido (4.6) fue medido en el pozo Petco el cual tiene una profundidad de 115 metros, capta los depósitos no consolidados y está localizado al sur de la ciudad. Este valor no hace parte de la tendencia típica de los pozos que se encuentran alrededor de la zona donde esta este pozo. El valor más básico (8.6) se localiza al nororiente de la ciudad. De nuevo, este valor no es representativo de los valores de la zona. La distribución espacial del muestreo muestra que los valores entre 5.6 a 8.5 se encuentran dispersos por todo el dominio.
- Las zonas donde se tienen los máximos descensos del nivel no presentan ninguna relación con los valores de pH, a excepción de la zona sur donde se encuentra una concentración de pH bajos.
- La temperatura del agua subterránea en el piedemonte y en la zona entorno a esta se mantiene entre los 18°C - 20°C, presentándose un aumento hacia el occidente. Esto debido a que la captación, más hacia el occidente, se hace en pozos más profundos. Al sur de la ciudad se tienen dos puntos con temperaturas altas (Carboquímica N4, 34.80C y La Fayette 27.20C). Estos puntos coinciden con las mayores explotaciones y los mayores descensos del nivel.
- Los valores de Conductividad Eléctrica (CE) son más bajos (en torno a 20µS) en las zonas de piedemonte, presentando un aumento (entorno a los 1850 µS/cm) hacia el oeste de la cuenca. Este comportamiento de la CE es típico de zonas donde el agua de recarga va teniendo un enriquecimiento producto del intercambio iónico.
- No es claro un enriquecimiento en Cl⁻ a medida que el agua subterránea va avanzando hacia el interior de la cuenca de la Sabana de Bogotá (esto bajo el supuesto que las líneas de flujo avanzan desde los cerros orientales hacia el occidente). Esta falta de enriquecimiento en la dirección del flujo sugiere que los materiales geológicos de la sabana de Bogotá no son fuentes importantes de este elemento. Es posible que los valores altos de Cloruros que se registran en las zonas de mayor explotación del recurso, estén relacionados con actividades

antrópicas que están influyendo en los valores. Este fenómeno hace que se genere una especie de aleatoriedad espacial en los datos.

6.2 Modelo hidrogeológico conceptual

- Las campañas de (SDA, 2013) y (UNAL, 2006) por la cantidad y por la distribución espacial de los datos permitieron realizar un análisis tanto en magnitudes como en evolución temporal teniendo en cuenta los 8 años que separan estas dos campañas. En estas dos campañas se puede observar que no se ha dado un cambio significativo en los descensos y se han mantenido prácticamente constantes. Es de aclarar que no se observa una tendencia de descenso de los niveles como se afirma en otras investigaciones.
- Los menores descensos se encuentran entorno a la zona del Carmel Club (autopista norte con calle 153). Los mayores abatimientos se encuentran entre el aeropuerto, pasando por el parque Simón Bolívar y Puente Aranda y al sur de la ciudad entorno al cementerio del Apogeo.
- Se realizó una sectorización de los niveles en función de los abatimientos con el objetivo de poder analizar para cada pozo los datos de nivel disponibles para diferentes periodos de tiempo. De la sectorización se puede concluir que en general los niveles parecen tener una recuperación. Este efecto queda enmascarado en las interpolaciones debido a que si se tiene al menos un pozo con un descenso considerable la interpretación hace pensar que es representativo de toda la zona.
- Se ha realizado una primera estimación de la recarga mediante el método del balance de Cloruros usando los datos de cloruros en los manantiales descritos en (Ingeominas, 2001) y usando las estaciones pluviométricas en las cuales se tiene medida de Cloruros y que se encuentran en la zona de estudio. La metodología sugiere una recarga entorno a los 143mm/año.
- El sistema hidrogeológico del distrito de Bogotá es complejo debido a su arquitectura geológica, la presencia de fallas y su régimen hidrológico. Las diferentes depositaciones de material, generaron una anisotropía muy marcada en el sentido vertical y esto se ve reflejado en la presencia de los diferentes estratos. Los cuales presentan variaciones en permeabilidades de varios órdenes de magnitud.
- Con el análisis de la geología a escala regional (para los primeros 100m) se podría inferir que la recarga en el sistema es poco probable, debido a que esta sugiere una ausencia de conectividad lateral con las zonas de piedemonte. Pero, al analizar los perfiles del metro de Bogotá se evidencia lo contrario. Se encuentra una continuidad lateral que se desarrolla hasta los límites del distrito y que finalmente permite concluir que se tiene una presencia de lentes acuíferos.
- Las entradas al sistema vienen condicionadas por el régimen de precipitación y por el tipo de formación geológica presente. Las zonas que más permiten la recarga son los afloramientos de las formaciones Labor – Tierna y la formación Arenisca dura, esto, debido a su nivel de fracturamiento. La formación Sabana permite una recarga en sus afloramientos y es la que permite un mayor tránsito del agua sin dejar de tener presente que lo hacen con unas velocidades de Darcy bajas.
- Si bien, en el perímetro urbano, se tiene una recarga muy baja o nula debido a la impermeabilización causada por las obras civiles, se debe analizar si existe un aporte debido

