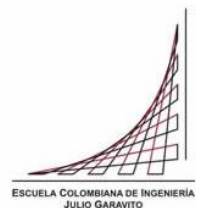


Maestría en Ingeniería Civil

Modelo hidrogeológico conceptual y matemático para el municipio de Castilla La Nueva, ubicado en el departamento del Meta

Carlos Mario Martínez Rincón

Bogotá D.C., 08 de enero de 2018

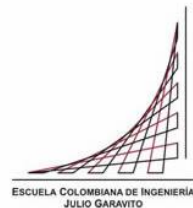


**Modelo hidrogeológico conceptual y matemático para el
municipio de Castilla La Nueva, ubicado en el departamento del
Meta**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil con
énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente**

Próspero Emiro Robles Burbano
Director

Bogotá D.C., 08 de enero de 2018



La tesis de maestría titulada “Modelo hidrogeológico conceptual y matemático para el municipio de Castilla La Nueva, ubicado en el departamento del Meta”, presentada por Carlos Mario Martínez Rincón, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente.

Director de la tesis

Próspero Emiro Robles Burbano

Jurado

Germán Ricardo Santos Granados.

Jurado

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Bogotá, D.C., 08 de enero de 2018

Resumen

Las aguas subterráneas constituyen importantes reservas de agua dulce y tienen menor susceptibilidad a los procesos de contaminación y degradación en comparación con las fuentes superficiales. De ahí la importancia de conocer su ocurrencia, distribución y principales características hidráulicas, hidrológicas e hidrogeoquímicas para una gestión adecuada y sostenible del recurso.¹

Para el estudio de las aguas subterráneas, como en muchos otros casos de ingeniería, es necesario desarrollar modelos que ayuden en el estudio del comportamiento de los principales parámetros involucrados en determinado problema.

El presente trabajo contiene información para desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual y matemático del municipio de Castilla La Nueva, ubicado en el departamento del Meta. El trabajo se elaboró con base en tres objetivos fundamentales, El primero fue profundizar en la construcción y elaboración de modelos hidrogeológicos conceptuales y matemáticos, el segundo fue conocer y aprender a utilizar la herramienta Feflow V 7.0 y el tercero desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual y uno numérico del municipio de Castilla La Nueva para aplicar los conocimientos adquiridos.

El proyecto se realizó a partir de información secundaria de siete estudios de licenciamiento ambiental: Estudio de impacto ambiental o EIA 50k, Modificación PMA Bloque Cubarral, EIA Sokay, EIA CPO10 norte, EIA CPO 10 sur, EIA Taray y EIA Ávila, los cuales desarrollaron el consorcio Megacoil y la empresa SGI Ltda.

El documento se divide en dos capítulos principales, denominados modelo hidrogeológico conceptual y modelación numérica. El primer capítulo se desarrolló con base en la metodología utilizada en el estudio nacional del agua 2014, que contiene la evaluación geológica, geofísica, hidrogeológica e hidrología del área en estudio. El capítulo sobre modelación numérica contiene información del desarrollo del modelo numérico del municipio de Castilla La Nueva, el cual está basado en la información del modelo conceptual. Para el desarrollo modelo numérico se utilizó el *software* de elementos finitos Feflow V 7.0® (p6) capaz de resolver ecuaciones de flujo, masa y transporte en medios

¹ (IDEAM, Estudio Nacional del Agua, 2014).

porosos. Para el desarrollo del trabajo de grado se utilizó la licencia de la empresa SGI Ltda, que la prestó sin costo alguno.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	16
2	MARCO CONCEPTUAL O ESTADO DEL ARTE.....	17
2.1	Definiciones.....	17
2.2	Estado del arte	19
3	MODELO HIDROGEOLOGÍCO CONCEPTUAL.....	25
3.1	Definición del área del modelo conceptual.....	27
3.2	Modelo geológico básico	28
3.2.1	Geometría y tipo de roca.....	29
3.2.1.1	Marco geológico regional	29
3.2.1.2	Estratigrafía regional	33
3.2.1.3	Delimitación de unidades hidrogeológicas y sistemas acuíferos	38
3.2.2	Marco geológico local.....	41
3.2.2.1	Geología estructural.....	41
3.2.2.2	Estratigrafía de la planicie oriental	43
3.2.2.3	Prospección geofísica y geometría del acuífero	49
3.2.2.3.1	Sondeos eléctricos verticales (SEV).....	50
3.2.3	Modelo geológico local en 3D	73
3.3	Modelo hidrológico.....	75
3.3.1	Inventario	75
3.3.2	Recarga	79
3.3.2.1	Cálculo de recarga por el método de Thomas o ABCD	81
3.3.2.1.1	Cálculo de recarga	85
3.3.2.2	Recarga potencial por métodos empíricos	90
3.3.2.2.1	Información climatológica	91
3.3.2.2.2	Comportamiento regional de la precipitación.....	93
3.3.2.2.3	Distribución espacial de la precipitación	95
3.3.2.2.4	Cálculo de recarga por métodos empíricos	96
3.3.1	Direcciones de flujo.....	99
3.4	Modelo hidráulico	100
3.4.1	Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico:.....	100

3.4.2	Propiedades hidráulicas	101
3.4.3	Análisis de las pruebas de bombeo.....	103
3.4.3.1	Metodología de análisis de pruebas de bombeo en acuíferos semiconfinados.....	105
3.4.3.2	Metodología de análisis de pruebas para pozos de gran diámetro.....	107
3.4.4	Análisis de las propiedades hidráulicas de las unidades geológicas del área en estudio	112
3.4.4.1	Propiedades hidráulicas de la unidad Qal	112
3.4.4.2	Propiedades hidráulicas de la unidad Qt	112
3.4.4.3	Propiedades hidráulicas de la unidad Qab	113
3.4.4.4	Cálculo de la capacidad específica	114
3.4.4.5	Resumen de las propiedades hidráulicas.....	115
3.5	Definición de las unidades hidrogeológicas	116
3.6	Modelo hidrogeológico conceptual.....	118
3.6.1	Condiciones de frontera	120
4	MODELACIÓN NUMÉRICA.....	121
4.1	Fundamentos.....	121
4.2	Métodos numéricos	123
4.2.1	Diferencias finitas.....	124
4.2.2	Elementos finitos.....	125
4.3	Medio poroso.....	132
4.3.1	Flujo en medios porosos saturados.....	132
4.3.1.1	Ecuaciones básicas	132
4.3.2	Dominio y geometría del modelo.....	134
4.3.3	Condiciones iniciales y de contorno (frontera).....	135
4.4	Armado del modelo.....	139
4.4.1	Definición del área de modelamiento y de la red de elementos finitos.....	140
4.4.1.1	Área del modelo.....	140
4.4.1.2	Red de elementos finitos y geometría de la red	141
4.5	Configuración del modelo en 3D.....	143
4.6	Propiedades hidráulicas.....	145
4.7	Condiciones de frontera.....	147
4.8	Calibración del modelo	150
4.8.1	Resultados de la calibración.....	151
4.8.2	Calibración con FePEST	152

4.8.2.1	Calibración por el método de zonas constantes	152
4.8.2.2	Calibración por puntos piloto.....	155
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	160
6	BIBLIOGRAFÍA.....	165

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO.....	19
FIGURA 2-2 LOCALIZACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE LICENCIAMIENTO AMBIENTAL UTILIZADOS PARA EL DESARROLLO DE LA TESIS.....	20
FIGURA 2-3 FUENTES DE INFORMACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE MODELOS HIDROGEOLÓGICOS CONCEPTUALES.....	21
FIGURA 2-4 COMPONENTES DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.	22
FIGURA 2-5 METODOLOGÍA DE TRABAJO PARA EL PROYECTO DE GRADO.....	24
FIGURA 3-1 COMPONENTES DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.	26
FIGURA 3-2 ÁREA EN ESTUDIO DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE CASTILLA LA NUEVA.....	27
FIGURA 3-3 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DESARROLLO DEL MODELO GEOLÓGICO.....	28
FIGURA 3-4 CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES.....	32
FIGURA 3-5 COLUMNA ESTRATIGRÁFICA GENERALIZADA DEL BORDE LLANERO, MACIZO DE QUETAME.....	36
FIGURA 3-6 PROVINCIAS HIDROGEOLÓGICAS. ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA 2014.....	38
FIGURA 3-7 SISTEMAS DE ACUÍFEROS. ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA 2014.	39
FIGURA 3-8 SISTEMAS DE ACUÍFEROS DEL ÁREA EN ESTUDIO.....	40
FIGURA 3-9 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ACUÍFEROS DEL ÁREA EN ESTUDIO.....	41
FIGURA 3-10 LÍNEA SÍSMICA MG-1989-1250 INTERPRETADA.....	42
FIGURA 3-11 COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES.....	44
FIGURA 3-12 PERFIL GEOLÓGICO A-A´ PLANCHA 285 SGC.....	47
FIGURA 3-13 MAPA GEOLÓGICO LOCAL DEL ÁREA EN ESTUDIO.....	48

FIGURA 3-14 MÉTODOS GEOFÍSICOS PARA LAS EVALUACIONES HIDROGEOLÓGICAS	49
FIGURA 3-15 DENSIDAD DE SONDEOS ELÉCTRICOS, DE ACUERDO CON LA ESCALA DEL MODELO	50
FIGURA 3-16 DISPOSITIVO TETRAELECTRÓDICO SIMÉTRICO DE SCHLUMBERGER.	51
FIGURA 3-17 LOCALIZACIÓN DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES.	51
FIGURA 3-18 EJEMPLO DE UN CORTE GEOELÉCTRICO DE DOS CAPAS.	53
FIGURA 3-19 EJEMPLO DE UN CORTE GEOELÉCTRICO DE DOS CAPAS.	54
FIGURA 3-20 POSIBLES CURVAS DE RESISTIVIDAD APARENTE QUE SE OBTENDRÍAN SOBRE DOS CAPAS.	54
FIGURA 3-21 EJEMPLO DE UN CORTE GEOELÉCTRICO DE TRES CAPAS.	55
FIGURA 3-22 GRÁFICA DE LOS MÁRGENES DE VARIACIÓN MÁS COMUNES EN ALGUNAS ROCAS, MINERALES Y QUÍMICOS.	65
FIGURA 3-23 MAPA DE ISORESISTIVIDAD DE LA CAPA GEOELÉCTRICA 1.	66
FIGURA 3-24 MAPA DE ISORESISTIVIDAD DE LA CAPA GEOELÉCTRICA 2.	67
FIGURA 3-25 MAPA DE ISORESISTIVIDAD DE LA CAPA GEOELÉCTRICA 3.	68
FIGURA 3-26 MAPA DE ISORESISTIVIDAD DE LA CAPA GEOELÉCTRICA 4.	69
FIGURA 3-27 ISORESISTIVIDADES DE LAS CAPAS GEOELÉCTRICAS EN 3-D.	70
FIGURA 3-28 MODELO DE CAPAS TENIENDO EN CUENTA LAS RESISTIVIDADES CALCULADAS EN LOS SONDEOS.	72
FIGURA 3-29 ESTRUCTURAS DEL MODELO GEOLÓGICO LOCAL EN 3-D DEL ÁREA EN ESTUDIO.....	73
FIGURA 3-30 MODELO GEOLÓGICO LOCAL EN3D DEL ÁREA EN ESTUDIO	74
FIGURA 3-31 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DEL ÁREA EN ESTUDIO.	75
FIGURA 3-32 RESUMEN DE LA INFORMACIÓN DE LOS ALJIBES.	78

FIGURA 3-33 RESUMEN DE LA INFORMACIÓN DE LOS POZOS.....	78
FIGURA 3-34 RESUMEN DE LA INFORMACIÓN DE LOS MANANTIALES.	78
FIGURA 3-35 APROXIMACIÓN CONCEPTUAL DEL MODELO DE THOMAS	82
FIGURA 3-36 METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DEL MODELO THOMAS.....	85
FIGURA 3-37 LOCALIZACIÓN DE LAS CUENCAS Y ESTACIONES UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DE RECARGA.....	86
FIGURA 3-38 HIDROGRAMA DE CALIBRACIÓN DEL MODELO THOMAS EN LA CUENCA DEL RÍO METICA.....	88
FIGURA 3-39 HIDROGRAMA DE CALIBRACIÓN DEL MODELO THOMAS DE LA CUENCA DEL RÍO HUMADEA.....	89
FIGURA 3-40 ESTACIONES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS PARA EL ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN.....	93
FIGURA 3-41 ISOYETAS DEL ÁREA EN ESTUDIO.	96
FIGURA 3-42 CÁLCULO DE RECARGA POR EL MÉTODO DE CHEETURVEDI.	97
FIGURA 3-43 CÁLCULO DE RECARGA POR EL MÉTODO DE SEHGAL.	98
FIGURA 3-44 MAPA DE LAS DIRECCIONES DE FLUJO, MUNICIPIO DE CASTILLA LA NUEVA.	99
FIGURA 3-45 COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO	101
FIGURA 3-46 LOCALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO.	103
FIGURA 3-47 TIPOS DE ENSAYOS DE BOMBEO	104
FIGURA 3-48 COMPORTAMIENTO DE LA PRUEBA DE BOMBEO.....	105
FIGURA 3-49 FUNCIÓN DE POZO $W(u, R/B)$ EN ACUÍFEROS SEMICONFINADOS (HANTUSH, 1956).....	106
FIGURA 3-50 ESQUEMA REPRESENTATIVO DE UN POZO DE GRAN DIÁMETRO..	107
FIGURA 3-51 CURVAS DE PAPADOPULOS Y COOPER (BATU, 1998).....	110
FIGURA 3-52 LEYENDA HIDROGEOOLÓGICA.....	116

FIGURA 3-53 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS DEL ÁREA EN ESTUDIO, VISTA PLANTA.....	117
FIGURA 3-54 MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE CASTILLA LA NUEVA.	118
FIGURA 3-55 MODELO HIDROGEOLOGICO EN 3D.	119
FIGURA 4-1 TIPO DE MODELOS.	122
FIGURA 4-2 MALLA DE PUNTOS DE DIFERENCIAS FINITAS EN DOS DIMENSIONES.	125
FIGURA 4-3 MALLA DE ELEMENTOS FINITOS.....	126
FIGURA 4-4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	127
FIGURA 4-5 EJEMPLOS DE CONFIGURACIONES GEOMÉTRICAS PARA OBRAS SUBTERRÁNEAS Y TAJOS.....	128
FIGURA 4-6 SIMULACIÓN DEL PROBLEMA DE TRANSPORTE DE MASA.....	129
FIGURA 4-7 DELIMITACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS DEF.....	130
FIGURA 4-8 PLANOS DE FRACTURAS	131
FIGURA 4-9 ENMALLADOS COMPLEJOS EN FEFLOW (MALLAS ESTRUCTURADAS Y NO ESTRUCTURADAS).	131
FIGURA 4-10 EJEMPLO DE UN DOMINIO (Ω) 2D, DISCRETIZADO POR DIFERENCIAS FINITAS (FD – FINITE DIFFERENCE) Y ELEMENTOS FINITOS (FE – FINITE ELEMENT). ADAPTADO DE DIERSCH (2014).	134
FIGURA 4-11 CONDICIONES DE FRONTERA PARA CARGA HIDRÁULICA FEFLOW.	136
FIGURA 4-12 CONDICIONES DE FRONTERA TIPO FLUJO FEFLOW.....	137
FIGURA 4-13 CONDICIONES DE FRONTERA TIPO TRANSFERENCIA DE FLUJO FEFLOW.....	138
FIGURA 4-14 CONDICIONES DE FRONTERA FEFLOW	139
FIGURA 4-15 SUPERMESH FEFLOW DEL DOMINIO DEL MODELO.....	140
FIGURA 4-16 OPCIONES DE ENMALLADO (MESHING).....	141

FIGURA 4-17 MODELO DE LA MALLA ESTRUCTURADA DEFINIDA PARA EL MODELO NUMÉRICO.	141
FIGURA 4-18 ÁNGULOS INTERNOS DE LOS ELEMENTOS DEFINIDOS.....	142
FIGURA 4-19 ÁNGULOS INTERNOS DESPUÉS DE REALIZAR EL SUAVIZADO.....	142
FIGURA 4-20 CONFIGURACIÓN DE ESPESORES DEL MODELO 3D DE LA MALLA ESTRUCTURADA.	143
FIGURA 4-21 MALLA ESTRUCTURADA DEL MODELO EN 3D.....	144
FIGURA 4-22 FALLAS DEL ÁREA EN ESTUDIO.....	145
FIGURA 4-23 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA PARA LAS CAPAS DEL MODELO.	146
FIGURA 4-24 CONDUCTIVIDAD DE LAS FALLAS (ÁREA DEL MODELO).....	146
FIGURA 4-25 COEFICIENTES DE ALMACENAMIENTO.....	147
FIGURA 4-26 CONDICIONES DE CONTORNO EN EL MODELO MATEMÁTICO.....	148
FIGURA 4-27 PUNTOS DE OBSERVACIÓN DEL MODELO.	150
FIGURA 4-28 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN.....	151
FIGURA 4-29 PARÁMETROS DE OPTIMIZACIÓN.....	153
FIGURA 4-30 PUNTOS DE OBSERVACIÓN.....	153
FIGURA 4-31 CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS CALCULADAS CON FEPEST.	154
FIGURA 4-32 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN FEPEST.	154
FIGURA 4-33 CRITERIOS DE TERMINACIÓN FEPEST.	155
FIGURA 4-34 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS FEPEST.	156
FIGURA 4-35 PUNTOS DE OBSERVACIÓN FEPEST.....	157
FIGURA 4-36 INFORMACIÓN SVD.....	157
FIGURA 4-37 CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS CALCULADAS CON FEPEST POR EL MÉTODO DE LOS PUNTOS PILOTO.....	158
FIGURA 4-38 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN FEPEST.	159

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3-1 DESCRIPCIÓN DE UNIDADES GEOLÓGICAS EN EL ÁREA EN ESTUDIO.	46
TABLA 3-2 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES UTILIZADOS PARA ELABORAR MODELO DE CAPAS	56
TABLA 3-3 RANGO DE RESISTIVIDAD DEL MODELO GEOLÓGICO	71
TABLA 3-4 PARÁMETROS OBTENIDOS EN LA FASE DE CALIBRACIÓN	87
TABLA 3-5 ESTACIONES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS PARA EL ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN.....	92
TABLA 3-6 VALORES MEDIOS DE PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN (MM)	95
TABLA 3-7 ESTIMACIÓN DE LA RECARGA PARA LAS METODOLOGÍAS UTILIZADAS	98
TABLA 3-8 COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO SEGÚN EL TIPO DE ACUÍFERO	102
TABLA 3-9 RESUMEN DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO.....	111
TABLA 3-10 RESUMEN DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO DE LA UNIDAD QAL.....	112
TABLA 3-11 RESUMEN DE PRUEBAS DE BOMBEO EN LA UNIDAD QT	113
TABLA 3-12 RESUMEN DE PRUEBAS DE BOMBEO DE LA UNIDAD QAB	113
TABLA 3-13 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD ESPECÍFICA DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO.....	114
TABLA 3-14 RESUMEN DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS	115
TABLA 3-15 CAPAS DEFINIDAS PARA EL MODELO CONCEPTUAL	119
TABLA 3-16 PROPIEDADES HIDRÁULICAS	120
TABLA 4-1 PROPIEDADES HIDRÁULICAS.....	124
TABLA 4-2 TIPO DE CONDICIÓN DE FRONTERA.....	138
TABLA 4-3 CAPAS DEFINIDAS PARA EL MODELO CONCEPTUAL	143
TABLA 4-4 PROPIEDADES HIDRÁULICAS.....	145

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO 1. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO

1 INTRODUCCIÓN

Para el estudio de las aguas subterráneas, como en muchos otros casos de ingeniería, es necesario desarrollar modelos que ayuden en el estudio del comportamiento de los principales parámetros involucrados en determinados problemas.

Un modelo es una representación simplificada de la realidad que permite resolver interrogantes o hacer predicciones acerca del fenómeno estudiado. En muchas ocasiones se comete el error de confundir un programa de computador con un modelo hidrogeológico. Un modelo hidrogeológico es el resultado de obtener información, crear bases de datos de una zona de estudio, alimentar un código de computador con dicha información, ejecutar el programa y comparar las respuestas con observaciones experimentales, para iterativamente corregir la información hasta calibrar el modelo. Por su parte, un modelo debe elaborarse y construirse para cada estudio hidrogeológico y se debe correr en un programa de computador, mientras que los programas son genéricos y no representan ninguna realidad en especial.

Un modelo está basado en datos con los cuales fue alimentado y, dependiendo de la calidad de estos datos, posee mayor o menor certidumbre en sus resultados. Teniendo en cuenta que todo dato experimental tiene un margen de error, no se puede aspirar a que un modelo posea una certidumbre del 100 % en sus resultados; sin embargo, los modelos son herramientas que permiten realizar análisis y predicciones en sistemas complejos.

La gran fortaleza de los modelos es verificar y contrastar múltiples hipótesis sobre el funcionamiento del sistema analizado. Frecuentemente, la formulación de un modelo permite identificar e involucrar nuevos procesos que no fueron tenidos en cuenta en primera instancia y que servirán para depurarlo y mejorar su desempeño.

Una vez construido el modelo debe tenerse en cuenta que éste es dinámico y siempre está sometido a cambios, por lo que es necesario actualizarlo periódicamente².

² (CATHALAC, 2015).

2 MARCO CONCEPTUAL O ESTADO DEL ARTE

2.1 Definiciones

- Acuífero [aquifer]¹ (del latín *fero*, llevar). - Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que permite su circulación con facilidad. Ejemplos: arenas, gravas, también granito u otra roca compacta con una fracturación importante.
- Acuicludo [aquiclude] (del latín *cludo*, encerrar). - Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de ella. Ejemplo: limos, arcillas. Un m³ de arcillas contiene más agua que el mismo volumen de arenas, pero el agua está atrapada, no puede salir por gravedad y, por tanto, no podrá circular en el subsuelo ni en condiciones naturales ni hacia un pozo que esté bombeando.
- Acuitardo [aquitard] (del latín *tardo*, retardar, impedir). - Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable, la cual circula a través de ella con dificultad. Evidentemente se trata de un concepto intermedio entre los dos anteriores. Ejemplos: arenas arcillosas, areniscas, rocas compactas con alteración o fracturación moderadas.
- Acuífugo [aquifuge] (del latín *fugo*, rechazar, ahuyentar). - Formación geológica que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella. Ejemplo: granito o esquisto inalterados y no fracturados.
- Unidad hidrogeológica (en inglés, a veces “sistema hidrogeológico”) es un conjunto de formaciones geológicas cuyo funcionamiento hidrogeológico conviene considerar conjuntamente. Dentro de la unidad podrá haber uno o varios acuíferos.
- Porosidad eficaz para el flujo [*effective porosity*]: se define la porosidad eficaz como el volumen de huecos disponible para el flujo respecto del volumen total. Se refiere a la porosidad que permite la circulación del agua.
- Porosidad primaria: la que resulta al originarse la formación geológica. Porosidad secundaria será cualquier abertura que se produzca posteriormente.
- Superficie freática: es la superficie formada por los puntos con una presión igual a la presión atmosférica.
- Zona saturada a la parte del subsuelo que se encuentra por debajo de la superficie freática y en la que todos los poros o fisuras están llenos de agua, por encima de la superficie freática.

- Acuíferos libres [*unconfined aquifers*]: aquellos que su límite superior (la superficie freática) está a presión atmosférica.
- Acuíferos confinados [*confined aquifers*]: su límite superior se encuentra a presión superior a la atmosférica. Es una capa impermeable.
- Acuíferos semiconfinados [*leaky aquifer*]: son acuíferos a presión (por tanto, entrarían en la definición anterior), pero que algunas de las capas confinantes son semipermeables (acuitardo) y a través de ellas le llegan filtraciones o rezumes.
- Ad = área de la cuenca hidrográfica en m².
- DEM: modelo digital de terreno.
- FEFLOW: finite element subsurface Flow Simulation System
- EIA: estudio de impacto ambiental.
- Hidrogeología: parte de la geología que estudia el ciclo de las aguas superficiales y subterráneas, así como su prospección, captación y protección.
- Modelo hidrogeológico conceptual: representación simplificada de la realidad
- Pruebas de bombeo: ensayo que se utiliza para evaluar un acuífero.
- Propiedades hidráulicas: cualidades de los suelos o formaciones.
- Conductividad hidráulica: representa la mayor o menor facilidad con la que el medio deja pasar el agua por unidad de área transversal a la dirección del flujo.
- Calibración del modelo matemático: el proceso de calibración consiste en realizar un ajuste simultáneo de los parámetros hidrogeológicos hasta lograr que los valores de los niveles freáticos simulados tengan una coincidencia aceptable con los valores observados (validación).³

³ (CATHALAC, 2015).

2.2 Estado del arte

El presente estudio hidrogeológico se desarrolló para el municipio de Castilla La Nueva, ubicado en el departamento del Meta (FIGURA 2-1).

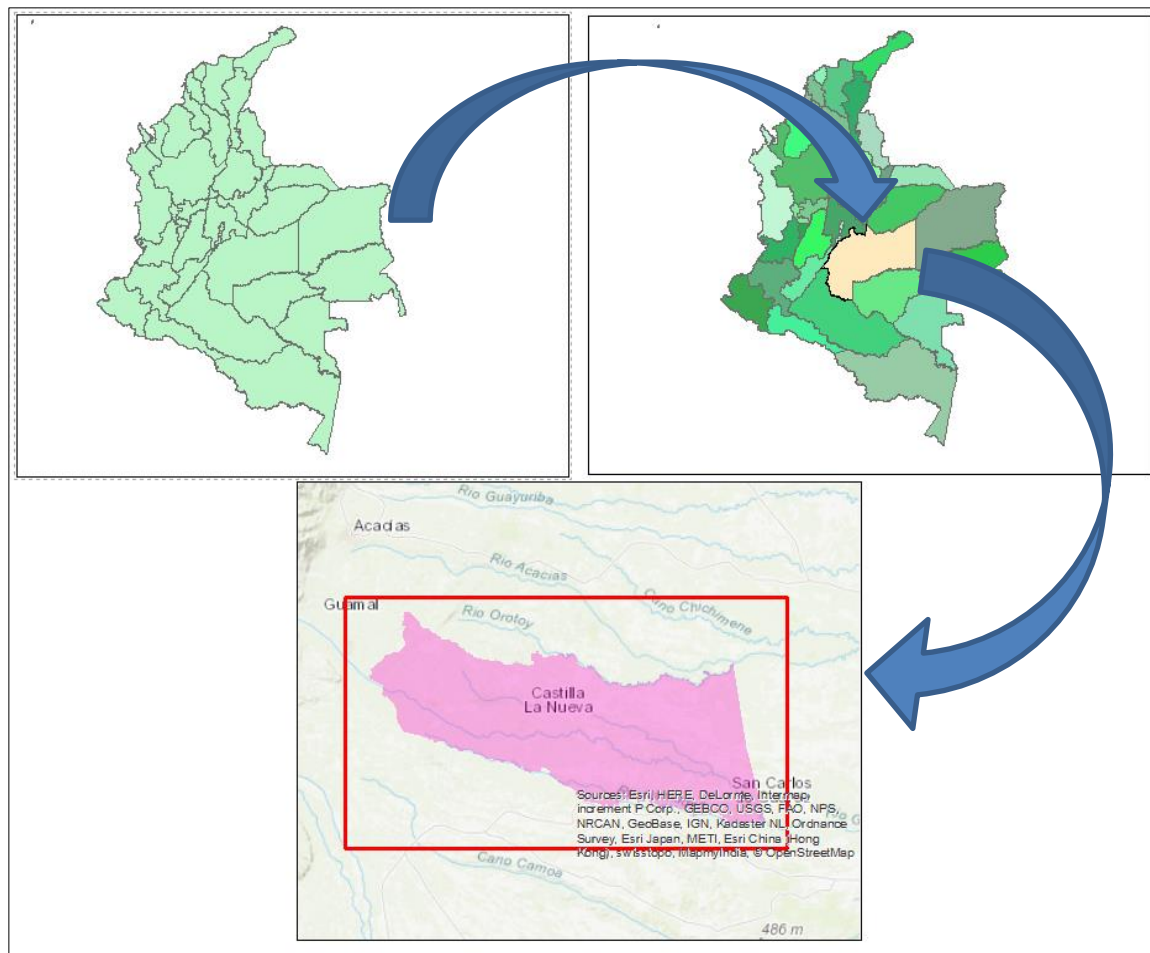


FIGURA 2-1 Localización del área en estudio.

El desarrollo de este trabajo de grado se realizó a partir de la información secundaria de siete estudios de licenciamiento ambiental realizados para Ecopetrol por la empresa SGI Ltda. y el consorcio Megaoil, los siguientes son los estudios utilizados:

- Estudio de impacto ambiental 50k
- Estudio de impacto ambiental Cubarral
- Estudio de impacto ambiental Sokay.
- Estudio de impacto ambiental CPO10 norte

- Estudio de impacto ambiental CPO 10 sur
- Estudio de impacto ambiental Taray
- Estudio de impacto ambiental Ávila

La localización de los estudios utilizados para el desarrollo de este trabajo de grado se presenta en la FIGURA 2-2.

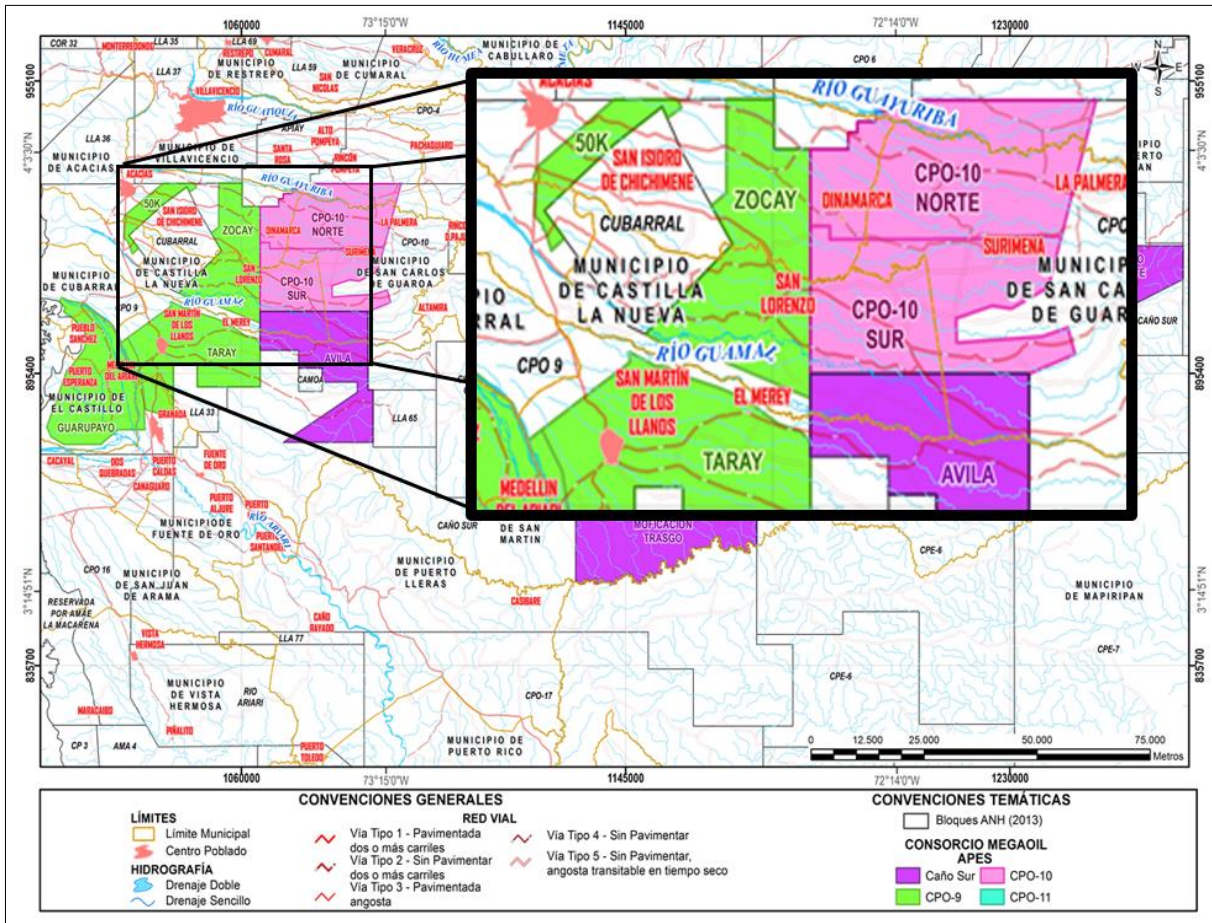
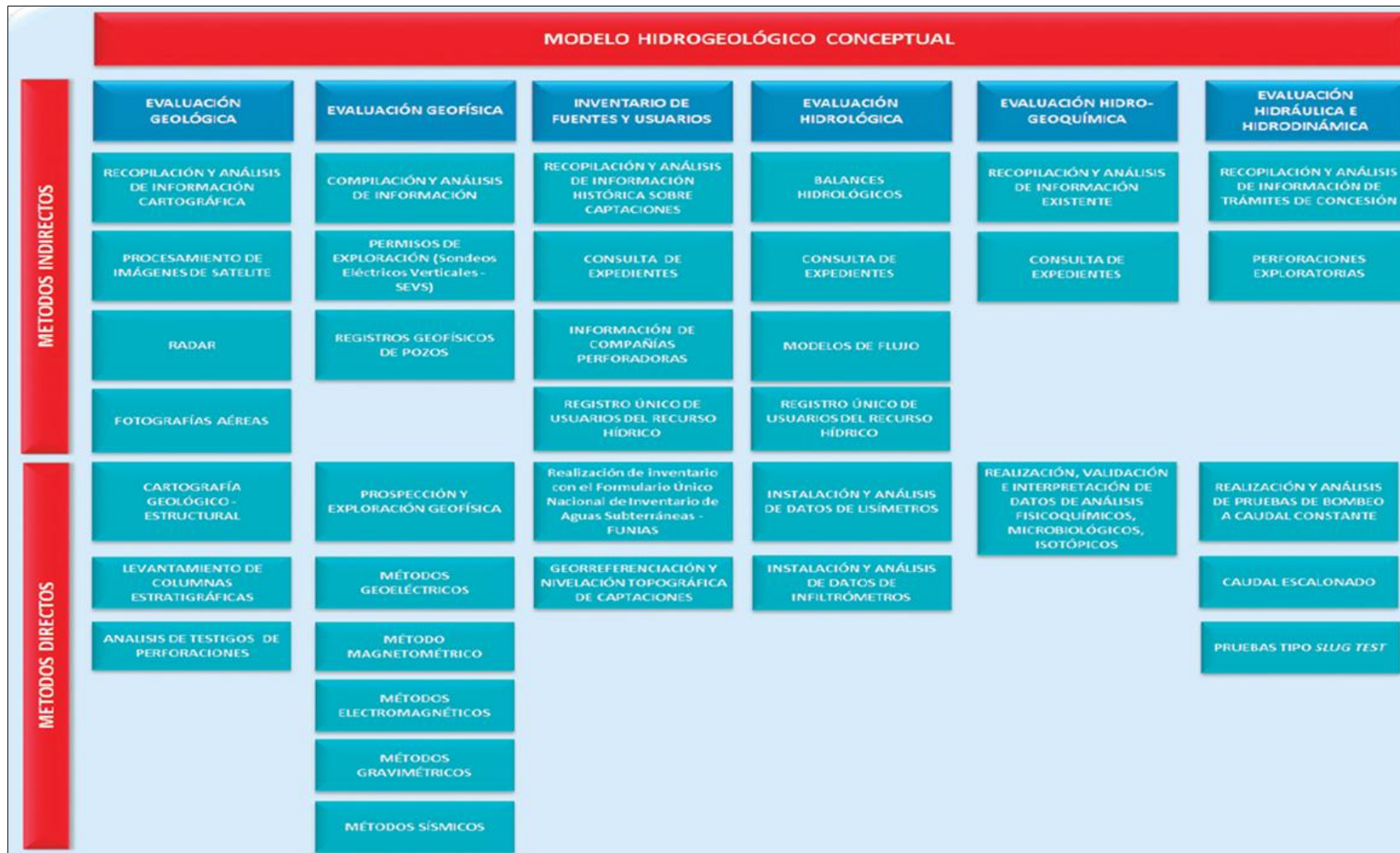


FIGURA 2-2 Localización de los estudios de licenciamiento ambiental utilizados para el desarrollo de la tesis.

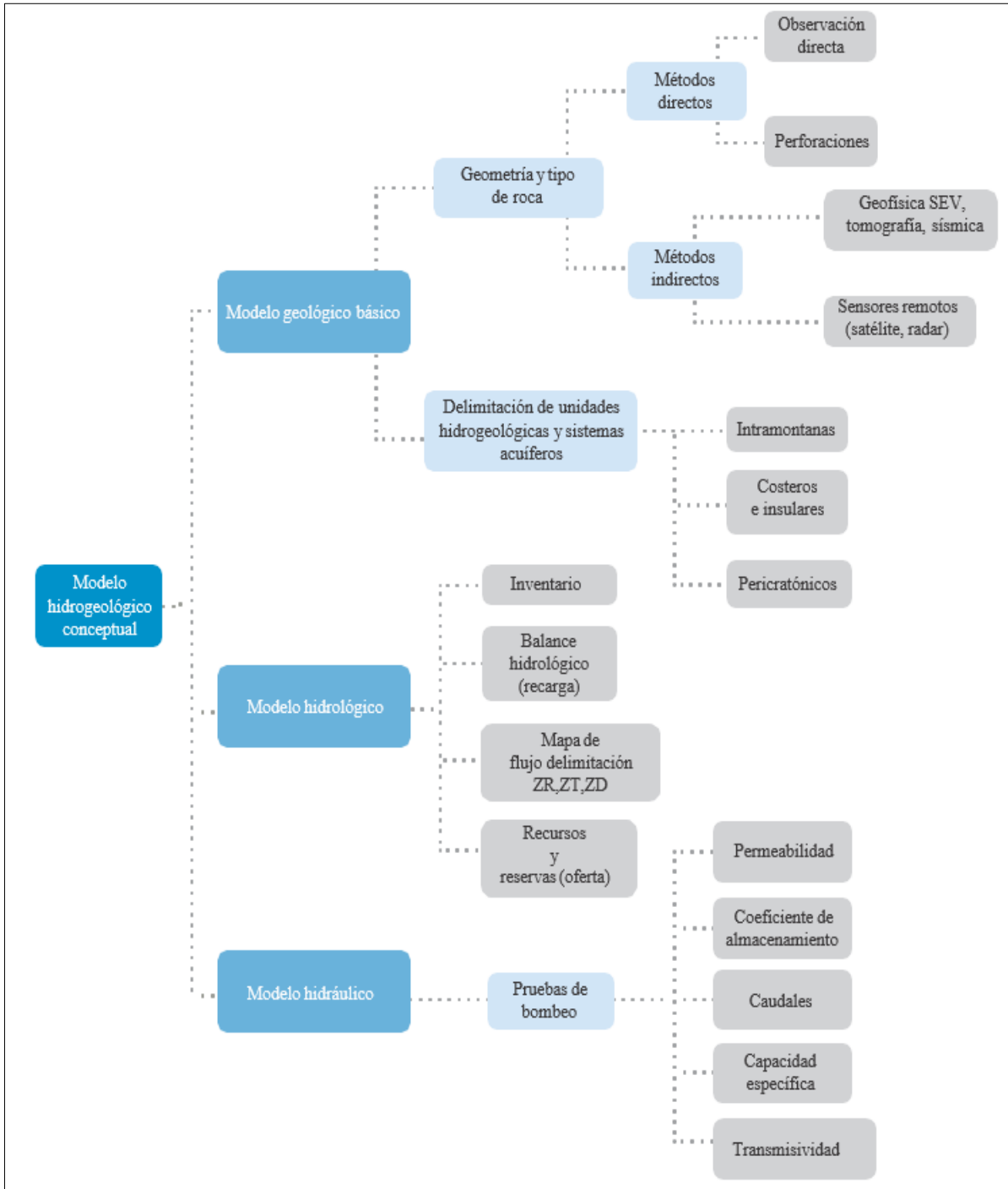
En la FIGURA 2-3 se presentan los tipos de fuentes de información que se utilizaron para el desarrollo del modelo conceptual, base del modelo matemático del presente estudio.



Fuente: Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos, p. 30.

FIGURA 2-3 Fuentes de información para la elaboración de modelos hidrogeológicos conceptuales

Una vez evaluada y organizada la información secundaria se realizó el modelo hidrogeológico conceptual del área. En la FIGURA 2-4 se presenta el diagrama de flujo utilizado para el desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual del presente documento.



Fuente: Modificado Estudio Nacional Del Agua 2014, p. 126.

FIGURA 2-4 Componentes del modelo hidrogeológico conceptual.

A partir de la información del modelo hidrogeológico conceptual se desarrolló el modelo numérico del área en estudio. Un modelo numérico es una herramienta o mecanismo que permite representar lo que sucede en la realidad de forma simplificada. Los objetivos primordiales que se persiguen con la construcción de un modelo son los siguientes:

- **Entendimiento.** Para ganar claridad respecto a los parámetros que controlan determinada situación. Un ejemplo en aguas subterráneas es modelar la dirección de movimiento en una cuenca.
- **Predicción.** Se efectúa con el fin de determinar las consecuencias de alguna acción propuesta o una excitación dada. Por ejemplo, un modelo para pronosticar cómo evolucionarán en 20 años los niveles piezométricos o si se mantiene el régimen actual de explotación en determinada cuenca hidrológica.
- **Control.** Se efectúa para monitorear el cumplimiento de cualquier tipo de reglamentación estipulada. Por ejemplo, para controlar el flujo de lixiviados en un relleno sanitario.
- **Predicción en tiempo real.** Consiste en realizar un seguimiento a cualquier proceso o fenómeno que se esté desarrollando. Por ejemplo, la evolución de un proyecto de remediación de acuíferos.⁴

Para el desarrollo del modelo numérico del municipio de Castilla La Nueva se utilizó el software de elementos finitos Feflow V 7.0® (p6), su acrónimo significa *finite element subsurface Flow simulation System*. Este programa tiene la capacidad de resolver ecuaciones de flujo, masa y transporte en medios porosos.

En la FIGURA 2-5 se presenta la metodología utilizada para el desarrollo del presente trabajo de grado.

⁴ (CATHALAC, 2015).

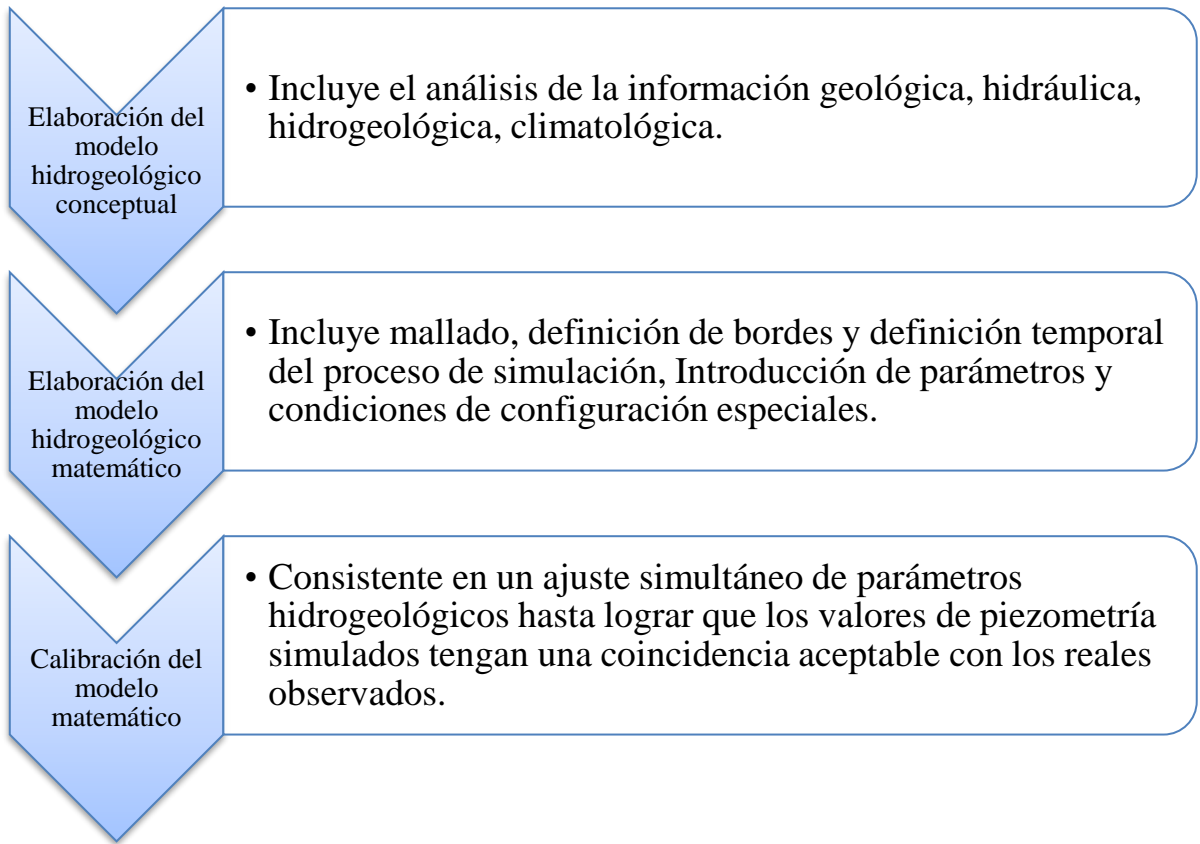


FIGURA 2-5 Metodología de trabajo para el proyecto de grado.