a las pérdidas del sistema de acueducto y alcantarillado. Las pérdidas del sistema para el distrito se estiman entre 300mm/año y 600mm/año por este motivo es importante realizar un modelo 1D en donde se evalué para una estratigrafía dada cuanto volumen puede finalmente entrar al sistema como recarga real.

- Como salidas del modelo se tiene caudales de extracción de los pozos concesionados y la descarga del sistema. Las tendencias analizadas en la sección 4.2.1, parece indicar que la recarga del sistema está siendo mayor a las salidas y producto de esto se está presentando una leve recuperación de los niveles (se aclara que este análisis se realiza puntualmente y con series de datos cortas en el mayor de los casos).
- La presencia de fallas transversales como la falla Río Bojacá y la Falla San Cristóbal, pueden permitir un flujo ascendente el cual generaría una mezcla de aguas entre los flujos regionales, intermedios y locales. Este flujo ascendente es evidente en el club Los Lagartos en donde se tiene una medida anómala de temperatura.
- Del análisis analítico 2D, se logró diferenciar que las zonas de recarga se extienden más al oriente de la divisoria de aguas oriental del Distrito, al igual que hacia el occidente. Que se tienen descargas en la zona de piedemonte (flujos locales), descargas a través de las fallas transversales hacia el Cuaternario. Que los tiempos de tránsito van desde cientos de años a miles de años. Dado lo anterior se distinguen flujos regionales, intermedios y locales, con una distribución diferente al sur y al norte de la ciudad. Se evidencia la probabilidad de flujos verticales, provenientes de la recarga en los cerros, que viajan a través de los depósitos consolidados, en especial el Grupo Guadalupe y ascienden hasta el cuaternario. Los parámetros más sensibles en el modelo son la conductividad hidráulica y las condiciones de recarga en la zona de los cerros.
- A pesar de no estar incluida en el alcance del presente convenio, se realizó una modelación analítica preliminar 3D (en elementos analíticos o AEM) en estado estacionario por medio de la herramienta AnAqSim. El modelo 3D fue útil para explorar: (i) si el sistema Neógeno-Cuaternario del Distrito Capital está conectado hidráulicamente con el resto de la sabana, según indicaciones previas del modelo geológico 3D, (ii) si, previo al desarrollo del bombeo (estado estacionario), el sistema Neógeno-Cuaternario podía recibir recarga natural, (iii) potenciales salidas del sistemas hacia otros sectores del valle superior de la cuenca del Río Magdalena, notablemente sectores ubicados a elevaciones topográficas más bajas, en dirección del Río Magdalena.