3 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Un modelo hidrogeológico conceptual es una representación descriptiva y gráfica de un sistema acuífero, el cual incorpora una interpretación de las condiciones geológicas e hidrogeológicas y su interrelación con sistemas asociados (ríos, lagos, ecosistemas, mar), de tal manera que se reducen el problema físico y el dominio del acuífero a una versión simplificada de la realidad.⁵

Este modelo se puede estructurar a partir de información primaria y secundaria preliminar de la zona de estudio y es un insumo básico e influyente para el modelo matemático que servirá como una herramienta de gestión en las etapas de planificación del recurso hídrico subterráneo. Las suposiciones que constituyen un modelo conceptual están relacionadas con temas como los siguientes:

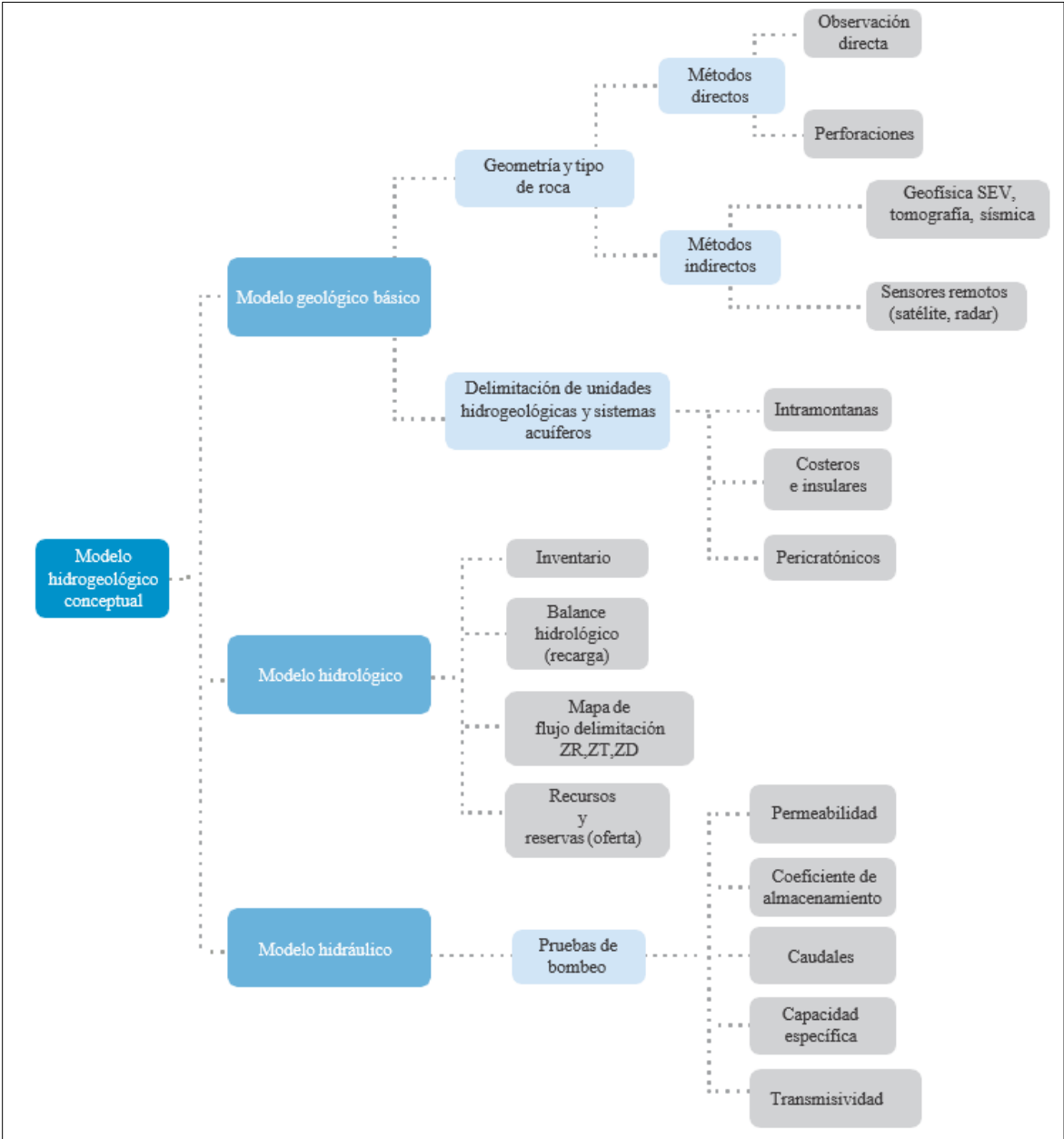
- **La geometría del acuífero y las características de la matriz que lo conforma.**
- **Tipo de flujo en el acuífero.**
- **Características hidráulicas del acuífero.**
- **Comportamiento de la tabla de agua.**
- **El régimen de flujo.**
- **Propiedades del fluido.**
- **Condiciones de frontera.**

Seleccionar el modelo conceptual más apropiado para un problema dado es uno de los pasos más importantes en el proceso de modelación. Esta selección y el grado de simplificación en cualquier caso en particular dependen de los siguientes aspectos:

- **Los objetivos del problema.**
- **Los recursos disponibles.**
- **La información de campo disponible.**
- **Las características legales y regulatorias aplicadas al caso.**

⁵ (CATHALAC, 2015).

Para el caso del modelo hidrogeológico conceptual del presente estudio se cuenta con información secundaria y primaria tomada de siete estudios de licenciamiento ambiental. Dicha información se organiza y analiza en el presente documento teniendo en cuenta el diagrama de flujo que se presenta en la FIGURA 3-1, con el fin de obtener las variables más relevantes que conformarán el modelo hidrogeológico conceptual del área en estudio.



Fuente: Modificado Estudio Nacional del Agua 2014, p. 126.

FIGURA 3-1 Componentes del modelo hidrogeológico conceptual.

Como se observa en la figura anterior, el modelo conceptual del presente estudio se desarrolló a partir de tres submodelos:

- **Geológico**
- **Hidrológico**
- **Hidráulico**

A continuación, se presenta la información generada para cada uno de los modelos.

3.1 Definición del área del modelo conceptual

El modelo hidrogeológico conceptual del presente estudio se realizó para el municipio de Castilla La Nueva, ubicado en el departamento del Meta. El comportamiento del sistema se basa en un balance de flujo en el cual las entradas menos las salidas son equivalentes a la variación de almacenamiento en el dominio. El área en estudio se encuentra sobre la cuenca del río Metica, localmente sobre las cuencas de los ríos Acacías y Humeada. La recarga del área en estudio se presenta hacia el piedemonte llanero y las zonas de descarga siguen la pendiente hasta descargar en los ríos y manantiales que atraviesan el área en estudio. En la FIGURA 3-2 se presenta el área del presente estudio hidrogeológico.

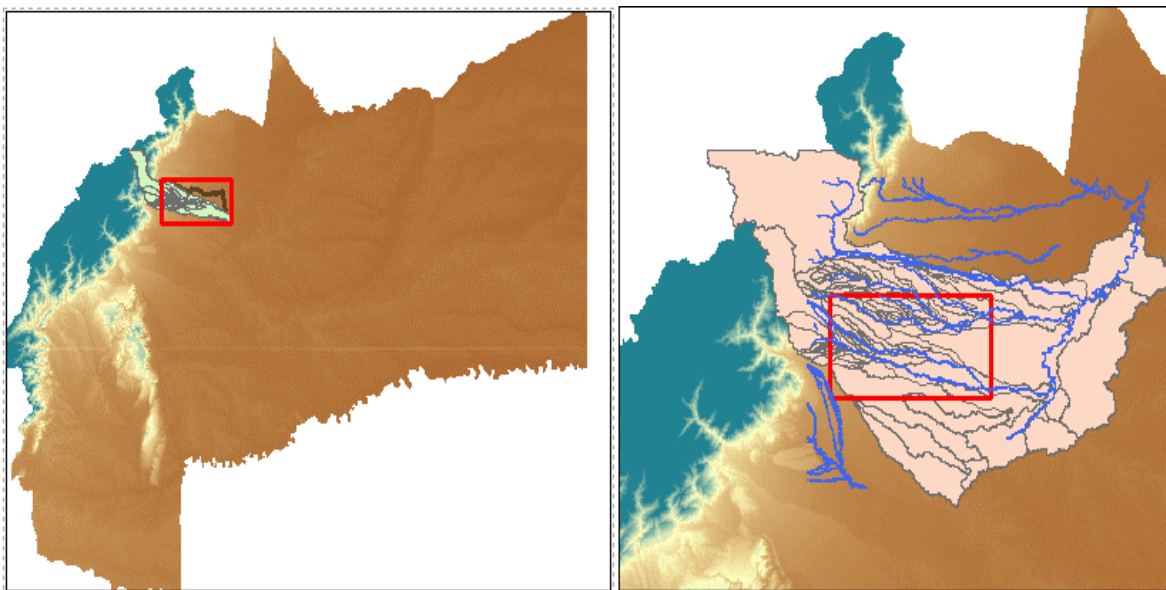
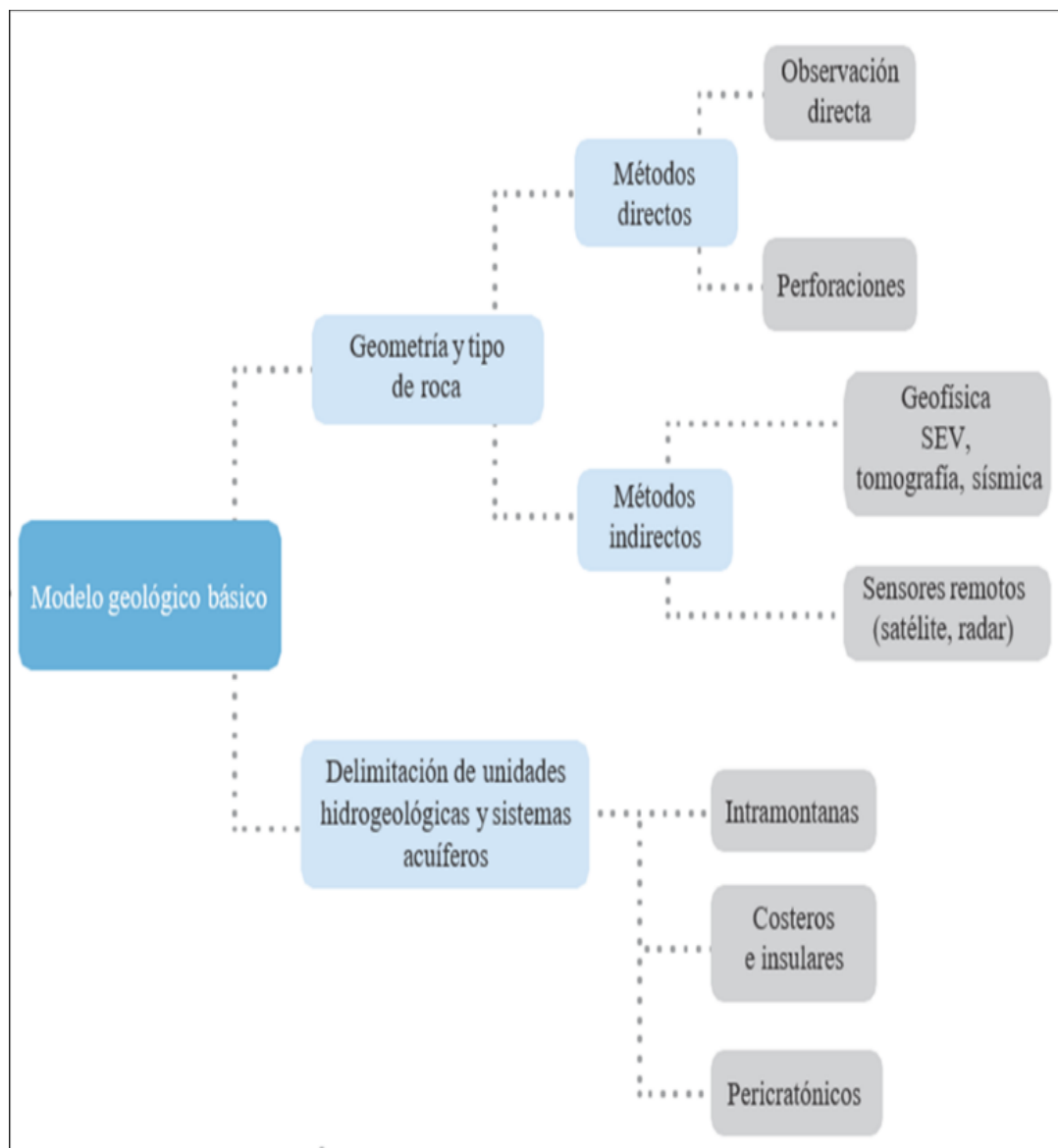


FIGURA 3-2 Área en estudio del modelo hidrogeológico conceptual de Castilla La Nueva.

3.2 Modelo geológico básico

La evaluación geológica es la base para los estudios hidrogeológicos, ya que permite identificar las rocas, los sedimentos y las estructuras geológicas que favorecen la circulación y el almacenamiento de las aguas subterráneas, así como la determinación de su continuidad en área y espesor. En la FIGURA 3-3 se presenta el diagrama de flujo de la información utilizada para el desarrollo del modelo geológico del área en estudio.



Fuente: Modificado Estudio Nacional del Agua 2014, p. 126.

FIGURA 3-3 Diagrama de flujo para el desarrollo del modelo geológico.

3.2.1 Geometría y tipo de roca

Las aguas subterráneas ocurren generalmente en los siguientes ambientes geológicos:

- Depósitos no consolidados de gravas y arenas intercalados frecuentemente con niveles o paquetes de limos y arcillas, que son comúnmente el resultado de procesos aluviales o de depósito en las vertientes.
- Rocas sedimentarias: materiales de origen sedimentario, normalmente consolidadas y semiconsolidadas de conglomerados y areniscas, con permeabilidad y porosidades primarias (intergranulares) y secundarias como consecuencia del fracturamiento (fallas y diaclasas, principalmente). En este grupo se encuentran las detríticas si se originan a partir de otras rocas, o las químicas y orgánicas si se forman a partir de precipitación de compuestos químicos o por acumulación de restos de seres vivos.
- Rocas ígneas y metamórficas: estas rocas cristalinas pueden ser bastante impermeables; sin embargo, el fracturamiento originado por esfuerzos tectónicos a través de su historia geológica puede favorecer el desarrollo de permeabilidad secundaria que permiten la circulación y el almacenamiento del agua.

La evaluación geológica del presente documento se realizó a partir del análisis de la cartografía geológica existente (a escala regional) e información secundaria. Se hizo especial énfasis en la caracterización litológica, estratigráfica y estructural.

3.2.1.1 Marco geológico regional

La evolución geológica del área del departamento del Meta, como la de la Orinoquia y parte de la amazonia colombiana, ha estado determinada por las diversas orogenias que han ocurrido como consecuencia de distintos procesos compresivos contra el Escudo de la Guayana o Escudo Guayanés.

El basamento que subyace a los Llanos Orientales consiste en remanentes del escudo, con edades superiores a 2700 millones de años, cubiertos por rocas sedimentarias intensamente metamorfoseadas que fueron instruidas por rocas ígneas básicas y ácidas producidas durante el episodio Orinoco, hace 1300 millones de años. La cuenca de la que hace parte la extensa zona de los llanos del departamento del Meta se formó durante el Paleozoico e incluyó el basculamiento de varios bloques, lo que permitió la transgresión de mares extensos pero someros que favorecieron una sedimentación de más de 8000 metros de espesor, con anterioridad a la Orogenia Caledoniana.

Durante el Mesozoico se producen sucesivamente etapas de levantamiento, metamorfismo y denudación de los sedimentos formados en el Paleozoico, lo que originó unas condiciones netamente continentales, en las que predominaban los ambientes desérticos con climas áridos que originaron la deposición de las capas rojas que cubren buena parte del borde oriental andino y el occidente de los llanos, estableciendo las condiciones para la formación de lo que ahora se conoce como un retro-arco.

Una inconformidad importante separa el Cretácico de las rocas más antiguas por un fenómeno de no acumulación durante el Jurásico Superior y el Cretácico Inferior, pero durante éste sí se presenta una intensa erosión de las rocas preexistentes que reimplantan las condiciones de depósito durante el Cretácico Inferior en la cuenca Cretácica situada donde ahora se localiza la cordillera oriental, que permitió la acumulación de algo más de 3000 metros de espesor de sedimentos marinos, de facies arenosa a conglomerático con paso gradual a sedimentos calcáreos, líticos y arenosos finos, que obligaron a una gradual subsidencia del piso de la cuenca. El Cretácico Superior se caracteriza por una sucesión alternante de ciclos marinos transgresivos y regresivos en un ambiente de plataforma somera, que favorecen la deposición de shales marinos y sedimentos clásticos progradantes. El final del periodo Cretácico marca una transición en la zona perimetral del Escudo, de margen pasivo pasa a margen convergente de acreción.

El periodo Cenozoico enmarca los procesos orogénicos que definen la actual orografía del país. A finales del Paleoceno y principios del Eoceno la orogénesis andina experimenta los primeros eventos que originan la formación de la cordillera central de Colombia, que con alturas mucho mayores a las actuales fue sometida a fuertes procesos erosivo-denudativos, para surtir de sedimentos en algo más de 2000 metros de espesor a la cuenca que se había formado entre dicha cordillera y el basamento llanero. Durante el Mio-Plioceno tiene lugar la orogenia andina principal con la emersión de la cordillera oriental, bisectando esta cuenca y creando la barrera de separación entre la planicie llanera y el valle del Magdalena. A este evento se atribuye la acumulación de sucesiones espesas Plio y Pleistocenas, con sedimentos erodados de la cordillera oriental, tanto en los llanos como en el mismo valle del Magdalena. El proceso orogénico compresivo produjo el intenso plegamiento de las rocas existentes, generando gran cantidad de anticlinales y sinclinales alargados y estrechos que hoy constituyen la zona cortical donde se encuentra la cordillera oriental, los cuales adoptaron como una simple respuesta dinámica compresiva una dirección

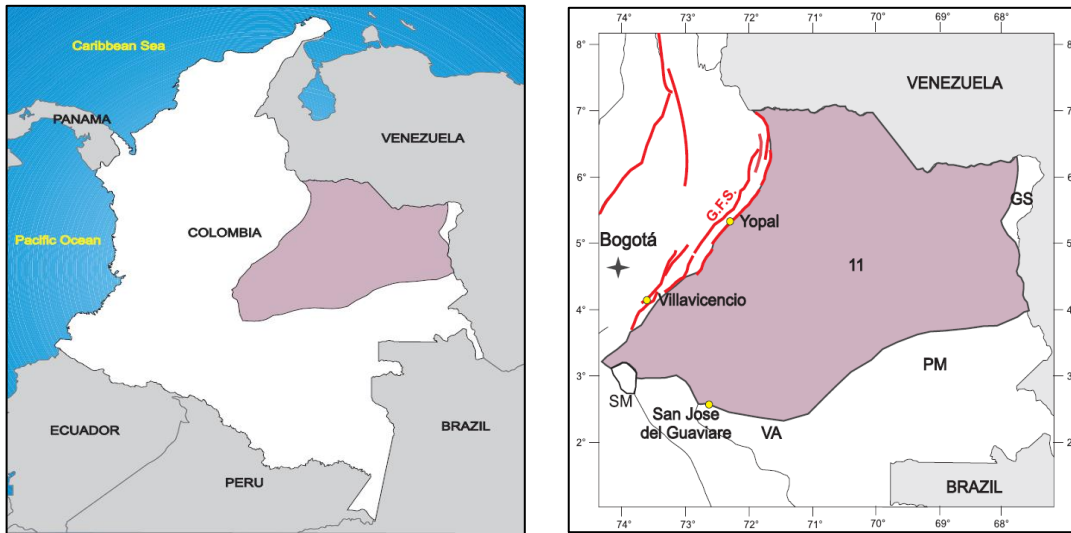
perpendicular a la dirección principal de los esfuerzos y en este sentido se aprecia un tren estructural, principalmente de dirección SW-NE.

Los esfuerzos compresivos y distensivos dieron lugar a la aparición de fallas de cabalgamiento de bajo ángulo y de cobertura delgada durante el Eoceno, pero que tuvieron su mayor desplazamiento entre el Mioceno y el Pleistoceno, con buzamiento hacia el este, o a la reactivación de los diversos sistemas de fallas preexistentes que marcaron los límites de bloques basculantes y tienen continuidad hasta el sócalo o basamento.

Durante las fases de plegamientos “Protoandinas” del Mio-Plioceno muchas de las fallas que habían tenido una actividad de tipo normal se vuelven a desplazar con importantes movimientos inversos, levantando bloques del basamento, tal es el caso de la Falla de Guaicáramo en esta zona. Este proceso orogénico andino con todas las etapas incluidas sería la continuación norte del tectonismo de plegamiento y cabalgamiento que se extendió a lo largo de los andes suramericanos (Chile, Ecuador, Perú), que comenzó durante el Mesozoico y continuó progresivamente durante el Cenozoico y el Cuaternario.

Según Toussaint et al., (1993), la cordillera oriental a 6° de latitud norte corresponde a un horst cuyos flancos oeste y este cabalgan respectivamente sobre el valle del Magdalena y sobre los llanos orientales. Dichos cabalgamientos afectan a toda la corteza continental hasta el Moho.

La cuenca de los llanos orientales es la más prolífica en hidrocarburos en Colombia. El límite norte de esta cuenca es la frontera colombo-venezolana; al sur se extiende hasta la serranía de La Macarena, el Arco del Vaupés y las rocas metamórficas del Precámbrico que afloran al sur del río Guaviare; el límite oriental está demarcado por los afloramientos de rocas plutónicas precámbricas del Escudo de Guyana, y al oeste la cuenca está limitada por el sistema de fallas del frente de la cordillera oriental (ver Figura 3 74) (Barrero et al., 2007).



Fuente: Barrero et al., 2007.

FIGURA 3-4 Cuenca de los Llanos Orientales.

La configuración de la cuenca de los llanos orientales encierra al oeste las estribaciones de la cordillera oriental, constituyendo la zona de piedemonte, mientras que hacia el este yace sobre el Escudo Precámbrico de Guyana, que actuó como basamento sobre el cual se depositó toda la secuencia sedimentaria Paleozoica a Neógena y que conforma una zona relativamente plana referida en este trabajo como Planicie Oriental (Rodríguez, 2001; Tapias et al., 2007).

La cordillera oriental, una vez erigida como orógeno emergido, comienza a ser modelada por los agentes climatológicos. Los últimos levantamientos del Neógeno y del Pleistoceno, apoyados por la sucesión de las diferentes épocas glaciares del Cuaternario o reciente, produjeron grandes cauces por los que se transportaron grandes cantidades de sedimentos que se acumularon en la parte baja y plana de los llanos orientales, dando origen a la topografía actual del departamento. El Escudo Guayanés de edad Precámbrica colaboró en la formación de la estructura andina y sirvió de base para soportar la acumulación de esta gran cantidad de sedimentos, los cuales rellenaron sus principales depresiones, dando origen al paisaje llano actual (Rodríguez, 2001).

En las estribaciones de la cordillera y de la serranía de La Macarena los materiales se depositaron de tal manera que semejan grandes y extendidos abanicos recostados, terminados a trechos largos en una serie de colinas de no más de 50 metros de altura que hoy se denominan piedemonte y altillanura, respectivamente (Rodríguez, 2001).

3.2.1.2 *Estratigrafía regional*

El departamento del Meta está dividido en dos grandes regiones orográficas: la región montañosa, que corresponde al flanco oriental de la cordillera oriental y su piedemonte contiguo, así como a la serranía de la Macarena; y la planicie oriental localizada al oriente de la anterior y que generalmente se subdivide en altillanura (para zonas que no sobrepasan los 200 m de altura) y la llanura aluvial (para zonas más bajas, ricas en bosques de vegetación natural y fauna autóctona) (Rodríguez, 2001). Para los fines descriptivos, la estratigrafía se presenta de acuerdo con la división de las áreas fisiográficas mencionadas: cordillera oriental, serranía de La Macarena, piedemonte llanero y planicie oriental (modificado de Rodríguez, 2001) (FIGURA 3-5).

- **Cordillera oriental**

Las rocas más antiguas que afloran en la cordillera oriental en el área del departamento del Meta están localizadas en los macizos de Garzón y Quetame y en el núcleo de la serranía de La Macarena. El primero en el extremo sur occidente del departamento y el segundo en el centro oriente (alrededores del municipio de Guayabetal y al oeste del municipio de Medina en Cundinamarca) (Rodríguez, 2001).

El macizo de Garzón en el departamento del Meta está compuesto por una secuencia de rocas metamórficas cartografiadas como Grupo Garzón. El macizo de Quetame consiste en dos unidades principales: una meta sedimentaria denominada Grupo Quetame, de edad Pre-Devoniana, y otra clástica denominada Grupo Farallones de edad Paleozoico superior. A estas unidades les supra yace una serie monótona de sedimentitas de edades Cretácico, Paleógeno y Neógeno (modificado de Rodríguez, 2001) (Ver Figura 3 75).

Grupo Garzón (pegg). Es un bloque antiguo constituido por materiales de edad Precámbrica, que se encuentra en la parte sur de la cordillera oriental y cuyas estribaciones afloran en la parte suroccidental del departamento del Meta en límites con el departamento del Huila. El nombre de este grupo lo sugirió Kroonemberg (1982), en Velandia et al., (1996) para nombrar una secuencia bandeada de rocas metamórficas de alto grado (facies granulita y anfibolita) intuidas por algunos diques y venas de pegmatitas y andesitas cuarzo feldespáticas que cortan la laminación o el bandeamiento. La secuencia bandeada está constituida por láminas oscuras de anfibolitas intercaladas con bandas claras de rocas granoblásticas de composición cuarzo-feldespática, que le dan un carácter neísico. Las direcciones principales de la foliación o bandeamiento son NE-SW, con buzamientos hacia

el SE, aunque localmente se muestran afectadas por la presencia de zonas de fallas (modificado de Rodríguez, 2001).

Grupo Quetame (pEq). El Grupo Quetame lo definió Hettner (1892) y redefinieron Campbell y Burgl (1965) en Julivert, M., (1968) para describir una secuencia que puede superar los 8000 m de espesor, constituida por rocas metasedimentarias de bajo grado; compuesta por metarenitas y filitas (cuarcitas y filitas de San Cristóbal), metalimolitas con intercalaciones de metarenitas (metalimolitas del río Guamal), filitas micáceas, metalimolitas y metarenitas (filitas y cuarcitas de Guayabetal), metaconglomerados cuarzosos y filitas (metaconglomerados y filitas de Susumuco). Su edad es Precámbrico-Paleozoico Inferior. La parte Precámbrica de este grupo es correlacionable con la unidad, denominada por Rodríguez (2001) como Precámbrico indiferenciado (pEi).

Grupo Farallones (pDf). Nombre dado por Segovia y Renzoni (1965) en Julivert, M. (1968) para designar la secuencia clástica que aflora en los farallones de Medina. La secuencia sedimentaria de edad Devónico-Carbonífero consta de cuarzoarenitas de grano medio y conglomerados cuarzosos (formación arenisca de Gutiérrez), lutitas y lodolitas laminadas con intercalaciones de micritas y areniscas arcillosas (formación lutitas de Pipiral) y limolitas rojizas con intercalaciones de arenitas finas y micritas (formación capas rojas del Guatiquía). Parte de este grupo es correlacionable con la unidad, denominada por Rodríguez (2001) como Devónico-Carbonífero indiferenciado (DCi). Las facies y espesores del grupo son variables; sin embargo, se estiman 2500 m en la sección tipo en el río Batá.

Formación brechas de Buenavista (Jsb). El nombre de esta unidad litoestratigráfica informal fue propuesto igualmente por Renzoni (1968) para designar una secuencia de brechas y conglomerados, resultado de avalanchas de detritos y lodo depositadas en un ambiente transicional o continental cercano al mar o marino somero con un espesor estimado de 110 m a menos de 80 m, la cual descansa discordantemente sobre el Grupo Quetame. Está constituida por una unidad con fragmentos angulosos a subredondeados tamaño guijo a canto, caóticamente distribuidos, de filitas, cuarcitas, arenitas, micritas y cuarzo lechoso, embebidos en una matriz areno-arcillosa. De acuerdo con su posición estratigráfica y su origen, producto de la cataclasis local de las fallas del borde llanero, se le asigna una edad pre Jurásico Superior (Pre -Titoniano).

Grupo Cáqueza (Kic). Nombre asignado por Hubach (1967) en Pulido et al. (1998) para la sucesión lutítica que aflora al este de la sabana de Bogotá entre los municipios de Cáqueza

y Puente de Quetame y que yace en forma discordante sobre rocas paleozoicas del macizo de Quetame. Consta de lodolitas negras con intercalaciones de conglomerados y arenitas calcáreas (formación lutitas de macanal), cuarzoarenitas de grano medio ligeramente conglomeráticas con intercalaciones de limolitas grises (formación arenisca de Cáqueza). Su edad es Jurásico Superior (Titoniano)-Cretácico Inferior (Hauteriviano). Los espesores del Grupo Cáqueza son muy variables, aún más cuando existen cambios faciales rápidos, principalmente en los conjuntos inferior y superior. El fuerte tectonismo del flanco este de la cordillera oriental es quizás uno de los factores que más dificulta la estimación del espesor real de dicho grupo, ya que muchas secuencias pueden haberse medido en forma repetitiva por acción de los planos de falla. El conjunto clástico inferior varía entre 350 y 850 m de espesor, el conjunto lutítico intermedio puede alcanzar los 3000 m, la parte superior arenosa varía entre 250 y 900 m.

Formación Fόμεque (Kif). Nombre dado por Hubach (1957) al conjunto de lutitas, calizas y arenitas que afloran al este de Bogotá, en el sector de los municipios de Ubaque, Choachí y Fόμεque, que suprayacen en forma concordante al Grupo Cáqueza. La unidad está compuesta por limolitas cuarzosas de grano grueso-cuarzoarenitas de grano muy fino y bioesparitas. Su edad es Cretácico Inferior (Aptiano - Albiano). El espesor de la formación Fόμεque varía entre 500 y 600 m cerca de Fόμεque (Ingeominas, 1988) y alcanza los 1200 m en la región del Guavio (Ulloa, 1985).

Formación Une (Kiu). El nombre de esta Unidad fue establecido por Hubach (1957) para designar un conjunto arenoso bastante persistente que se extiende por el flanco este de la cordillera oriental y que se ubica en forma concordante entre las formaciones Fόμεque (infrayacente) y Chipaque (suprayacente). La formación Une se manifiesta de manera clara en la morfología porque forma cuchillas escarpadas que se destacan con respecto a las unidades adyacentes. Su litología consiste principalmente en areniscas blancas y grises, cuarzosas, de grano fino hasta conglomerático, con cemento de sílicio y minerales accesorios como mica y pirita, intercaladas con lutitas negras carbonosas dispuestas en capas de varios metros de espesor. Pueden encontrarse ocasionalmente capas de calizas de poco espesor y lentes de carbón antracítico bituminoso. El espesor de la formación es de unos 1000 m en su sección tipo, cerca de la población de Une en Cundinamarca. Se estima su edad en el Cretácico Inferior-Superior (Albiano-Cenomaniano).

Formación Chipaque (Ksc). Las primeras referencias de la formación Chipaque se tienen de Hubach (1931) en Julivert, M. (1968), quien la denomina conjunto de Chipaque, y Renzoni (1968) la redefine y establece límites más precisos para su base y techo. Está constituida por una secuencia de limolitas arenosas laminadas de color negro, con un espesor que varía entre 400 y 500 m. Su edad es Cretácico Superior (Cenomaniano-Coniaciano).



Fuente: Pulido y Gómez, 2001.

FIGURA 3-5 Columna estratigráfica generalizada del borde llanero, macizo de Quetame

- **Estratigrafía del piedemonte llanero**

En la unidad fisiográfica conocida como piedemonte llanero sobresale una secuencia de sedimentitas que originan una morfología de pequeñas elevaciones que sobresalen del

resto de terrazas que conforman la llanura y se diferencian de los abanicos, las terrazas aluviales y los aluviones recientes. Estas formaciones se describen a continuación:

Grupo Palmichal (Ksp). Nombre propuesto por Ulloa y Rodríguez (1976) para designar una sucesión de arenitas y conglomerados finos con delgadas intercalaciones de capas de lutitas, que afloran en la quebrada Palmichal y se extienden por toda la vereda Loma de Pañuelo en vecindades del río Guayuriba, el municipio de San Juan de Arama y el río Güejar. La formación consta de una secuencia de cuarzoarenitas de grano medio, grueso y conglomerático, con intercalaciones de arcillolitas grises. Se le estima una edad de Cretácico Superior (Campaniano - Maastrichtiano). Su espesor se calcula en 600 m.

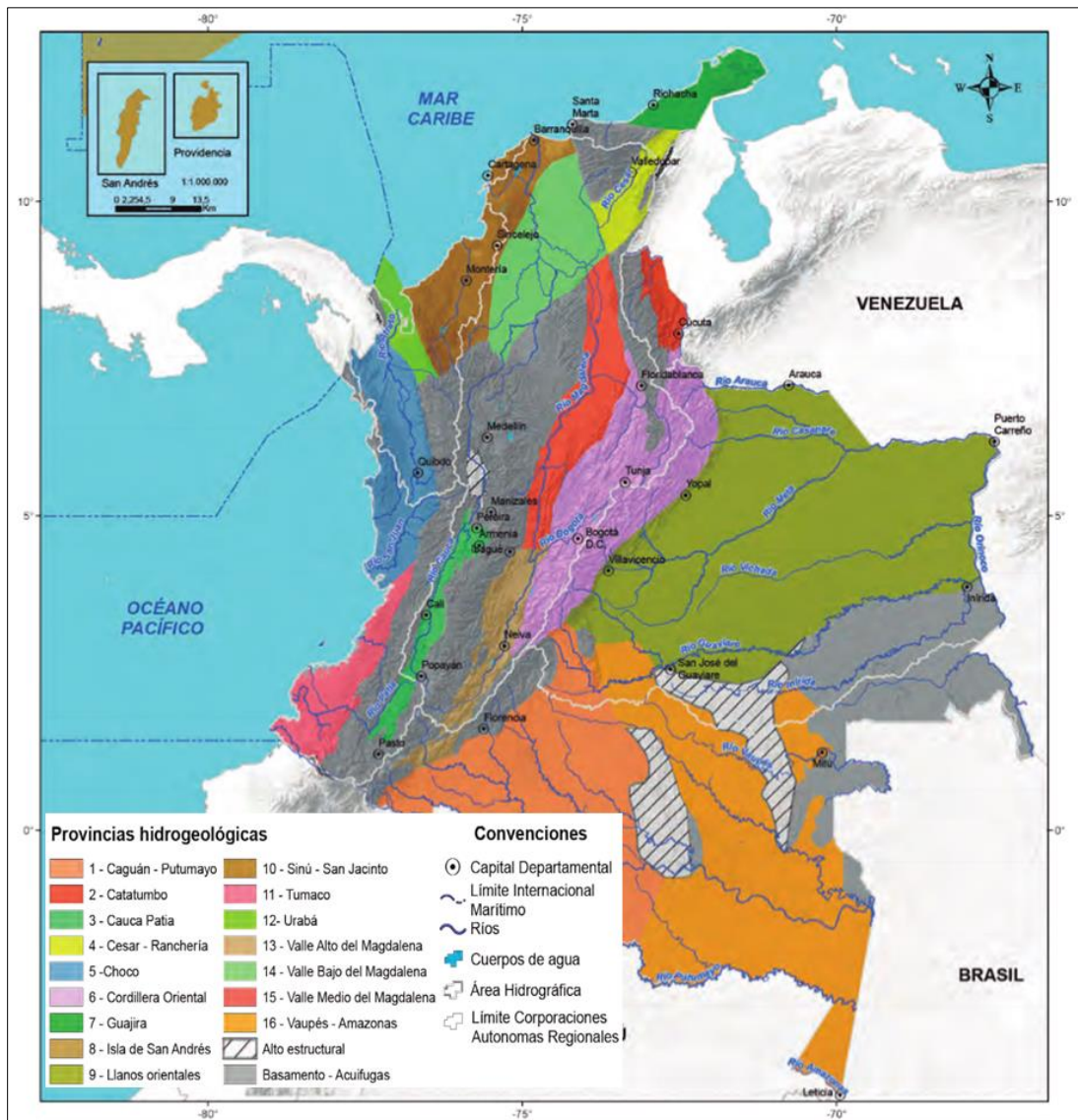
Formación Arcilla de El Limbo (Pgal). La referencia original de esta unidad litoestratigráfica fue dada por Hubach en Van der Hammen (1960), en Ulloa y Rodríguez (1979), para describir 250 m de una secuencia de arcillolitas grises y verdes con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano medio, que afloran en el lecho del río Cravo Sur, en vecindades del Morro y en la vereda El Pañuelo, y que se ha datado en el Paleoceno.

Formación Arenisca de El Limbo (Pgarl). Hubach (1960) designa con este nombre a unos paquetes de cerca de 200 m de espesor de cuarzoarenitas de grano medio a grueso y de grano muy grueso a conglomerático, con delgados niveles lenticulares de carbón. Su edad es Eoceno Superior-Oligoceno. Parte de estas rocas corresponden a lo que Rodríguez (2001) denomina como unidades transicionales del Paleógeno-Neógeno (PgNgt).

Formación La Corneta (Ngc). Este nombre fue propuesto por Ulloa y Rodríguez (1976) para designar un conjunto de gravas interestratificadas con limolitas que afloran en la quebrada La Corneta, cerca de la localidad de Nazaret en Bogotá. La sección tipo se estima en 80 m de espesor. Es un depósito de origen aluvial, con clastos tamaño grava de cuarcitas, arenitas y lodolitas, inmersos en una matriz arenosa gruesa. Su edad estimada es Plio-Pleistoceno.

3.2.1.3 Delimitación de unidades hidrogeológicas y sistemas acuíferos

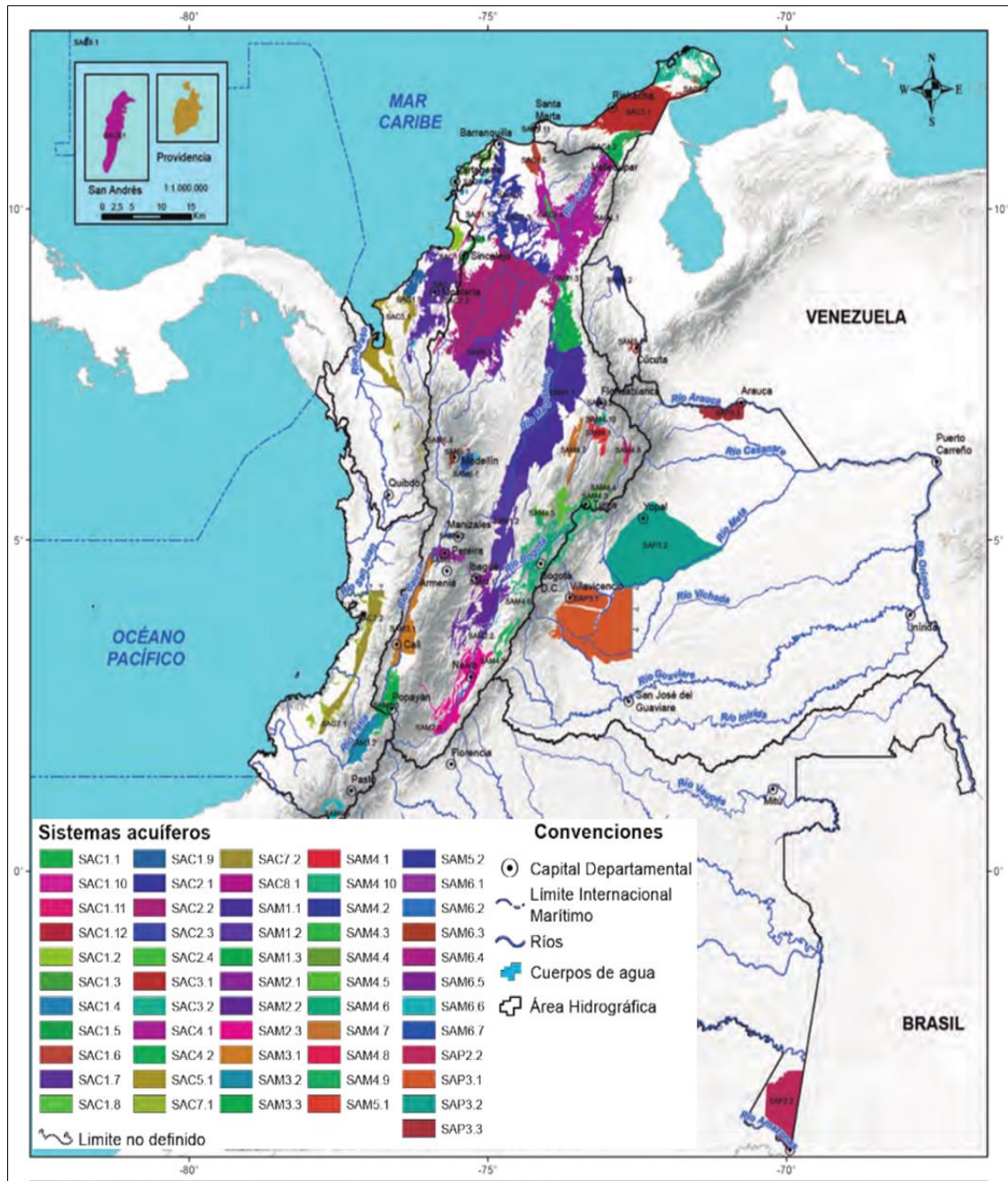
De acuerdo con la zonificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas (IDEAM, 2013a), Colombia está compuesta por 16 provincias hidrogeológicas distribuidas en cinco áreas hidrográficas, en las cuales se han identificado a la fecha 61 sistemas acuíferos de carácter local y regional y cinco transfronterizos. En la FIGURA 3-6 se presentan las provincias hidrogeológicas definidas dentro del estudio nacional del agua 2014.



Fuente: Estudio Nacional del Agua 2014, p. 130.

FIGURA 3-6 Provincias hidrogeológicas. Estudio Nacional del Agua 2014.

La distribución de los sistemas acuíferos por áreas hidrográficas, provincias hidrogeológicas y sistemas acuíferos se presenta a continuación (FIGURA 3-7).



Fuente: Estudio Nacional del Agua 2014, p. 130.

FIGURA 3-7 Sistemas de acuíferos. Estudio Nacional del Agua 2014.

Con base en las figuras anteriores, el área en estudio para la elaboración del presente proyecto se encuentra localizada en la provincia hidrogeológica de los Llanos Orientales, en el sistema acuífero denominado SPA3-1. Como se presenta en la FIGURA 3-8.

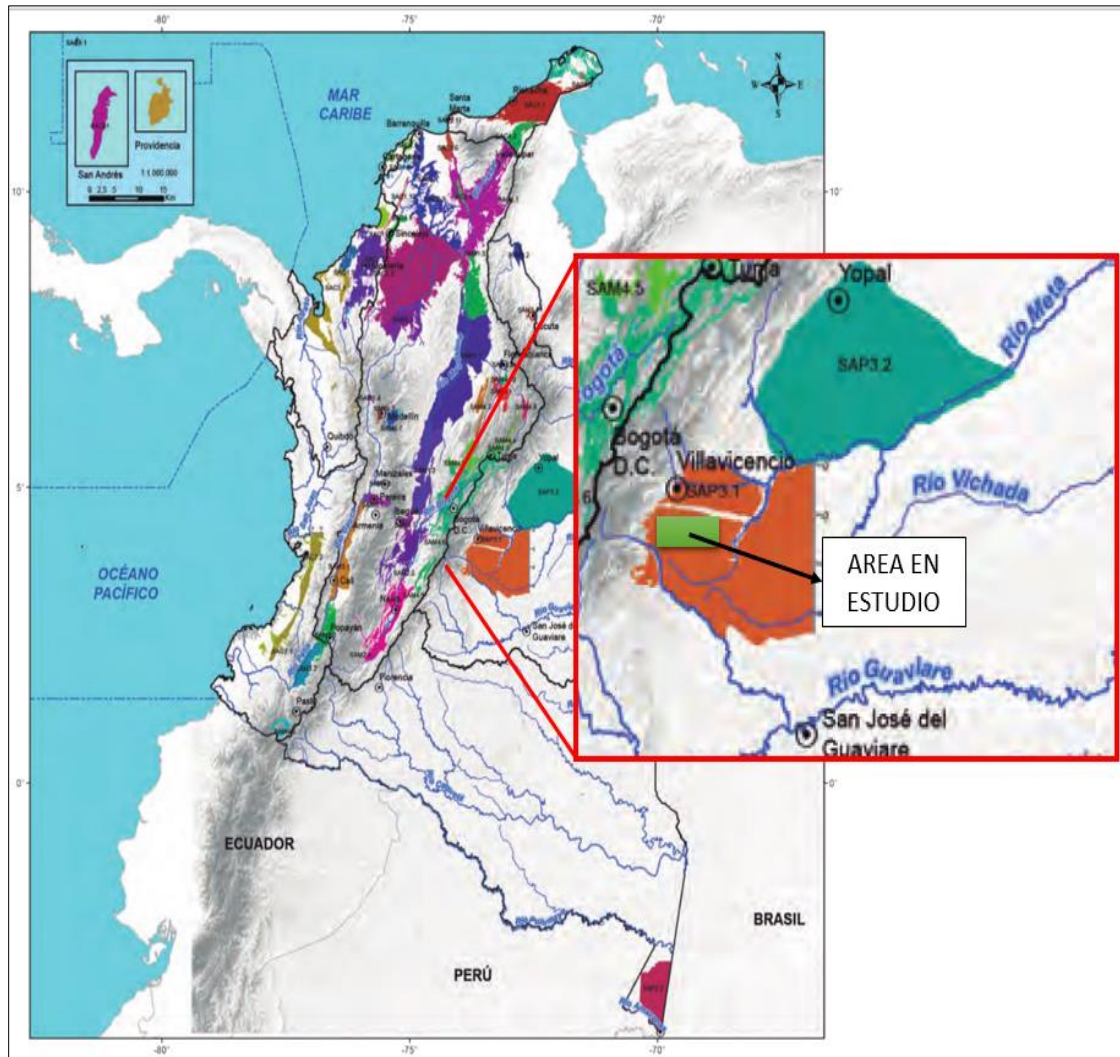


FIGURA 3-8 Sistemas de acuíferos del área en estudio.

En la FIGURA 3-9 se describen los sistemas acuíferos por áreas hidrográficas y provincias hidrogeológicas a la altura del área en estudio.

Provincia hidrogeológica	Código	Sistema acuífero	Unidades hidrogeológicas	Tipo de acuíferos	Parámetros hidráulicos		Área superficial (Km ²)
Área hidrográfica del Orinoco							
PP3 Llanos orientales	SAP3.1 (13S)	Villavicencio-Granada-Puerto López	Acuífero Cuaternario y Acuífero Terciario	Libres a confinados	B= 80 a >230 m	T= 102 a 215 m ² /d S= 9.9x10-4 a 1.5x10-3	13.753
	SAP3.2 (13S)	Yopal Tauramena (Maní)	Acuífero Terrazas de planicie aluvial (Qt), Acuífero de depósitos aluviales recientes (Qal)	Libres a confinados			17.446
	SAP3.3 (13S)	Arauca - Arauquita	C-D1-D2, F	Libres a confinados	B= 280 a 900 m K= 22.6 m/d	T= 650 a 750 m ² /d S= 0.3 a 3.2x10-4	1.807

Fuente: Estudio Nacional del Agua 2014, p. 136.

FIGURA 3-9 Descripción de los sistemas de acuíferos del área en estudio.

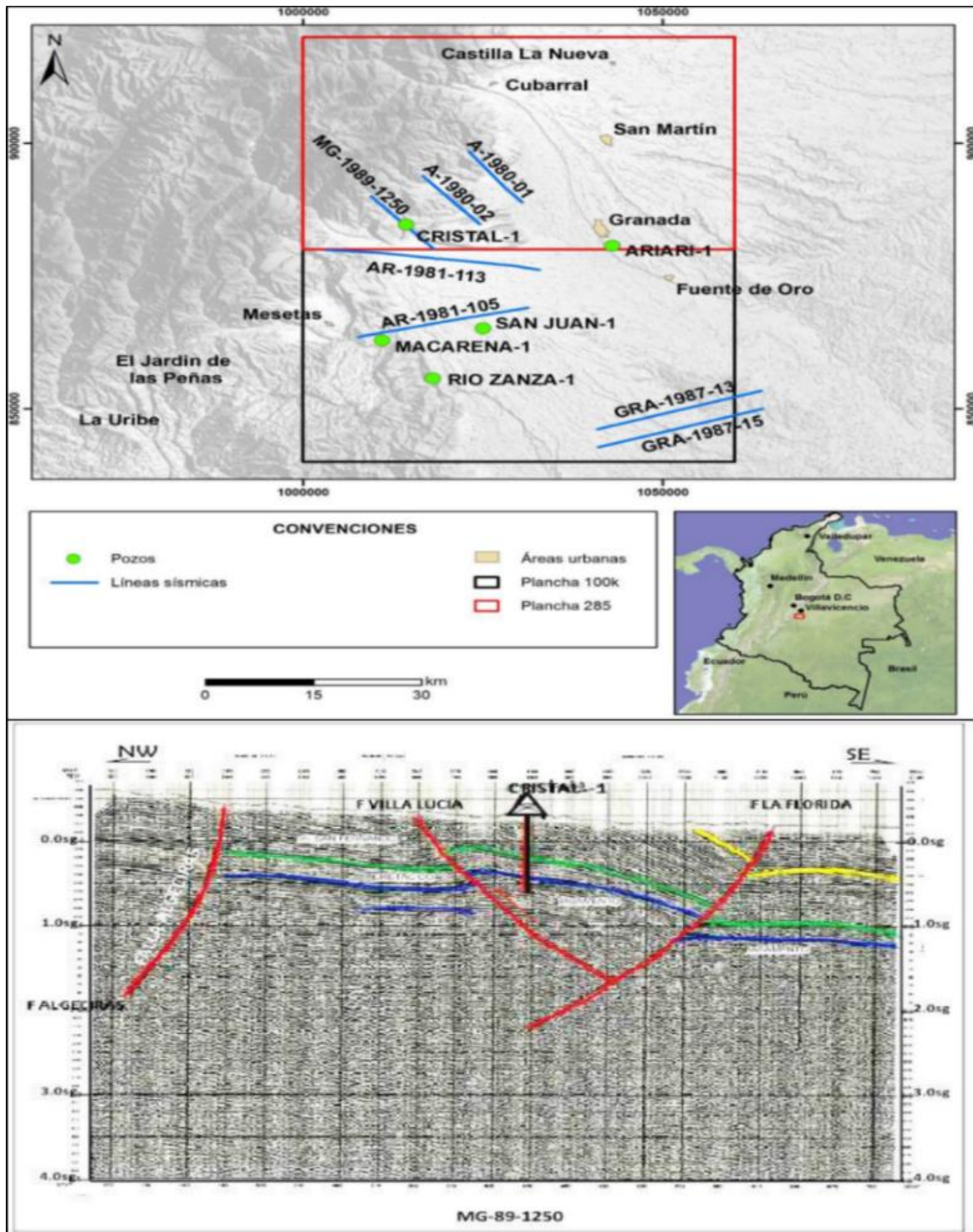
Teniendo en cuenta la evaluación realizada en el Estudio Nacional del Agua 2014, en el área de estudio existen unidades hidrogeológicas de los acuíferos cuaternario y terciario, con tipos de acuíferos libres a confinados. Esta información se corrobora con la información geológica del área en estudio.

3.2.2 Marco geológico local

El área de estudio se encuentra localizada en la planicie de la cuenca de los Llanos Orientales. En el presente capítulo se describe la estratigrafía y geología estructural del área del proyecto.

3.2.2.1 Geología estructural

El área de estudio se encuentra influenciada por la falla regional Algeciras Sur, la cual presenta un rumbo regional noreste y buzamiento hacia el noroeste, con cinética dextral. Dentro del área en estudio se presentan fallas satélites denominadas en la Memoria explicativa de la Plancha 285 del Servicio Geológico Colombiano como Falla Villa Lucía y La Floridas, las cuales presentan cinética dextral inversa generando bloque levantado, como se muestra en la FIGURA 3-10, en la cual se presenta una línea sísmica interpretada al sur del área de estudio. Estas fallas conservan su rumbo hacia el noreste hasta la zona de estudio, según la plancha 285 escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano, como se muestre en la FIGURA 3-13.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano, 2015.

FIGURA 3-10 Línea sísmica mg-1989-1250 interpretada

3.2.2.2 Estratigrafía de la planicie oriental

El área de estudio se encuentra en la planicie oriental de la cuenca de los Llanos Orientales, su columna estratigráfica se presenta en FIGURA 3-11. La información estratigráfica proporcionada por la industria petrolera (a nivel de sub superficie) considera que el basamento de esta zona de la cuenca está constituido por rocas de edad Pre-Jurásica, por esta razón la información disponible para este sector se centra en unidades Cretácicas, Paleógenas y Neógenas. A partir de la información de la Memoria explicativa de la plancha 285 del servicio geológico se establecieron las unidades presentes en el área de estudio, las cuales de base a tope son las siguientes:

Lutitas de Pipiral (D2): metalimolitas a filitas en capas delgadas a medias tabulares masivas, ocasionalmente conglomeráticas.

Formación Une (K2): corresponde a la progradación del nivel más inferior de las arenitas agrupadas con el mismo nombre en la zona de piedemonte (FIGURA 3-11). Su edad es Cretácico Inferior (Barremiano– Aptiano).

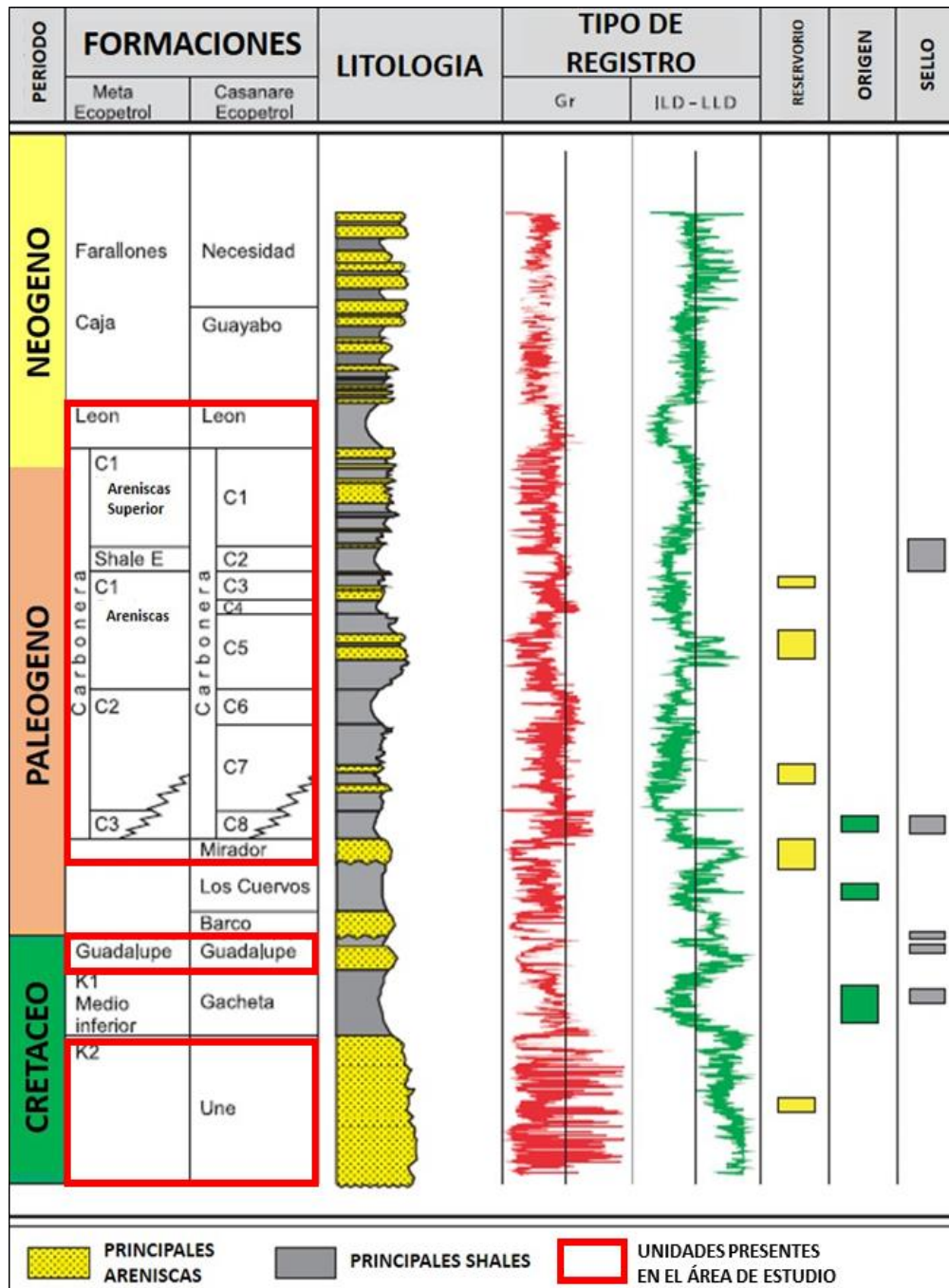
Grupo Guadalupe (K1 Superior): El Grupo Guadalupe lo definieron formalmente Pérez & Salazar (1978) al oriente de Bogotá. Esta unidad agrupa las rocas producto de la progradación oriental de los sedimentos clásticos del Grupo Palmichal y está conformado por las formaciones arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna. Su edad es Cretácico Superior (Coniaciano)-Paleoceno (FIGURA 3-11).

Formación Mirador: unidad correlacionable con la formación arenisca de El Limbo del piedemonte, que es una importante roca almacenadora de hidrocarburos. Su edad es Eoceno Superior-Oligoceno.

Formación Carbonera ©: consta de una alternancia de niveles continuos y lenticulares de arcillolitas y arenitas, siendo las arenitas las principales rocas almacenadoras (a nivel regional). Desde el punto de vista sísmico, los topes de las capas tabulares de las areniscas están relacionados con los horizontes impares de reflexión, los cuales se numeran de C1 a C7 (de arriba hacia abajo de la formación). Los techos de las capas de arcilla corresponden a los horizontes pares de reflexión y van desde C2 hasta C8. Su edad es Eoceno-Oligoceno.

Formación León (L): secuencia de lodolitas, arcillolitas y areniscas, constituyendo la roca sello regional. Su edad es Mioceno medio.

En la FIGURA 3-11 se observa la columna estratigráfica generalizada de la cuenca de los Llanos Orientales.



Fuente: Barrero et al., 2007.

FIGURA 3-11 Columna estratigráfica de la cuenca de los Llanos Orientales

La región fisiográfica conocida como planicie oriental o Llanos Orientales ocupa la mayor extensión del departamento del Meta. Corresponde a la zona plana donde se han venido

acumulando los productos de los procesos denudativos que de manera incesante han actuado sobre la cordillera oriental desde su emersión como cadena montañosa u orógeno, hasta modelar su actual morfología y relieve. Los productos de estos procesos denudativos (meteorización y erosión) se manifiestan como grandes depósitos de edad Cuaternaria que cubren extensas zonas del departamento y que enmascaran la estratigrafía del subsuelo (Rodríguez, 2001).⁶ Teniendo en cuenta la información del servicio geológico consignada en la plancha 285 y su respectiva memoria explicativa, los depósitos cuaternarios pueden alcanzar espesores hasta de 250 metros. A continuación, se describen las formaciones geológicas de orden regional que pertenecen al proyecto o a su área de influencia.

- **Depósitos cuaternarios**

Los trabajos más recientes publicados (Escala 1:100.000) referentes a las planchas 266, 267, 285 y 286 del Servicio Geológico Colombiano presentan un trabajo más detallado que los anteriores, ya que dichos sedimentos de edad Pleistoceno-Holoceno se agrupan en cinco tipos de depósitos, los cuales son los siguientes:

Depósitos cuaternarios - Terrazas aluviales (Qt). Conformados por conglomerados con clastos de tamaño guijos a bloques, con matriz areno-arcillosa, algunas veces clasto soportado y otras matrices soportadas, con estratificación e imbricación incipiente.

Depósitos cuaternarios - Abanicos aluviales antiguos (Q1ab). Formados por gravas y clastos subangulares a redondeados, de cuarzo lechoso, areniscas y rocas metamórficas en una matriz arenosa.

Depósitos cuaternarios - Coluviones (Qc). Conformados por clastos angulares en una matriz arcillosa, mal clasificados y no estratificados.

Depósitos cuaternarios - Aluviales (Qal). Conformado por gravas de cuarzo lechoso, clastos de areniscas y clastos metamórficos en matriz arenosa.

Teniendo en cuenta el detalle de la cartografía de los antecedentes cartográficos oficiales, el análisis de sensores remotos (incluyendo el modelo de elevación digital, DEM), la

⁶ Rodríguez, A. (2001). Mapa geológico del departamento del Meta, escala 1:500.000. Bogotá: Memorial explicativo, Ingeominas, p. 33.

información geológica de los EIA próximos al área en estudio (EIA Cubarral, EIA Zocay, CPO10 Sur y EIA Taray) En la TABLA 3-1 y la FIGURA 3-13 se describen las unidades geológicas que afloran en el área de estudio y su distribución espacial.

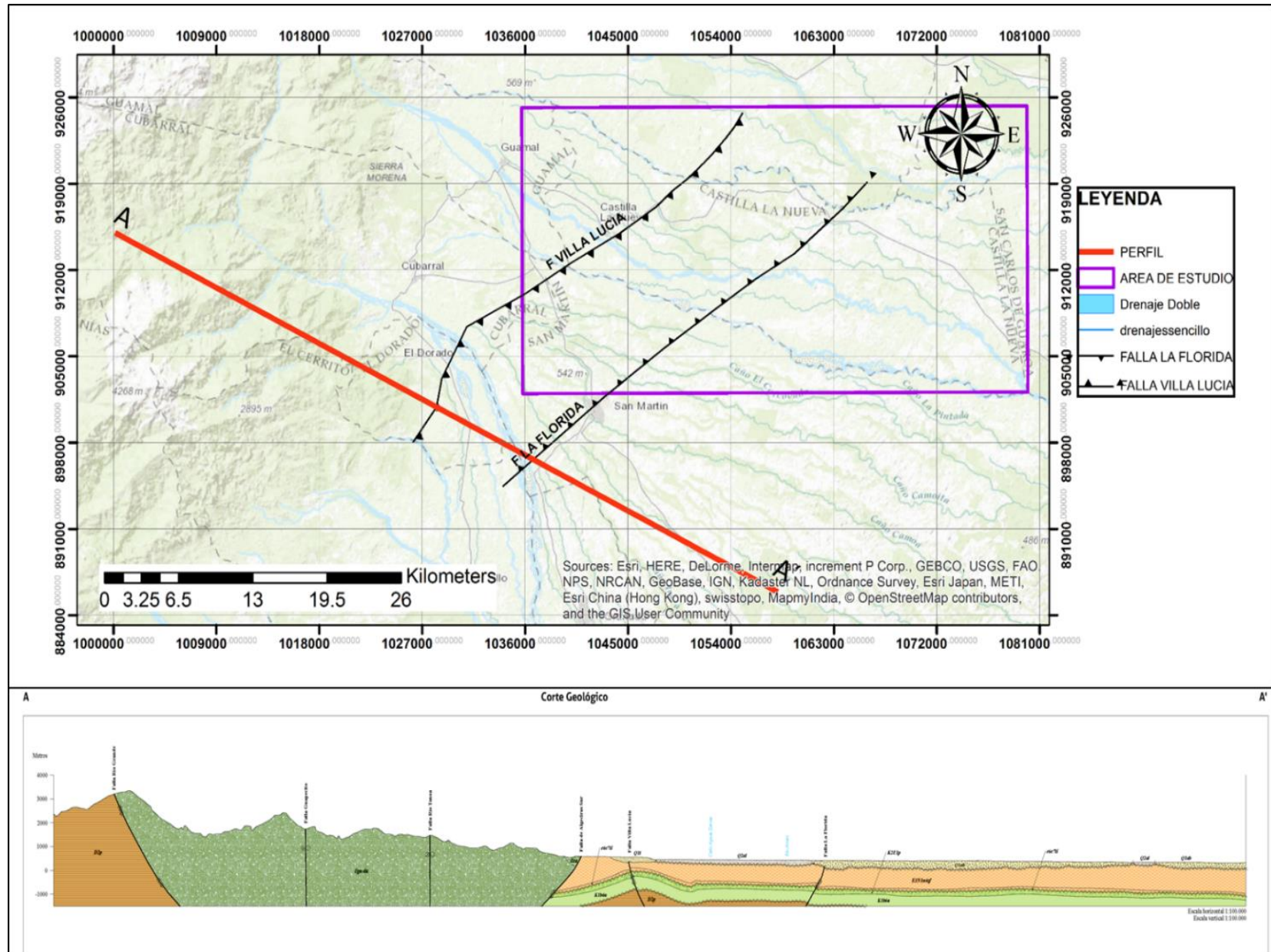
Para comprender la geometría del subsuelo se usó el perfil geológico tomado de la plancha 285 del SGC (Ver FIGURA 3-12), el cual se encuentra localizado al suroeste del área de estudio donde se observan fallas importantes como Villa Lucía y La Florida, las cuales tienen un tren suroeste-noreste. Estas fallas presentan cinética inversa de esfuerzos compresivos.

En este perfil se observan unidades del Devónico, Cretácico, Paleógeno-Neógeno y Cuaternario con contactos discordantes, se aprecia que entre las fallas Villa Lucía y La Florida se encuentra una estructura anticlinal desplazada.

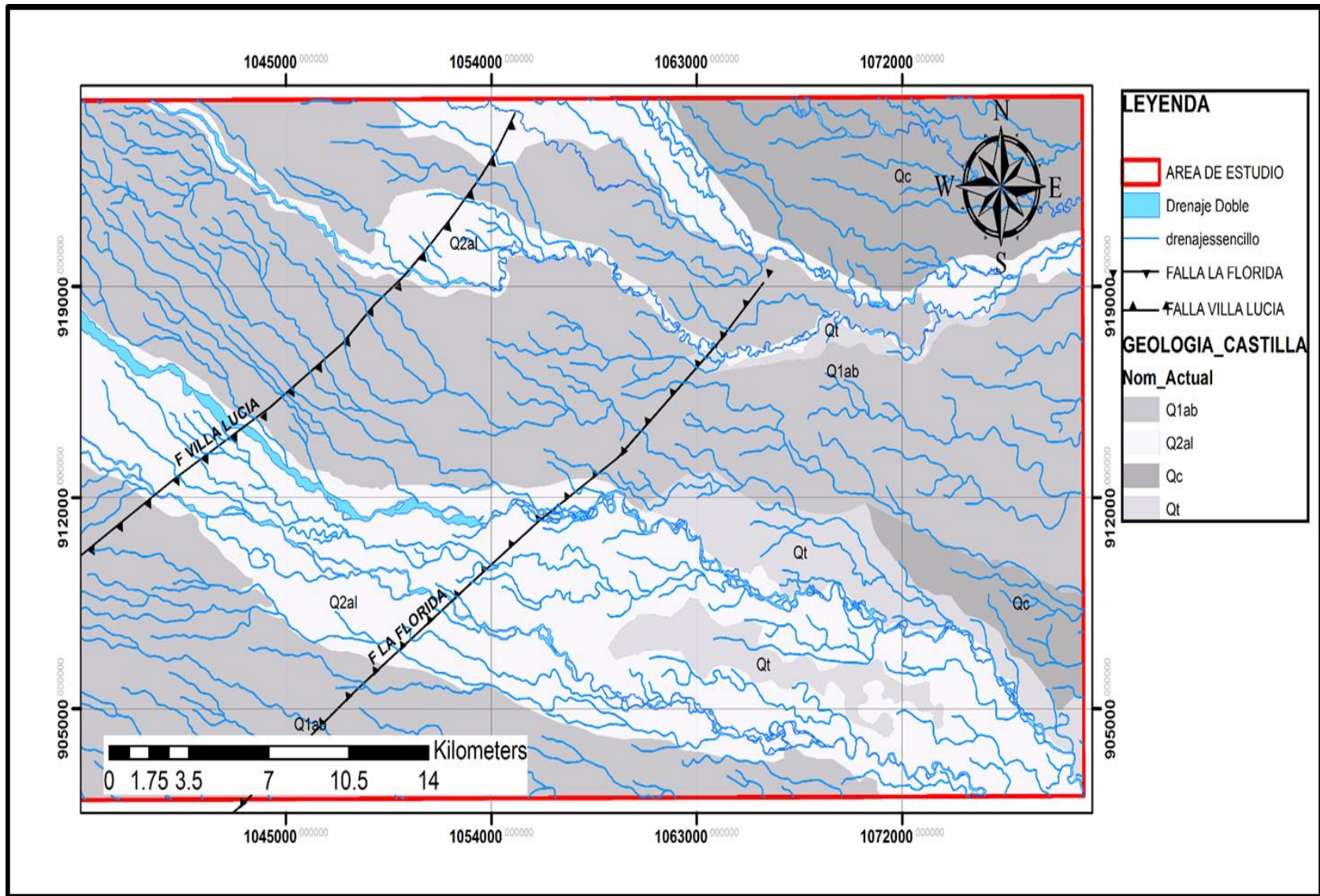
TABLA 3-1 Descripción de unidades geológicas en el área en estudio.

ERA	PERIODO	ÉPOCA	UNIDAD GEOLÓGICA	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Depósitos aluviales	Qal	Son depósitos asociados a los ríos Orotoy, Acacias – Pajure y Guamal representativos de un patrón de tipo meándrico, conformado por materiales finos (arenas muy finas y lodos) intercalados con capas lenticulares de gravas.
			Depósitos coluviales	Qc	Conformados por clastos angulares en una matriz arcillosa, mal clasificados y no estratificados.
		PLEISTOCENO	Depósitos de terraza	Qt	Conformadas por conglomerados con clastos de tamaño guijos a bloques, con matriz areno-arcillosa, algunas veces clasto soportado y otras matriz soportado, con estratificación e imbricación incipientes.
			Depósitos de abanicos	Q1ab	Formados por gravas y clastos subangulares a redondeados de cuarzo lechoso, areniscas y rocas metamórficas en una matriz arenosa. recubiertas por un nivel de suelo orgánico.

Con base en esta información se generó el mapa geológico local del área en estudio y su respectivo modelo geológico 3-D (FIGURA 3-13 y FIGURA 3-30).



Fuente: Modificado de Servicio Geológico Colombiano, plancha escala 1:100.000 -285.
FIGURA 3-12 Perfil geológico a-a' plancha 285 SGC.



Fuente: Modificado de Servicio Geológico Colombiano, planchas escala 1:100.000 - 266, 267, 285 y 286.

FIGURA 3-13 Mapa geológico local del área en estudio

3.2.2.3 Prospección geofísica y geometría del acuífero

La geofísica consiste en aplicar los principios de la física al estudio de la Tierra (Overmeeren, R., 1987). Los métodos geofísicos se basan en el análisis y la variación de propiedades físicas como la resistividad, la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, las variaciones del campo magnético de la Tierra y la densidad de la roca. A través de la aplicación de métodos geofísicos puede obtenerse información del subsuelo, la cual ayuda a identificar estructuras, fallas, estratificaciones, unidades hidrogeológicas, profundidad del basamento, condiciones de salinidad del agua, etc. Esta información, al ser evaluada en conjunto con la cartografía geológica de superficie, la posición de los niveles freáticos y las columnas estratigráficas de pozos permite establecer un modelo geológico - geofísico (profundidad, espesor, continuidad lateral de unidades de interés hidrogeológico), base para la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual.

Los estudios de exploración o prospección geofísica para aguas subterráneas han generalizado el empleo de métodos geoelectrónicos como sondeos eléctricos verticales (SEV); sin embargo, de acuerdo con las características propias del medio que se requiere investigar, podría ser más adecuado el empleo adicional de otros métodos o la integración de algunos de ellos (FIGURA 3-14).⁷

MÉTODOS	PRINCIPIOS	INFORMACIÓN QUE PUEDE OBTENERSE
Geoelectrónico	Conductividad o resistividad eléctrica	Geometría del acuífero (profundidad de formaciones impermeables y estructura del subsuelo), extensión lateral, propiedades de las formaciones (arena – arcilla), salinidad del agua, plumas de contaminación.
Sísmica de refracción	Velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico	Depósitos secos-saturados, espesores de diferentes estratos y detección de zonas de fracturamiento.
Sísmica de reflexión	Velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico	Zona de fallas, cartografía de estructuras de recubrimiento.
Gravimetría	Densidad	Relleno-basamento
Magnetometría	Susceptibilidad magnética	Geometría del acuífero (profundidad de formaciones impermeables y estructura del subsuelo), extensión lateral.

Fuente: Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos, p. 32.

FIGURA 3-14 Métodos geofísicos para las evaluaciones hidrogeológicas

⁷ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos, numeral 2.2, fase diagnóstico, p. 31, Colombia.

Según el Ingeominas, en Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Ideam, Ingeominas, Coralina y CVC, 2002, de acuerdo con la escala del modelo hidrogeológico conceptual la densidad de sondeos eléctricos verticales por km² podría ser como se define en la FIGURA 3-15.

ESCALA	DENSIDAD POR KM ²
1:100.000	1 SEV por cada 10 km ²
1:50.000	1 SEV / 5 km ²
1:25.000	1 SEV / 2.5 km ²

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Ideam, Ingeominas, Coralina y CVC, 2002.

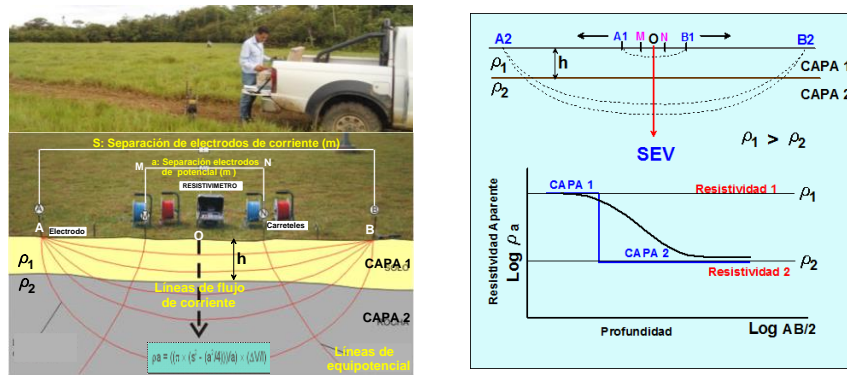
FIGURA 3-15 Densidad de sondeos eléctricos, de acuerdo con la escala del modelo

Para construir el modelo geofísico del área en estudio sólo se cuenta con información secundaria de sondeos eléctricos verticales (SEV).

3.2.2.3.1 Sondeos eléctricos verticales (SEV)

El objetivo del análisis de sondeos eléctricos verticales es delimitar las capas en el subsuelo para el área en estudio, obteniendo sus espesores y resistividades, información necesaria para la construcción del modelo numérico.

Los SEV se elaboraron con un dispositivo tipo Schlumberger, que es un arreglo de cuatro electrodos dispuestos simétricamente en relación con el centro del dispositivo. Una línea de emisión (electrodos A y B) hacen pasar una corriente de intensidad I, una línea de recepción (electrodos M y N) mide la diferencia de potencial generada, los valores obtenidos permiten calcular la resistividad aparente del terreno de acuerdo con la ley de Ohm. En la FIGURA 3-16 se muestra la ejecución de un SEV utilizando un arreglo Schlumberger y su representación gráfica con un modelo de dos capas, con resistividades R1 y R2.



Fuente: EIA Sokay, 2013.

FIGURA 3-16 Dispositivo tetraelectrónico simétrico de Schlumberger.

Para elaborar el modelo geofísico del área en estudio se utilizaron 86 sondeos eléctricos verticales, tomados de los estudios EIA CPO-10 SUR, EIA Cubarral, EIA Sokay, PMA Estación San Fernando. La localización de los SEV se puede observar en la FIGURA 3-17.

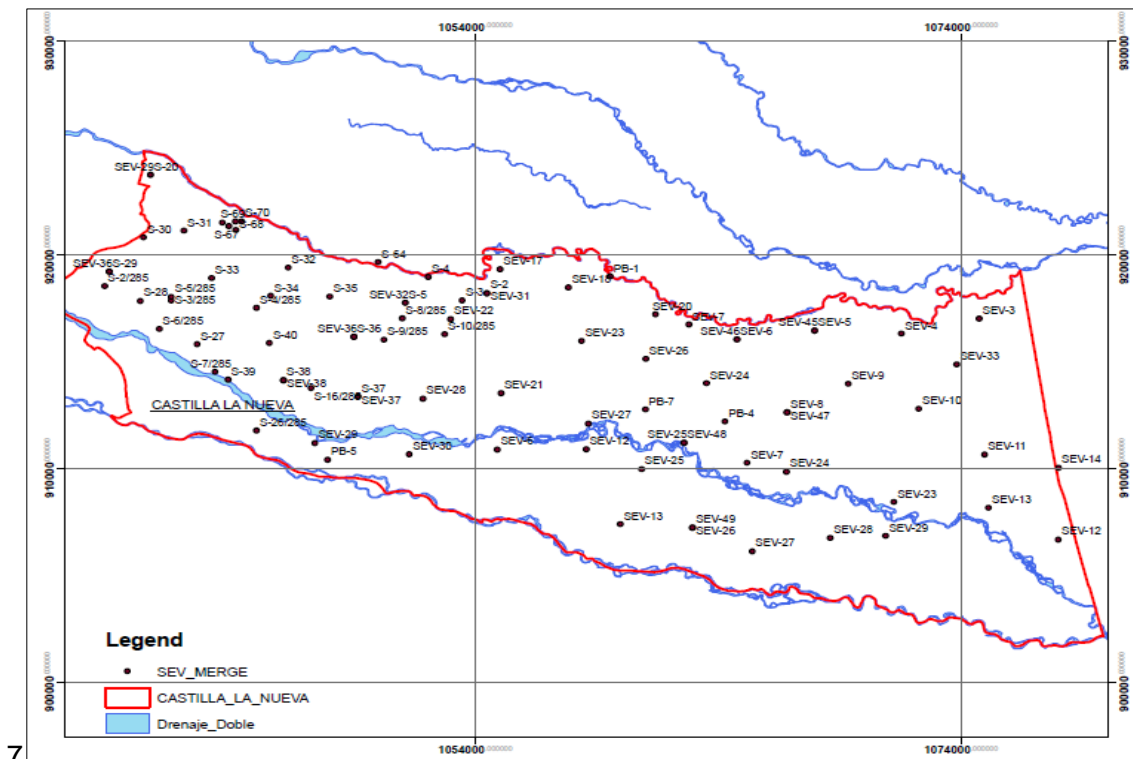


FIGURA 3-17 Localización de los sondeos eléctricos verticales.

- **Resistividad de los materiales naturales**

La resistividad en los materiales naturales varía desde 10^{-8} en los metales nativos hasta 10^{15} en micas (perpendiculares a la foliación).

Los valores de la resistividad en una roca están determinados más que por su composición mineralógica por el agua que contienen, fundamentalmente por la porosidad y la salinidad del agua (a mayor salinidad mayor conductividad).

Esto hace que la resistividad de cada tipo de roca presente una gran variabilidad. En general, en el campo encontraremos valores de los siguientes órdenes:

- Rocas ígneas y metamórficas inalteradas: $> 1000 \Omega.m$
- Rocas ígneas y metamórficas alteradas o fuertemente diaclasadas: 100 a $1000 \Omega.m$
- Calizas y areniscas: 100 a más de $1000 \Omega.m$
- Arcillas: 1 a $10 \Omega.m$
- Limos: 10 a $100 \Omega.m$
- Arenas: 100 a $1000 \Omega.m$
- Gravas: 200 a más de $1000 \Omega.m$

Es importante saber que en materiales detríticos la resistividad aumenta con el tamaño de grano. Por tanto, en una investigación hidrogeológica en materiales detríticos, se buscan resistividades elevadas que indican los materiales más gruesos y mayor permeabilidad.

En rocas compactas (en general, las que deben su permeabilidad a la posible fisuración) se buscan las resistividades más bajas, que indican las zonas en que la formación presente la mayor fracturación o alteración. En este caso, puede suceder que las zonas o niveles de menor conductividad tampoco sean permeables si los planos de fracturación han sido colmatados por arcillas de alteración.

En una región determinada, la experiencia indica qué valores concretos de resistividad presenta cada una de las formaciones. En otras ocasiones estos valores pueden obtenerse de diagráfias o realizando sondeos eléctricos en el mismo punto donde exista una perforación de la que se conozca la columna litológica (SEV paramétricos).

- **Cortes geoelectricos. Nomenclatura**

Un SEV puede realizarse sobre cualquier combinación de formaciones geológicas, pero para que la curva de resistividad aparente obtenida sea interpretable el subsuelo debe estar formado por capas horizontales y homogéneas. En muchos casos la realidad se acerca lo suficiente a esta descripción teórica como para que los resultados sean aprovechables. En otros casos, el procedimiento no es aplicable.

Un corte geoelectrico de n capas se compone de los siguientes datos: n valores de resistividad y n-1 espesores (no se conoce el espesor de la última capa).

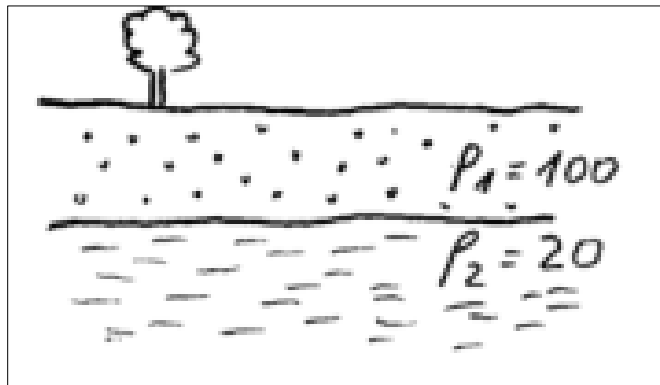
A continuación se presentan ejemplos de los tipos de cortes geoelectrico que se pueden encontrar.

- Ejemplo cortes de dos capas

Solamente pueden presentarse dos posibilidades: $\rho_1 > \rho_2$ y $\rho_1 < \rho_2$. No reciben nomenclatura específica. Supongamos un ejemplo del primer caso:

$\rho_1 = 100 \Omega.m$ (arenas)

$\rho_2 = 20 \Omega.m$ (limos)

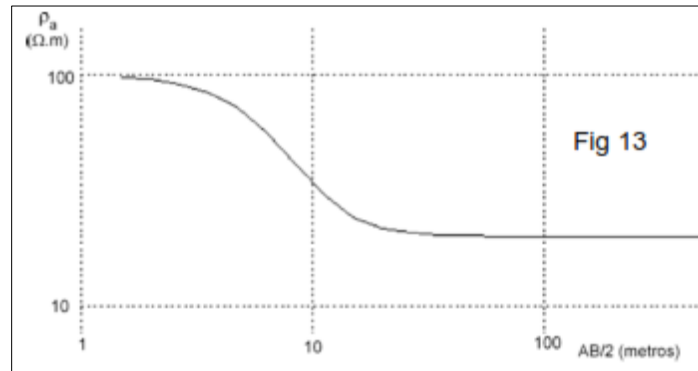


Fuente: Prospección geofísica. Sondeos eléctricos verticales, p. 7.

FIGURA 3-18 Ejemplo de un corte geoelectrico de dos capas.

Si se comienza la realización de un SEV suponiendo que en la primera medida el flujo eléctrico pasa solamente por la primera capa y se obtiene una ρ_a igual a la ρ_1 de la primera capa: $100 \Omega.m$, al realizar la segunda medida parte del flujo eléctrico pasaría por la segunda

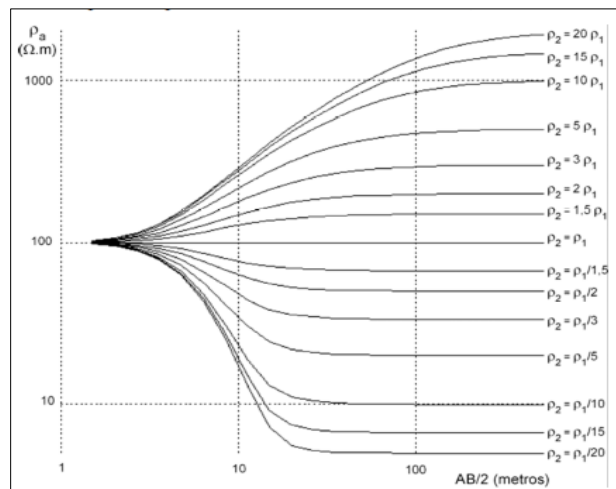
capa, por lo que el valor de ρ_a obtenido estaría entre 100 y 20 $\Omega.m$, por ejemplo 96 $\Omega.m$. A medida que se abre la distancia AB, la corriente iría circulando a profundidad creciente, razón por la cual cada vez sería mayor la fracción de flujo eléctrico que circularía por la capa de 20 $\Omega.m$. Consecuentemente, los valores de ρ_a siempre estarían entre 100 y 20 $\Omega.m$, pero se irían acercando sintóticamente a 20 $\Omega.m$ a medida que se abriera AB. Por tanto, se obtendría en el campo una curva como la que se muestra en la FIGURA 3-19.



Fuente: Prospección geofísica. Sondeos eléctricos verticales, p. 7.

FIGURA 3-19 Ejemplo de un corte geoelectrico de dos capas.

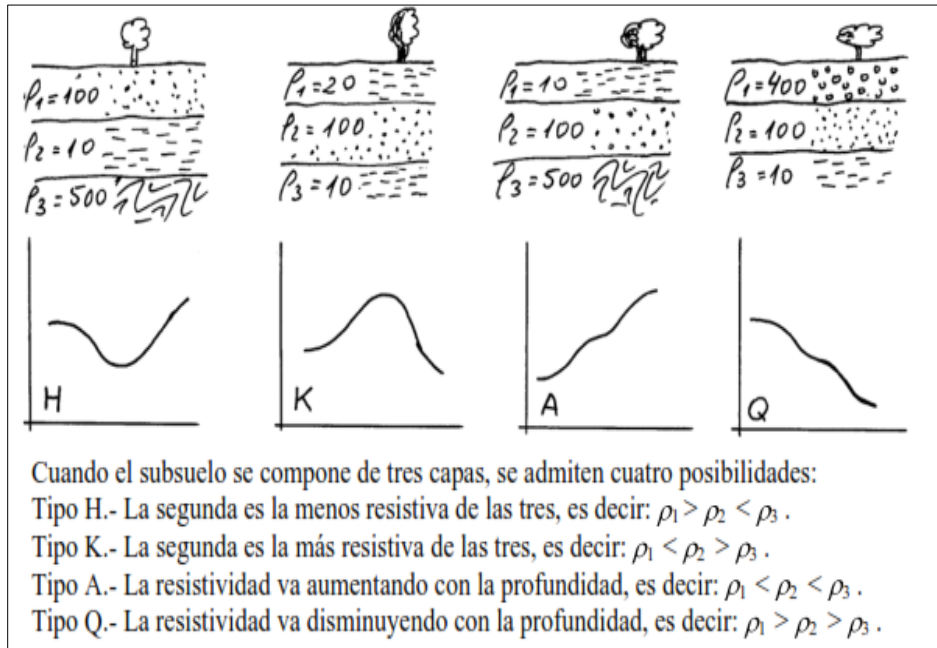
Cualquier otro corte geoelectrico dará exactamente la misma curva, simplemente más arriba o más abajo en el gráfico, pero la curva sería idéntica.



Fuente: Prospección geofísica. Sondeos eléctricos verticales, p. 7.

FIGURA 3-20 Posibles curvas de resistividad aparente que se obtendrían sobre dos capas.

La FIGURA 3-21 presenta ejemplos de cortes geoelectricos de tres capas.



Fuente: Prospección geofísica. Sondeos eléctricos verticales, p. 7.

FIGURA 3-21 Ejemplo de un corte geoelectrico de tres capas.

En la TABLA 3-2 se presenta el análisis de los sondeos eléctricos verticales realizados en el área de estudio.