El modelo 3D sugiere que:

- El sistema estacionario era compatible con una recarga directa baja, del orden de 20-30mm en promedio, a lo largo de toda la sabana.
- El sistema tiene entradas laterales y por debajo debido a los aportes de agua de las zonas de los cerros y de los piedemontes.
- Sin embargo, hacia las partes más profundas del relleno Neógeno-Cuaternario, es posible que el sistema pierda agua hacia sectores del valle superior de la cuenca del Río Magdalena ubicados a cotas más bajas o a través de zonas de fallas.
- Si no se incluyen entradas y salidas al sistema, de acuerdo con lo inferido anteriormente, no es posible generar una superficie piezométrica que refleje el comportamiento esperado en la

región, y que refleje un equilibrio hidrodinámico antes del bombeo intensivo de aguas subterráneas.

- El modelo analítico 3D se ha mantenido simple para explorar mejor las hipótesis alrededor del funcionamiento del sistema. En este sentido, esta herramienta tiene que interpretarse solo como un apoyo a la modelación conceptual y no puede ser utilizada para realizar predicciones del sistema antes presiones futuras. Para construir una herramienta de gestión es necesario escalar la modelación realizada.

6.3 Incertidumbre

- Se tiene incertidumbre asociada a la información recopilada en la base de datos de pozos en la Sabana y en el Distrito, especialmente en los atributos de profundidad de extracción (para un mismo pozo se reportaban dos o más profundidades), caudales de extracción (gran parte reportados como el caudal concesionado), clasificación de pozos activos y no activos y ubicación de los filtros.
- Se tiene incertidumbre en la medición de los niveles estáticos, generalmente, las entidades requieren interrumpir el bombeo 24 horas antes de la medición del nivel en el pozo. En algunos casos, sin embargo, la recuperación del nivel en el pozo es lejos del 90% o 95% generalmente requerido para el registro del nivel estático y para realizar nuevas pruebas de bombeo. Por lo tanto, cuando se reporta este nivel como estático y se utiliza para realizar mapas de isopiezas, se está considerando, erróneamente, la condición pseudoestática como representativa del estado del recurso a nivel regional.
- La incertidumbre del nivel estático, también se asocia a diseño de los pozos. En el área de estudio los pozos de bombeo suelen tener grandes longitudes de la zona de respuesta, por ejemplo, en pozos de bombeo para fines productivos, que tienen como objetivo principal maximizar el caudal a extraer en el pozo, por lo que se dejan empaques de grava a lo largo de toda la longitud del pozo.
- Con respecto al balance hídrico global de la sabana de Bogotá, a la cual pertenece el área de estudio del Distrito, existen incertidumbres principalmente relacionadas con:
 - Entradas/salidas de agua subterránea desde la base del Complejo Neógeno-Cuaternario desde/hacia el complejo Paleógeno o Guadalupe.
 - Propagación de la infiltración efectiva (es decir la resta entre la infiltración en el suelo y la evapotranspiración desde el mismo) asociadas con las pérdidas de la red de acueducto y alcantarillado de Bogotá, hacia horizontes más profundos del relleno Cuaternario.
 - Incertidumbre en los volúmenes de agua bombeados del sistema, que se pueden atribuir a la falta de un inventario actualizado de captaciones en la sabana de Bogotá.
- Se realizaron unos perfiles en los cuales se compara la cota topográfica con la piezometría estimada a partir de los niveles medidos en las EDS y el nivel presente en los humedales. Normalmente en las zonas donde se tiene una buena densidad de puntos los niveles piezométricos se encuentran por debajo de la cota del terreno. Esto no ocurre en su mayoría a la hora de revisar el comportamiento entre los humedales y las aguas subterráneas en donde estas últimas normalmente quedan por sobre el nivel del humedal. Debido a esto se recomienda hacer una campaña en donde se tomen los niveles de los humedales y poder mejorar estas comparaciones.