TABLA 3-2 Sondeos eléctricos verticales utilizados para elaborar modelo de capas

FECHA	ID	LOCALIZACIÓN	X COORD	Y COORD	No. CAPA	RES (OHM-m)	ESPESOR (m)	PROF (m)
19/11/2012	SEV-3	Vereda Surimena	1074758.405	916987.5944	1	452	1.3	1.3
19/11/2012	SEV-3	Vereda Surimena	1074758.405	916987.5944	2	204.3	1.3	2.7
19/11/2012	SEV-3	Vereda Surimena	1074758.405	916987.5944	3	1201.3	7.9	10.6
19/11/2012	SEV-3	Vereda Surimena	1074758.405	916987.5944	4	83.6	25.7	36.3
19/11/2012	SEV-4	Vereda Barro Blanco	1071552.825	916284.6253	1	110.1	2	2
19/11/2012	SEV-4	Vereda Barro Blanco	1071552.825	916284.6253	2	869	3.4	5.4
19/11/2012	SEV-4	Vereda Barro Blanco	1071552.825	916284.6253	3	53.9	44.2	49.6
19/11/2012	SEV-5	Vereda Barro Blanco	1067986.714	916429.6947	1	442.8	2.8	2,8
19/11/2012	SEV-5	Vereda Barro Blanco	1067986.714	916429.6947	2	960.8	7.6	10,4
19/11/2012	SEV-5	Vereda Barro Blanco	1067986.714	916429.6947	3	92.3	38.2	48,6
19/11/2012	SEV-5	Vereda Barro Blanco	1067986.714	916429.6947	4	21.4	59.7	108
20/11/2012	SEV-6	Vereda Barro Blanco	1064777.436	916005.1506	1	92.8	2	2,0
20/11/2012	SEV-6	Vereda Barro Blanco	1064777.436	916005.1506	2	159.7	3.7	5,7
20/11/2012	SEV-6	Vereda Barro Blanco	1064777.436	916005.1506	3	301.8	46	51,7
20/11/2012	SEV-7	Vereda Barro Blanco	1062799.832	916718.8206	1	86.1	2.2	2,2
20/11/2012	SEV-7	Vereda Barro Blanco	1062799.832	916718.8206	2	455.6	11.6	13,7
20/11/2012	SEV-7	Vereda Barro Blanco	1062799.832	916718.8206	3	132.4	38.2	51,9
20/11/2012	SEV-8	Vereda El Toro	1066851.724	912607.5683	1	137.4	4	4,0
20/11/2012	SEV-8	Vereda El Toro	1066851.724	912607.5683	2	274.8	4.9	4,9
20/11/2012	SEV-8	Vereda El Toro	1066851.724	912607.5683	3	893.8	33.3	42,3
20/11/2012	SEV-9	Vereda El Toro	1069369.759	913934.4181	1	227.7	2.9	2,9
20/11/2012	SEV-9	Vereda El Toro	1069369.759	913934.4181	2	757.4	4.2	7,1
20/11/2012	SEV-9	Vereda El Toro	1069369.759	913934.4181	3	244.3	41.8	48,9

FECHA	ID	LOCALIZACIÓN	X COORD	Y COORD	No. CAPA	RES (OHM-m)	ESPESOR (m)	PROF (m)
21/11/2012	SEV-10	Vereda El Toro	1072269.16	912761.8406	1	213.9	2.4	2,4
21/11/2012	SEV-10	Vereda El Toro	1072269.16	912761.8406	2	652.2	8.6	11,1
21/11/2012	SEV-10	Vereda El Toro	1072269.16	912761.8406	3	230.8	31.2	42,3
21/11/2012	SEV-10	Vereda El Toro	1072269.16	912761.8406	4	47.1	65.8	108,1
21/11/2012	SEV-11	Vereda El Toro	1074978.238	910629.9046	1	50.6	1.4	1,4
21/11/2012	SEV-11	Vereda El Toro	1074978.238	910629.9046	2	219.5	7.5	8,9
21/11/2012	SEV-11	Vereda El Toro	1074978.238	910629.9046	3	97.2	36.6	36,6
21/11/2012	SEV-12	Vereda Alto Corozal	1078010.425	906653.343	1	44	2.5	2,5
21/11/2012	SEV-12	Vereda Alto Corozal	1078010.425	906653.343	2	163.4	2.8	5,3
21/11/2012	SEV-12	Vereda Alto Corozal	1078010.425	906653.343	3	363.9	33.9	39,2
21/11/2012	SEV-13	Vereda Alto Corozal	1075143.891	908127.3979	1	124.5	1.3	1,3
21/11/2012	SEV-13	Vereda Alto Corozal	1075143.891	908127.3979	2	570.3	5.9	7,2
21/11/2012	SEV-13	Vereda Alto Corozal	1075143.891	908127.3979	3	344	21.9	29,1
23/11/2012	SEV-23	Vereda Alto Corozal	1071244.348	908402.0792	1	283.1	2.1	2,1
23/11/2012	SEV-23	Vereda Alto Corozal	1071244.348	908402.0792	2	603.3	4.3	6,4
23/11/2012	SEV-23	Vereda Alto Corozal	1071244.348	908402.0792	3	313.3	30.7	37,1
23/11/2012	SEV-24	Vereda Alto Corozal	1066815.944	909825.1184	1	77.4	0.3	0,3
23/11/2012	SEV-24	Vereda Alto Corozal	1066815.944	909825.1184	2	132	0.9	1,2
23/11/2012	SEV-24	Vereda Alto Corozal	1066815.944	909825.1184	3	633.5	49.7	50,9
24/11/2012	SEV-25	Vereda Alto Corozal	1062598.215	911177.0949	1	62.7	1.3	1,3
24/11/2012	SEV-25	Vereda Alto Corozal	1062598.215	911177.0949	2	225.7	7.6	8,8
24/11/2012	SEV-25	Vereda Alto Corozal	1062598.215	911177.0949	3	322.6	44.1	52,9
24/11/2012	SEV-26	Vereda Arenales	1062954.8	907205.0537	1	101.9	1.4	1,4
24/11/2012	SEV-26	Vereda Arenales	1062954.8	907205.0537	2	472.9	6.6	8,0
24/11/2012	SEV-26	Vereda Arenales	1062954.8	907205.0537	3	162.7	46.9	54,9

FECHA	ID	LOCALIZACIÓN	X COORD	Y COORD	No. CAPA	RES (OHM-m)	ESPESOR (m)	PROF (m)
24/11/2012	SEV-27	Vereda Arenales	1065412.408	906105.0528	1	514.3	0.7	0,7
24/11/2012	SEV-27	Vereda Arenales	1065412.408	906105.0528	2	174.3	1.2	1,2
24/11/2012	SEV-27	Vereda Arenales	1065412.408	906105.0528	3	820	7.6	8,8
24/11/2012	SEV-27	Vereda Arenales	1065412.408	906105.0528	4	342.4	41.3	50,9
24/11/2012	SEV-28	Vereda Arenales	1068622.242	906724.3287	1	66.2	1	1,0
24/11/2012	SEV-28	Vereda Arenales	1068622.242	906724.3287	2	392.2	7.9	8,9
24/11/2012	SEV-28	Vereda Arenales	1068622.242	906724.3287	3	264.7	42.5	51,5
24/11/2012	SEV-29	Vereda Arenales	1070896.602	906817.0166	1	208.4	2.6	2,6
24/11/2012	SEV-29	Vereda Arenales	1070896.602	906817.0166	2	608.8	6.6	9,2
24/11/2012	SEV-29	Vereda Arenales	1070896.602	906817.0166	3	280.7	33.4	42,6
26/11/2012	SEV-26	Vereda Barro Blanco	1073825.623	914844.0471	1	155.5	1.9	1,9
26/11/2012	SEV-26	Vereda Barro Blanco	1073825.623	914844.0471	2	414.9	49.1	51,0
26/11/2012	SEV-26	Vereda Barro Blanco	1073825.623	914844.0471	3	24.5		
15/07/2013	SEV-6	Vereda La Loma	1054919.984	910865.0546	1	209.8	1.6	1,6
15/07/2013	SEV-6	Vereda La Loma	1054919.984	910865.0546	2	199.3	6.4	8
15/07/2013	SEV-6	Vereda La Loma	1054919.984	910865.0546	3	46.5	30	38
15/07/2013	SEV-7	Vereda Quebraditas	1065206.606	910239.4657	1	132.1	3.5	3,5
15/07/2013	SEV-7	Vereda Quebraditas	1065206.606	910239.4657	2	581.7	14.5	18
15/07/2013	SEV-7	Vereda Quebraditas	1065206.606	910239.4657	3	270.1	31.7	49,7
16/07/2013	SEV-12	Vereda Patio Bonito	1058578.069	910873.9214	1	36.5	1.3	1,3
16/07/2013	SEV-12	Vereda Patio Bonito	1058578.069	910873.9214	2	1760.2	4.7	5,9
16/07/2013	SEV-12	Vereda Patio Bonito	1058578.069	910873.9214	3	118	32.6	39,2
16/07/2013	SEV-13	Vereda El Turuy	1059978.562	907368.8411	1	168.3	0.6	0,6
16/07/2013	SEV-13	Vereda El Turuy	1059978.562	907368.8411	2	258.9	4.4	5
16/07/2013	SEV-13	Vereda El Turuy	1059978.562	907368.8411	3	17	35.7	40,7

FECHA	ID	LOCALIZACIÓN	X COORD	Y COORD	No. CAPA	RES (OHM-m)	ESPESOR (m)	PROF (m)
17/07/2013	SEV-17	Vereda Sabanas del Rosario	1055033.015	919302.72	1	38.7	0.4	0,4
17/07/2013	SEV-17	Vereda Sabanas del Rosario	1055033.015	919302.72	2	288.9	5.6	6,0
17/07/2013	SEV-17	Vereda Sabanas del Rosario	1055033.015	919302.72	3	27.6	27.3	33,0
17/07/2013	SEV-18	Vereda Sabanas del Rosario	1057839.099	918444.352	1	49.8	1.4	1,4
17/07/2013	SEV-18	Vereda Sabanas del Rosario	1057839.099	918444.352	2	253.2	7	8,4
17/07/2013	SEV-18	Vereda Sabanas del Rosario	1057839.099	918444.352	3	120.4	26.5	34,9
17/07/2013	SEV-20	Vereda Sabanas del Rosario	1061428.85	917192.694	1	201	0.4	0,4
17/07/2013	SEV-20	Vereda Sabanas del Rosario	1061428.85	917192.694	2	120.1	2.2	2,6
17/07/2013	SEV-20	Vereda Sabanas del Rosario	1061428.85	917192.694	3	198.3	5.7	8,3
17/07/2013	SEV-20	Vereda Sabanas del Rosario	1061428.85	917192.694	4	1098.3	14.1	22,4
17/07/2013	SEV-20	Vereda Sabanas del Rosario	1061428.85	917192.694	5	648.7	24.7	47,1
17/07/2013	SEV-21	Vereda San Lorenzo	1055067.101	913498.2354	1	96.5	2.1	2,1
17/07/2013	SEV-21	Vereda San Lorenzo	1055067.101	913498.2354	2	2023.1	5.7	7,8
17/07/2013	SEV-21	Vereda San Lorenzo	1055067.101	913498.2354	3	607.3	26.4	34,2
18/07/2013	SEV-22	Vereda Sabanas del Rosario	1053002.259	916956.285	1	121	2.9	2,9
18/07/2013	SEV-22	Vereda Sabanas del Rosario	1053002.259	916956.285	2	564.5	6.5	9,4
18/07/2013	SEV-22	Vereda Sabanas del Rosario	1053002.259	916956.285	3	2294.5	29	38,4
18/07/2013	SEV-23	Vereda Sabanas del Rosario	1058396.63	915938.1885	1	49.9	1.4	1,4
18/07/2013	SEV-23	Vereda Sabanas del Rosario	1058396.63	915938.1885	2	252.1	7.2	8,6
18/07/2013	SEV-23	Vereda Sabanas del Rosario	1058396.63	915938.1885	3	121	26.3	34,9
18/07/2013	SEV-24	Vereda San Lorenzo	1063524.587	913958.247	1	498.4	0.8	0,8
18/07/2013	SEV-24	Vereda San Lorenzo	1063524.587	913958.247	2	163	1.4	2,3
18/07/2013	SEV-24	Vereda San Lorenzo	1063524.587	913958.247	3	1904.1	3.6	5,9
18/07/2013	SEV-24	Vereda San Lorenzo	1063524.587	913958.247	4	318.7	45.1	51,0
18/07/2013	SEV-25	Vereda San Lorenzo	1060853.371	909939.0277	1	65.4	1.7	1,7

FECHA	ID	LOCALIZACIÓN	X COORD	Y COORD	No. CAPA	RES (OHM-m)	ESPESOR (m)	PROF (m)
18/07/2013	SEV-25	Vereda San Lorenzo	1060853.371	909939.0277	2	17.1	7	8,7
18/07/2013	SEV-25	Vereda San Lorenzo	1060853.371	909939.0277	3	3.9	35.6	44,3
19/07/2013	SEV-26	Vereda San Lorenzo	1061027.818	915108.0334	1	81.3	2	2
19/07/2013	SEV-26	Vereda San Lorenzo	1061027.818	915108.0334	2	801.2	6.9	8.9
19/07/2013	SEV-26	Vereda San Lorenzo	1061027.818	915108.0334	3	147.7	38.3	47,2
19/07/2013	SEV-27	Vereda San Lorenzo	1058663.126	912075.6941	1	141.2	1.4	1,4
19/07/2013	SEV-27	Vereda San Lorenzo	1058663.126	912075.6941	2	675.4	1.9	33
19/07/2013	SEV-27	Vereda San Lorenzo	1058663.126	912075.6941	3	329.4	35.4	38,7
19/07/2013	SEV-28	Vereda Caño Grande	1051855.629	913245.5676	1	301.1	1	1
19/07/2013	SEV-28	Vereda Caño Grande	1051855.629	913245.5676	2	70.8	2.4	3,4
19/07/2013	SEV-28	Vereda Caño Grande	1051855.629	913245.5676	3	368.9	25.7	29,1
19/07/2013	SEV-29	Vereda El Turuy	1047409.031	911167.6597	1	153.5	0.5	0,5
19/07/2013	SEV-29	Vereda El Turuy	1047409.031	911167.6597	2	421.7	2.8	3,3
19/07/2013	SEV-29	Vereda El Turuy	1047409.031	911167.6597	3	155.7	22.7	26,0
19/07/2013	SEV-29	Vereda El Turuy	1047409.031	911167.6597	4	6.88		
19/07/2013	SEV-30	Vereda El Turuy	1051291.045	910638.3276	1	359.1	3.5	3,5
19/07/2013	SEV-30	Vereda El Turuy	1051291.045	910638.3276	2	1507.9	5.6	9,1
19/07/2013	SEV-30	Vereda El Turuy	1051291.045	910638.3276	3	39.1	21.3	30,4
Nov 10 /2011	SEV-12	Vereda La Esmeralda	1054490.921	918180	2	73.7	2.7	3.7
Nov 10 /2011	SEV-12	Vereda La Esmeralda	1054490.921	918180	3	781.4	6.3	10
Nov 10 /2011	SEV-12	Vereda La Esmeralda	1054490.921	918180	4	82.5	30.5	40.5
Nov 10 /2011	SEV-13	Vereda La Esmeralda (río Acacias)	1040650	923718	1	50.8	2	2.0
Nov 10 /2011	SEV-13	Vereda La Esmeralda (río Acacias)	1040650	923718	2	2.29	1	3
Nov 10 /2011	SEV-13	Vereda La Esmeralda (río Acacias)	1040650	923718	3	86.4	2.2	3

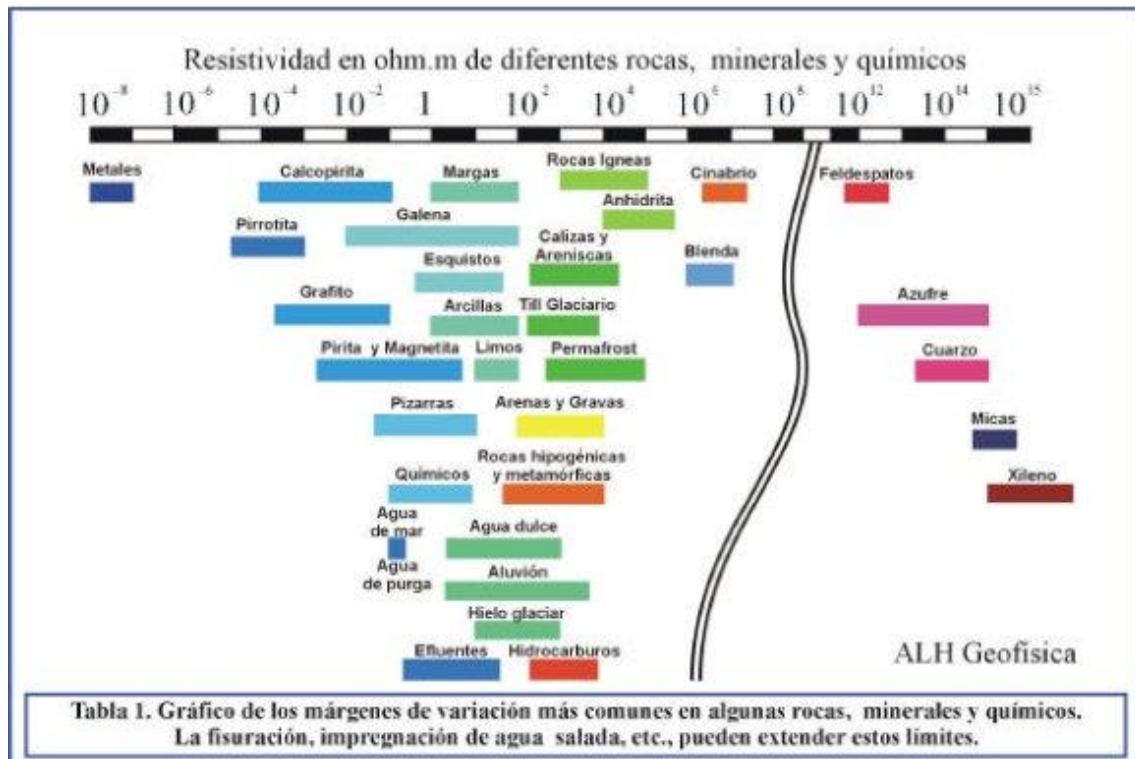
FECHA	ID	LOCALIZACIÓN	X COORD	Y COORD	No. CAPA	RES (OHM-m)	ESPESOR (m)	PROF (m)
Nov 10 /2011	SEV-13	Vereda La Esmeralda (río Acacias)	1042557	915792	2	1527.6	4.2	6
Nov 10 /2011	SEV-13	Vereda La Esmeralda (río Acacias)	1042557	915792	3	84.4	22.6	28.6
Nov 12 /2011	SEV-21	Vereda Santa Bárbara	1040223	917819	1	16.8	1.27	1.27
Nov 12 /2011	SEV-21	Vereda Santa Bárbara	1040223	917819	2	1252.3	8.3	9.5
Nov 12 /2011	SEV-21	Vereda Santa Bárbara	1040223	917819	3	184	43.6	53.2
Nov 12 /2011	SEV-22	Vereda Santa Bárbara	1038943	919180	1	159.1	3.9	3.9
Nov 12 /2011	SEV-22	Vereda Santa Bárbara	1038943	919180	2	1341.1	12.2	16.1
Nov 12 /2011	SEV-22	Vereda Santa Bárbara	1038943	919180	3	125.3	69.3	85.4
Nov 12 /2011	SEV-23	Vereda El Encanto	1053478	917847	1	50.8	0.7	0.7
Nov 12 /2011	SEV-23	Vereda El Encanto	1053478	917847	2	1371.7	3.8	4.5
Nov 12 /2011	SEV-23	Vereda El Encanto	1053478	917847	3	276.2	25	29.5
Nov 12 /2011	SEV-24	Vereda Santa Bárbara	1040361	920786	1	109.9	0.75	0.75
Nov 12 /2011	SEV-24	Vereda Santa Bárbara	1040361	920786	2	27	0.9	1.65
Nov 12 /2011	SEV-24	Vereda Santa Bárbara	1040361	920786	3	1.2529	2.2	3.8
Nov 12 /2011	SEV-24	Vereda Santa Bárbara	1040361	920786	4	354	24.4	28.2
Nov 12 /2011	SEV-25	Vereda El Encanto	1042020	921099	1	48.4	0.75	0.75
Nov 12 /2011	SEV-25	Vereda El Encanto	1042020	921099	2	1403.1	5.5	6.2
Nov 12 /2011	SEV-25	Vereda El Encanto	1042020	921099	3	103.4	14.8	21.1
Nov 13 /2011	SEV-26	Vereda El Encanto	1046312	919368	1	80.4	0.75	0.75
Nov 13 /2011	SEV-26	Vereda El Encanto	1046312	919368	2	360.7	48.2	49
Nov 13 /2011	SEV-27	Castilla La Nueva	1043151	918883	1	90	3.1	3.1
Nov 13 /2011	SEV-27	Castilla La Nueva	1043151	918883	2	159.6	7.9	11
Nov 13 /2011	SEV-27	Castilla La Nueva	1043151	918883	3	54.5	31.7	42.7
Nov 13 /2011	SEV-28	Vereda Las Violetas	1045596	918058	1	98.2	1.5	1.5
Nov 13 /2011	SEV-28	Vereda Las Violetas	1045596	918058	2	457	5.6	7.1

FECHA	ID	LOCALIZACIÓN	X COORD	Y COORD	No. CAPA	RES (OHM-m)	ESPESOR (m)	PROF (m)
Nov 13 /2011	SEV-28	Vereda Las Violetas	1045596	918058	3	216.5	14.6	21.7
Nov 13 /2011	SEV-29	Vereda Las Violetas	1048017	918022	1	165.3	0.9	0.9
Nov 13 /2011	SEV-29	Vereda Las Violetas	1048017	918022	2	1.6619	5.2	6.1
Nov 13 /2011	SEV-29	Vereda Las Violetas	1048017	918022	3	562.4	13	19
Nov 13 /2011	SEV-30	Vereda Las Violetas	1049010	916136	1	31.6	0.75	0.75
Nov 13 /2011	SEV-30	Vereda Las Violetas	1049010	916136	2	267	2.9	3.6
Nov 13 /2011	SEV-30	Vereda Las Violetas	1049010	916136	3	107.8	33.8	37.4
Nov 14 /2011	SEV-31	Vereda Betania	1049188	913338	1	111	1.5	1.5
Nov 14 /2011	SEV-31	Vereda Betania	1049188	913338	2	957.1	7.9	9.5
Nov 14 /2011	SEV-31	Vereda Betania	1049188	913338	3	264	46.3	55.7
Nov 14 /2011	SEV-32	Vereda Betania	1046111	914102	1	117	1.9	1.9
Nov 14 /2011	SEV-32	Vereda Betania	1046111	914102	2	910.1	10	11.9
Nov 14 /2011	SEV-32	Vereda Betania	1046111	914102	3	145.1	14.9	26.8
Nov 14 /2011	SEV-33	Vereda Las Violetas	1043827	914132	1	114.2	1.8	1.8
Nov 14 /2011	SEV-33	Vereda Las Violetas	1043827	914132	2	163.7	5.9	7.7
Nov 14 /2011	SEV-33	Vereda Las Violetas	1043827	914132	3	442	32	39.7
Nov 14 /2011	SEV-34	Vereda Cacayal	1052073	918944	1	84.4	3.3	3.3
Nov 14 /2011	SEV-34	Vereda Cacayal	1052073	918944	2	844.3	16.4	19.7
Nov 14 /2011	SEV-35	Vereda Cacayal	1045540	915854	1	641.6	1	1
Nov 14 /2011	SEV-35	Vereda Cacayal	1045540	915854	2	54.8	0.6	0.6
Nov 14 /2011	SEV-35	Vereda Cacayal	1045540	915854	3	496.8	13.2	14.8
Nov 14 /2011	SEV-35	Vereda Cacayal	1045540	915854	4	90	75.5	90.3
Nov 17 /2011	SEV-46	Vereda Caño Hondo (río Acacias)	1051131	917721	1	91.8	0.7	0.7
Nov 17 /2011	SEV-46	Vereda Caño Hondo (río Acacias)	1051131	917721	2	502.4	7.9	8.6

FECHA	ID	LOCALIZACIÓN	X COORD	Y COORD	No. CAPA	RES (OHM-m)	ESPEJOR (m)	PROF (m)
Nov 17 /2011	SEV-46	Vereda Caño Hondo (río Acacias)	1051131	917721	5	1086.4	11.5	20
Junio 6 2011	SEV-67	Estación San Fernando	1043867	921320	1	132.5	0.8	0,8
Junio 6 2011	SEV-67	Estación San Fernando	1043867	921320	2	444.6	32.4	33,2
Junio 6 2011	SEV-67	Estación San Fernando	1043867	921320	3	109.6	78.6	111,8
Junio 6 2011	SEV-68	Estación San Fernando	1044155	921133	1	398.1	1.5	1,5
Junio 6 2011	SEV-68	Estación San Fernando	1044155	921133	2	744.8	38.3	39,8
Junio 6 2011	SEV-68	Estación San Fernando	1044155	921133	3	84.7	102	141,8
Junio 6 2011	SEV-69	Estación San Fernando	1044135	921532	1	144.5	2.1	2,1
Junio 6 2011	SEV-69	Estación San Fernando	1044135	921532	2	717.8	21.2	23,3
Junio 6 2011	SEV-69	Estación San Fernando	1044135	921532	3	75.9	96.9	120,2
Junio 6/ 2011	SEV-70	Estación San Fernando	1044402	921540	1	96.4	2	3,8
Junio 6/ 2011	SEV-70	Estación San Fernando	1044402	921540	2	331.1	23.3	27,1
Junio 6/ 2011	SEV-70	Estación San Fernando	1044402	921540	3	60.8	95.4	122,5
1980- 1981	SEV-2/285 TNO	Vereda Las Violetas	1038750	918500	2	1150	4	5
1980- 1981	SEV-2/285 TNO	Vereda Las Violetas	1038750	918500	3	600	13	18
1980- 1981	SEV-2/285 TNO	Vereda Las Violetas	1038750	918500	4	300	60	78
1980- 1981	SEV-2/285 TNO	Vereda Las Violetas	1038750	918500	5	60	62	140
1980- 1981	SEV-3/285 TNO	Vereda Las Violetas	1041599	917850	2	640	20.5	22
1980- 1981	SEV-3/285 TNO	Vereda Las Violetas	1041599	917850	3	40	48	70
1980- 1981	SEV-4/285 TNO	La Vara	1045000	917850	1	0		
1980- 1981	SEV-4/285 TNO	La Vara	1045000	917850	2	800	17	18
1980- 1981	SEV-4/285 TNO	La Vara	1045000	917850	3	40	47	65
1980- 1981	SEV-5/285 TNO	Vereda Las Violetas	1041500	918000	2	1100	17	18
1980- 1981	SEV-5/285 TNO	Vereda Las Violetas	1041500	918000	3	45	32	50
1980- 1981	SEV-6/285 TNO	Vereda Las Violetas	1041000	916500	2	1200	3.8	4.8

FECHA	ID	LOCALIZACIÓN	X COORD	Y COORD	No. CAPA	RES (OHM-m)	ESPESOR (m)	PROF (m)
1980- 1981	SEV-6/285 TNO	Vereda Las Violetas	1041000	916500	3	110	15.2	20
1980- 1981	SEV-6/285 TNO	Vereda Las Violetas	1041000	916500	4	50	35	55
1980- 1981	SEV-7/285TNO	Castilla La Nueva	1043300	914500	2	3100	16.5	18
1980- 1981	SEV-7/285TNO	Castilla La Nueva	1043300	914500	3	120	32	63
1980- 1981	SEV-7/285TNO	Castilla La Nueva	1043300	914500	4	450	60	120
1980- 1981	SEV-8/285 TNO	Vereda Sabanas del Rosario	1051000	917000	2	1200	10	11
1980- 1981	SEV-8/285 TNO	Vereda Sabanas del Rosario	1051000	917000	3	400	33	43
1980- 1981	SEV-8/285 TNO	Vereda Sabanas del Rosario	1051000	917000	4	58	70	113
1980- 1981	SEV-9/285 TNO	Vereda Sabanas del Rosario	1050250	916000	2	610	15.8	18
1980- 1981	SEV-9/285 TNO	Vereda Sabanas del Rosario	1050250	916000	3	120	7	25
1980- 1981	SEV-9/285 TNO	Vereda Sabanas del Rosario	1050250	916000	4	52	47	68
1980- 1981	SEV-10/285 TNO	Vereda Sabanas del Rosario	1052750	916250	2	600	16.5	18
1980- 1981	SEV-10/285 TNO	Vereda Sabanas del Rosario	1052750	916250	3	2100	32	60
1980- 1981	SEV-10/285 TNO	Vereda Sabanas del Rosario	1052750	916250	4	40	60	120
1980- 1981	SEV-16/285 TNO	Vereda Caño Grande	1047250	913750	2	120	21	31.9
1980- 1981	SEV-16/285 TNO	Vereda Caño Grande	1047250	913750	3	40	34.1	66
1980- 1981	SEV-16/285 TNO	Vereda Caño Grande	1047250	913750	4	120	54	120
1980- 1981	SEV-26/285 TNO	Vereda San Antonio (río Guamal)	1045000	911750	2	700	9.5	10.5
1980- 1981	SEV-26/285 TNO	Vereda San Antonio (río Guamal)	1045000	911750	3	600	21.5	32

El análisis de los cortes geoelectricos se realizó teniendo en cuenta la FIGURA 3-22, que presenta los márgenes de variación más comunes en algunas rocas y minerales químicos.



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos71/practica-sondeo-electrico-vertical/practica-sondeo-electrico-vertical2.shtml>. Recuperado FECHA

FIGURA 3-22 Gráfica de los márgenes de variación más comunes en algunas rocas, minerales y químicos.

De la información analizada para el área en estudio se encontraron cuatro capas. A continuación, se presenta el análisis geofísico desarrollado para el área en estudio.

En la FIGURA 3-23 se presenta el mapa de isoresistividades de la capa 1.

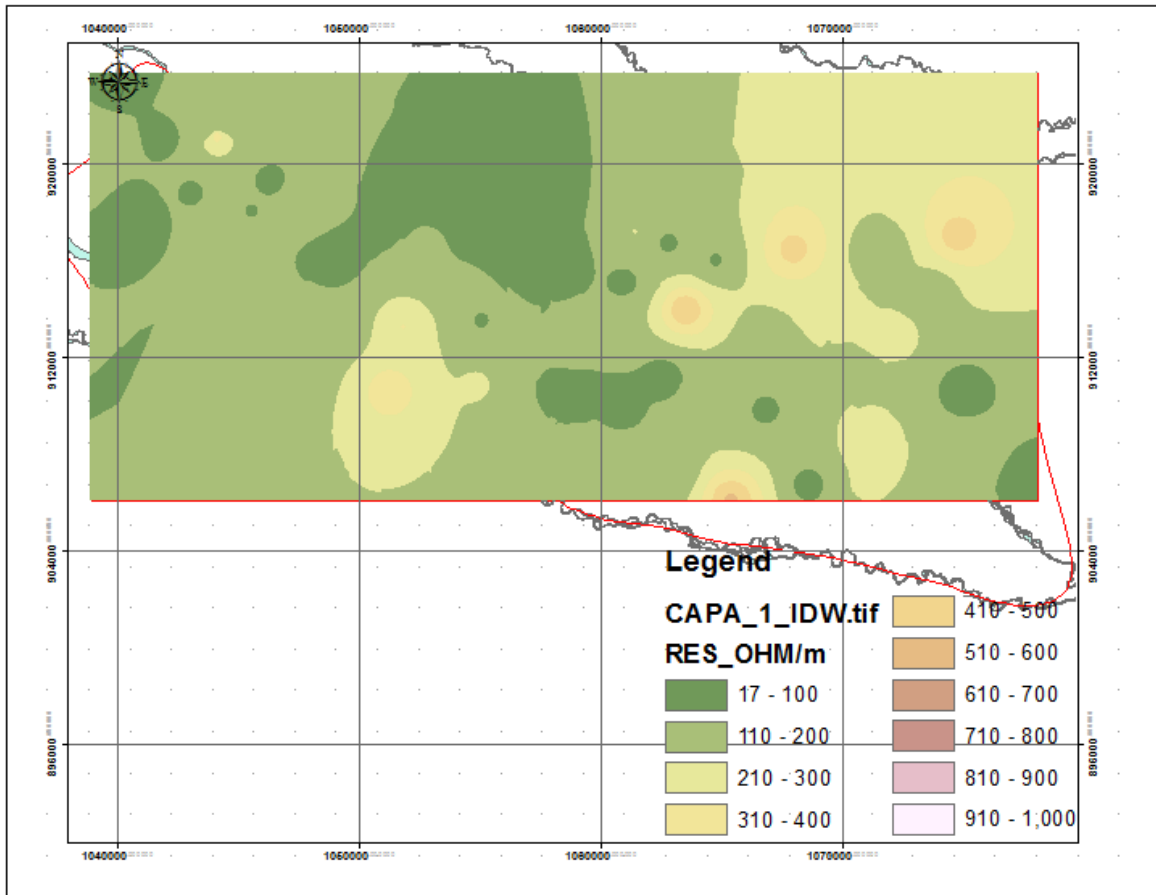


FIGURA 3-23 Mapa de Isoresistividad de la capa geoelectrica 1.

En la capa geoelectrica 1 las resistividades encontradas varían de 17 a 514.3 Ohm/m, la media de estos valores es de 150 Ohm/m. Teniendo en cuenta la geología puede asociarse a depósitos cuaternarios aluviales con predominio de arenas. La capa encontrada tiene un espesor promedio de 1,68 metros.

En la FIGURA 3-24 se presenta el mapa de resistividades para la capa geoelectrica 2.

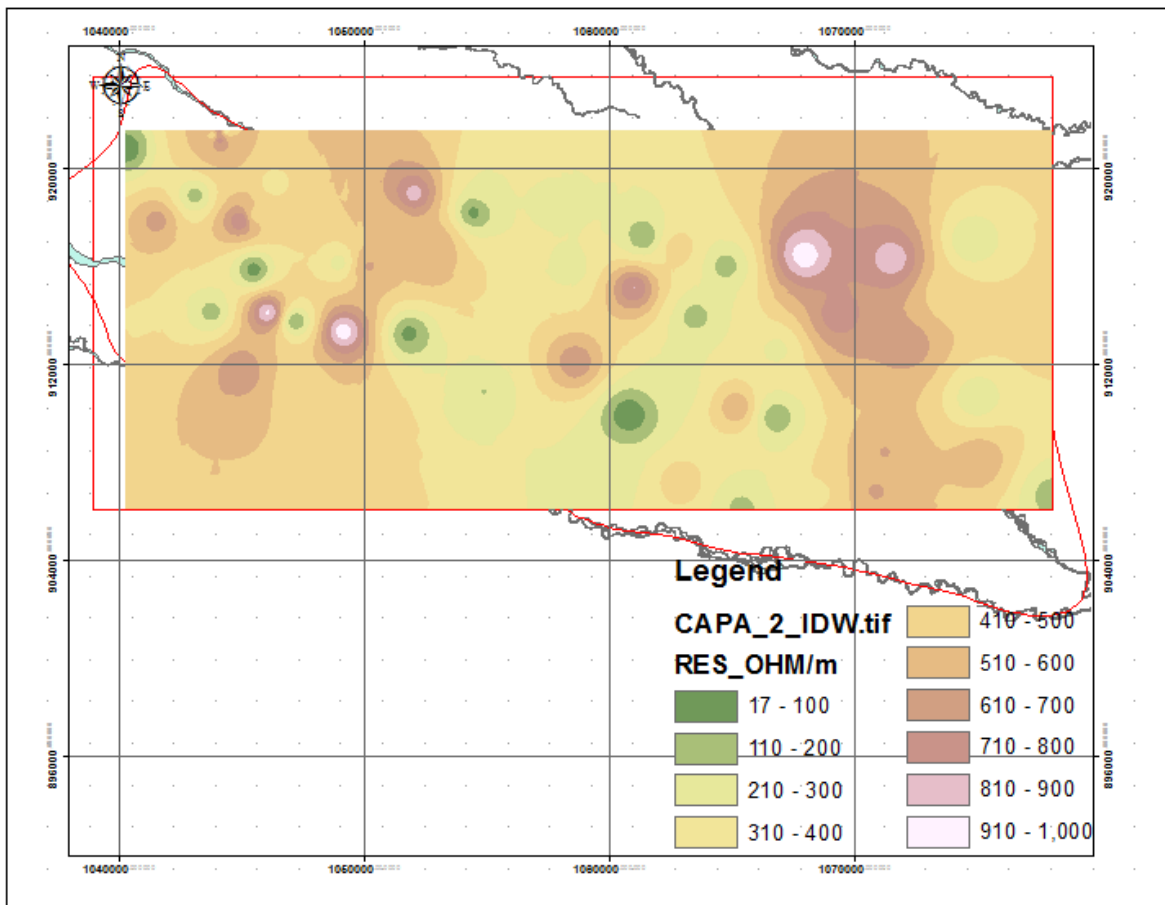


FIGURA 3-24 Mapa de Isoresistividad de la capa geoelectrica 2.

Para la capa 2 las resistividades varían de 17 a 1000 Ohm/m, la media de estos valores es de 430 Ohm/m. Teniendo en cuenta la geología puede asociarse a depósitos cuaternarios con predominio de tamaños de arenas y gravas. La capa encontrada tiene un espesor promedio de 9,45 metros.

En la FIGURA 3-25 se presenta el mapa de resistividades encontradas para la capa 3.

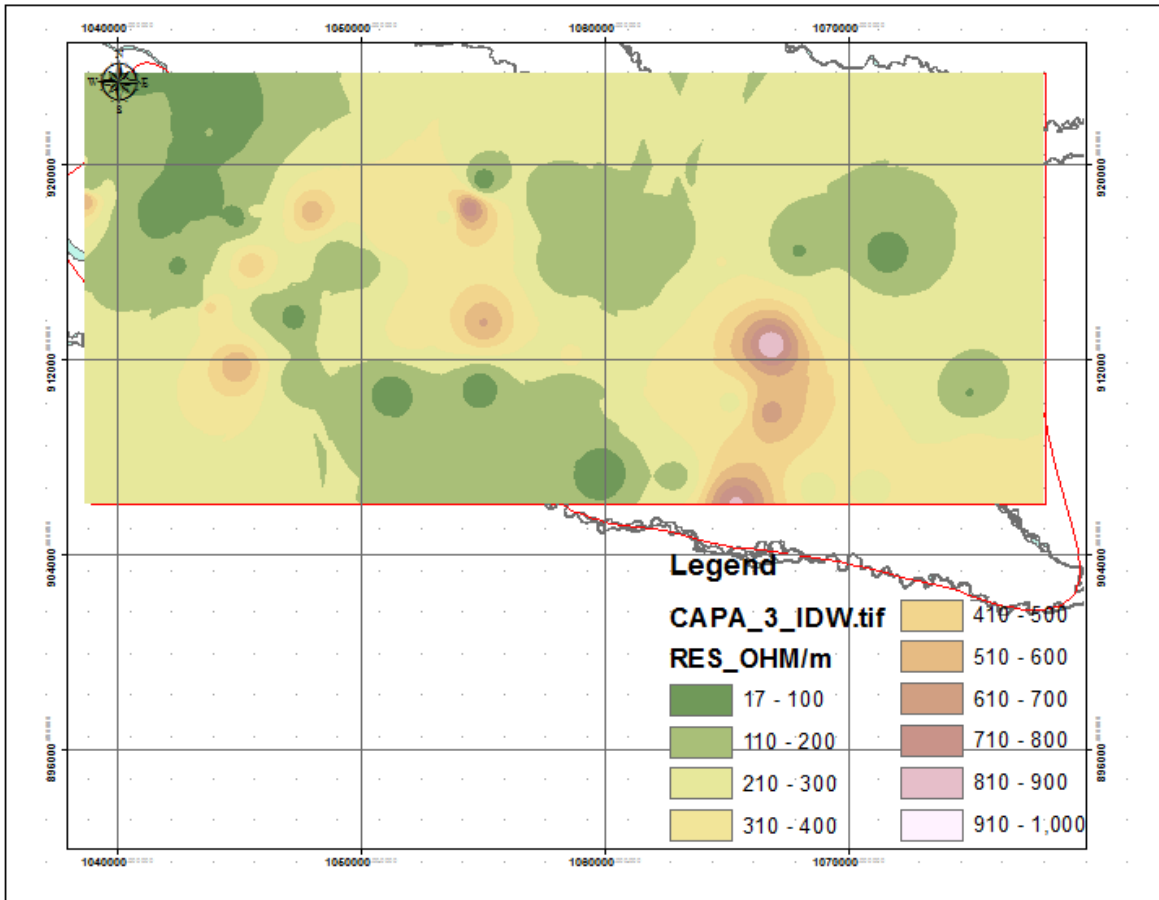


FIGURA 3-25 Mapa de Isoresistividad de la capa geoelectrica 3.

Para la capa 3 las resistividades varían de 14 a 1000 Ohm/m, la media de estos valores es de 250 Ohm/m. Teniendo en cuenta la geología puede asociarse a depósitos cuaternarios con predominio de tamaños de arenas con gravas. La capa encontrada tiene un espesor promedio de 33 metros.

En la FIGURA 3-26 se presenta el mapa de resistividades para la capa 4 definida.

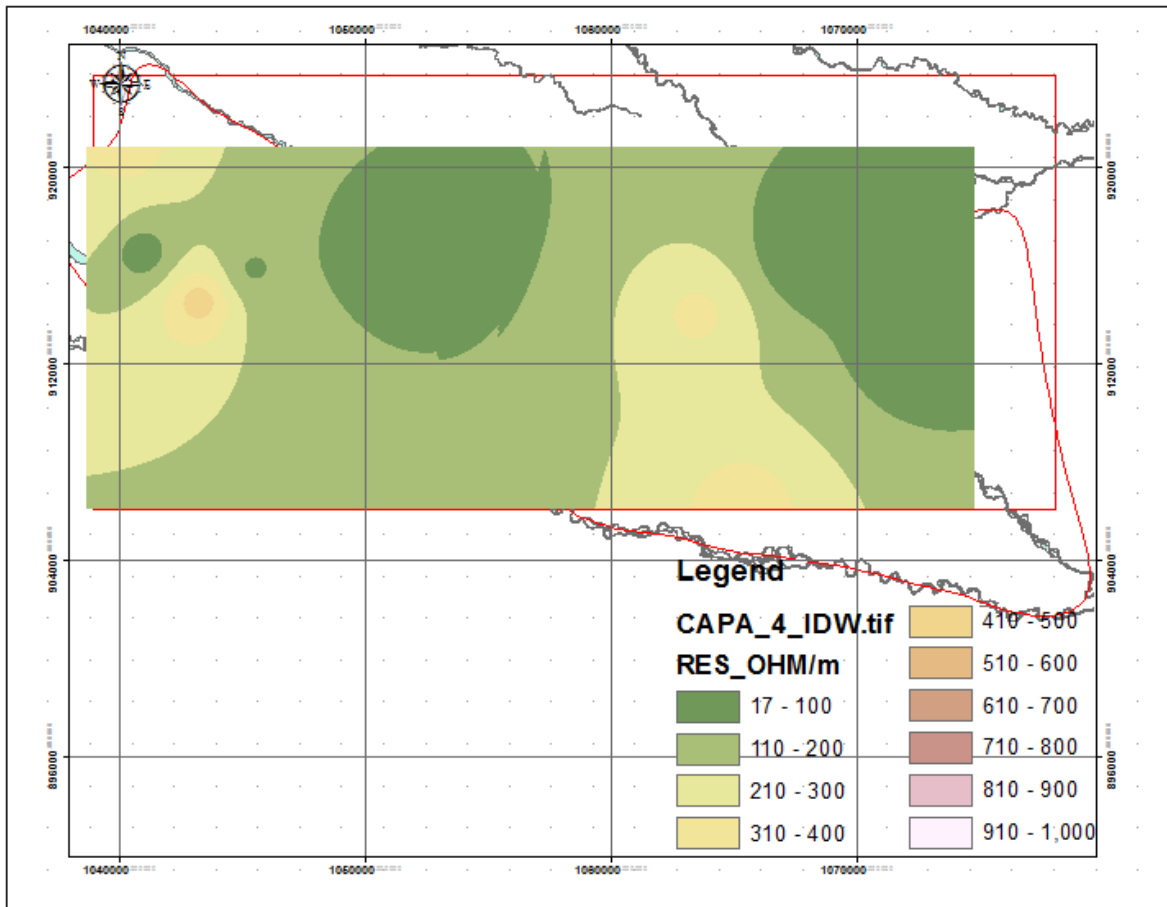


FIGURA 3-26 Mapa de Isoresistividad de la capa geoelectrica 4.

Para la capa 4 las resistividades varían de 21 a 450 Ohm/m, la media de estos valores es de 160 Ohm/m. Teniendo en cuenta la geología puede asociarse a depósitos cuaternarios, con predominio de arenas.

El modelo geoelectrico definido se presentan en la FIGURA 3-27.

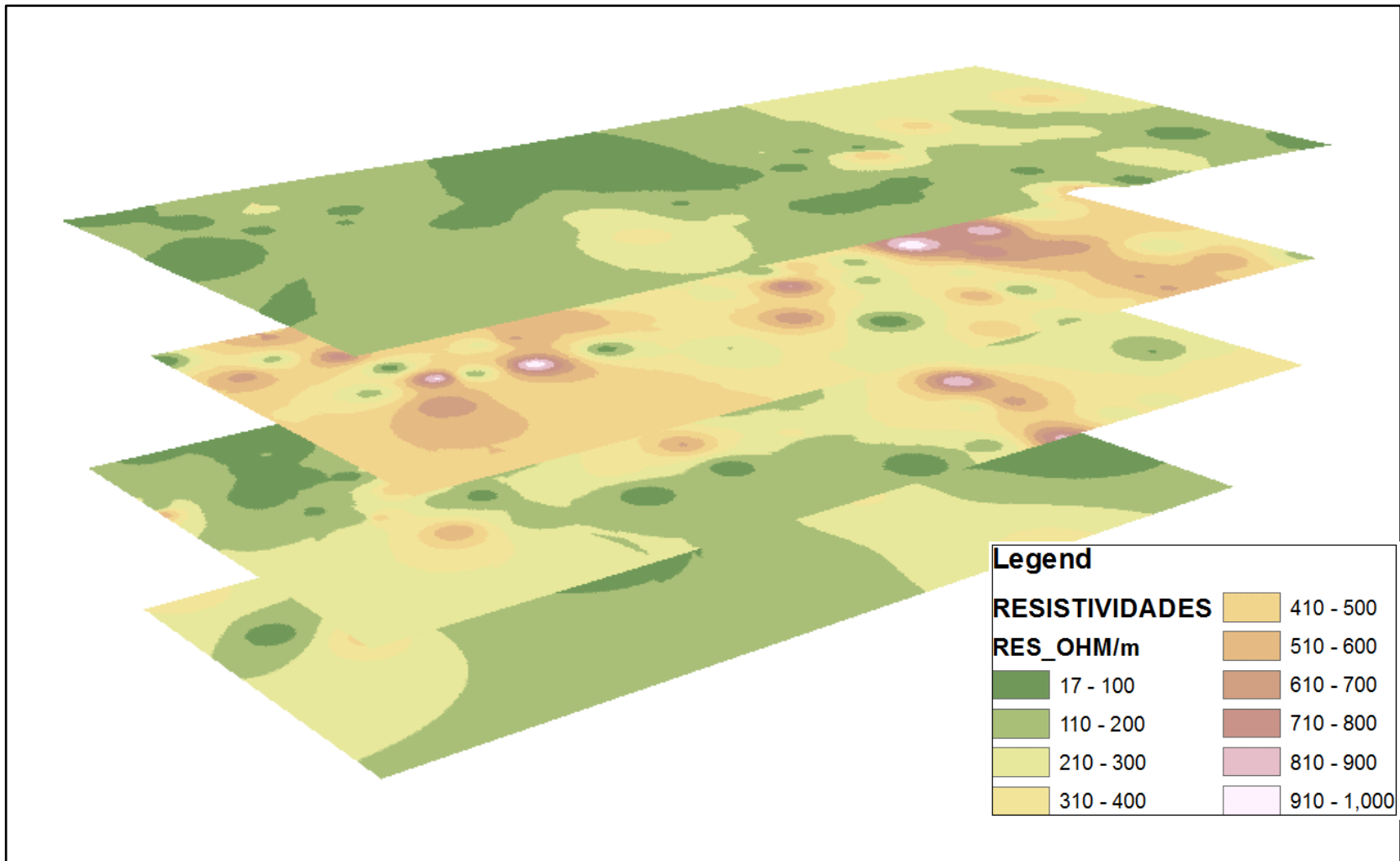


FIGURA 3-27 Isoresistividades de las capas geoelectricas en 3-D.