6.4 Recomendaciones

El modelo hidrogeológico conceptual generado por la PUJ sirve como insumo para la generación de una Herramienta de Gestión, la cual se considera el objetivo a alcanzar por parte de la SDA. Se recomienda entonces la construcción de una herramienta de gestión para el recurso hídrico subterráneo, que genere diferentes tipos de reportes para el seguimiento y evaluación de las concesiones de agua subterránea. La herramienta debe incorporar Indicadores que ayuden a la toma de decisiones para la aprobación de concesiones de agua subterránea. Así mismo, la herramienta debe tener un subsistema de alertas tempranas de calidad de agua y explotación no controlada de agua subterránea (descenso de niveles), y estar alineada con la definición de zonas de protección o zonas de riesgo. Los pozos de la red de monitoreo deben tener conexión telemétrica para visualización en tiempo real de los datos a través de la herramienta de gestión.

Es óptimo que la herramienta disponga de un geovisor que permita la consulta y descarga de datos hidrogeológicos históricos por sectores y por variables (ej. datos hidroclimatológicos, geológicos, parámetros hidráulicos del acuífero, niveles, parámetros hidrogequímicos), ya sea para uso interno de la SDA o para descarga del público de acuerdo a las políticas que se establezcan por parte de la Secretaría.

Para llegar a la construcción de dicha herramienta se requiere avanzar en:

- El desarrollo de un modelo matemático 3D mejorado que permita incorporar la información que se viene colectando a través de diferentes políticas actuales de la SDA. Esta herramienta serviría para potencializar el uso de esta información y para apoyar la toma de decisiones.
- La creación de indicadores para la toma de decisiones en concesiones, seguimiento de concesiones vigentes (cantidad y calidad) y acciones que aseguren el aprovechamiento sostenible.
- Apoyo en la transferencia de datos a través de un geovisor que permita la integración de bases de datos, para evitar manejo redundante de la información. Este geovisor estaría alimentado por una geodatabase dinámica capaz de asimilar datos de manera ágil y eficaz.
- Paralelo al desarrollo de las fases mencionadas, es fundamental continuar con los programas de monitoreo de caudales de bombeo y niveles que actualmente realiza la SDA. Adicionalmente, se sugiere llevar a cabo pruebas de bombeo en diferentes sectores del distrito con mediciones en piezómetros cercanos, para la estimación de las propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas (coeficiente de almacenamiento, conductividad hidráulica), que permitan reducir la incertidumbre en la estimación de las reservas.

Es muy importante que los esfuerzos que se lleven a cabo para la construcción de la herramienta se trabajen de forma integrada con las demás herramientas que ha venido desarrollando la SDA a través del centro de modelación.

7 ANEXOS

ANEXO A Bases de datos de información secundaria

ANEXO B-Estudio de magnetotelúrica en el Parque Zona Franca

ANEXO C-Informe de perforación del pozo profundo

ANEXO D-Mapa modelo hidrogeológico conceptual

ANEXO E – Salidas Rockworks - 17

8 BIBLIOGRAFIA

- Acosta, Jorge and Carlos Ulloa. 2001a. Geología Plancha 227 La Mesa.
- Acosta, Jorge and Carlos Ulloa. 2001b. Geología Plancha 246 Fusagasugá.
- AIH, Asociación Internacional de Hidrogeólogos. 1995. Leyenda Internacional de Los Mapas Hidrogeológicos.
- Álvarez, A. 1998. “Acuíferos de La Formación Tilatá (Mioceno-Plioceno) En Dos Pozos Del Suroeste de La Sabana de Bogotá.” *Geología Colombiana* (23):79–95.
- Álvarez, Alberto. 1997. “Gestión Del Agua Subterránea En La Sabana de Bogotá.” (22):81–101.
- Anderson, Mary, William W. Woessner, and Randall Hunt. 2015. *Applied Groundwater Modeling, Second Edition: Simulation of Flow and Advective Transport*.
- CAR. 2008. Plan De Manejo Ambiental de Agua Subterránea En La Sabana de Bogotá y Zona Crítica Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Cardenas, M. Bayani. 2008. “Surface Water-Groundwater Interface Geomorphology Leads to Scaling of Residence Times.” *Geophysical Research Letters* 35(8):L08402.
- Cooper, M. A. et al. 1995. “Basin Development And Tectonic History Of The Llanos Basin, Eastern Cordillera And Middle Magdalena Valley, Colombia.” *AAPG Bulletin Boletín Servicio Geológico Nacional* 79(1319).
- Corredor, Victoria and Roberto Terraza. 2015. Geología Plancha 228 Bogotá Noreste.
- EAAB-JICA. 2003. Estudio Del Desarrollo Sostenible Del Agua Subterránea En La Sabana de Bogotá. Bogotá.
- EAAB-JICA. 2009. “Estudio de Abastecimiento Sostenible de Agua Para La Ciudad de Bogotá y Áreas Circundantes Basado En El Manejo Integrado de Recursos Hídricos En La República de Colombia.”
- Fitts, C. R. 2010. “Modeling Aquifer Systems with Analytic Elements and Subdomains.” *Water Resources Research* 46(7):n/a-n/a. Retrieved March 30, 2017 (<http://doi.wiley.com/10.1029/2009WR008331>).
- Freeze, R. Allan and P. A. Witherspoon. 1966. “Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow: 1. Analytical and Numerical Solutions to the Mathematical Model.” *Water Resources Research* 2(4):641–56.
- Van der Hammen, T., J. H. Werner, and H. van Dommelen. 1973. “Palynological Record of the Upheaval of the Northern Andes: A Study of the Pliocene and Lower Quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the Early Evolution of Its High-Andean Biota.” *Review of Palaeobotany and Palynology* 16(1–2).
- van der Hammen, Thomas and Henry Hooghiemstra. 1997. “Chronostratigraphy and Correlation of the Pliocene and Quaternary of Colombia.” *Quaternary International* 40(96):81–91.

- Helmens, K. F. and T. Van der Hammen. 1994. "The Pliocene and Quaternary of the High Plain of Bogotá?? (Colombia): A History of Tectonic Uplift, Basin Development and Climatic Change." *Quaternary International* 21(C):41–61.
- Helmens, Karin. 1990. "Neogene-Quaternary Geology of the High Plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia : Stratigraphy, Paleoenvironments and Landscape Evolution." 202. Retrieved April 27, 2017 (<http://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783443640750/%23?l=EN>).
- Hidrogeocol Ltda, PNUD, and DAMA. 2000a. Elaboración Del Modelo Hidrogeológico Para Los Acuíferos de Santa Fe de Bogotá, D.C.
- Hidrogeocol Ltda, PNUD, and DAMA. 2000b. Elaboración Del Modelo Hidrogeológico Para Los Acuíferos de Santa Fe de Bogotá, D.C. Retrieved (http://oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/elaboracion_del_modelo_hidrogeologico_para_los_acuiferos_de_santa_fe_de_bogota_dc.pdf).
- Ingeominas. 1991. Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de La Sabana de Bogotá. Mapa Hidrogeológico Sector Tibito-Salto de Tequendama. Bogotá.
- Ingeominas. 2001. Caracterización Geoquímica e Isotópica de Los Acuíferos de La Cuenca Alta Bogota. Bogotá.
- Ingeominas. 2005. Geología de La Sabana de Bogotá.
- INGEOMINAS. 2002a. Modelo Hidrogeologico Conceptual de La Sabana de Bogota, INGEOMINAS-OIEA COL 8019.
- INGEOMINAS. 2002b. Modelo Hidrogeológico Conceptual de La Sabana de Bogota. Recursos, Subdireccion Subsuelo, D E L Tecnicas, Aplicacion D E En, Isotopicas Aguas, L O S Estudios D E.
- INGEOMINAS, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. 1997. Microzonificación Sísmica De Santa Fé De Bogotá. Retrieved May 18, 2017 (http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/Microzonificacion_de_Bogota_1993.pdf).
- Julivert, M. 1962. "Estudio Sedimentologico de la Parte Alta de La Formación Guadalupe de Bogotá (Cretacico Superior)." 10:25–54.
- Kuhry-Helmens, Karin F. 1990a. Neogene-Quaternary Geology of the High Plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia : Stratigraphy, Paleoenvironments and Landscape Evolution. J. Cramer. Retrieved April 25, 2017 (<http://www.schweizerbart.de/publications/detail/artno/064016300?l=EN>).
- Kuhry-Helmens, Karin F. 1990b. Neogene-Quaternary Geology of the High Plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia : Stratigraphy, Paleoenvironments and Landscape Evolution. J. Cramer.
- Lobo-Guerrero, Alberto. 1992. "Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y Su Sabana." Retrieved March 27, 2017 (http://www.logemin.com/eng/Download/pdf/16_Geologia_hidrogeologia_Sabana_Bogota.pdf).
- Lobo-Guerrero, Alberto Sanz. 1996. "Excursión Geológica Por La Sabana de Bogotá." 26.