Al analizar las resistividades tomadas sobre el área de estudio se puede concluir que la capa geoelectrica 1, con resistividad hasta de 514 ohm-m, corresponde a sedimentos predominantemente de arenas, con un espesor aproximado de 1,68 m, asociadas al suelo natural de la zona.

En la capa intermedia del subsuelo, denominada capa 2, las resistividades encontradas varían de 17 a 1000 Ohm/m, con un espesor promedio de 9,45 metros, se encontraron predominantemente sedimentos de gravas y arenas.

En la capa 3 se obtuvieron resistividades de 14 a 1000 Ohm-m, que corresponde a intercalaciones de niveles conglomeráticas en matriz arenosa con gravas, con espesor promedio de 33 metros, conforman acuíferos libres con variación a semiconfinado asociadas a los depósitos cuaternarios.

La capa geoelectrica 4 corresponde al nivel inferior con resistividad de 21 a 450 ohm-m, se correlaciona con secuencia de lodolitas y areniscas, que se asocian a depósitos cuaternarios.

Al analizar la información recolectada para la construcción del modelo geoelectrico se concluye que sólo se obtuvo información de los depósitos cuaternarios del área en estudio. En la TABLA 3-3 se resume la información del modelo de capas calculado a partir de la prospección geofísica realizada.

TABLA 3-3 Rango de resistividad del modelo geológico

SISTEMA ACUÍFERO	LITOLOGÍA		RANGO DE RESISTIVIDAD (ohm-m)	ESPESOR PROMEDIO (m)
Depósitos cuaternarios. Aluviales (Qal), de abanico (Qab) y de terraza aluvial (Qt)	Capa 1	Predominio de arenas y finos	17 - 514.3	2
	Capa 2	Predominio de tamaños de gravas y arenas	17 - 1000	9.45
	Capa 3	Predominio de arenas con gravas	14 - 1000	33
	Capa 4	Predominio de arenas y finos	21 - 450	48

Teniendo en cuenta la información geofísica se realizó el modelo de capas del área en estudio con ayuda del *software* Surfer (FIGURA 3-28).

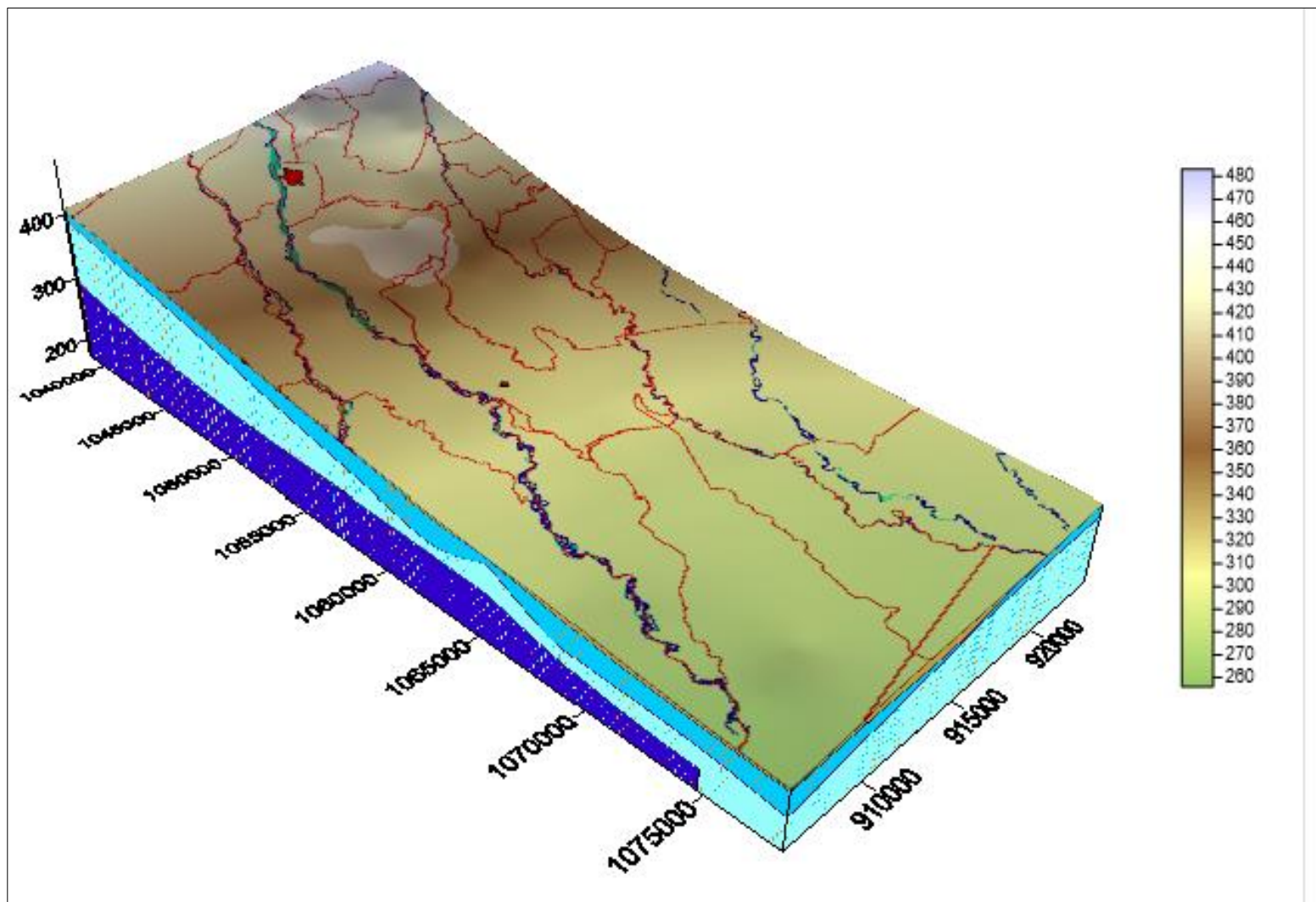


FIGURA 3-28 Modelo de capas teniendo en cuenta las resistividades calculadas en los sondeos.

3.2.3 Modelo geológico local en 3D

A partir de la información geológica del área en estudio, la información estratigráfica y el perfil geológico a-a' plancha 285 SGC y con la ayuda del *software* Move 2013.1, utilizado para la modelación estructural geológica, se desarrollaron las capas geológicas del área en estudio y se pudo representar la geología local (FIGURA 3-29).

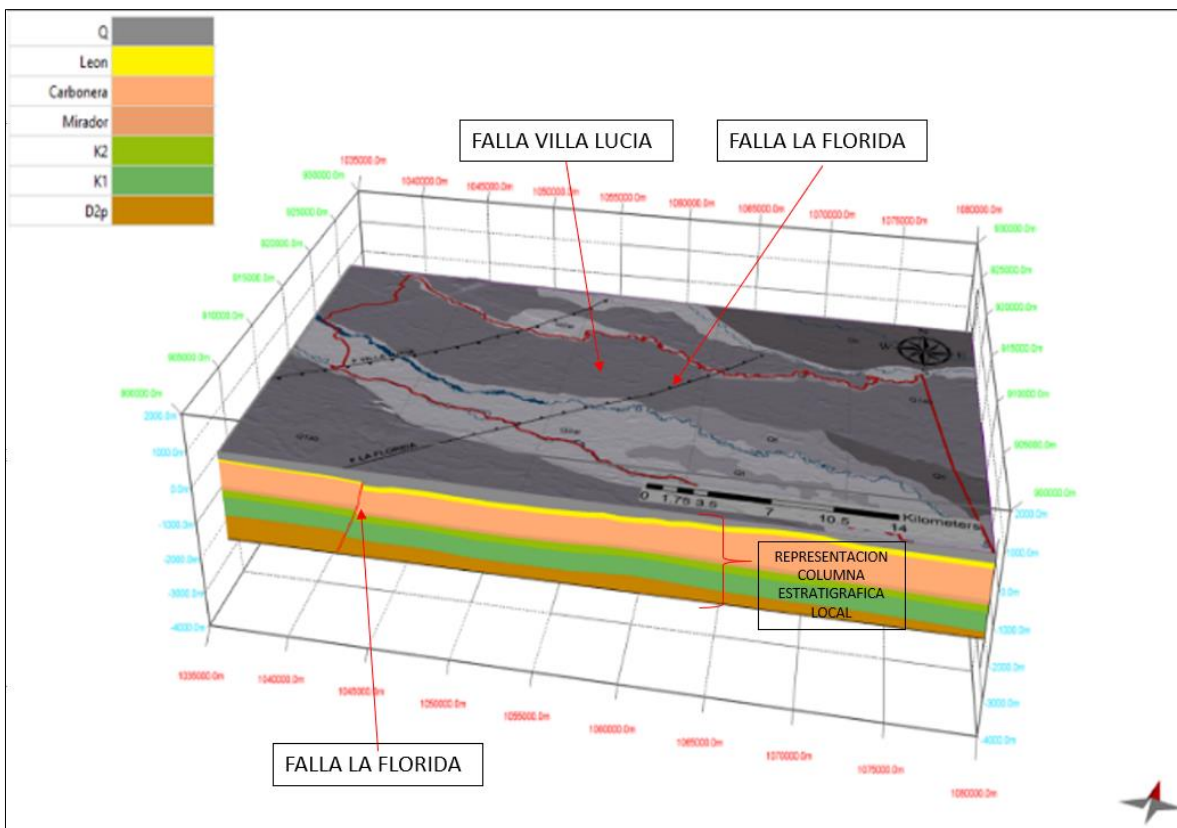


FIGURA 3-29 Estructuras del modelo geológico local en 3-D del área en estudio

La FIGURA 3-30 presenta el modelo geológico local en 3D del área en estudio, donde se pueden observar las capas que tendrá el modelo matemático y las estructuras geológicas (fallas y distribución espacial de las formaciones geológicas).

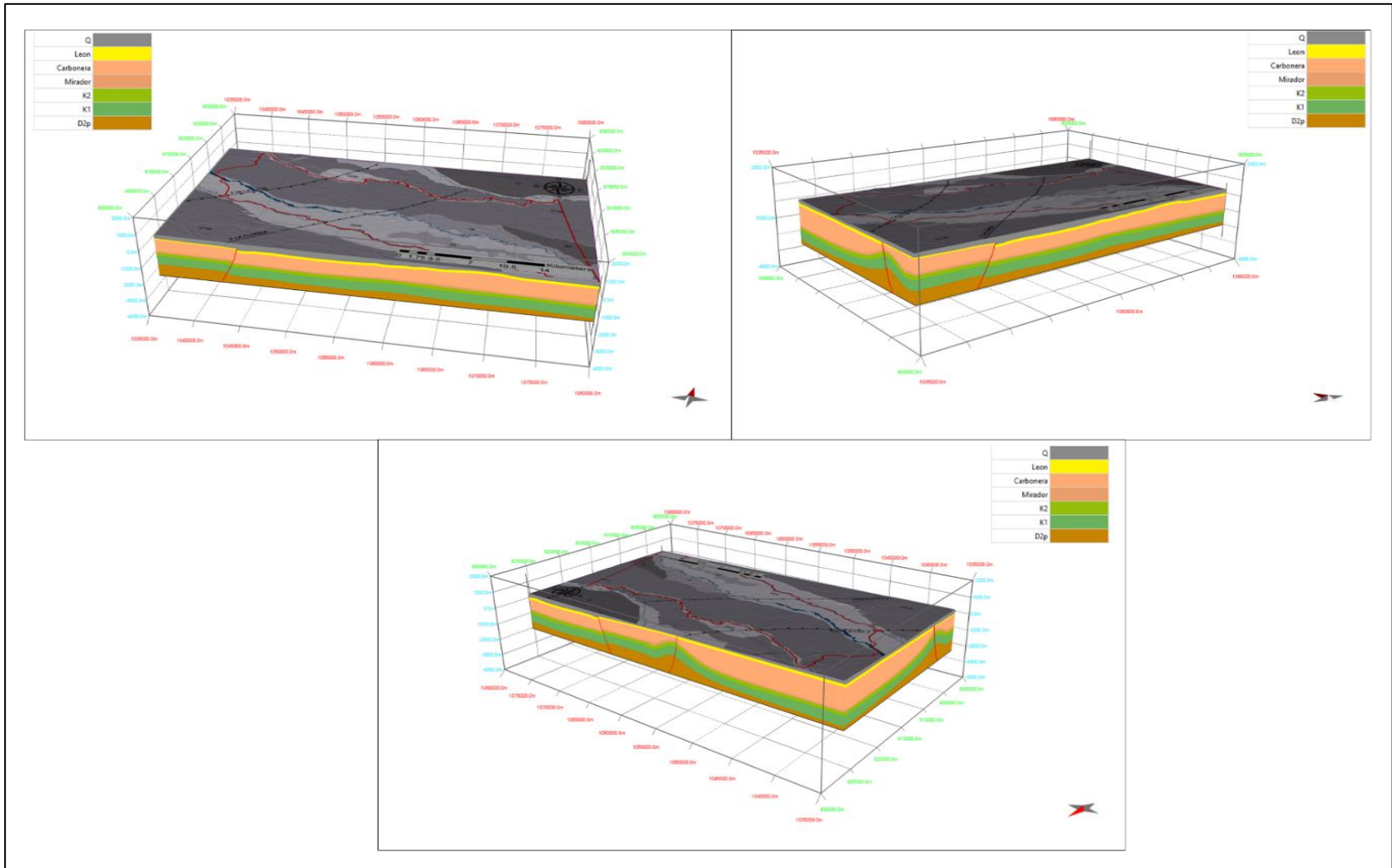
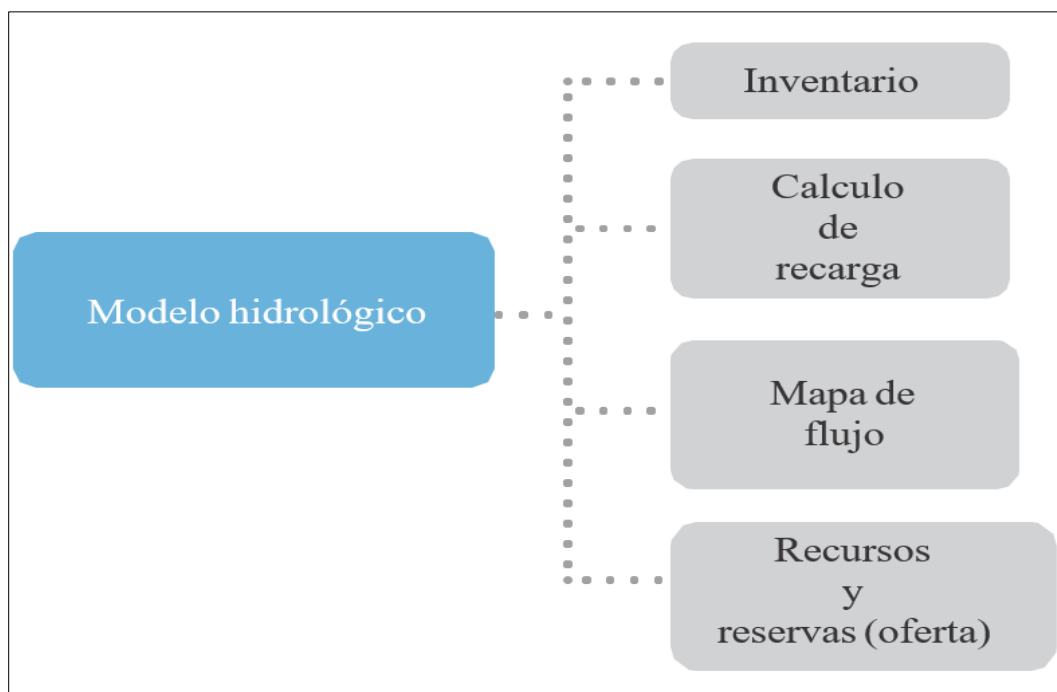


FIGURA 3-30 Modelo geológico local en3D del área en estudio

La información generada con el *software* MOVE 2013.1 se exportó para desarrollar las capas del modelo matemático.

3.3 Modelo hidrológico

En el presente capítulo se presenta la información hidrológica del área del proyecto, la cual se desarrolló teniendo en cuenta el diagrama de flujo que se presenta en la FIGURA 3-31.



Fuente: modificado del Estudio Nacional del Agua 2014, p. 126.

FIGURA 3-31 Diagrama de flujo para la construcción del modelo hidrológico del área en estudio.

3.3.1 Inventario

La primera aproximación al comportamiento de las aguas subterráneas para determinada área de estudio se realiza a través de los inventarios de pozos, aljibes y manantiales. Con el fin de homogeneizar criterios de los diferentes estudios utilizados para la elaboración del presente documento, se utilizaron las definiciones de pozos y aljibes propuestas por la FAO:

- El pozo profundo es una perforación que se realiza con un taladro de hasta 8 pulgadas de diámetro, revestido con tubería metálica o de PVC. Su pequeño diámetro excluye su explotación por medios tradicionales, por lo cual se hace necesario el uso de motobombas, electrobombas o molinos de viento con pistón.
- El aljibe no es muy profundo (menos de 20 m) con un diámetro grande (0,9 a 1,8 m) Se puede explotar tradicionalmente (en forma manual, medios mecánicos o con una bomba activada por una fuente de energía renovable: viento, solar, etc.). Para áreas

de potreros (en zonas de pastoreo) los molinos de viento son comúnmente usados a campo abierto debido a su relativa simplicidad. Sin embargo, requieren vientos de una regularidad suficiente, por lo que esta tecnología puede no ser apropiada para cualquier situación.

Por su parte, los manantiales presentan una tipología muy variada (Morell Evangelista, 2008, pp. 13-16) y pueden clasificarse de la siguiente forma:

- **Según mane el agua a lo largo del tiempo, podemos distinguir entre:**
 - Manantiales permanentes. Si bien pueden experimentar variaciones de caudal representan descargas directas de acuíferos de dimensiones apreciables, caracterizándose por variaciones lentas y amortiguadas. Suele haber importantes desfases temporales entre el momento de las precipitaciones y las puntas de caudal, pues el agua recorre un largo trayecto desde el área de alimentación hasta la de descarga.
 - Manantiales temporales. Acusan el estiaje hasta secarse por completo, bien porque el nivel del agua del acuífero queda por debajo del nivel de aliviadero del manantial o porque el acuífero se vacía totalmente. Este último caso es el de los acuíferos colgados, que presentan niveles permeables de reducido espesor.
 - Manantiales efímeros. Sólo funcionan eventualmente tras precipitaciones relativamente abundantes. Suelen estar asociados a acuíferos de pequeña dimensión en los que el agua reside poco tiempo y, por lo tanto, presenta baja mineralización.

- **En función del modo de salida del agua del subsuelo, se distingue entre:**
 - Manantiales puntuales. Suelen aprovechar para salir al exterior a través de fracturas en rocas consolidadas o cavidades, siendo el caso de la mayor parte de los manantiales kársticos.
 - Manantiales difusos. Conjunto de salidas puntuales en una extensión más o menos amplia, siendo más frecuentes en acuíferos detríticos. Se pueden considerar como un solo manantial.
 - Manantiales ocultos. Se producen a los cauces de los ríos o a zonas húmedas. En este último caso se denominan “ojos de agua”.

- **Según el acuífero al que se encuentran asociados, se clasifican en:**

- Manantiales en materiales detríticos. Los acuíferos detríticos suelen ser sistemas de alta inercia, permeables por porosidad intergranular, donde el flujo de agua no es rápido. Por ello, sus manantiales tienen variaciones lentas y amortiguadas de caudal, su descarga suele ser difusa y son frecuentes las salidas ocultas a ríos y humedales.
- Manantiales en materiales kársticos. Los acuíferos kársticos son sistemas de baja inercia, en los que la recarga de agua se manifiesta rápidamente en los manantiales mediante crecidas y agotamientos, su descarga suele ser puntual.
- **Si el agua aflora a una temperatura de 4 °C, superior a la media ambiente de la zona, se trata de manantiales termales. El origen de tal circunstancia puede ser:**
 - La cercanía de un foco de calor como una cámara magmática o, incluso, fluidos magmáticos en áreas de vulcanismo activo, que pueden hacer que la temperatura de surgencia se acerque a los 100 °C.
 - La circulación profunda del agua. Se deben a la rápida emergencia a través de fracturas de aguas subterráneas que circulan a gran profundidad, donde las altas temperaturas están relacionadas con el gradiente térmico terrestre (aproximadamente 1 °C por cada 33 metros de profundidad).⁸

El criterio de clasificación de aljibes para el presente estudio se realizó según su condición temporal de emanación de agua. Los criterios adicionales como temperatura no se consideraron pues en general se trata de aguas de baja temperatura, dado que no se identifican fuentes termales en el área.

Para el análisis del nivel de agua se utilizó la información de los inventarios de los estudios EIA Ávila, EIA Sokay, EIA CPO 10 norte, EIA CPO 10 SUR, EIA Taray, PMA Cubarral. En las siguientes figuras (FIGURA 3-32 Resumen de la información de los aljibes, FIGURA 3-33 Resumen de la información de los pozos y FIGURA 3-34 Resumen de la información de los manantiales) se presenta el resumen de los puntos de agua subterránea encontrados en el área de estudio.

⁸ (Lopez, 2013).

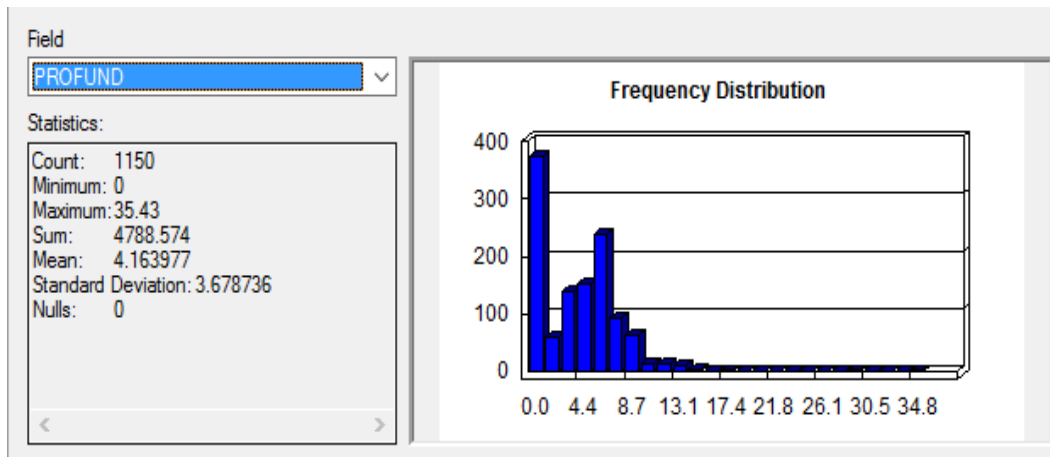


FIGURA 3-32 Resumen de la información de los aljibes.

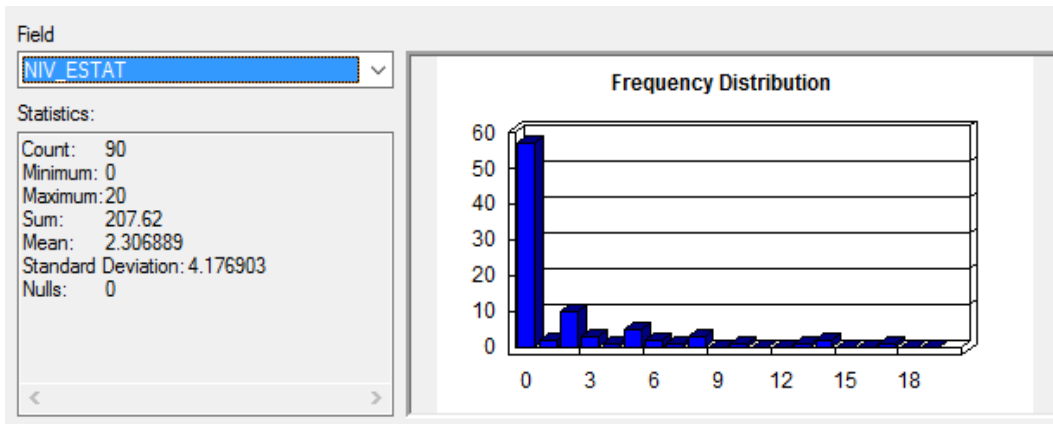


FIGURA 3-33 Resumen de la información de los pozos.

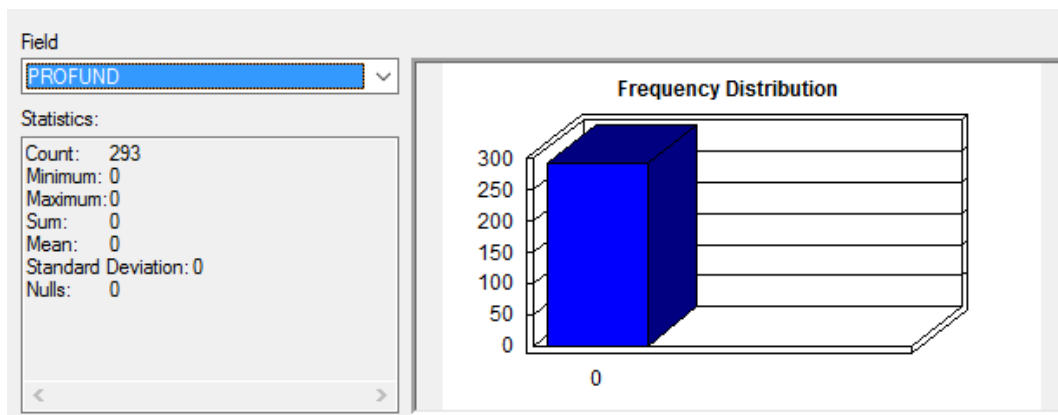


FIGURA 3-34 Resumen de la información de los manantiales.

3.3.2 Recarga

La recarga a un acuífero puede definirse como el agua que alcanza las reservas subterráneas. Este concepto es importante para estudios de recursos hídricos y estudios de transporte de contaminantes. La recarga puede determinarse por varios métodos y se clasifica en cinco grupos:

- Medidas directas
- Balance de agua
- Técnicas de trazadores
- Técnicas de Darcy
- Métodos empíricos

Sin embargo, dependiendo de los datos de los que se disponga se elige el método.

- **Medidas directas**

La recarga por medidas directas se calcula mediante la construcción de lisímetros, que es un bloque de suelo dotado de dispositivos que permiten medir el flujo que drena hasta el acuífero.

- **Método de balance de agua**

Los métodos de balance hídrico se desarrollan determinando los flujos de entrada y salida de un sistema, y la recarga al acuífero constituye el residuo de la ecuación de balance. Hacen parte de este grupo los balances de humedad del suelo, de agua en canales, el método de fluctuaciones del nivel freático y los que igualan la descarga a la recarga.

Existen diversas metodologías y autores que calculan la recarga mediante un balance hídrico, como los modelos de Thornthwaite, Thomas y Temez, entre otros. Estos métodos de balance ofrecen gran disponibilidad de datos para su aplicación. Entre sus ventajas se encuentran su bajo costo, la capacidad de múltiples localizaciones, la facilidad de procesamiento de los datos y la aceptable precisión para numerosas aplicaciones. Además, hacen que se compensen las limitaciones, convirtiéndose esta técnica en una de las más aplicadas fundamentalmente en estudios encaminados a determinar la evapotranspiración.⁹

⁹ (CATHALAC, 2015)

- **Método de trazadores**

Consiste en determinar fuentes de recarga y zonas de descarga, aunque se utiliza para cuantificar la recarga a través de un balance de masa.

Según Velez (2004), los trazadores son sustancias que se encuentran en el agua y se pueden detectar por medios visuales o analíticos y sirven para definir caminos preferenciales de flujo, identificar mecanismos responsables de generación de flujo, identificar fuentes de soluto y sistema de contaminación, determinar fuentes de recarga, entre otros. El principio general de este método es el balance de masa del trazador, en el cual se asume que el agua y el trazador son transportados a la misma tasa.

Uno de los aspectos positivos del uso de trazadores ambientales es que representan, al menos en una primera aproximación, una entrada uniforme a la zona no saturada-acuífera. Sin embargo, el principal inconveniente de los isótopos es que sólo pueden ofrecer una medida indirecta de la recarga, lo cual puede ocasionar sobre o subestimación.

- **Aproximación de Darcy**

Esta metodología consiste en encontrar a partir de las ecuaciones de Richards (en la zona no saturada) y Boussinesq (en la zona saturada) los valores de cabeza hidráulica, contando con datos de conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y contenido de humedad, mediante el uso de técnicas analíticas o modelos numéricos, según la simplicidad de las condiciones de campo o la cantidad de simplificaciones asumidas.

El principal problema con la solución dada por la aproximación de la ley de Darcy para el movimiento de agua en la zona vadosa es que esta técnica requiere el conocimiento de las curvas de retención de agua en el suelo y las curvas de conductividad hidráulica. La determinación directa de estos parámetros es difícil; no obstante, se han desarrollado métodos indirectos para estimarlos a partir de datos medibles. Estos métodos a menudo dan información suficientemente exacta para muchos usos prácticos sin incrementar los costos¹⁰.

- **Métodos empíricos**

¹⁰ (CATHALAC, 2015)

Los métodos empíricos correlacionan la recarga con otras variables hidrológicas que se pueden medir como precipitación, temperatura, elevación, flujo en canales, etc.

Esta relación se usa para extrapolar los registros de recarga en el tiempo y transponer los estimativos a otras áreas de recarga de características similares. La Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible considera que esta metodología es viable para zonas que no cuentan con suficiente información. Esta guía propone algunos autores que presentan las expresiones empíricas para estimar la recarga potencial por precipitación¹¹:

- **Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1988):**

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

Donde r es la recarga (pulg./año); y p es la precipitación (pulg./año).

- **Sehgal (1973)**

$$r = 2.5 (p - 16)^{0.5}$$

Donde r es la recarga (pulg./año); y p es la precipitación (pulg./año).

- **Turc (1954)**

$$r = p \left[1 - \left(0.9 + \frac{p^2}{L^2} \right)^{-0.5} \right]$$
$$L = 300 + 25T + 0.05T^2$$

Donde r es la recarga (mm/año); p es la precipitación (mm/año) y T la temperatura media anual (°C).

Para el cálculo de recarga del presente estudio se utilizó el método de balance de agua de Thomas o ABCD y los métodos empíricos de Cheeturvedi y Sehgal.

3.3.2.1 Cálculo de recarga por el método de Thomas o ABCD

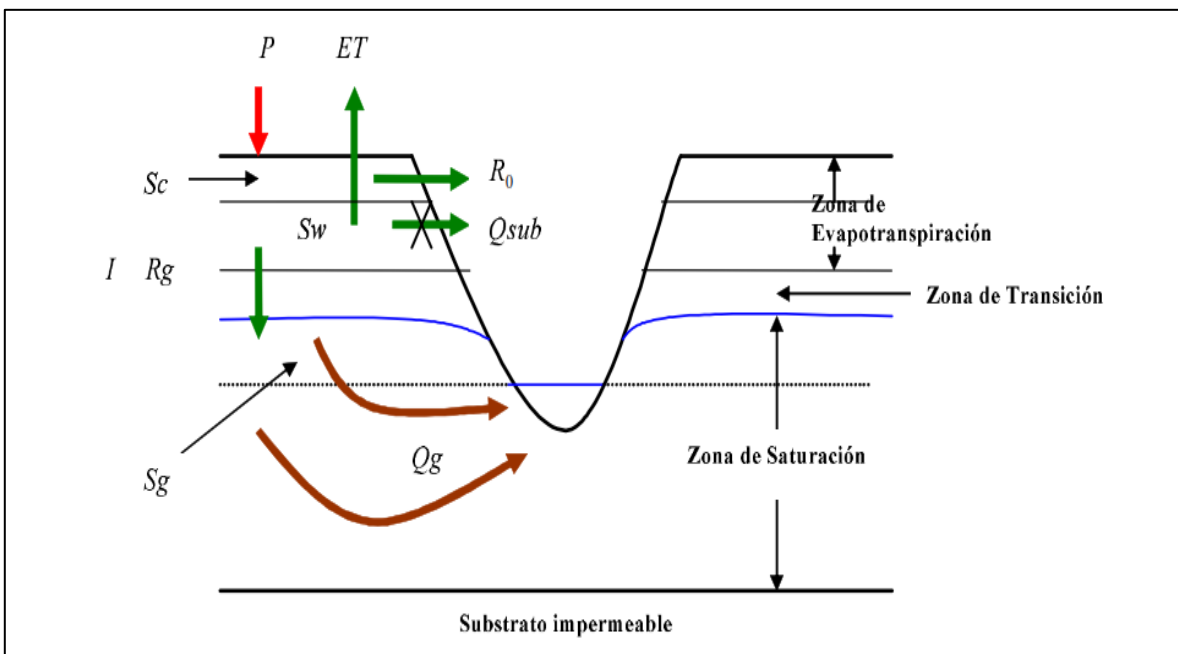
De acuerdo con Fragala & Obregón (2002, 2003), el modelo de Thomas, también conocido como modelo ABCD, es de carácter agregado de cuatro parámetros, que se puede explicar aplicando inicialmente la ecuación de continuidad a un volumen de control con almacenamiento $Sw + Sc$, donde Sw representa el almacenamiento en la parte superficial

¹¹ (MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2014, pág. 37)

del suelo. Sw es el contenido de humedad en la zona no saturada y Sc otros componentes del almacenamiento superficial. La zona Sc representa un espesor muy pequeño en comparación con Sw ; por lo tanto, puede ser despreciada. La recarga del acuífero Rg se puede asimilar a la infiltración I , debido a que en el modelo se desprecia la escorrentía subsuperficial Q_{sub} . Aplicando la ecuación de continuidad a tal volumen de control se obtiene:

$$P_i - ET_i - I_i - R_{o_i} = \Delta Sw = Sw_i - Sw_{i-1} \quad (1)$$

En la FIGURA 3-35 se presenta una aproximación conceptual del modelo de Thomas.



Fuente: Fragala & Obregón (2002).

FIGURA 3-35 Aproximación conceptual del modelo de Thomas

donde:

P_i : lluvia al final del periodo i -ésimo

ET_i : evapotranspiración real al final del periodo i -ésimo

I_i : infiltración al final del periodo i -ésimo

R_o = escorrentía directa al final del periodo i -ésimo

ΔSw = variación en el almacenamiento del suelo

Sw i: humedad del suelo al final del periodo i-esimo

Sw i-1: humedad del suelo al final del periodo anterior

Reagrupando los términos de la ecuación anterior se obtiene:

$$(P_i + Sw_{i-1}) - (ET_i + Sw_i) = Ro_i + I_i \quad (2)$$

Thomas define la suma de los dos primeros términos del lado izquierdo como el agua disponible (Wi) en cada intervalo de tiempo i.

$$W_i = P_i + Sw_{i-1} \quad (3)$$

y la suma de los últimos términos el lado izquierdo como:

$$Y_i = ET_i + Sw_i \quad (4)$$

En cada intervalo de tiempo se asume que la humedad disminuye según la siguiente ley de decaimiento exponencial, asumiendo como humedad inicial el comienzo de cada intervalo Yi.

$$Sw_i = Y_i e^{-PE_i/b} \quad (5)$$

PEi = evapotranspiración potencial.

Thomas define la variable Yi como una función no lineal del agua disponible, según los parámetros a y b.

$$Y_i = \frac{(W_i + b)}{2a} - \left\{ \left[\frac{(W_i + b)}{2a} \right]^2 - \frac{W_i b}{a} \right\}^{0.5} \quad (6)$$

Esta función asegura que $Y_i \leq W_i$, $Y'(0) = 1$, $Y'(\infty) = 0$. El límite superior de Yi lo representa el parametro b. Thomas et al. (1983 en Alley, 1984) hacen notar que "a excepcion de estas propiedades la función Yi no tiene ningun significado particular".

Sustituyendo la ecuacion 3 y la 4 en la 2 tenemos.

$$(W_i - Y_i) = Ro_i + I_i \quad (7)$$

Para diferenciar la escorrentía directa (Ro) de la recarga ($Rg \equiv I$) se asume un coeficiente de reparto c , y se tiene:

$$Ro_i = (1 - c)(W_i - Y_i) \quad (8) \quad \text{y} \quad Rg_i = c(W_i - Y_i) \quad (9)$$

El caudal subterráneo, es decir, aquella fracción del caudal observado que proviene del almacenamiento subterráneo es:

$$Qg_i = d \times Sg_i \quad (10)$$

donde d representa la fracción del almacenamiento en el acuífero que viene descargada al río. Si se aplica la ecuación de continuidad a la zona saturada se tiene

$$Rg_i - Qg_i = \Delta Sg = Sg_i - Sg_{i-1} \quad (11)$$

Sustituyendo la ecuación 10 en la 11 y resolviendo por Sg_i se tiene:

$$Sg_i = \frac{Rg_i + Sg_{i-1}}{d + 1} \quad (12)$$

El caudal total al final del periodo i es:

$$Qs_i = Ro_i + Qg_i \quad (13)$$

3.3.2.1.1 Cálculo de recarga

El método de Thomas para calcular la recarga requiere unos datos de entrada: lluvia y evapotranspiración potencial y el valor de los cuatro parámetros (a, b, c, d); adicionalmente, el almacenamiento inicial en el suelo es (Swo) y en el acuífero (Sgo). De esta manera se pueden estimar los demás componentes del ciclo hidrológico, como el caudal total y la recarga, el caudal subterráneo, la escorrentía directa, la evapotranspiración real, el almacenamiento en el suelo y en el acuífero. Sin embargo, en la generalidad de los casos como el del presente estudio no se conoce el valor de los parámetros, entonces se debe resolver un problema inverso: teniendo el caudal observado ¿cuál es el valor de los cuatro parámetros del modelo que produce un caudal simulado que mejor se ajusta? Por tanto, el caudal simulado es función de los cuatro parámetros y de los valores iniciales de almacenamiento en el suelo y en el acuífero. Esto se puede expresar de la siguiente forma:

$$Qs = f(a, b, c, d, Swo, Sgo)$$

En el proceso de calibración se incluyeron los valores de Swo y Sgo sin la existencia de datos disponibles al respecto. La problemática generalizada de la calibración del modelo de Thomas se ilustra en el siguiente diagrama de bloques.

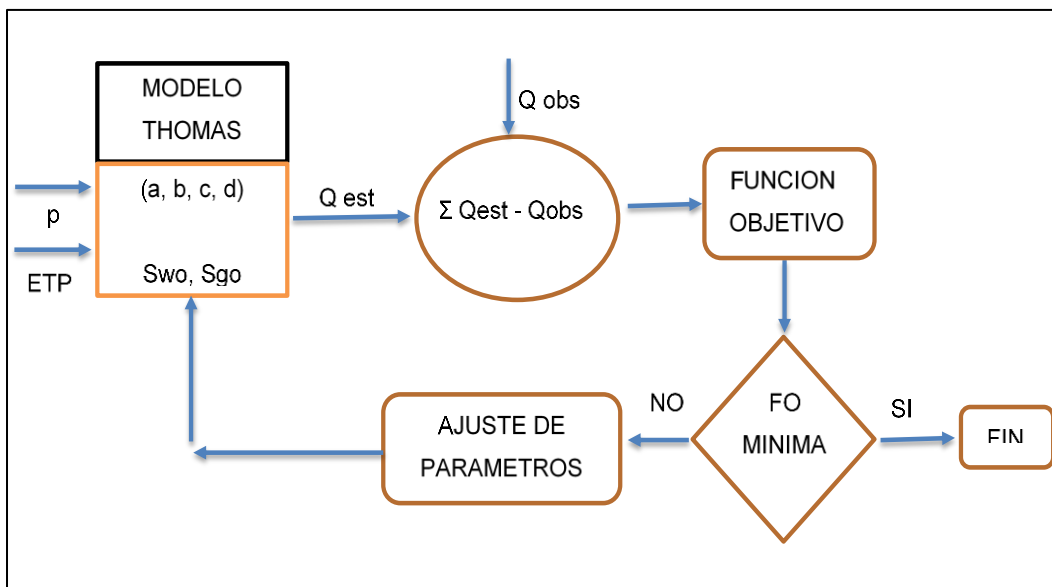


FIGURA 3-36 Metodología de calibración del modelo Thomas.

Como se observa en el diagrama anterior es necesario establecer una función objetivo que de alguna manera mida el ajuste de los caudales simulados y observados. La función objetivo que se ensayo fue el error medio cuadrático.

El área de estudio se localiza sobre las cuencas de los ríos Orotoy y Humadea, afluentes del río Metica. Para calcular la recarga en estas cuencas se utilizó información de las estaciones limnimétricas Rancho Alegre (35017070), ubicada sobre el río Orotoy, y el Barro (35017040), sobre el río Metica (Ver FIGURA 3-37).

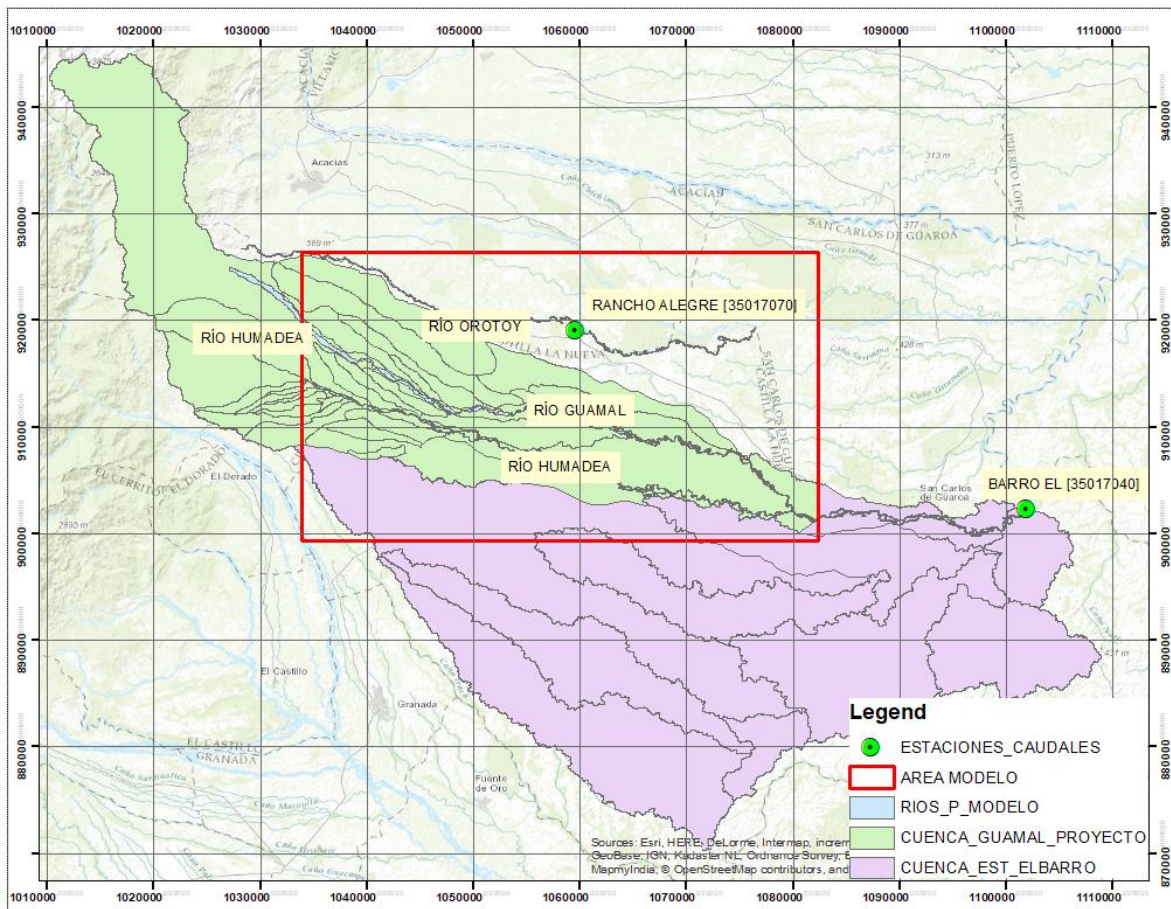


FIGURA 3-37 Localización de las cuencas y estaciones utilizadas para el cálculo de recarga.

Para determinar los caudales de la cuenca del río Humadea se realizó una transposición de caudales por medio de la siguiente ecuación:

$$Q_x = Q_P \frac{A_x P_x}{A_p P_p}$$

donde:

Q_p = caudal de la cuenca pivote en m^3/seg

A_p = área de la cuenca pivote en km^2

A_x = área de la cuenca sin información en km^2

P_p = precipitación en la cuenca pivote (río Metica) en m^3/seg

P_x = precipitación mensual multianual de la cuenca sin información en m^3/seg

A partir de los caudales calculados para las cuencas que atraviesan el área en estudio, la precipitación y el cálculo de la evapotranspiración potencial se calculó la recarga para la cuenca del río Humadea, que atraviesa el área en estudio. Se realizó la calibración del modelo de Thomas ABCD. Los parámetros calculados para la solución del método aparecen a continuación (tabla 3-4).

TABLA 3-4 Parámetros obtenidos en la fase de calibración

Cuenca río Metica		Cuenca río Humadea	
a	0.80	a	0.50
b	100.00	b	0.5
c	0.49	c	0.32
d	0.02	d	0.03
SW i-1	179.13	SW i-1	250
Sg i-1	1800	Sg i-1	100
Area km^2	2384.65	Area km^2	942.34

En las FIGURA 3-38 y FIGURA 3-39 se presentan los mejores resultados de calibración obtenidos de los caudales calculados frente a los observados para las cuencas de los ríos Metica y Humadea.

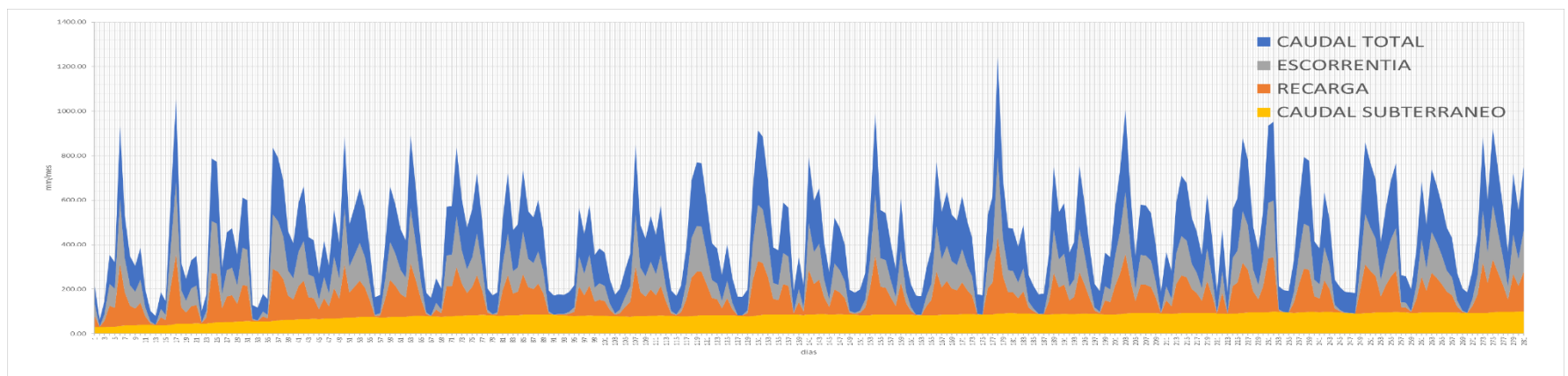
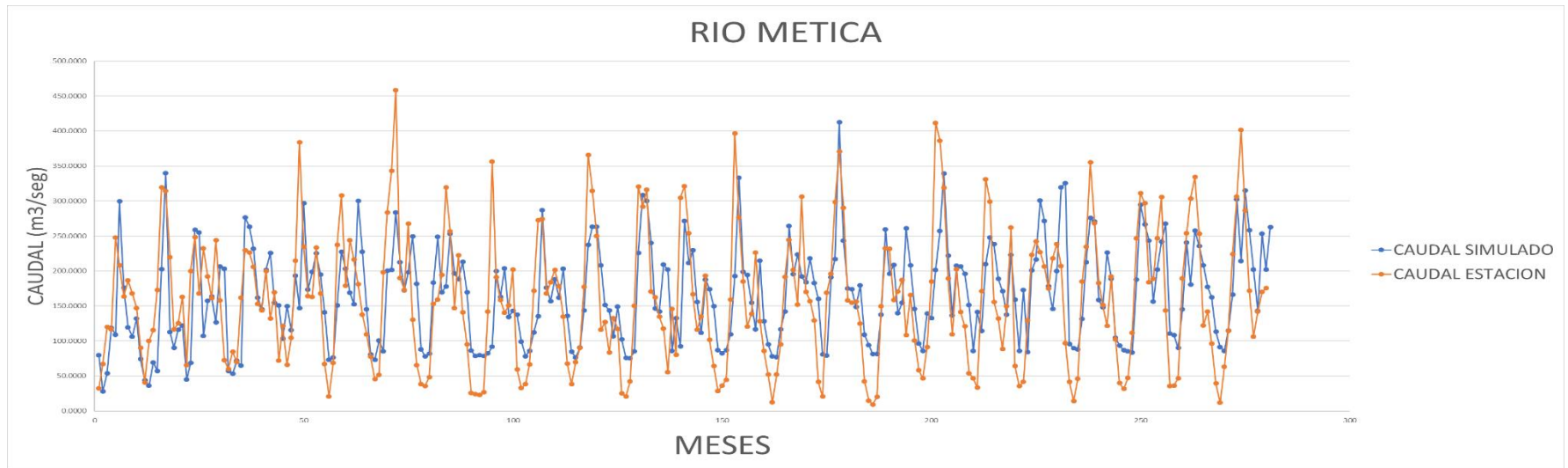


FIGURA 3-38 Hidrograma de calibración del modelo Thomas en la cuenca del río Metica

La recarga calculada para la cuenca del río Metica fue de 896.77 mm/año.

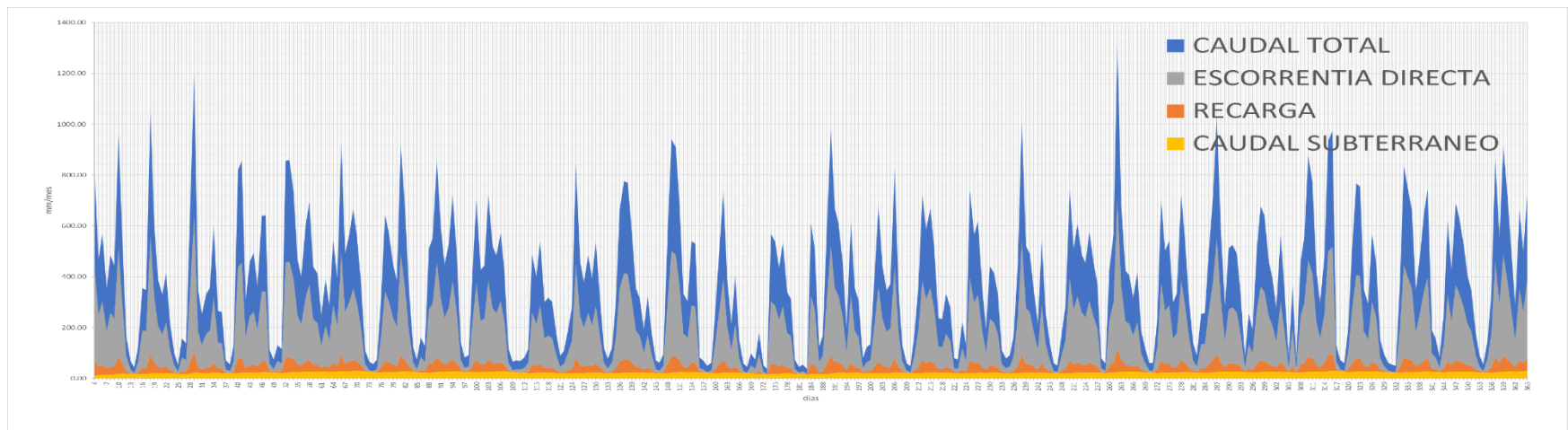
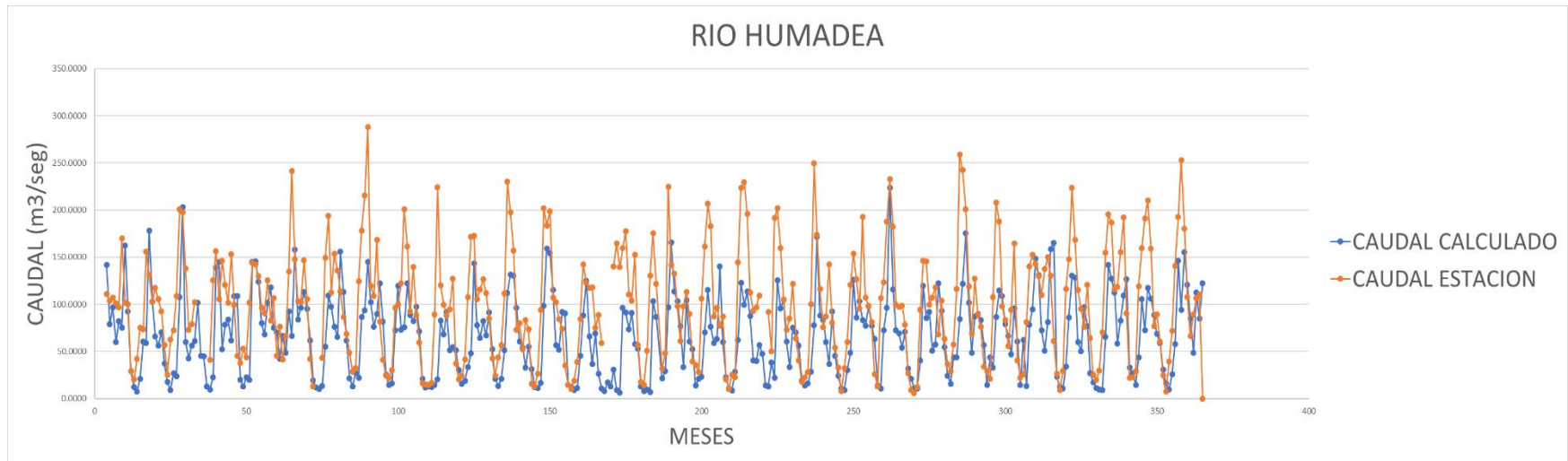


FIGURA 3-39 Hidrograma de calibración del modelo Thomas de la cuenca del río Humadea.

La recarga calculada para la cuenca del río Humeada que cubre el área en estudio fue de 285.68 mm/año.

3.3.2.2 Recarga potencial por métodos empíricos

A través del análisis de las variables hidroclimatológicas podrá determinarse la recarga de los acuíferos, que es fundamental para establecer medidas apropiadas para el manejo y sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo.

La recarga de acuíferos se define como el ingreso de agua en la zona saturada, donde comienza a hacer parte de las reservas subterráneas de agua (Bradbury et al., 2000; Balek, 1988; Scanlon et al., 2002; de Vries y Simmers, 2002). Esta entrada se da de dos maneras: la primera por un movimiento descendente del agua debido a la fuerza de gravedad y la segunda se presenta luego del movimiento horizontal del flujo, debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo.

La recarga natural de un acuífero puede darse por precipitación o por aguas superficiales, es decir, a través de ríos o lagos o por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos, pero también de manera artificial, producto de actividades como la irrigación, fugas de redes de acueducto o alcantarillado o por infiltraciones de embalses y depósitos (Balek, 1988; Custodio, 1997; Simmers, 1990; Lerner et al., 1990; Samper, 1997).

En general, la recarga por lluvia es la más importante, mientras que la que se produce por ríos o lagos es importante en climas secos. La debida a fugas en redes de acueducto y alcantarillado es de gran importancia en las zonas urbanizadas.¹²

A continuación se presentan las expresiones empíricas para estimar la recarga potencial por precipitación.

- **Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1988):**

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

Donde *r* es la recarga (pulg./año); y *p* es la precipitación (pulg./año).

¹² (MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2014, pág. 37).

- **Sehgal (1973)**

$$r = 2.5(p - 16)^{0.5}$$

Donde r es la recarga (pulg./año); y p es la precipitación (pulg./año).

- **Turc (1954)**

$$r = p \left[1 - \left(0.9 + \frac{p^2}{L^2} \right)^{-0.5} \right]$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^2$$

Donde r es la recarga (mm/año); p es la precipitación (mm/año) y T la temperatura media anual (°C).

3.3.2.2.1 Información climatológica

De acuerdo con el Atlas climático de Colombia, elaborado por el IDEAM, se establece que el clima es el conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas que se caracteriza por los estados y evoluciones del tiempo en un lugar o región determinado, durante un periodo de tiempo. Sus factores determinantes hacen referencia a las condiciones físicas y geográficas, las cuales son constantes en el tiempo y el espacio.

Para el estudio de recarga se realizó el análisis espaciotemporal del parámetro de precipitación, que se llevaron a nivel de cartografía (isoyetas).

El área de estudio comprende un paisaje de sabana o llanura, con una pendiente suave del terreno y coberturas vegetales asociadas con la ganadería y la intensificación del cultivo de palma africana.

Para el estudio se tomó como referencia información del centro de documentación del Ideam en Bogotá, compuesto por datos registrados históricamente en varias estaciones meteorológicas. Se eligió la más actualizada y confiable, respecto a la ubicación del campo.

Las principales estaciones empleadas para la descripción del parámetro de precipitación del área en estudio se presentan en la TABLA 3-5, en la que se describen las principales características de cada una de ellas.

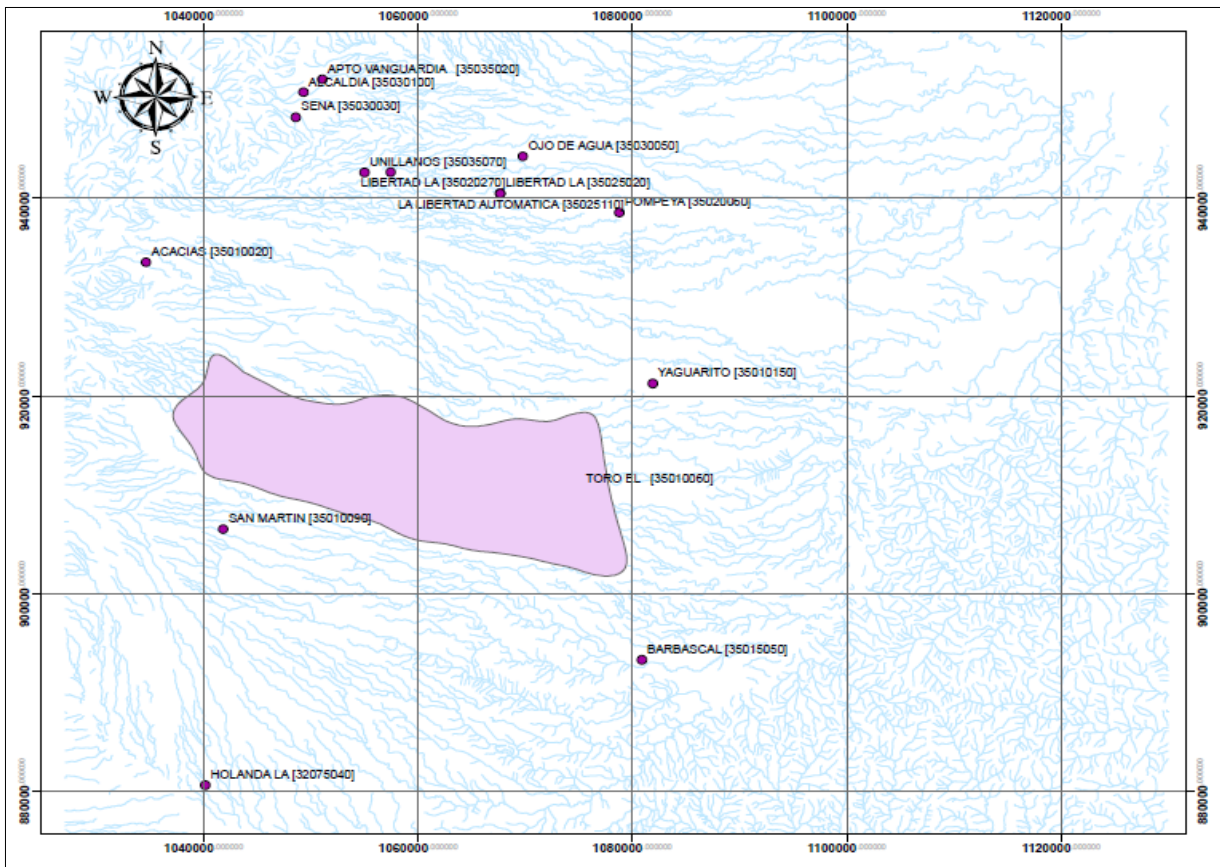
TABLA 3-5 Estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de comportamiento de la precipitación.

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE ESTACIÓN	NOMBRE	MUNICIPIO	ELEVACIÓN	COORDENADAS DATUM MAGNAS SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ	
						ESTE	NORTE
3503502	SP	AEROPUERTO VANGUARDIA	GUATIQUEÍA	Villavicencio	423	1051166	952517
3502502	AM	LA LIBERTAD	RÍO NEGRO	Villavicencio	336	1067830	941469
35035070	CO	UNILLANOS	RÍO NEGRO	Villavicencio	340	1049319	946987
3503501	SS	BASE AÉREA APIAY	RÍO OCOA	Villavicencio	400	1056724	943305
3503005	PM	OJO DE AGUA	RÍO OCOA	Villavicencio	300	1069679	943314
3503010	PG	ALCALDÍA	GUATIQUEÍA	Villavicencio	470	1049317	950673
3503004	PG	ESCUELA EDUARDO CUEVAS (ACD TO LA ESMERALDA)	GUATIQUEÍA	Villavicencio	550	1047466	950672
3503003	PG	SENA	GUATIQUEÍA	Villavicencio	425	1051168	950674
3501002	PM	ACACÍAS	ACACÍAS	Acacias	525	1034520	932235
3501505	CO	BARBASCAL	META	San Martín de los Llanos	245	1077265	900927
3207005	CO	PUERTO LLERAS	META	Puerto Lleras	245	1077151	854850
3207504	CO	LA HOLANDA	META	Granada	320	1040094	880633
3501006	PM	EL TORO	CAÑO GUAROA	Castilla La Nueva	230	1053039	913814
3501015	PM	YAGUARITO	META	San Carlos de Guaria	257	1075251	919358
3501009	PM	SAN MARTÍN	META	San Martín	389	1043788	902751
3502006	PM	POMPEYA	META	Villavicencio	263	1073384	939631

PM – Pluviométrica, PG – Pluviográfica, ME – Meteorológica especial, SP – Sinóptica principal, SS – Sinóptica secundaria, CO – Climatológica ordinaria.

Fuente: Base de datos del Ideam.

En la FIGURA 3-40 se presenta la ubicación de las estaciones utilizadas para la caracterización.



Fuente: Base de datos del Ideam.

FIGURA 3-40 Estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de comportamiento de la precipitación.

3.3.2.2 Comportamiento regional de la precipitación.

El régimen de las lluvias en el departamento del Meta y, en especial, en el área de estudio está directamente influenciado por varios factores, entre ellos el más relevante, el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) y el efecto orográfico que ejerce la cordillera oriental o piedemonte llanero.

De la parte sur del continente llegan corrientes húmedas que arrastran la evapotranspiración de la selva amazónica y van descargando parte de su contenido sobre la Amazonia y la Orinoquia, pero su mayor volumen lo dejan en el flanco oriental de la cordillera, entre Villavicencio y Acacías, así se forma un núcleo en este piedemonte, que se considera el de mayor valor pluviométrico desde Arauca hasta el Putumayo. El punto donde se encuentran las masas de aire del sur y las provenientes del norte (en relación con el

ecuador geográfico) se denomina zona de confluencia intertropical o simplemente ZCIT, que en su dinámica de movimiento durante todo el año va desde el sur del país hasta el norte para luego regresar, generando dos inviernos en su desplazamiento. Para la zona de estudio el movimiento de la ZCIT se puede sintetizar de la siguiente manera:

- **Posición meridional máxima de la ZCIT**

Se presenta entre enero y febrero. La actividad pluviométrica más activa se encuentra hacia el sur del país y, por lo tanto, lejos del departamento del Meta. Corresponde al periodo seco o de baja pluviometría en la región, que se extiende de mediados de diciembre a marzo.

- **Posición central de la ZCIT**

Se presenta de abril a mayo y de septiembre a octubre. En estas dos épocas la zona de confluencia se halla aproximadamente en la parte central del país, cubriendo todo el departamento del Meta y ocasionando una temporada lluviosa. Se incrementa notoriamente la pluviometría en abril, mayo y junio. A partir de este mes la ZCIT traspasa la cordillera oriental, se mueve hacia el norte del país, pero sigue recibiendo la influencia las masas húmedas que llegan desde la Amazonia, es decir, la lluvia se reduce en valor pero continúa lloviendo en la zona.

- **Posición septentrional máxima de la ZCIT**

La zona de confluencia se desplaza a la parte norte del país, entre junio y agosto, llevando la temporada lluviosa al Caribe. En estos dos meses el Meta se encuentra nuevamente lejos de la influencia de la ZCIT, pero los vientos alisios del sur saturados de humedad, producto de la evapotranspiración en la selva amazónica, traen masas de aire con exceso de humedad, que al chocar con la cordillera y por efecto advectivo, generan precipitaciones de gran intensidad.

La anterior dinámica de la ZCIT muestra que en el Meta existe una sola época de verano, que va desde mediados de diciembre hasta finales de marzo o comienzos de abril. El resto del año se considera como temporada lluviosa, especialmente de abril a junio.

3.3.2.2.3 Distribución espacial de la precipitación

La distribución espacial de la lluvia hace referencia a la forma como se distribuye la precipitación sobre el relieve, es decir, la forma como llueve en el piedemonte y en la llanura aluvial. Para visualizar el comportamiento espacial de la precipitación y empleando los valores de lluvia obtenidos en las estaciones localizadas en inmediaciones del municipio de Castilla La Nueva se generaron las isoyetas con la información de precipitación media multianual.

El análisis de la precipitación temporal hace referencia al comportamiento de la lluvia en relación con el tiempo o la forma como ésta se distribuye en el año, mes a mes. En la TABLA 3-6 se presentan los valores totales de precipitación media mensual para el área de influencia.

TABLA 3-6 VALORES MEDIOS DE PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN (MM)

VALORES MEDIOS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)													
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	VR ANUAL
AEROP. VANGUARDIA	53.3	103.2	200.6	493.3	588.7	506.4	440.2	373.6	357.6	430.9	373.4	152.4	4073.6
SAN MARTÍN	41.8	93.5	223	426	532	402	348	253	299	348	240	92.8	3298.7
LA LIBERTAD	31.1	68.8	157.7	362.7	420	410.1	309.1	247.9	269.3	311.5	210.3	82.2	2880.7
ACACÍAS	86.2	128.5	267.3	560.2	682.8	625.9	479.3	428.3	423.5	517.5	490.7	233.3	4923.6
BARBASCAL	29.6	63.5	190	329	374	345	287	220	194	255	207	50.1	2544.7
BAJO NARE	15.6	30.2	182	370	385	408	308	222	249	279	150	84.1	2682.4
PTO. LLERAS	23.2	72.4	200	334	414	398	305	253	221	251	192	74.6	2739.3
LA HOLANDA	38.5	78.7	216	347	422	354	296	237	228	267	239	62.9	2785.4
POMPEYA	35.3	59.4	125	335	358	369	289	242	257	273	187	54.3	2583.7
BASE AÉREA DE APIAY	22	73.4	163.1	404.5	471	408.7	311.1	267.7	269.3	352.3	232.8	96.9	3072.8
UNILLANOS	95.4	102	211	446.9	482.6	483.4	372.4	336.1	308.1	424.6	300.1	105.4	3668
ALTO DEL TIGRE	64.2	143	196.5	359.2	455	388.7	354.7	301.8	272.3	317.9	209.8	149.7	3212.9
EL TORO	24.6	62.9	174.2	345.5	396.6	370.6	280.5	228.8	244.2	251.3	187.2	61.6	2628.4
MANZANARES	137	172.5	276.1	509	682.4	755.3	698.7	602.8	533.3	488.2	450.9	311.2	5617.2

Fuente: Base de datos IDEAM

En la FIGURA 3-41 se presentan las isoyetas media multianuales calculadas para el área en estudio.

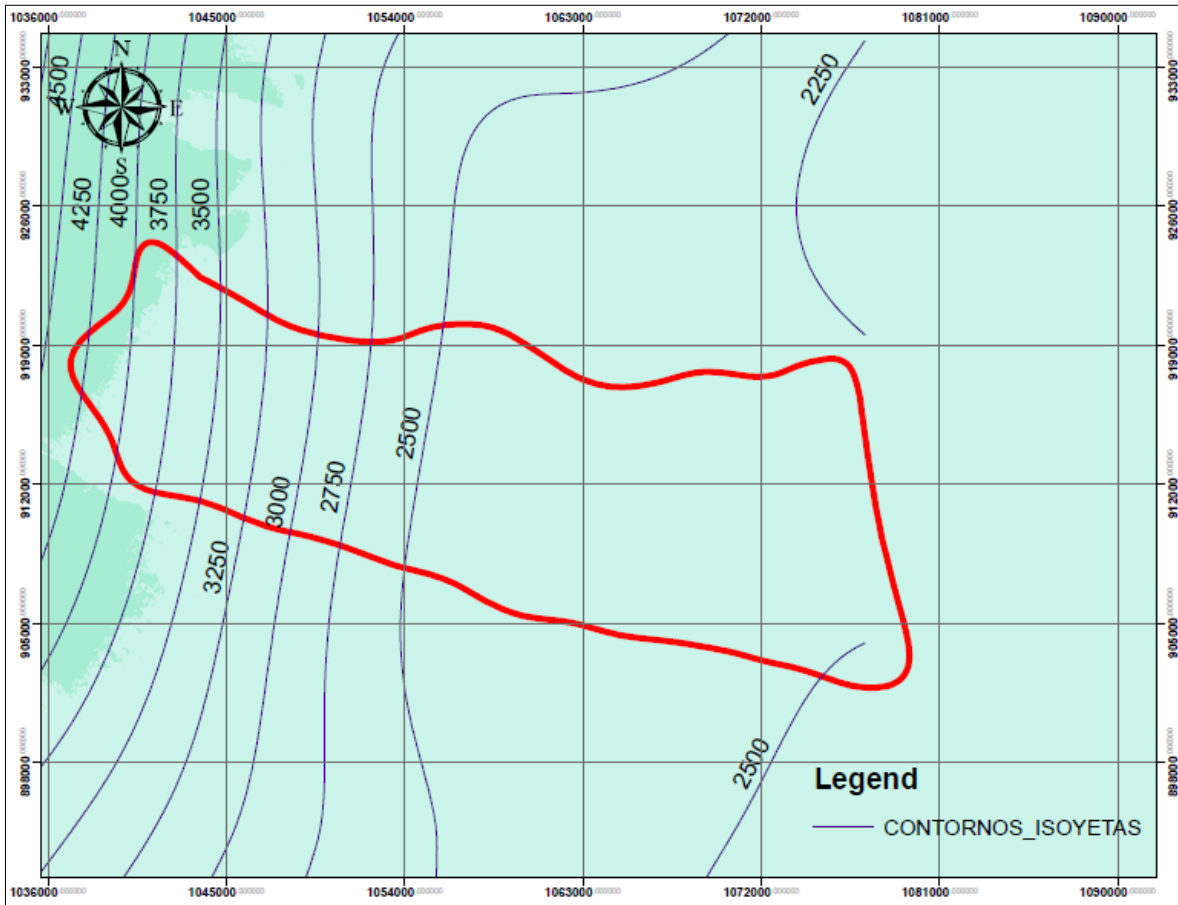


FIGURA 3-41 Isoyetas del área en estudio.

3.3.2.2.4 Cálculo de recarga por métodos empíricos

Tomando en cuenta la distribución espacial de la precipitación calculada y utilizando las expresiones empíricas para estimar la recarga potencial explicada se calculó la distribución espacial de la recarga por los métodos de Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1988) y Sehgal (1973).

En la FIGURA 3-42 se presenta la recarga calculada por el método de Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1988).

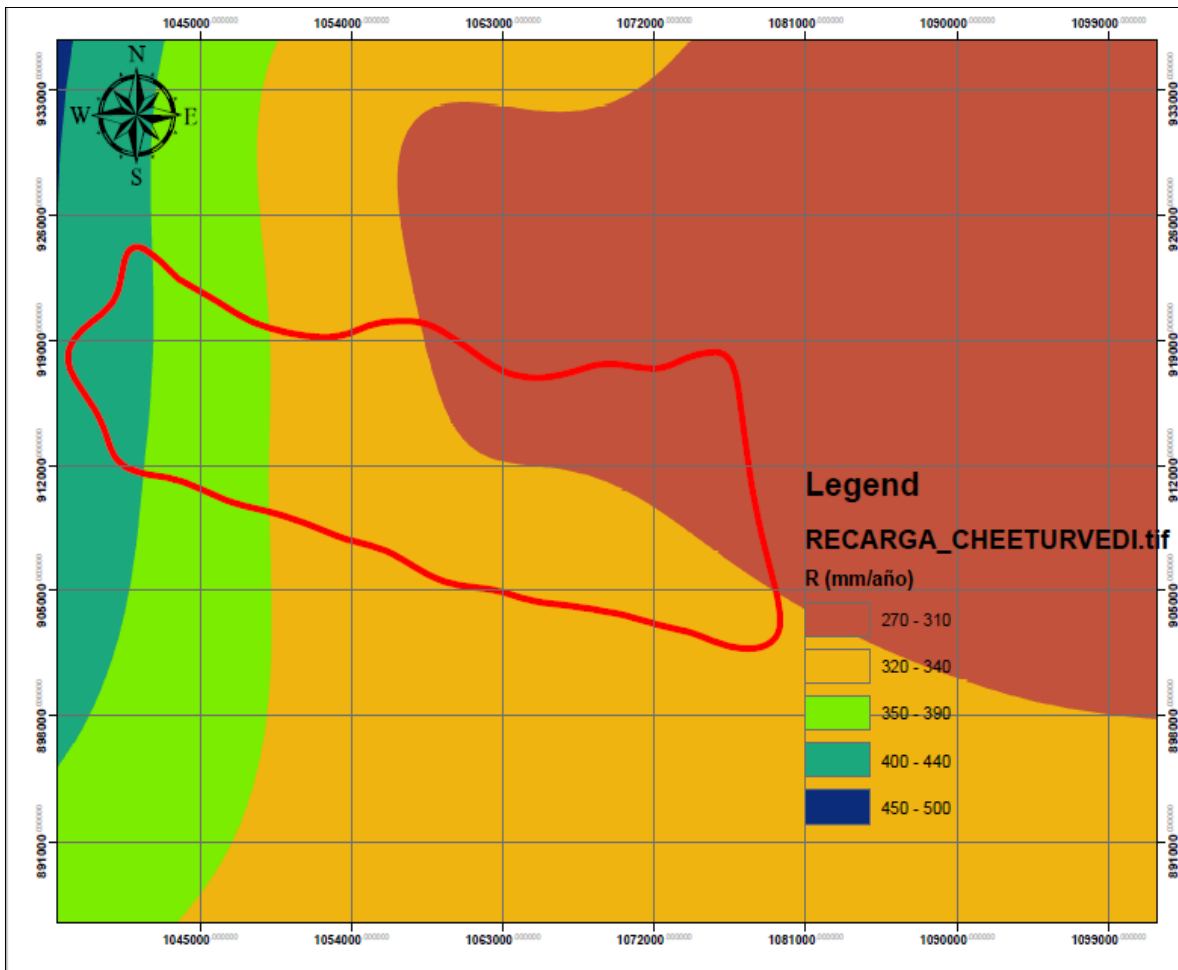


FIGURA 3-42 Cálculo de recarga por el método de Cheeturvedi.

En la FIGURA 3-43 se presenta la recarga calculada por el método de Sehgal (1973).

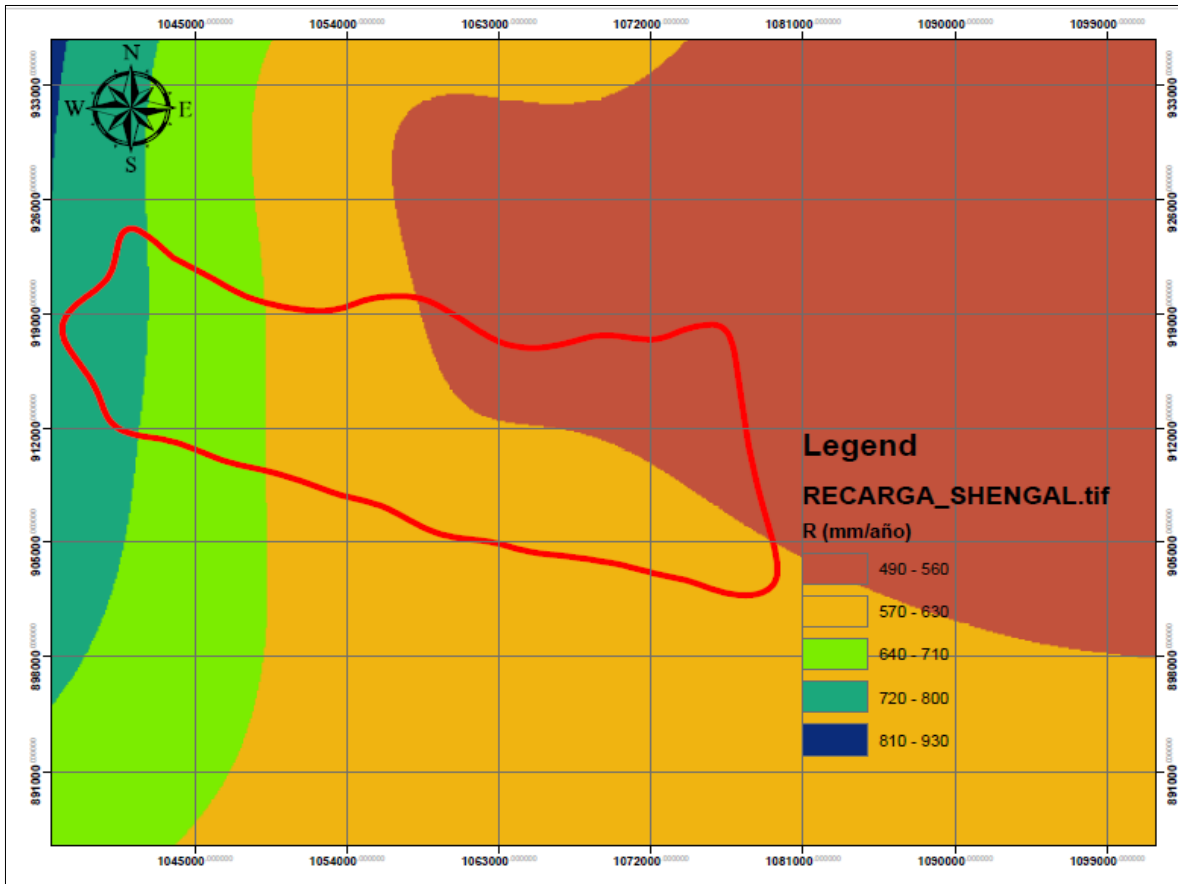


FIGURA 3-43 Cálculo de recarga por el método de Sehgal.

La recarga calculada por los métodos de Cheeturvedi y de Sehgal varían en un 50 % de magnitud para una misma zona.

La TABLA 3-7 presenta los valores de recarga obtenidos por las diferentes metodologías desarrolladas en el presente estudio.

TABLA 3-7 ESTIMACIÓN DE LA RECARGA PARA LAS METODOLOGÍAS UTILIZADAS

MÉTODO DE BALANCE	MÉTODO EMPÍRICO	
THOMAS abcd C. río Vetás	CHEETURVEDI	SHEGAL
285.68 mm/año	270 - 500 mm/año	400 - 930 mm/año

3.3.1 Direcciones de flujo

Con base en los niveles estáticos de los puntos de agua inventariados se calculó la dirección de flujo del agua subterránea del área en estudio. La caracterización del flujo subterráneo local se realizó a partir de los datos de elevación del nivel de la tabla de agua en aljibes, pozos someros y la elevación del punto de surgencia en manantiales. Se considera que en general la surgencia de agua subterránea como manantial representa la intersección de la tabla de agua con la superficie topográfica. Estos datos de elevación se interpolaron para obtener la elevación de la superficie piezométrica y la dirección del flujo¹³. En la FIGURA 3-44 se presenta la superficie potenciométrica, se observa que sigue de manera general la pendiente topográfica de la zona. Las zonas más altas se encuentran hacia el sector noroccidental del área y las más bajas hacia el sureste.

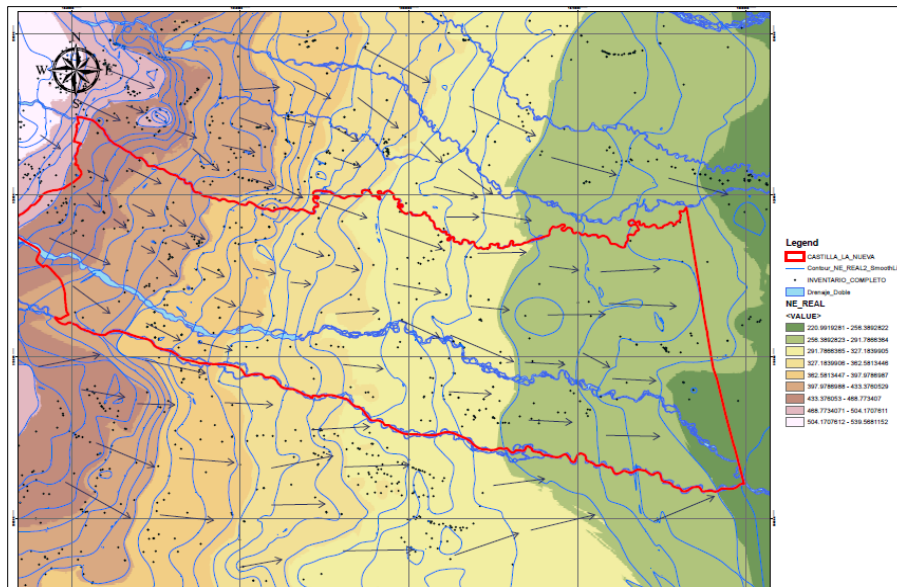


FIGURA 3-44 Mapa de las direcciones de flujo, municipio de Castilla La Nueva.

Un segundo tipo de flujo subterráneo intermedio se determinó usando los pozos de más de 30 metros, a excepción de los pozos del acueducto de San Martín, que captan los niveles más profundos. Este flujo sigue el gradiente topográfico regional en dirección NW-SE. Estas

¹³ (CATHALAC, 2015).

tendencias se conservan en profundidad considerando que ninguna formación geológica o falla esté actuando como barrera para el flujo subterráneo.

3.4 Modelo hidráulico

Este modelo se desarrolló con el fin de conocer las propiedades hidráulicas del área en estudio, para cuyo análisis se tomó la información de las pruebas de bombeo realizadas para la elaboración del capítulo de hidrogeología en los estudios de licenciamiento ambiental.

3.4.1 Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico:

Acuífero (del latín *fero*, llevar). Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que permite su circulación con facilidad. Ejemplo: arenas, gravas. También granito u otra roca compacta con una fracturación importante.

Acuícludo (del latín *cludo*, encerrar). Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y no permite que circule a través de ella. Ejemplo: limos, arcillas. Un m³ de arcillas contiene más agua que el mismo volumen de arenas, pero el agua está atrapada, no puede salir por gravedad y, por tanto, no puede circular en el subsuelo ni en condiciones naturales ni hacia un pozo que esté bombeando.

Acuitardo (del latín *tardo*, retardar, impedir). Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable que circula a través de ella con dificultad. Evidentemente se trata de un concepto intermedio entre los dos anteriores. Ejemplo: arenas arcillosas, areniscas, rocas compactas con alteración o fracturación moderadas.

Acuífero (del latín *fugo*, rechazar, ahuyentar). Formación geológica que no contiene agua porque no permite su circulación. Ejemplo: granito o esquisto inalterados y no fracturados¹⁴

¹⁴ (Sánchez, 2012).

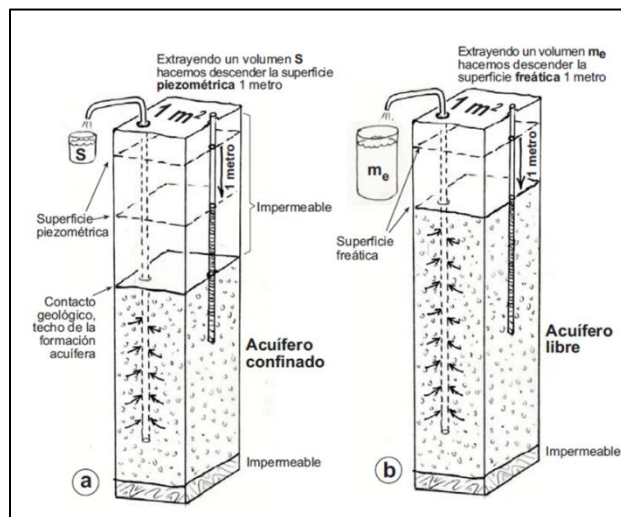
3.4.2 Propiedades hidráulicas

- **Coefficiente de almacenamiento (S)**

Se define como el volumen de agua liberado al disminuir la presión en el acuífero:

$$S = \frac{\text{Volumen de agua liberado}}{\text{Volumen total que ha bajado la superficie piezométrica}}$$

En la FIGURA 3-45 se presenta un ejercicio gráfico que explica el cálculo del coeficiente de almacenamiento.



Fuente: modificado de Sánchez, 2012.

FIGURA 3-45 Coeficiente de almacenamiento

En la parte a de la figura anterior vemos una columna de 1 m² de base de un acuífero confinado, en la que la superficie piezométrica ha bajado un metro. El pequeño volumen de agua obtenido es S.

En la parte b una columna de 1 m² de base de un acuífero libre en la que la superficie freática ha bajado un metro. El volumen de agua obtenido es la porosidad eficaz (*specific yield*). Pero son dos conceptos distintos:

Primero, se concluye que el acuífero libre sólo aporta agua (por vaciado) al m³ superior, entre las dos posiciones sucesivas de la superficie freática.

Segundo, el acuífero confinado aporta agua (por descompresión) toda la columna vertical de acuífero; por tanto, su magnitud depende del espesor geológico del acuífero.¹⁵

El coeficiente de almacenamiento es adimensional como la porosidad eficaz (volumen / volumen) y los valores que presenta son mucho más bajos en los confinados perfectos que en los semiconfinados. Los valores típicos se presentan en la TABLA 3-8.

TABLA 3-8 Coeficiente de almacenamiento según el tipo de acuífero

Tipo de acuífero	Rangos	Descripción
Acuíferos libres	(porosidad eficaz): 0,3 a 0,01 (3.10 ⁻¹ a 10 ⁻²)	El agua proviene del vaciado de los poros
Acuíferos semiconfinados	(coef. de almacenamiento): 10 ⁻³ a 10 ⁻⁴	El agua proviene de descompresión y de los rezumes desde las capas confinantes
Acuíferos confinados	(coef. de almacenamiento): 10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁵	El agua proviene de descompresión

Fuente: modificado de Sánchez, 2012.

- **Permeabilidad (K)**

Es la facilidad que ofrece un cuerpo para ser atravesado por un fluido, en este caso el agua. En hidrogeología la permeabilidad (o mejor: conductividad hidráulica, K) es un concepto más preciso: es la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico:

$$\text{Caudal por unidad de seccion} = K * \text{gradiente hidraulico}$$

¹⁵ (Sánchez, 2012).

- **Transmisividad (T)**

El parámetro que indica la facilidad del agua para circular horizontalmente por una formación geológica es una combinación de la conductividad hidráulica y del espesor.¹⁶

$$\text{Transmisividad} = K * \text{Espesor}$$

El análisis de las propiedades hidráulicas se realizó a partir de la reinterpretación de trece pruebas de bombeo realizadas entre los años 2014 y 2015 en pozos y aljibes. La localización de las pruebas de bombeo utilizadas para el modelo hidráulico se presenta en la FIGURA 3-46.

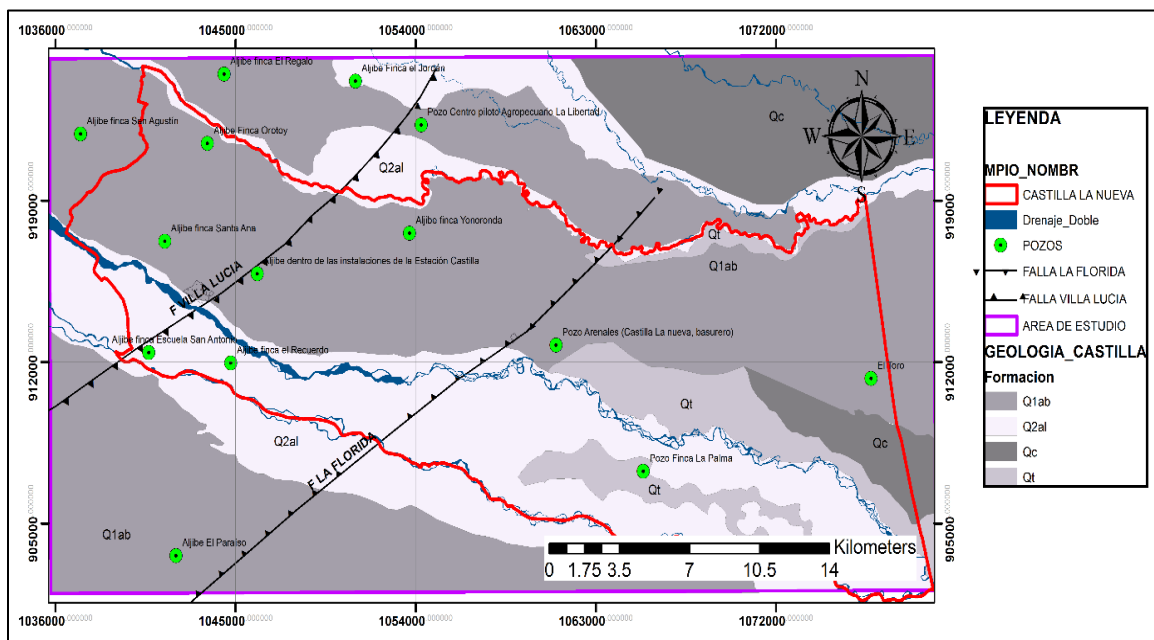
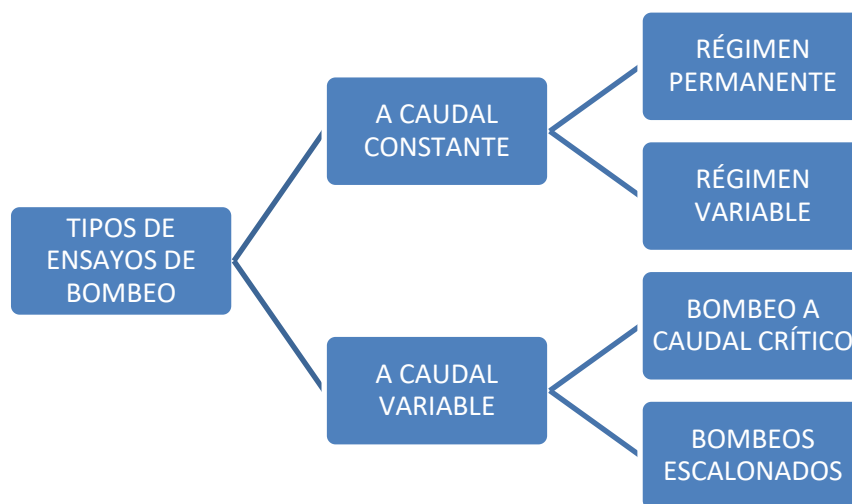


FIGURA 3-46 Localización de las pruebas de bombeo.