- Lobo-Guerrero Uscátegui, Alberto. 2005. “La Falla de Bogotá En Cundinamarca.”
- Maréchal, J. C., R. Wyns, et al. 2004. “Vertical Anisotropy of Hydraulic Conductivity in the Fissured Layer of Hard-Rock Aquifers Due to the Geological Structure of Weathering Profiles.” *Journal of the Geological Society of India* 63(5):545–50. Retrieved (http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/46/67/18/PDF/JGSI_2004.pdf).
- Maréchal, J. C., B. Dewandel, and K. Subrahmanyam. 2004. “Use of Hydraulic Tests at Different Scales to Characterize Fracture Network Properties in the Weathered-Fractured Layer of a Hard Rock Aquifer.” *Water Resources Research* 40(11):1–17.
- Montoya, Diana and German Reyes. 2005. *Geología de La Sabana de Bogotá*. Bogotá. Retrieved March 27, 2017 (https://choconta.files.wordpress.com/2007/12/informe_geologia_sabana_bta.pdf).
- Ochoa, D. et al. 2012. “The Final Phase of Tropical Lowland Conditions in the Axial Zone of the Eastern Cordillera of Colombia: Evidence from Three Palynological Records.” *Journal of South American Earth Sciences* 39:157–69.
- Patiño, Alejandro et al. 2011. *Geología Plancha 247 Cáqueza*. Escala 1:100.000.
- PNUD, DAMA, and Hidogeocol. 1999. *Elaboracion Del Modelo Hidrogeologico Para Los Acuiferos De Santa Fe De Bogota, D.C.* PNUD/COL/96/023.
- Rodriguez, C.O; Jiménez, G. 1986. “Datación Del Agua Subterránea de La Sabana de Bogotá y Sus Implicaciones Hidrogeológicas.” *Geología Colombiana* 205–18.
- Sarmiento, L., J. Van Wess, and S. Cloetingh. 2006. “Mesozoic Transtensional Basin History of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from Tectonic Models.” *Journal of South American Earth Sciences* 21(4):383–411.
- SDA. 2013. *Sistema De Modelamiento Hidrogeológico Del Distrito Capital Bogotá*.
- SIAM. 2006. *Informe Final:Inclusión Del Balance Hídrico, Implementación Del Modelo Hidrogeológico Y Capacitación En Modflow*.
- Torres, Vladimir, Jef Vandenberghe, and Henry Hooghiemstra. 2005. “An Environmental Reconstruction of the Sediment Infill of the Bogotá Basin (Colombia) during the Last 3 Million Years from Abiotic and Biotic Proxies.” *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*.
- Tóth, J. 1963. “A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins.” *Journal of Geophysical Research* 68(16):4795–4812.
- UNAL. 2005. *Brindar Apoyo Técnico Y Actualizar Herramientas Para La Regulación Del Aprovechamiento De Las Aguas Subterráneas En Bogotá*.
- UNAL. 2006. *Brindar Apoyo Técnico Y Actualizar Herramientas Para La Regulación Del Aprovechamiento De Las Aguas Subterráneas En Bogotá*.
- Velandia, Francisco and Olga De Bermoudes. 2002. “Fallas Longitudinales y Transversales En La Sabana de Bogotá, Colombia.” 24(39). Retrieved March 27, 2017 (<http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/viewFile/3909/4258>).