3.4.3 Análisis de las pruebas de bombeo

En la actualidad existen diversos tipos de ensayos de bombeo, como se muestra en la FIGURA 3-47.

¹⁶ (Sánchez, 2012).



Fuente: Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo.

FIGURA 3-47 Tipos de ensayos de bombeo

Los ensayos de bombeo se realizaron a caudal constante, en régimen variable, es decir, para calcular las propiedades hidráulicas se analizó la evolución del abatimiento durante la prueba. La metodología general para este tipo de ensayo es la siguiente: primero, se miden los niveles iniciales, esto es, las profundidades a que se encuentre el nivel de agua en el pozo que se va bombear. Luego, se prende el motor en el pozo de bombeo y se mide la evolución de los niveles con el tiempo. Cabe aclarar que en las pruebas de bombeo realizadas en los estudios de licenciamiento ambiental no se tuvieron en cuenta los pozos de observación, por lo que los valores de coeficiente de almacenamiento se definen teniendo en cuenta la información geológica e hidrogeológica¹⁷.

Se emplearon dos métodos para el análisis de las pruebas de bombeo. Para los aljibes se utilizó el método de Papadopoulos & Cooper (métodos para pozos de gran diámetro) y para las pruebas realizadas en los pozos se aplicó el método de Hantush y Themis (para acuíferos semiconfinados).

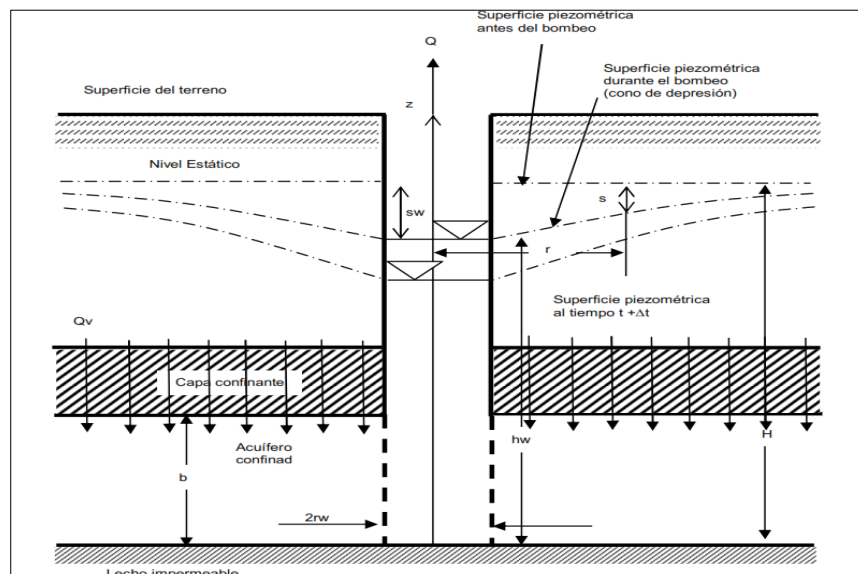
A continuación se presenta la metodología utilizada para el análisis de pruebas de bombeo realizadas a caudal constante en régimen variable.

¹⁷ (Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984).

3.4.3.1 Metodología de análisis de pruebas de bombeo en acuíferos semiconfinados

Hantush y Jacob (1955) desarrollaron un modelo aplicable a acuíferos semiconfinados, isotrópicos y homogéneos (FIGURA 3-48). Estos investigadores tuvieron en cuenta las siguientes suposiciones:

- Acuífero homogéneo e isotrópico.
- Acuífero horizontal y de espesor constante, b , y su capa confinante posee un espesor constante b' y una conductividad hidráulica vertical K' .
- Descarga constante, Q .
- Acuífero de extensión infinita.
- El diámetro del pozo es infinitesimalmente pequeño, es decir, que no existe almacenamiento en el pozo.
- El pozo penetra todo el acuífero.
- La capa confinante no almacena agua.
- El flujo en el acuífero es horizontal y el goteo es vertical.
- Inicialmente, la tabla de agua posee la misma altura de la carga hidráulica del acuífero y es igual a h_0 .



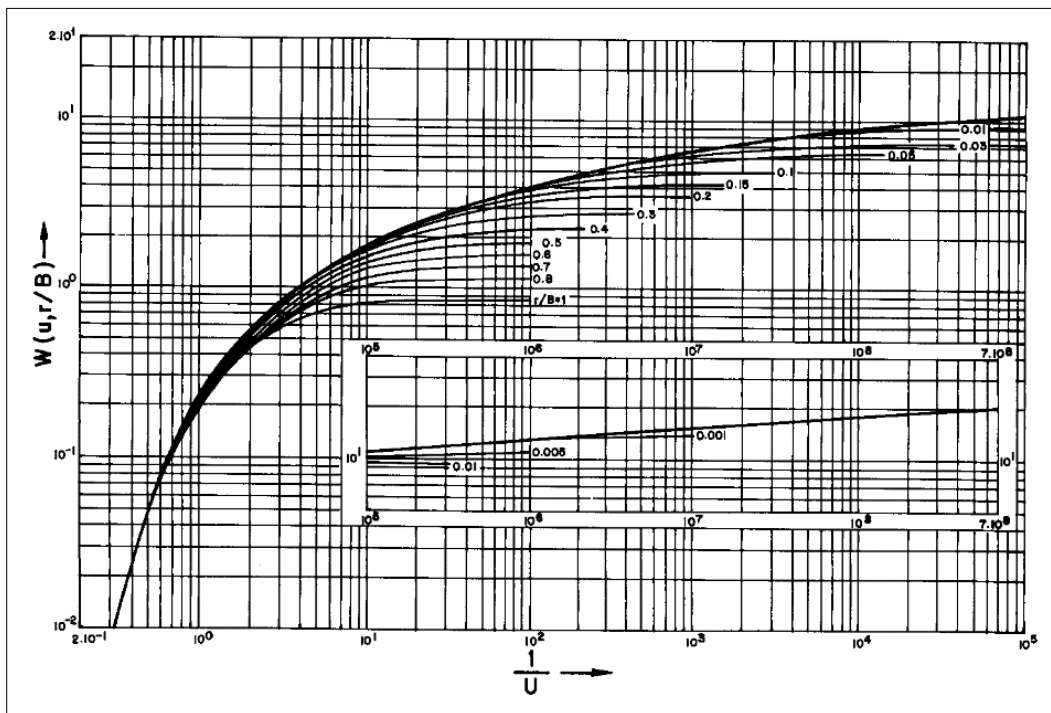
Fuente: Diplomado Cathalac en aguas subterráneas para América Latina y el Caribe, capítulo 8.

FIGURA 3-48 Comportamiento de la prueba de bombeo.

La Hantush y Jacob encontraron la solución a la ecuación de la hidráulica de pozos en acuíferos semiconfinados, la cual es:

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u, \frac{r}{B}\right)$$

Donde $W\left(u, \frac{r}{B}\right)$ es la función de pozo para acuíferos semiconfinados de Hantush y Jacob. Dicha función es una integral sin solución analítica como en el caso de Theis. Consecuentemente está tabulada (FIGURA 3-49)¹⁸.



Fuente: Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo.

FIGURA 3-49 Función de pozo $W(u, r/B)$ en acuíferos semiconfinados (Hantush, 1956)

¹⁸ (CATHALAC, 2015).

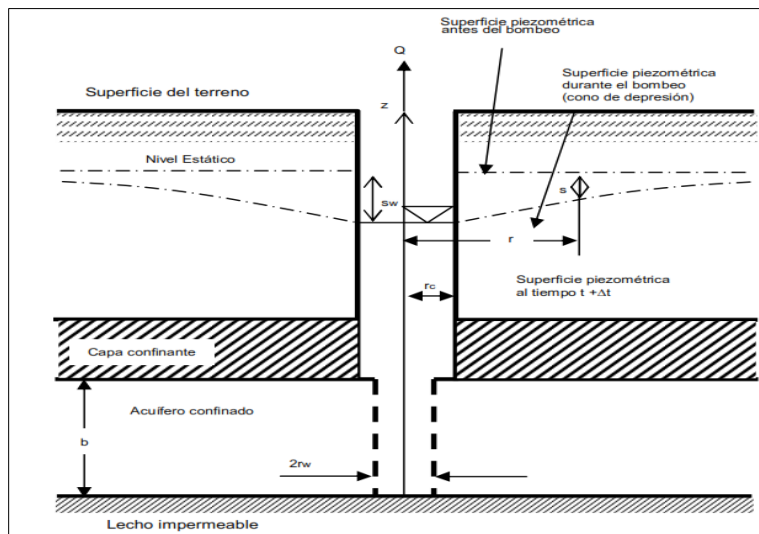
3.4.3.2 Metodología de análisis de pruebas para pozos de gran diámetro

Los pozos pequeños generalmente varían entre 0,05 y 0,25 m, mientras que los de gran diámetro son pozos excavados y pueden ser de 0,5 a 2 m o más. La teoría de Themis asume que un pozo es una línea en el origen. Esta suposición no tiene en cuenta los efectos significativos de almacenamiento de agua en ellos, que llegan a ser importantes cuando la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento del acuífero son pequeños o cuando el diámetro del pozo de bombeo es grande.

Papadopulos y Cooper (1967) desarrollaron soluciones analíticas en y alrededor de pozos de gran diámetro en acuíferos confinados homogéneos e isotrópicos, tomando en cuenta los efectos del almacenamiento.¹⁹

- **Método de Papadopulos y Cooper (1967)**

La FIGURA 3-50 muestra la sección transversal de un pozo de gran diámetro que penetra totalmente un acuífero confinado. Papadopulos y Cooper (1967) desarrollaron una solución analítica bajo condiciones de explotación con las siguientes suposiciones:



Fuente: Diplomado Cathalac en aguas subterráneas para América Latina y el Caribe, capítulo 8.
FIGURA 3-50 Esquema representativo de un pozo de gran diámetro

¹⁹ (CATHALAC, 2015).

El problema lo resolvieron Papadopoulos & Cooper mediante la transformada de Laplace (Batu, 1998), y se expresa de la siguiente manera:

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} F(u, \alpha, \rho)$$

donde:

$$F(u, \alpha, \rho) = \frac{8\alpha}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{C(\beta)}{D(\beta)^2} d\beta$$

$$C(\beta) = \left[1 - e^{\left(-\frac{\beta^2 \rho^2}{4u} \right)} \right] \left[J_0(\beta \rho) A(\beta) - Y_0(\beta \rho) B(\beta) \right] \quad 20$$

$$A(\beta) = \beta Y_0(\beta) - 2\alpha Y_1(\beta)$$

$$B(\beta) = \beta J_0(\beta) - 2\alpha J_1(\beta)$$

$$D(\beta) = [A(\beta)]^2 + [B(\beta)]^2 -$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}, \quad \alpha = \frac{r_w^2 S}{r_c^2}, \quad \rho = \frac{r}{r_w}$$

J_0 y Y_0 son las funciones de Bessel de orden cero y primera clase. Y_1 es la función de Bessel de primer orden y segunda clase.

- Abatimiento dentro del pozo

Este abatimiento se obtiene cuando $r = r_w$ y se puede expresar como:

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} F(u_w, \alpha)$$

donde:

$$F(u_w, \alpha) = F(u, \alpha, 1)$$

$$u_w = \frac{r_w^2 S}{4Tt}$$

²⁰ (CATHALAC, 2015).

Los valores $F(u, \alpha, \rho)$ se tabulan por integración numérica de la ecuación anterior. En la FIGURA 3-51 se presentan los valores tabulados como una familia de cinco curvas de $\frac{s_w}{Q/4\mu T}$ contra $\frac{1}{u_w}$; una curva para cada uno de los cinco valores del parámetro α . La curva de Theis también se muestra en la FIGURA 3-51, de la que se obtiene importantes características de $F(u, \alpha, \rho)$.

El abatimiento predicho por la ecuación de Theis se aproxima al abatimiento en el pozo de diámetro finito sólo para valores de tiempo relativamente grandes. Papadopoulos (1967) comparó su aproximación con la Theis, así:

$$F(u, \alpha, \rho) \approx W(u) \text{ para } t > 2.5 \frac{10^3 r_c}{T}, \quad \frac{\alpha \rho^2}{u} > 10^4$$

$$F(u_w, \alpha) \approx W(u_w) \text{ para } t > 2.5 \frac{10^2 r_c}{T}, \quad \frac{\alpha}{u_w} > 10^3$$

Las siguientes son las aproximaciones de las ecuaciones:

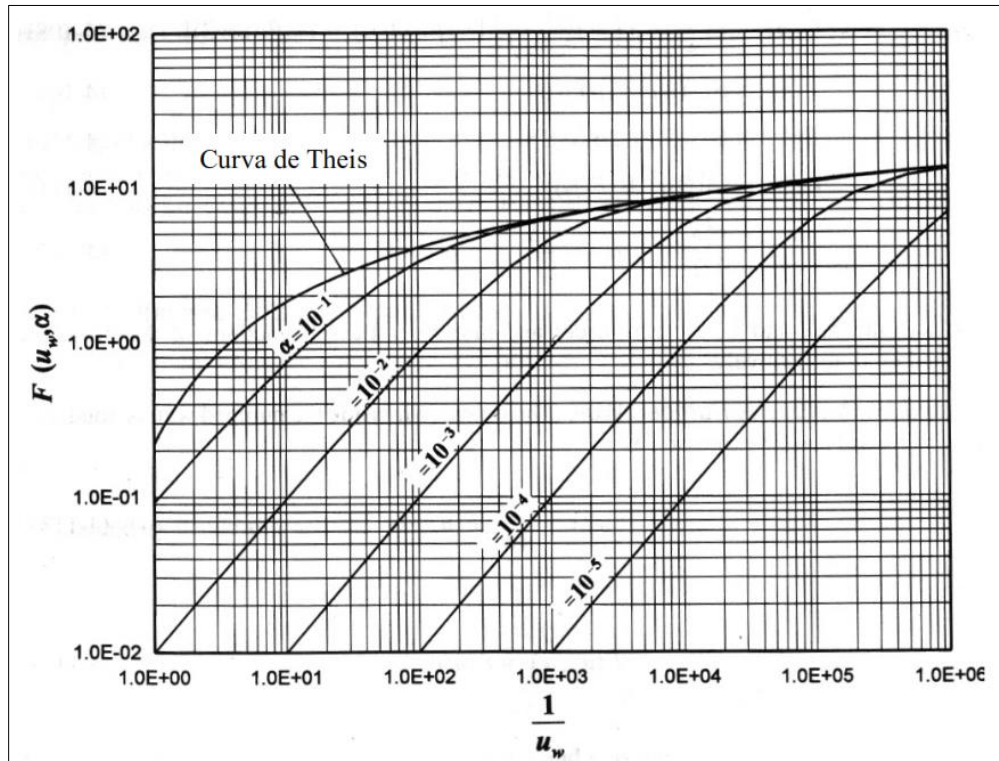
$$\begin{aligned} A(\beta) &= \beta Y_0(\beta) - 2\alpha Y_1(\beta) \\ B(\beta) &= \beta J_0(\beta) - 2\alpha J_1(\beta) \end{aligned}$$

Estas aproximaciones son válidas para ambas condiciones: para pozos con un diámetro pequeño o acuíferos de transmisividad relativamente alta. El periodo definido en las anteriores ecuaciones es muy pequeño. De esta manera, para pozos de gran diámetro y acuíferos de baja transmisividad este periodo es considerablemente largo.

Si $1/u_w$ llega a ser suficientemente pequeño, las curvas se aproximan a líneas rectas que satisfacen la ecuación:

$$s_w = \frac{Qt}{\pi r_c^2} = \frac{\text{Volumen de agua descargada}}{\text{Área del pozo}} = \frac{Q}{4\pi T} \frac{\alpha}{u_w}$$

$$F(u_w, \alpha) = \frac{\alpha}{u_w}$$



Fuente: Diplomado Catalac en aguas subterráneas para América Latina y el Caribe, capítulo 8.
FIGURA 3-51 Curvas de Papadopulos y Cooper (Batu, 1998).

En los primeros periodos las líneas rectas representan las condiciones bajo las cuales toda el agua bombeada se obtiene del almacenamiento dentro del pozo. Como resultado, los datos que están dentro del tramo de línea recta, de las curvas tipo, no dan información acerca de las características hidrogeológicas del acuífero.²¹

En el área de estudio se realizaron trece pruebas de bombeo, de las cuales sólo en ocho se encontró información, que se reinterpretó con el *software* Aquifer test. Este análisis se presenta en el ANEXO 1. En la TABLA 3-9 se presenta el resumen de los parámetros hidráulicos calculados.

²¹ (CATHALAC, 2015)

TABLA 3-9 Resumen de las pruebas de bombeo

DESCRIPCIÓN	NORTE	ESTE	INFORMACIÓN DE LOS ESTUDIOS EIA Y PMA		REINTERPRETACIÓN PRUEBAS DE BOMBEO		PROF (m)	N.E (m)
			T (m ² /día)	K (m/día)	T (m ² /día)	K (m/día)		
Pozo Arenales (Castilla La Nueva, basurero)	912737.00	1061015.00	152.33	10.14	180	60	100.00	0.30
Aljibe dentro de las instalaciones de la Estación Castilla	915834.00	1046089.00	1552.00	310.00			6.28	2.22
Aljibe finca el Jordán	924190.00	1050987.00	2.30	0.80	2.21	0.74	6.28	2.22
Aljibe finca El Regalo	924497.00	1044431.00	12.00	2.60	11.3	1.16-	6.28	2.22
Aljibe finca San Agustín	921897.00	1037255.00	336.20	120.10	187	62.3	5.75	2.09
Aljibe finca Santa Ana	917247.00	1041464.00	566.70	188.90	98	36.8	6.28	2.22
Aljibe finca Yonoronda	917592.00	1053692.00	24.60	12.30			7.76	5.57
Aljibe finca escuela San Antonio	912421.00	1040667.00	8.53	2.84	5.19	1.73	6.28	2.22
Aljibe finca El Recuerdo	911966.00	1044757.00	16.70	8.30	5.16	2.68	5.90	3.87
Aljibe finca Orotoy	1043597.00	921484.00	3.30	3.30	6.22	2.07	6.20	2.22
Aljibe El Paraíso	903604.00	1042026.00	39.20	4.60			9.40	0.89
El Toro	911297.00	1076748.20	52.70	5.90			11.15	5.86
Pozo finca La Palma	907266.44	1065369.97	158.00	50.27			70.00	2.65

Con las conductividades calculadas se analizó el comportamiento de la conductividad hidráulica del área en estudio para cada una de las unidades geológicas que intervienen en el área del modelo.

3.4.4 Análisis de las propiedades hidráulicas de las unidades geológicas del área en estudio

Para evaluar el comportamiento de las propiedades hidráulicas se utilizaron trece pruebas de bombeo. La siguiente es la distribución de las pruebas de bombeo, según las unidades geológicas definidas para el área en estudio:

- 1 prueba de bombeo sobre la unidad Qt
- 3 pruebas de bombeo sobre la unidad Qal.
- 9 pruebas de bombeo sobre la unidad Qab.

3.4.4.1 Propiedades hidráulicas de la unidad Qal

Son depósitos asociados a los ríos Orotoy, Acacias - Pajure y Guamal, representativos de un patrón de tipo meandro, conformado por materiales finos (arenas muy finas y lodos) intercalados con capas lenticulares de gravas. Sobre esta unidad se realizaron tres pruebas de bombeo (TABLA 3-10).

TABLA 3-10 Resumen de las pruebas de bombeo de la unidad Qal

DESCRIPCIÓN	NORTE	ESTE	INFORMACIÓN DE LOS ESTUDIOS EIA Y PMA		REINTERPRETACIÓN ESTE ESTUDIO		PROF (m)	N.E (m)
			T (m ² /día)	K (m/día)	T (m ² /día)	K (m/día)		
Aljibe finca el Jordán	924190	1050987	2.3	0.8	2.21	0.74	6.28	2.22
Aljibe finca escuela San Antonio	912421	1040667	8.53	2.84	5.19	1.73	6.28	2.22
Aljibe finca el Recuerdo	911966	1044757	16.7	8.3	5.16	2.68	5.9	3.87

Para esta unidad geológica se calculó una conductividad hidráulica promedio de 2,25 m²/día.

3.4.4.2 Propiedades hidráulicas de la unidad Qt

La unidad hidrogeológica de depósito de terraza o Qt es una unidad cuaternaria compuesta por depósitos corresponde a una secuencia intercalada de capas lenticulares limo-arcillosas rojizas, gravas y limos arenosos rojizos (TABLA 3-11).

TABLA 3-11 Resumen de pruebas de bombeo en la unidad Qt

DESCRIPCIÓN	NORTE	ESTE	INFORMACIÓN DE LOS ESTUDIOS EIA Y PMA		REINTERPRETACIÓN ESTE ESTUDIO		PROF (m)	N.E (m)
			T (m ² /día)	K (m/día)	T (m ² /día)	K (m/día)		
Pozo finca La Palma	907266.44	1065369.97	158.00	50.27			70.00	2.65

Para la unidad geológica Qt se calculó una transmisividad de 158 m²/día y una conductividad de 50,27 m/día.

3.4.4.3 Propiedades hidráulicas de la unidad Qab

La unidad hidrogeológica de depósito de abanicos aluviales antiguos o Qab es una unidad cuaternaria compuesta de intercalaciones lenticulares de gravas, arenas y arenas finas arcillosas recubiertas por un nivel de suelo orgánico. Para esta unidad se realizaron nueve pruebas de bombeo, de las cuales ocho se hicieron en Aljibes y una en pozos profundos (TABLA 3-12).

TABLA 3-12 Resumen de pruebas de bombeo de la unidad Qab

DESCRIPCIÓN	NORTE	ESTE	INFORMACIÓN DE LOS ESTUDIOS EIA Y PMA		REINTERPRETACIÓN ESTE ESTUDIO		PROF (m)	N.E (m)
			T (m ² /día)	K (m/día)	T (m ² /día)	K (m/día)		
Pozo Arenales (Castilla La Nueva, basurero)	912737	1061015	152.33	10.14	180	60	100	0.3
Aljibe dentro de las instalaciones de la estación Castilla	915834	1046089	1552	310			6.28	2.22
Aljibe finca El Regalo	924497	1044431	12	2.6	11.3	1.16	6.28	2.22
Aljibe finca San Agustín	921897	1037255	336.2	120.1	187	62.3	5.75	2.09
Aljibe finca Santa Ana	917247	1041464	566.7	188.9	98	36.8	6.28	2.22
Aljibe finca Yonoronda	917592	1053692	24.6	12.3			7.76	5.57
Aljibe finca Orottoy	1043597	921484	3.3	3.3	6.22	2.07	6.2	2.22
Aljibe El Paraíso	903604	1042026	39.2	4.6			9.4	0.89
El Toro	911297	1076748.2	52.7	5.9			11.15	5.86

La conductividad calculada promedio en las pruebas de bombeo que se realizaron en los aljibes fue de 33,72 m/día y la que se hizo en el pozo fue de 60 m/día.

3.4.4.4 Cálculo de la capacidad específica

Es la relación que existe entre el caudal que se obtiene de un pozo y el abatimiento producido. Se expresa en unidades de caudal por longitud, [L3/T/L]. Este valor es contante para acuíferos confinados y variable para los acuíferos libres. Es un término que representa el grado de eficiencia de un pozo, ya que de dos pozos perforados en una misma formación acuífera el de menor capacidad específica tiene menos eficiencia.

Para cada prueba de bombeo escogida para estimar las propiedades hidráulicas del área en estudio se calculó la capacidad específica (TABLA 3-13).

TABLA 3-13 Cálculo de la capacidad específica de las pruebas de bombeo

NOMBRE DEL POZO O ALJIBE	N.E (m)	Abatimiento (m)	Caudal de la prueba de bombeo (l/s)	Capacidad específica l/s/m
Aljibe dentro de las instalaciones de la estación Castilla	2.22	0.75	0.50	0.67
Aljibe finca Santa Ana	2.22	0.04	0.50	12.50
Aljibe finca Yonoronda	5.57	0.63	0.38	0.60
Aljibe escuela San Antonio	2.22	0.90	0.37	0.41
El Toro	5.86	0.40	1.00	2.50
Pozo Arenales (Castilla La Nueva, basurero)	0.30	0.80	1.22	1.53
Aljibe finca El Recuerdo	3.87	0.50	0.53	1.06
Pozo finca La Palma	2.65	0.15	1.00	6.67
Aljibe finca Orotoy	2.22	1.66	0.56	0.34
Aljibe finca El Jordán	2.22	4.51	1.13	0.25
Aljibe finca El Regalo	2.22	5.30	0.98	0.18
Aljibe finca San Agustín	2.09	0.67	1.06	1.58
Aljibe El Paraíso	0.89	8.04	3.61	0.45

3.4.4.5 Resumen de las propiedades hidráulicas

En la TABLA 3-14 se presenta un resumen de las propiedades hidráulicas. Como no se cuenta con información primaria de las formaciones León y Carbonera se asignaron propiedades teóricas.

TABLA 3-14 Resumen de las propiedades hidráulicas de las formaciones geológicas

UNIDAD GEOLÓGICA	DESCRIPCIÓN	K (m/día)	T (m ² /día)
Depósitos aluviales	Son depósitos asociados a los ríos Orotoy, Acacias – Pajure y Guamal representativos de un patrón de tipo meándrico, conformado por materiales finos (arenas muy finas y lodos) intercalados con capas lenticulares de gravas.	entre 0.7- 2.68 m/d	2.21 y 5.19
Depósitos coluviales	Conformados por clastos angulares en una matriz arcillosa , mal clasificados, no estratificados.	0.01-1000 (Smith & Weathcraft, 1993)	
Depósitos de terraza	Conformadas por conglomerados con clastos de tamaño guijos a bloques, con matriz areno arcillosa, algunas veces clasto soportado y otras matriz soportado, con estratificación e imbricación incipiente	5.27 m/d	158.00
Depósitos de abanicos	Formados por gravas y clastos subangulares a redondeados de cuarzo lechoso, areniscas y rocas metamórficas en una matriz arenosa. Recubiertas por un nivel de suelo orgánico.	Entre 1.16 - 62.3	Entre 6.22 - 180)
Formación León	Secuencia de lodolitas, arcillolitas y areniscas, constituyendo la base impermeable del modelo	10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁴ (Smith & Weathcraft, 1993)	-
Formación Carbonera	Consta de una alternancia de niveles continuos y lenticulares de arcillolitas y areniscas. Desde el punto de vista sísmico, los topes de las capas tabulares de las areniscas	10 ⁻⁵ -1 (Smith & Weathcraft, 1993)	-

3.5 Definición de las unidades hidrogeológicas

Éstas se determinaron según la capacidad específica y las características hidroestratigráficas. La leyenda que se utilizó para definir las unidades hidrogeológicas del área en estudio se presenta en la FIGURA 3-52.





LEYENDA HIDROGEOLÓGICA				
Sedimentos con flujo esencialmente intergranular				
Sistema de acuífero		Características de los acuíferos	Símbolo	Unidad Hidrogeológica
	Acuíferos de muy alta productividad, capacidad específica mayor a 5 l/s/m	Agrupar los sistemas acuíferos formados en depósitos recientes, extensivos y altamente productivos conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente Fluvial y lacustre. Depósitos de terraza	Qt (I-1)	Terrazas Aluviales (Qt)
	Acuífero de baja a Media productividad, capacidad específica entre 0.05 l/s/m y 2 l/s/m	Agrupar los sistemas acuíferos formados en depósitos recientes, extensivos y altamente productivos conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente Fluvial y lacustre. Depósitos de abanico y Aluviales	Qal, Qc y Q1ab (I-2)	Abanicos Aluviales antiguos (Q1ab), Coluviones (Qc), aluviales (Qal)
Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas				
	Acuífero de Media y Alta productividad, capacidad específica entre 0.05 l/s/m y 5 l/s/m	Acuífero continuo, extensión regional y ambiente predominantemente continental conformado por intercalaciones de areniscas y lodolitas	Carbonera II-1	Formación Carbonera
Sedimentos con limitados recursos de aguas subterráneas				
	Acuícludo, de muy baja productividad, capacidad específica menor de 0.05 l/s/m	Acuícludo continuo, secuencia de arcillolitas grises, constituyendo la base impermeable de los depósitos cuaternarios.	Formación León III-1	Formación León

FIGURA 3-52 Leyenda hidrogeológica

A continuación se presenta la descripción de las características de los acuíferos.

- **Sedimentos con flujo esencialmente intergranular. Unidad hidrogeológica I**

Agrupar los sistemas acuíferos formados en depósitos recientes. Se subdivide en las siguientes unidades:

- Unidad hidrogeológica I-1. Agrupa los sistemas acuíferos formados en depósitos recientes, extensivos y altamente productivos, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial (depósitos de terraza).

- Unidad hidrogeológica I-2. Agrupa los sistemas acuíferos formados en depósitos recientes, extensivos y altamente productivos, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial (depósitos de abanico y aluviales).
- **Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas**
 - Unidad hidrogeológica II-1. Acuífero continuo, extensión regional y ambiente predominantemente continental. Conformado por intercalación de areniscas y lodolitas.
- **Acuíferos con limitado a ningún recurso de agua subterránea. Unidad hidrogeológica III**

Son sedimentos en los que predominan litologías de grano fino como arcillolitas y limolitas.

 - Unidad hidrogeológica III-1. Acuífero continuo, secuencia de arcillolitas grises. Constituyen la base impermeable de los depósitos cuaternarios.

En la FIGURA 3-53 se presentan las unidades hidrogeológicas definidas para el área en estudio.

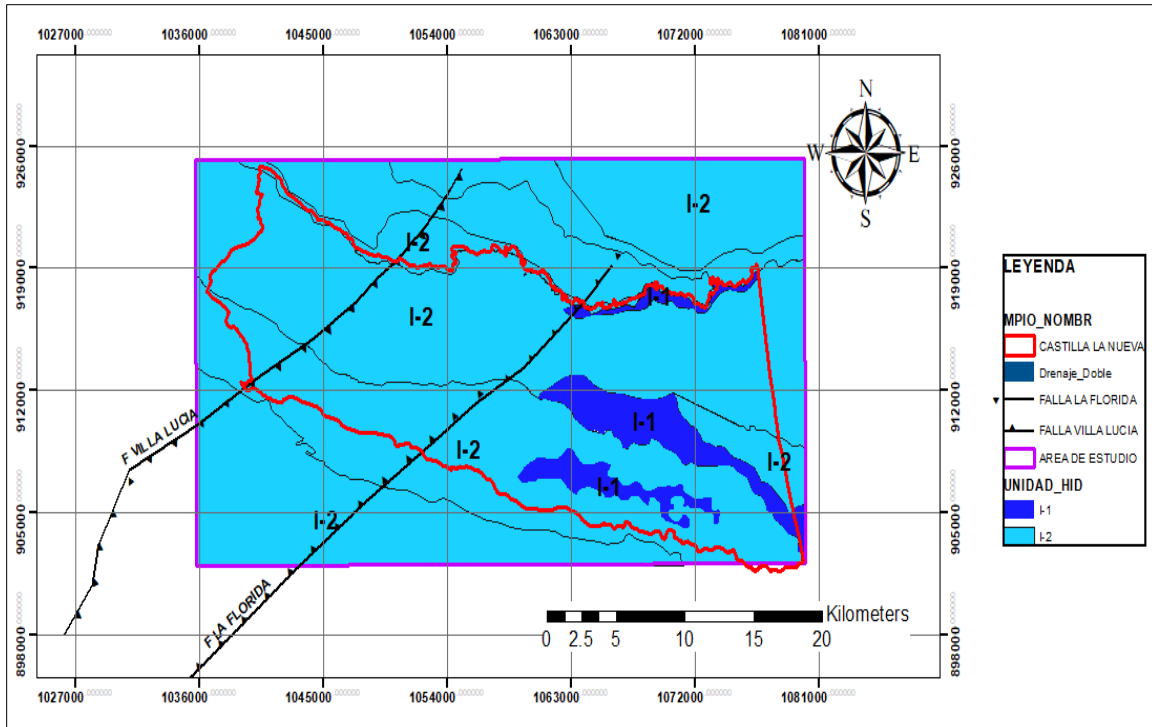


FIGURA 3-53 Unidades hidrogeológicas del área en estudio, vista planta.

3.6 Modelo hidrogeológico conceptual

Para desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual del área en estudio se utilizó información de los modelos geológico, hidrológico e hidráulico.

El flujo del agua subterránea del área en estudio se presenta en sentido NW-SE, noreste a suroeste, siguiendo la pendiente natural de los terrenos. La circulación de las aguas subterráneas en la zona superficial del acuífero libre es preferencial y relativamente independiente, siguiendo la morfología del terreno.

El sistema hidrogeológico del área en estudio está compuesto por un acuífero superior, tipo libre con variación a semiconfinado de extensión regional, el cual está compuesto por las unidades geológicas cuaternarias, que se dividen en las unidades hidrogeológicas I-1 e I-2. Debajo de los depósitos cuaternarios se encontró la formación León, un sistema acuífero de tipo acuícludo, definido por la unidad hidrogeológica III, y se constituye en una base impermeable (FIGURA 3-54).

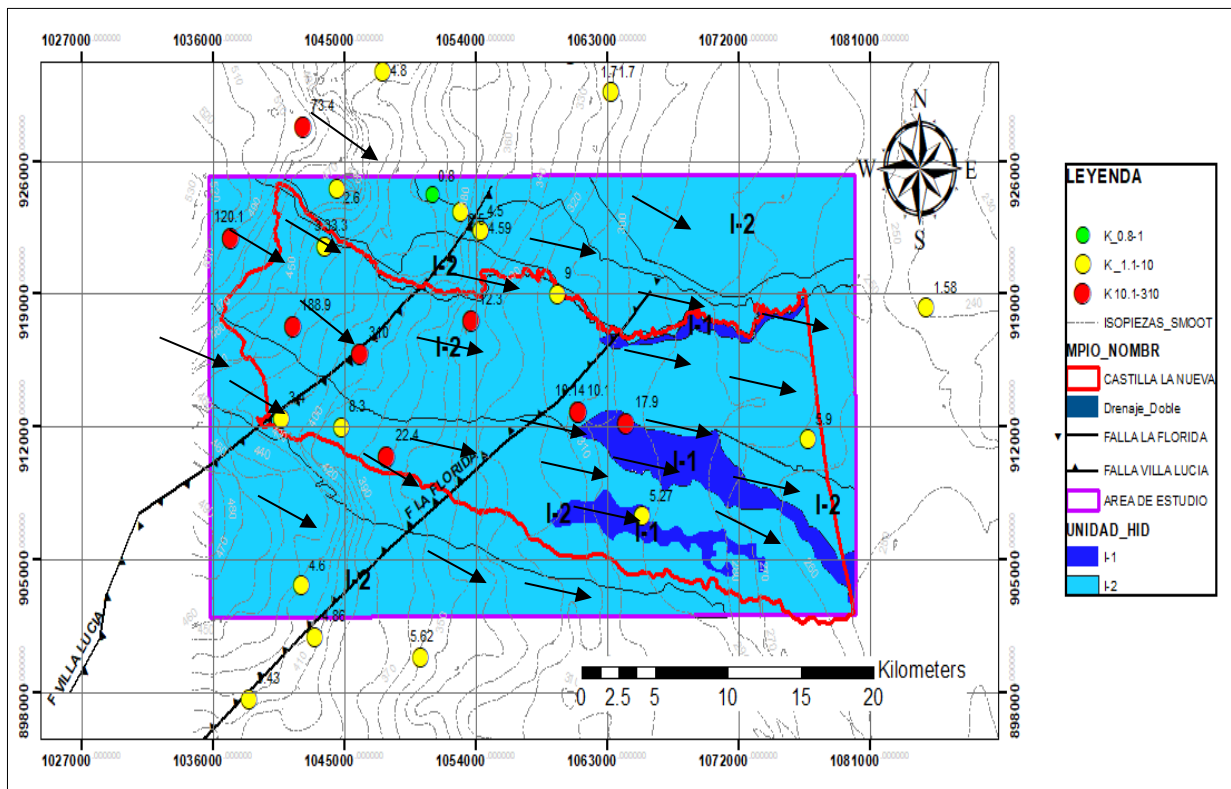


FIGURA 3-54 Modelo hidrogeológico conceptual de Castilla La Nueva.

La base del modelo está representada por la formación Carbonera, que tiene características de acuífero continuo de extensión regional y ambiente predominantemente continental, conformado por intercalación de areniscas y lodolitas. Las capas definidas para el modelo conceptual se presentan en la TABLA 3-15.

TABLA 3-15 Capas definidas para el modelo conceptual

Capa	Tipo de acuífero	Unidad	Nombre	Espesor medio (m)	Descripción hidrogeológica
1	Libre a semi-confinado.	Qt, Qal, Qc y Q1ab (I-1, I-2)	Depósitos cuaternarios	50 -250	Agrupar los sistemas acuíferos formados en depósitos recientes, extensivos y altamente productivos, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial y lacustre.
3	Acuícludo	Formación León III-1	Formación León	90 - 180	Acuícludo continuo, secuencia de arcillolitas grises, constituyendo la roca sello regional.
2	Confinado	Carbonera II-1	Carbonera	200	Acuífero continuo, extensión regional y ambiente predominantemente continental, conformado por intercalaciones de areniscas y lodolitas.

Las capas definidas para el modelo conceptual y matemático se presentan en la FIGURA 3-55.

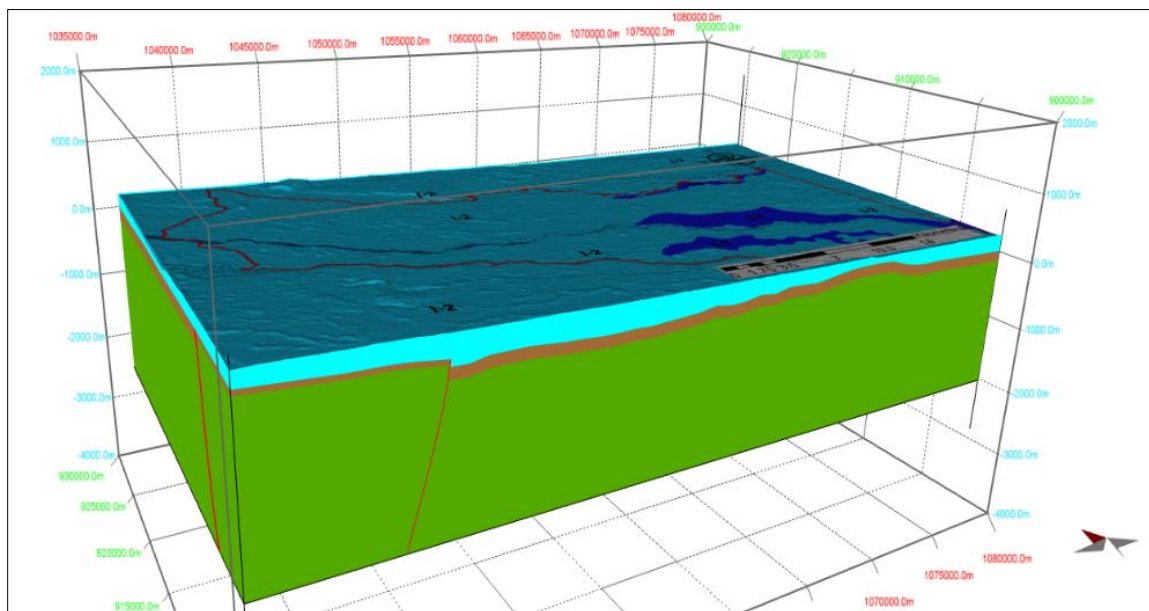


FIGURA 3-55 Modelo hidrogeológico en 3D.

Las propiedades hidráulicas del área en estudio se obtuvieron a partir del análisis de los ensayos tipo pruebas de bombeo. Las propiedades definidas para el área en estudio se presentan en la TABLA 3-16.

TABLA 3-16 Propiedades hidráulicas

Capa	Tipo de acuífero	Unidad	Nombre	Espesor medio (m)	KX, KY (m/d)	Ss (1/m)
1	Libre a semi-confinado.	Qt,	Depósitos cuaternarios	50 -250	5.27	0.01
		Qal, Qc y Q1ab		50 -250	Entre 1.16 - 62.3	0.01
3	Acuícludo	Formación León	Formación León	90 - 180	$10^{[-8]}$ - $10^{[-4]}$	1.00E-04
2	Confinado	Carbonera	Carbonera	200	$10^{[-5]}$ -1	1.00E-04

3.6.1 Condiciones de frontera

La modelación considera tres tipos de condición de borde, tales como:

- **Altura piezométrica constante (primer orden o Dirichlet)**

Para definir la condición de borde de altura piezométrica constante se utilizó la información del inventario de los puntos de agua subterránea que se realizó en el área en estudio.

- **Recarga (tipo II o Neumann) correspondiente a la precipitación en la zona de modelación**

La recarga se calculó por diferentes métodos (TABLA 3-7). La recarga natural se considera sobre toda la superficie del modelo; además, para su calibración se distribuye según el método calculado por Shegal.

- **Recarga por ríos principales. Tipo III o Cauchy (flujo condicionado por la variación de la carga hidráulica)**

Para los ríos principales que controlan el nivel piezométrico de la zona se define el tipo III o Cauchy.

4 MODELACIÓN NUMÉRICA

4.1 Fundamentos

Un modelo numérico es una herramienta por medio de la cual se puede representar de forma simplificada lo que sucede en la realidad. Los objetivos primordiales que se persiguen con la construcción de un modelo son los siguientes:

- **Entendimiento.** Tener claridad respecto a los parámetros que controlan determinada situación. Un ejemplo en aguas subterráneas es modelar la dirección del movimiento en una cuenca.
- **Predicción.** Determinar las consecuencias de alguna acción propuesta o una excitación dada. Por ejemplo, un modelo para pronosticar la evolución en 20 años de los niveles piezométricos si se mantiene el régimen actual de explotación en determinada cuenca hidrológica.
- **Control.** Monitorear el cumplimiento de cualquier tipo de reglamentación estipulada. Por ejemplo, para controlar el flujo de lixiviados en un relleno sanitario.
- **Predicción en tiempo real.** Hacer seguimiento a cualquier proceso o fenómeno que se esté desarrollando. Por ejemplo, la evolución de un proyecto de remediación de acuíferos.²²

Existen numerosos tipos de modelos, los cuales se pueden clasificar de la siguiente forma:

²² (CATHALAC, 2015).

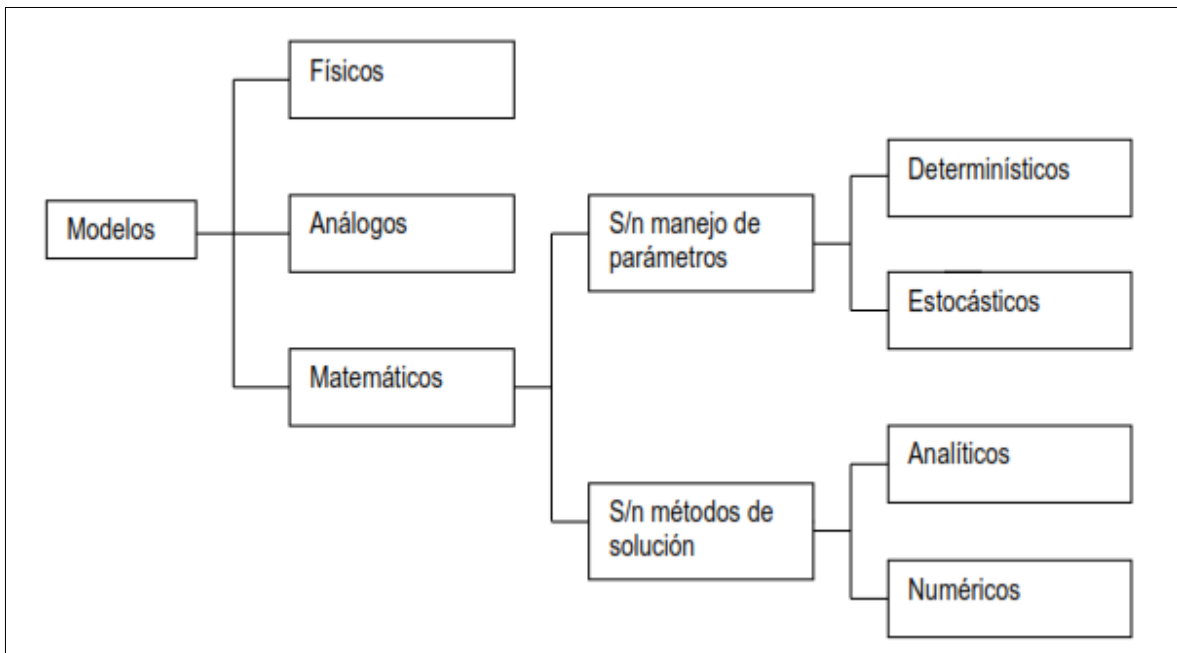


FIGURA 4-1 Tipo de modelos.

Los modelos físicos son los de laboratorio o campo. En hidrogeología son particularmente útiles en estudios de contaminación de acuíferos. En otras palabras, los modelos físicos son una reproducción a escala de un fenómeno natural (por ejemplo, modelos de tanques de arena y agua para la simulación de corrientes de flujo, experimentos de Helle-Shaw). La principal limitación de estos modelos es que el comportamiento de los materiales utilizados, así como su escala, no reflejan en muchos casos el comportamiento natural real. Para superar esto frecuentemente se utilizan modelos a escala real.

Los modelos análogos se basan en la correspondencia entre los diversos fenómenos que cumple la ecuación de Laplace. De esta manera, por ejemplo, se puede construir y analizar un circuito eléctrico que represente el flujo en un acuífero. Estos modelos fueron muy populares hasta la década ²³de los setenta, pero fueron gradualmente desplazados por modelos matemáticos numéricos con la creciente disponibilidad de computadores personales.

²³ (CATHALAC, 2015).

Los modelos matemáticos se utilizan ampliamente en aguas subterráneas. Representan los procesos físicos que sufre un acuífero mediante la aplicación de ecuaciones matemáticas de las leyes de conservación de energía, de masa y momentum. Se pueden clasificar en:

- Modelos determinísticos. Son los que suponen conocidos y “exactos” los valores de los parámetros involucrados (T y S) y, en consecuencia, al aplicarse una excitación dada siempre se llega a una misma respuesta.
- Modelos estocásticos. Los valores de los parámetros se tratan en términos probabilísticos y la solución se encuentra dentro de un conjunto de soluciones posibles, es decir, que al realizarse una misma excitación se producen varias respuestas, debido a la incertidumbre de los parámetros de entrada.

Otra forma de clasificar los modelos matemáticos es hacerlo respecto a la metodología de solución. Los modelos analíticos resuelven de manera exacta la ecuación diferencial que representa el problema, como por ejemplo la ecuación de Theis, mientras que los modelos numéricos se emplean cuando el grado de complejidad es bastante alto, debido a las condiciones reales que se presentan en el problema y que se deben tomar en cuenta (anisotropía, heterogeneidad, capas confinantes, recarga, condiciones de frontera, etc.).

4.2 Métodos numéricos

Debido a múltiples factores como la irregularidad en las formas de los acuíferos, la variación espacial de los parámetros, las variaciones de las condiciones de frontera, la no uniformidad de las condiciones iniciales, etc., las soluciones a un problema hidrogeológico son muy difíciles de obtener mediante métodos analíticos, incluso aquellos que tienen solución analítica requieren una intensa elaboración matemática que se obvia mediante la aplicación métodos numéricos.

Dichos métodos se desarrollan básicamente al remplazar las ecuaciones diferenciales, mediante ciertos procedimientos, por un sistema algebraico de ecuaciones, cuya solución es más simple. Existen dos estrategias para llegar a la solución de un problema empleando métodos numéricos: diferencias finitas y elementos finitos. La escogencia del método

depende de los recursos del usuario y del tipo de problema que se debe resolver. A continuación se resumen las fortalezas de ambos métodos.²⁴

TABLA 4-1 Propiedades hidráulicas

Diferencias finitas	Elementos finitos
<p>Fácil de entender y programar.</p> <p>Pocos datos de entrada para la conformación de la malla</p> <p>El valor de la función en un nodo determinado es el promedio de los valores de las funciones en los nodos vecinos.</p>	<p>Mayor capacidad para aproximar</p> <p>Permito la introducción de formas irregulares en las fronteras.</p> <p>Fácil localización y ubicación de las fronteras.</p>

Fuente: Diplomado Cathalac en aguas subterráneas.

4.2.1 Diferencias finitas

En este método las derivadas parciales que aparecen en la ecuación diferencial básica se remplazan por un equivalente algebraico. La idea básica es expresar la derivada de una función en términos de diferencias (Δ):

$$\frac{df}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t}$$

De una forma aproximada se puede remplazar la derivada anterior por un cociente de diferencias, mediante la omisión del proceso de límite, $\Delta t \rightarrow 0$ y haciendo Δt lo más pequeño posible, pero finito. De esta forma se obtiene:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t}$$

Si se conocen las condiciones iniciales ($f(t)$) mediante iteraciones es posible encontrar la función en tiempos sucesivos ($f(t + \Delta t)$).

En problemas de flujo estable o inestable en aguas subterráneas la variable desconocida es la carga piezométrica (Bear & Verruijt, 1987), la cual depende de x , y y t y está

²⁴ (CATHALAC, 2015).

representada para cada valor de tiempo t por un número finito de valores $\Delta (i,j)$. Los puntos i,j conforman la malla de la región en consideración (FIGURA 4-2).²⁵

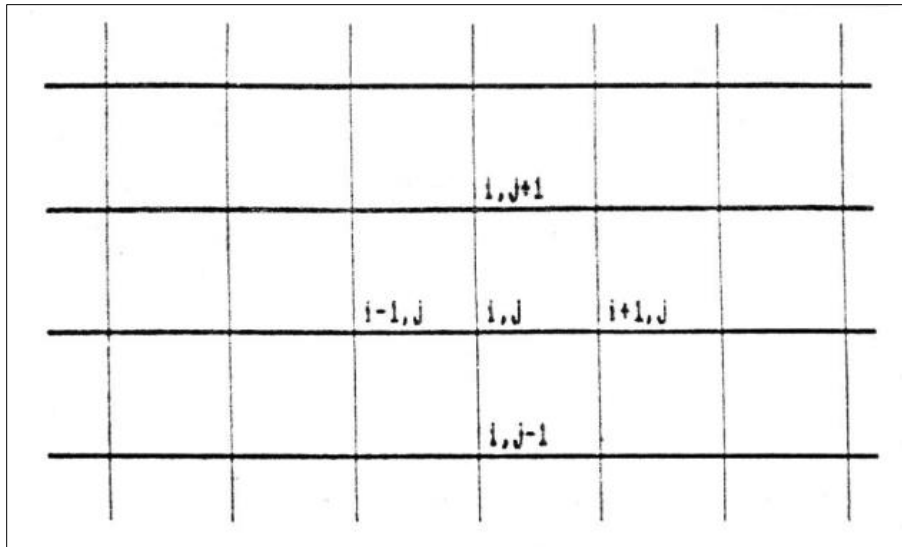


FIGURA 4-2 Malla de puntos de diferencias finitas en dos dimensiones.

El valor de la carga piezométrica en cada punto depende de los valores en los puntos que lo rodean. Si se conocen los valores iniciales, los valores en un Δt posterior resultan siendo las incógnitas, de donde se puede plantear un sistema N de ecuaciones lineales con N incógnitas, y de esta forma la solución se limita a la solución de un sistema lineal de ecuaciones. El número N indica el número total de puntos de la malla.

4.2.2 Elementos finitos

Consiste en subdividir la región en pequeños elementos, de manera que se describa el flujo para cada elemento en términos de la carga en los nodos para obtener un sistema de ecuaciones, partiendo de la condición de que el flujo debe ser continuo en cada nodo. La formulación mediante elementos finitos tiene la propiedad de que cada elemento puede tener su propio valor para cada parámetro físico, como por ejemplo de transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc.

²⁵ (CATHALAC, 2015)

El sistema de ecuaciones que se obtuvo por el método de elementos finitos tiene estructura similar a la que resulta mediante diferencias finitas; sin embargo, la forma de derivar y desarrollar las ecuaciones presenta importantes diferencias entre ambos métodos. El elemento más simple que se usa para construir la malla en elementos finitos es el triángulo, que permite una buena representación del área (FIGURA 4-3).²⁶

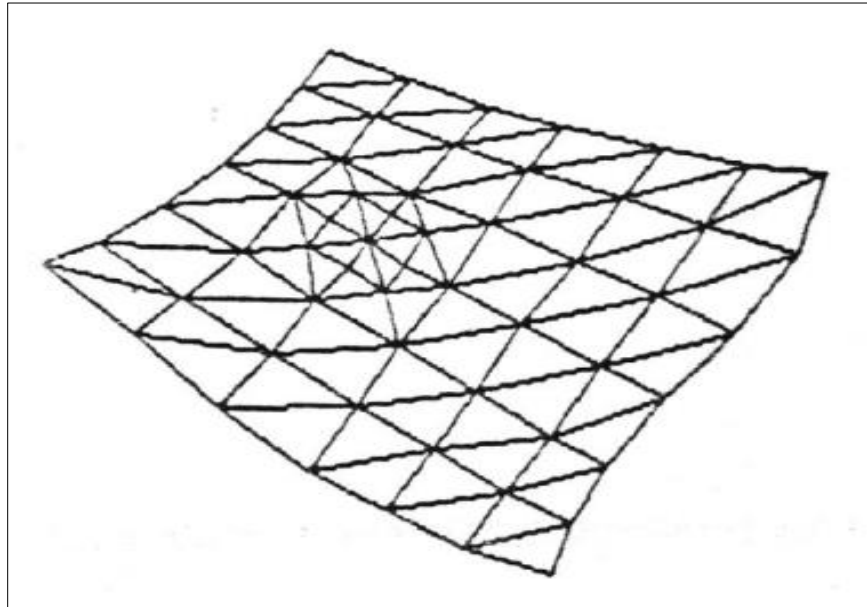


FIGURA 4-3 Malla de elementos finitos.

Pulido (1996) presenta el procedimiento que se debe seguir para solucionar los problemas que cumplan la ecuación de Laplace mediante el método de los elementos finitos, partiendo de la ecuación fundamental que rige su comportamiento, la geometría, las condiciones externas que lo están afectando, las condiciones de frontera y el método numérico de solución e interpolación de los resultados para todo el dominio.²⁷

²⁶ (CATHALAC, 2015)

- **Formulación del problema**

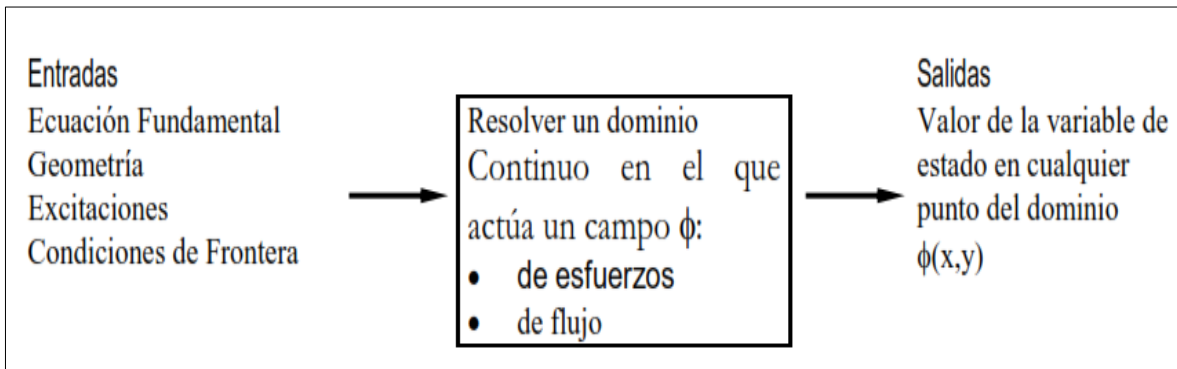


FIGURA 4-4 Formulación del problema.

- **Elección de la metodología de solución**

El problema del continuo se puede resolver por elementos finitos, que es un método cuyo procedimiento general de solución es el siguiente:

- Modelar el dominio mediante una malla de "elementos finitos" conectados en los nodos, situados en los vértices de sus contornos. Las incógnitas del modelo de elementos finitos son el valor de la variable de estado en los nodos (valores nodales).
- Elegir un conjunto de funciones que definan de manera única el campo dentro de cada elemento finito, en función de los valores nodales (funciones de aproximación, de interpolación o de forma).
- Aplicar la ley física que rige sobre el campo a cada subdominio de los elementos finitos (método de aproximación).
- A los nodos adecuados se les aplican las condiciones de frontera y las excitaciones que caracterizan al problema particular y lo diferencian de cualquier otro, aunque se trate del mismo campo (condiciones de frontera, de borde e iniciales).
- Los dos últimos pasos producen un sistema de ecuaciones simultáneas que al resolverlas arrojan el conjunto de valores nodales buscados (solución del sistema).²⁸

Para construir el modelo numérico del municipio de Castilla La Nueva se utilizó el *software* de elementos finitos Feflow V 7.0[®] (p6), su acrónimo significa finite element subsurface

²⁸ (CATHALAC, 2015)

FLOW simulation System. Este programa tiene la capacidad de resolver ecuaciones de flujo, masa y transporte en medios porosos y medios fracturados con un FEM multidimensional para geometrías complejas y situaciones paramétricas, incluyendo densidad de fluido variable, saturación variable, superficie (s), cinética de reacción multiespecífica, flujo no isotérmico y difusión múltiple. Maneja un amplio espectro de problemas que van desde estudios teóricos hasta aplicaciones prácticas en el sitio real.²⁹.

Feflow permite realizar tareas típicas de modelado en obras subterráneas (a través de modelos bidimensionales, 2D, o tridimensionales, 3D) en geometrías con mallas estructuradas o no estructuradas, como el drenaje en minas de tajo abierto y subterráneas (túneles), recuperación del nivel de aguas subterráneas, transporte reactivo (drenaje ácido de mina), simulación del progreso del tajo o de la excavación, estimación de descensos, inclusión y análisis de sistemas de fallas y medios parcialmente saturados, interacción entre programas geológicos, etc. (FIGURA 4-5).

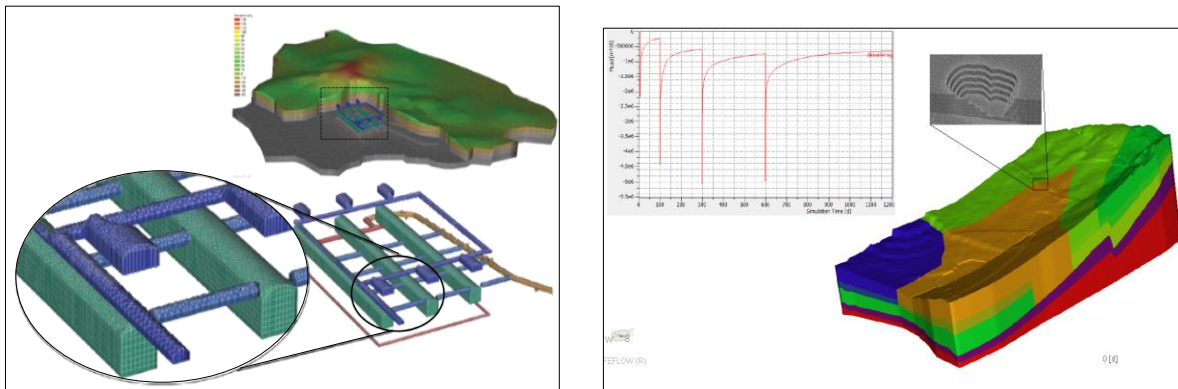


FIGURA 4-5 Ejemplos de configuraciones geométricas para obras subterráneas y tajos

A continuación se presentan algunas bondades del programa Feflow.

²⁹ (Diersch, 2014).

- **Modelación de superficies y transporte de contaminantes**

- Modela flujo a superficie libre y confinada; así mismo, transporte a través de las unidades hidroestratigráficas variables saturadas y no saturadas.
- Simula en 2D y 3D transportes de masa y reactivo a través de dominios del modelo de flujo de aguas subterráneas.
- Simula transporte de contaminantes de origen de fuentes puntuales y no puntuales, a través de dominios 2D y 3D.
- Exporta los resultados de transporte de masa por tiempo de paso empleado a través de EarthVision™ (FIGURA 4-6), para visualizar el comportamiento del transporte de la masa en 3D en relación con las estructuras subterráneas y estimar el volumen de tierra afectada.

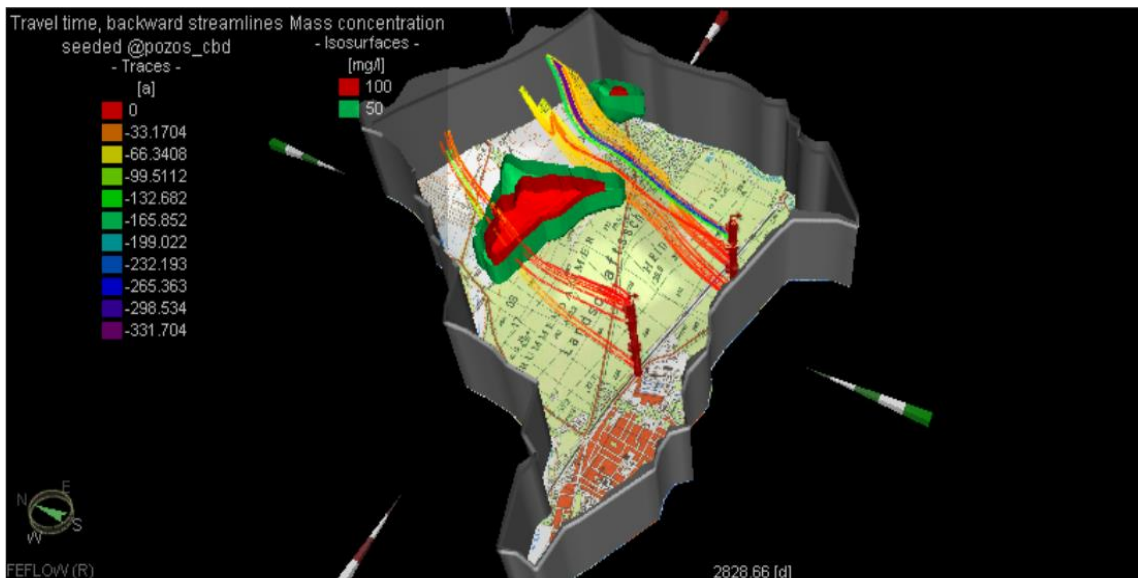


FIGURA 4-6 Simulación del problema de transporte de masa.

- Desarrolla modelos de doble permeabilidad utilizando el paquete de elementos discretos para simular un conducto y el flujo en una matriz de un acuífero kárstico (FIGURA 4-7 y FIGURA 4-8).
- Define conductos como elementos en dos dimensiones (vertical y horizontal), a través de los componentes lineales asignados a lo largo de las extremidades de los elementos de la malla.

- Determina los conductos definidos entre *swallets* conocidos (nodos) de infiltración y manantiales (nodos de descarga) y hasta gradiente de manantiales en la matriz.
- Presenta al flujo a través de conductos definidos utilizando la ecuación de Manning-Strickler, etc.
- Utiliza una sección de conexión entre nodos de DFN para definir la capacidad de transporte del conducto.
- Utiliza un factor de rugosidad para controlar la velocidad del flujo de agua (grado en que la característica representa un solo conducto o la zona de conductos).
- Define la ubicación y dimensiones de los conductos a través de la calibración de los niveles de aguas subterráneas, los vertidos y las velocidades de las aguas subterráneas a través de trazadores definidos.

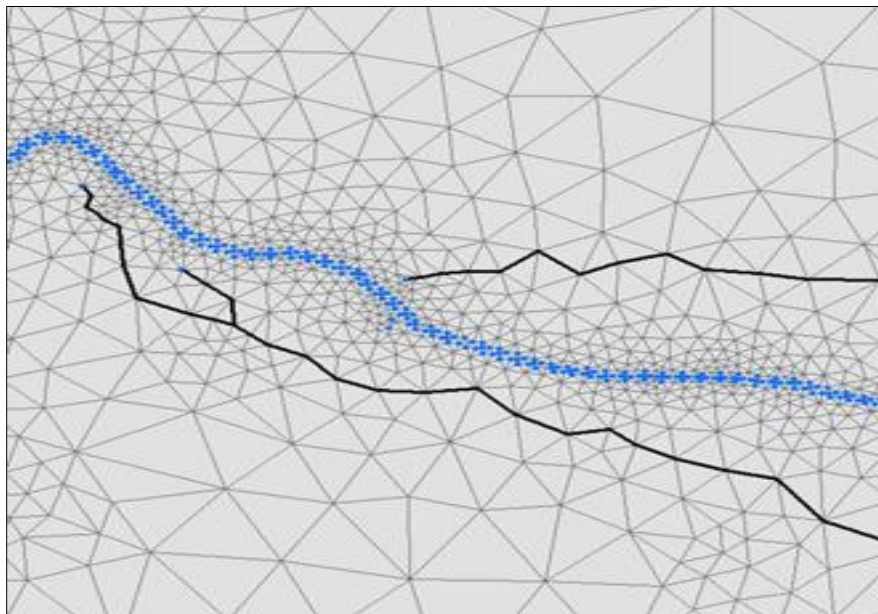


FIGURA 4-7 Delimitación de las propiedades de los DEF.

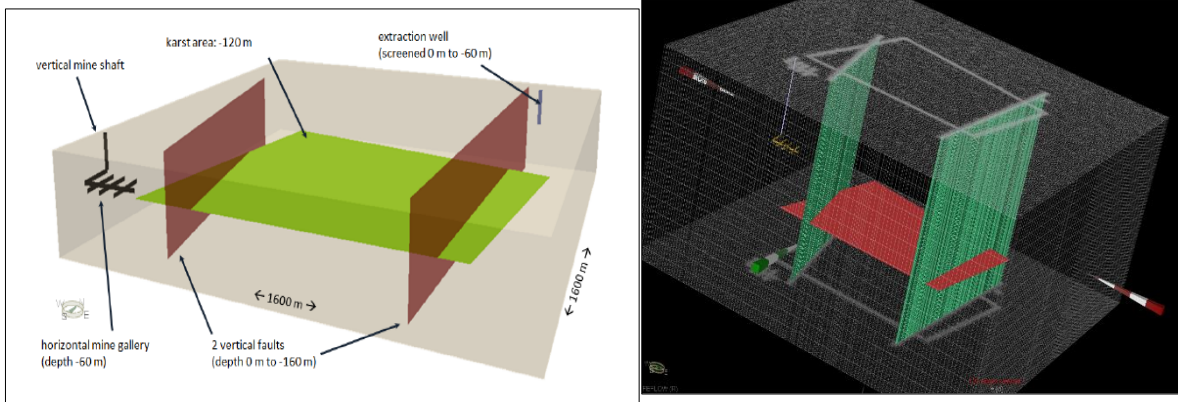


FIGURA 4-8 Planos de fracturas

- **Diseño de enmallados complejos**

- Integra la construcción del enmallado con ArcGIS para facilitar el diseño de mallas complejas y su refinamiento.
- Desarrolla mallas complejas para simular geometrías laterales y verticales de las estructuras naturales y artificiales complejas, incluyendo conductos kársticos que convergen a manantiales y ríos (FIGURA 4-9).
- Sus características simuladas incluyen capas o lentes delgadas, discontinuos de diferentes propiedades de materiales, grandes bóvedas y diques; arroyos, ríos, manantiales, lagos, túneles, etc.
- Tiene incluido un plug-in de revisión de los criterios mínimos de ángulo internos de los elementos para promover la convergencia y reducir al mínimo los errores del modelo.

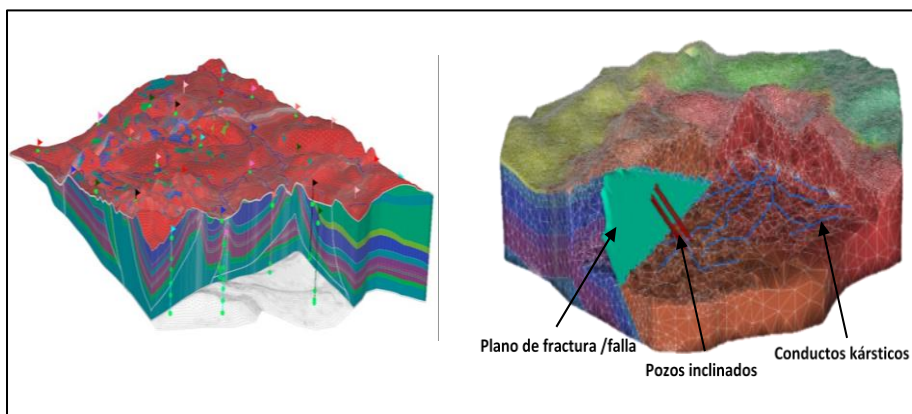


FIGURA 4-9 Enmallados complejos en Feflow (mallas estructuradas y no estructuradas).

4.3 Medio poroso

4.3.1 Flujo en medios porosos saturados

La simulación numérica del flujo de agua subterránea es una de las tareas de los modeladores en el campo de la hidrología subsuperficial. Las aguas subterráneas se refieren a agua, donde el medio poroso está completamente saturado. Por lo general, el modelado del agua subterránea se ocupa del movimiento de ésta en acuíferos y sistemas acuíferos que pueden ser no confinados o confinados, es decir, delimitados por las superficies libres o sin su presencia. A continuación, se presentan las ecuaciones básicas para el desarrollo del modelado.

4.3.1.1 Ecuaciones básicas

La ecuación básica para el desarrollo de modelos 3D, vertical 2D y problemas axisimétricos es la ecuación de Darcy:

$$S_o \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q$$
$$\mathbf{q} = -\mathbf{K} \cdot \nabla h$$

Para resolverla por la carga hidráulica h y la velocidad de Darcy \mathbf{q} , donde:

So: coeficiente de almacenamiento específico³⁰

K: tensor de la conductividad hidráulica.

Q: función general de fuente/depresión

Utilizando la ecuación de Darcy en la de Richards se puede obtener la ecuación de Richards, de la siguiente forma:

$$S_o \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla h) = Q_h + Q_{hw}$$

Donde el termino fuente/depresión es $Q = Q_h + Q_{hw}$, que es adecuadamente dividido en un término de oferta Q_h y un término tipo pozo o demanda Q_{hw} . La ecuación anterior se debe

³⁰ (Diersch, 2014).

resolver para la variable primaria \mathbf{h} , sujeto a un conjunto de condiciones de frontera tipo Dirichlet, Neuman y Cauchy, así como las tipo pozo.

$$\begin{aligned}
 h &= h_D && \text{on } \Gamma_D \times t[t_0, \infty) \\
 -(\mathbf{K} \cdot \nabla h) \cdot \mathbf{n} &= q_h && \text{on } \Gamma_N \times t[t_0, \infty) \\
 -(\mathbf{K} \cdot \nabla h) \cdot \mathbf{n} &= -\Phi_h(h_C - h) && \text{on } \Gamma_C \times t[t_0, \infty) \\
 Q_{hw} &= -\sum_w Q_w(t)\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_w) && \text{on } \mathbf{x}_w \in \Omega \times t[t_0, \infty)
 \end{aligned}$$

Con las ecuaciones anteriores se obtiene la siguiente:

$$\left. \begin{aligned}
 -(\mathbf{K} \cdot \nabla h) \cdot \mathbf{n} &= \varepsilon_e \frac{\partial h}{\partial t} - P \\
 h &= z
 \end{aligned} \right\} \text{ on } \Gamma_S \times t[t_0, \infty)$$

Combinando las ecuaciones se obtiene:

$$h(\mathbf{x}, t_0) = h_0(\mathbf{x}) \quad \text{in } \bar{\Omega}$$

donde:

ε_e : rendimiento específico

Z: coordenada en z (alineada con la dirección de la gravedad)

$\Gamma = \Gamma_D \cup \Gamma_N \cup \Gamma_C \cup \Gamma_S$: conjunto de condiciones de frontera³¹

Una vez se resuelve la carga hidráulica, la segunda variable de la ecuación de velocidad de Darcy $\mathbf{q} = -\mathbf{K} \cdot \nabla h$ se puede evaluar como la derivada de la carga hidráulica.

³¹ (Diersch, 2014)

4.3.2 Dominio y geometría del modelo

Anderson et al., (2015) establecen que para definir un dominio Ω (área) en un modelo numérico éste debe partir de las consideraciones del modelo hidrológico conceptual que establece los límites o contornos hidrogeológicos (distintos a los límites hidrológicos) de la zona de estudio.

En la FIGURA 4-10 se presenta un ejemplo de un dominio (Ω) 2D, discretizado por diferencias finitas (FD – Finite Difference) y elementos finitos (FE – Finite Element). Adaptado de Diersch (2014).

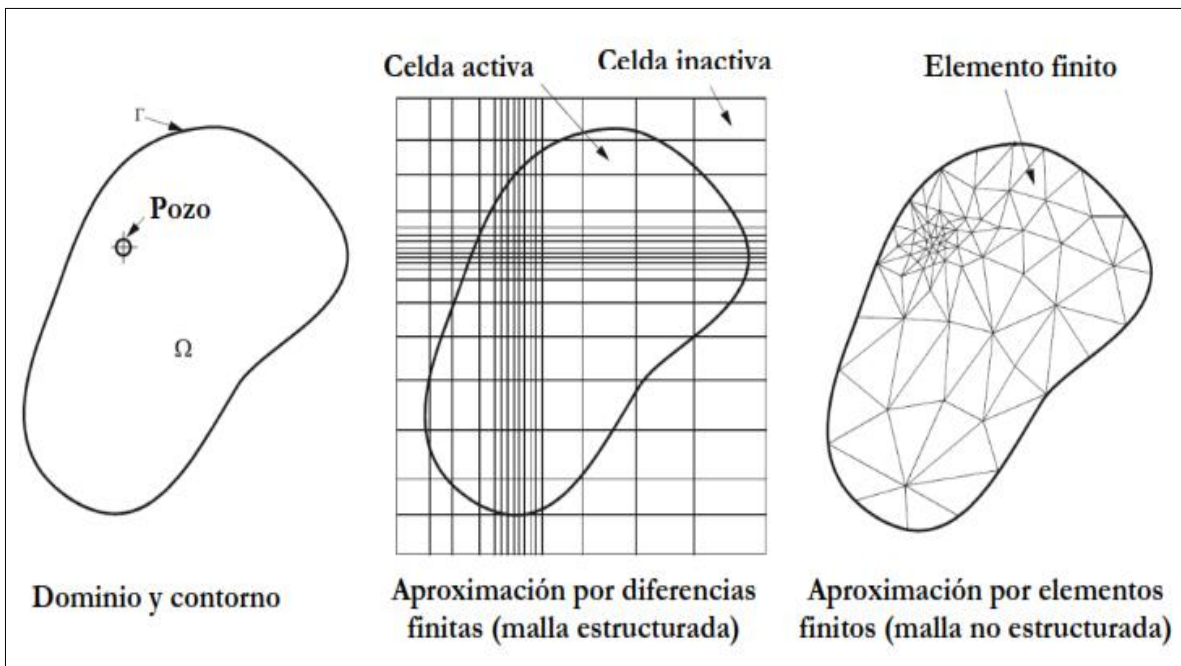


FIGURA 4-10 Ejemplo de un dominio (ω) 2D, discretizado por diferencias finitas (fd – finite difference) y elementos finitos (fe – finite element). Adaptado de Diersch (2014).

Para construir el modelo numérico del presente documento se utilizan elementos finitos.³²

³² (Suescún, 2016).

4.3.3 Condiciones iniciales y de contorno (frontera)

La no definición y asignación apropiada de las condiciones iniciales y de contorno puede generar errores graves y restringir los resultados de las simulaciones (Franke et al., 1987). Todo modelo numérico requiere condiciones iniciales para el cálculo numérico de la solución en estado estacionario/transitorio. Para ello se debe asignar un valor de carga hidráulica o potencial (Φ) en todos los puntos o nodos del Ω y un tiempo inicial, usualmente establecido como $t = 0$.

$$\Phi = f(x, y, z, 0)$$

Para todos los puntos (nodos) x, y, z dentro del Ω ; f es una función conocida.

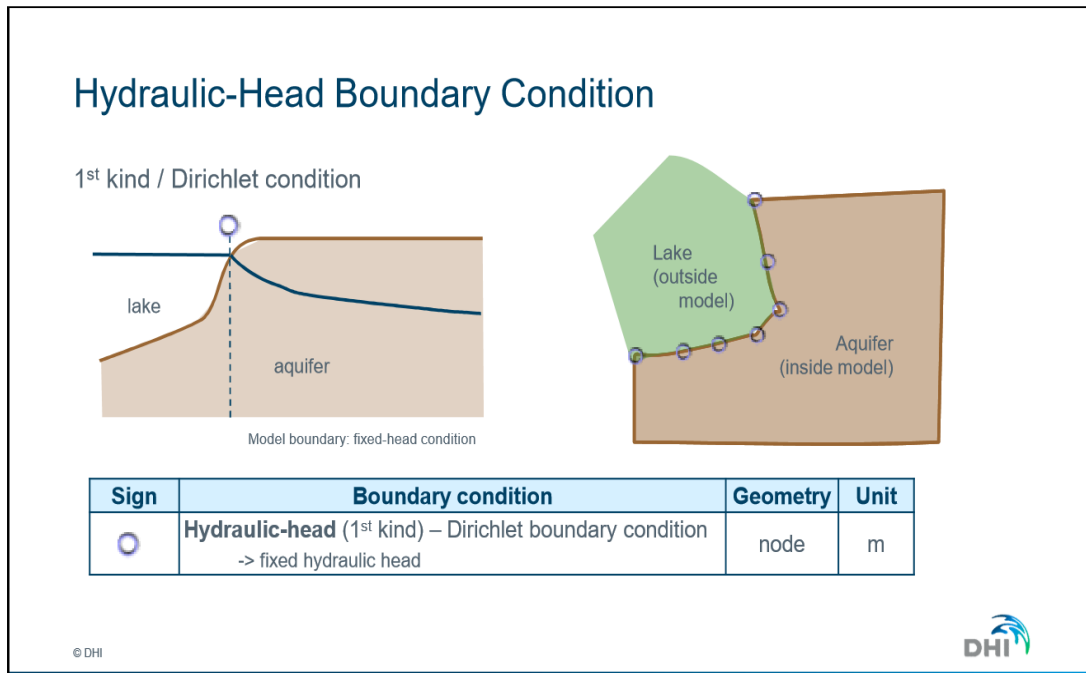
En general, los problemas de flujo de aguas subterráneas están descritos por ecuaciones diferenciales parciales que requieren valores en los contornos o límites del Ω (Franke et al., 1987). Se observa que para problemas en estado estacionario las condiciones de contorno no son necesarias, a menos que el problema sea no lineal, caso en el cual requieren un valor de inicio para el proceso iterativo (Diersch, 2014).

Bear (1979) estableció que existen varias condiciones de contorno para flujo en medios porosos (carga hidráulica constante, carga hidráulica especificada, línea de corriente o superficie de flujo), flujo especificado, flujo dependiente de la carga hidráulica, superficie libre e infiltración en la cara. Sin embargo, es común agruparlas en tres tipos (Dirichlet, Neumann, Cauchy) para modelos en estado estacionario y transitorio (Diersch, 2014).³³

- **Tipo I o Dirichlet (carga hidráulica impuesta)**

- Es una condición de contorno de carga hidráulica conocida, se asigna a lo largo de una frontera del dominio y puede variar en el espacio (Anderson et al., 2015). La aplicación directa es la asignación de un valor potencial (nivel del agua subterránea conocido en el límite), concentración de masa (masa de agua superficial perfectamente comunicada con el acuífero) o temperatura en función del problema que se va a tratar. Está definida por la unidad de longitud (L) (Diersch, 2014).

³³ (Suescún, 2016).



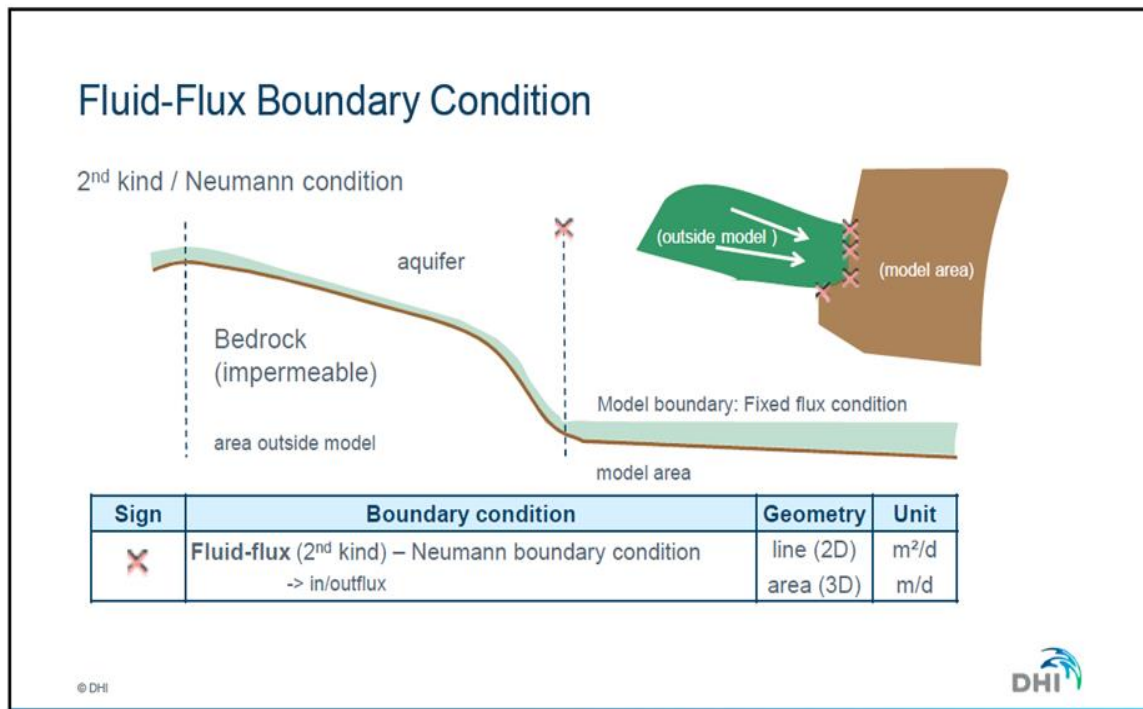
Fuente: Training Manual Feflow 7.0.

FIGURA 4-11 Condiciones de frontera para carga hidráulica Feflow.

- **Tipo II o Neumann (flujo impuesto)**

- Es una condición de contorno de flujo prescrito (flujo de Darcy) en los nodos de los elementos que están a lo largo de una línea (2D) o a los que conforman las caras de los elementos (3D). Las condiciones de contorno de este tipo se aplican cuando el gradiente de velocidad o flujo de entrada/flujo de salida se conoce de antemano y es normal a la superficie (Bear, 2012). Se aplica para las entradas de un acuífero presente en un valle con flancos o pendientes empinadas, la conexión de un acuífero con la superficie y puede variar en el espacio. Está definida por la unidad de longitud (L) y tiempo (T). Para modelos 2D su unidad será (L/T) y para modelos 3D (L²/T). Si esta condición tiene valor de 0 significa que no hay flujo ni velocidad, lo cual es típico en bordes impermeables (Diersch, 2014) (FIGURA 4-12).³⁴

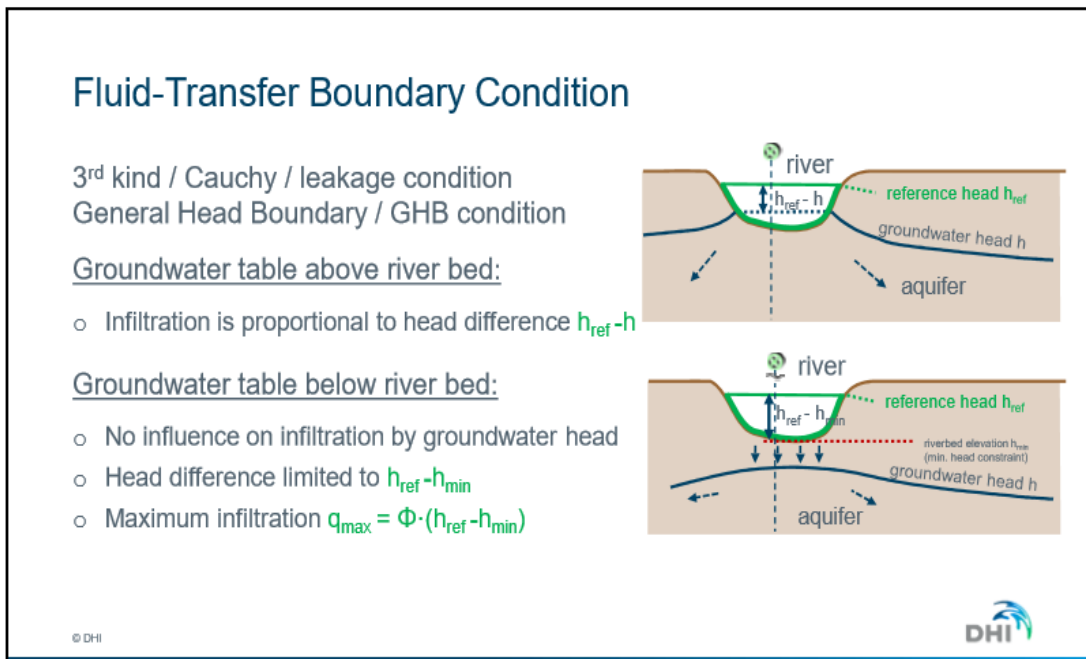
³⁴ (Suescún, 2016)



Fuente: Training Manual Feflow 7.0.

FIGURA 4-12 Condiciones de frontera tipo flujo Feflow.

- **Tipo III o Cauchy (flujo condicionado por la variación de la carga hidráulica)**
 - Esta condición de contorno se denomina también de tipo mixto porque relaciona las condiciones del contorno de carga hidráulica (Dirichlet) con las de flujo (Neumann). En algunas situaciones el flujo cruza una parte del contorno de la superficie y cambia dentro del acuífero en respuesta a las variaciones de la carga hidráulica. Esto se observa en el caso de ríos o lagos que tienen conexión limitada con las aguas subterráneas (nivel de agua superficial = nivel de agua subterránea) o acuíferos semiconfinados en los que el goteo condiciona la transferencia de flujo entre los medios permeable y semipermeable. Está definida por la unidad de longitud (L) (Diersch, 2014).



Fuente: Training Manual Feflow 7.0.

FIGURA 4-13 Condiciones de frontera tipo transferencia de flujo Feflow.






En la TABLA 4-2 se presenta un resumen de los tipos de condiciones de frontera.

TABLA 4-2 Tipo de condición de frontera.

Nombre de la condición de frontera	Tipo de condición de frontera y nombre general	Nombre formal	Designación matemática
Carga constante / Carga impuesta	Tipo I (Carga hidráulica impuesta)	Dirichlet	$h(x,y,z,t) _{\Omega} = H \text{ constante,}$
Línea de corriente (o superficie de flujo) / flujo impuesto	Tipo II (Flujo impuesto)	Neumann	$\underline{T} \nabla h \cdot \vec{n} _{\Omega} = Q \text{ constante,}$
Flujo dependiente de la carga hidráulica	Tipo III (Condición contorno mixta)	Cauchy	$\underline{T} \nabla h \cdot \vec{n} _{\Omega} = \beta(H - h) \text{ constante,}$

En la FIGURA 4-14 se presenta un resumen de las diferentes condiciones de frontera que se pueden utilizar para elaborar los modelos matemáticos con el *software* Feflow.

Boundary Conditions for Flow - Overview

Sign	Boundary condition	Geometry	Unit
	Hydraulic-head BC 1 st kind / Dirichlet BC -> fixed hydraulic head	node	m
	Fluid-flux BC 2 nd kind / Neumann BC -> in/outflux	line (2D) area (3D)	m ² /d m/d
	Fluid-transfer BC 3 rd kind / Leakage / Cauchy BC -> ground-/surface-water interaction	line (2D) area (3D)	m
	Well BC 4 th kind -> nodal extraction / injection	node	m ³ /d
	Multilayer Well (3D only) -> extraction / injection along a well screen	join edge	m ³ /d

Fuente: Training Manual Feflow 7.0.

FIGURA 4-14 Condiciones de frontera Feflow

4.4 Armado del modelo

A partir del modelo conceptual se definieron zonas homogéneas e isotrópicas en función del tipo de roca y la formación geológica de referencia. Seguidamente se empleó el *software* para crear un modelo 3-D, el cual puede representar las condiciones topográficas, las zonas de recarga, descarga y el comportamiento del agua subterránea de la zona de estudio. Esto, apoyado con las condiciones de borde (*Boundary Conditions*) establecidas para la situación actual de la zona de influencia del área en estudio. El proceso de construcción del modelo matemático tuvo las siguientes etapas:

- **Definición del área y enmallado del modelo**
- **Definición de las propiedades hidráulicas**
- **Condiciones de frontera del modelo**
- **Parámetros hidráulicos del modelo**
- **Calibración del modelo matemático**
- **Corrida y puesta en marcha del modelo**

A continuación se muestra el proceso de construcción del modelo matemático.

4.4.1 Definición del área de modelamiento y de la red de elementos finitos

4.4.1.1 Área del modelo

Para definir el área del modelo y las fronteras exteriores e interiores en el modelo de elementos finitos el primer paso es construir la red de superelementos, que provee la estructura básica del modelo donde se debe desarrollar la red de elementos finitos. La información de la red de superelementos se diseñó a partir de la información desarrollada para el modelo conceptual, la cual se importó a Feflow en formato GIS (*.shp) y CAD (*.dxf). La información que se utiliza para elaborar el modelo son elementos geométricos como líneas, puntos o polígonos que hacen parte de la geometría bidimensional o tridimensional del modelo. En la FIGURA 4-15 se puede apreciar la red de superelementos o *supermesh*, que representa el área donde se desarrollará el modelo numérico.

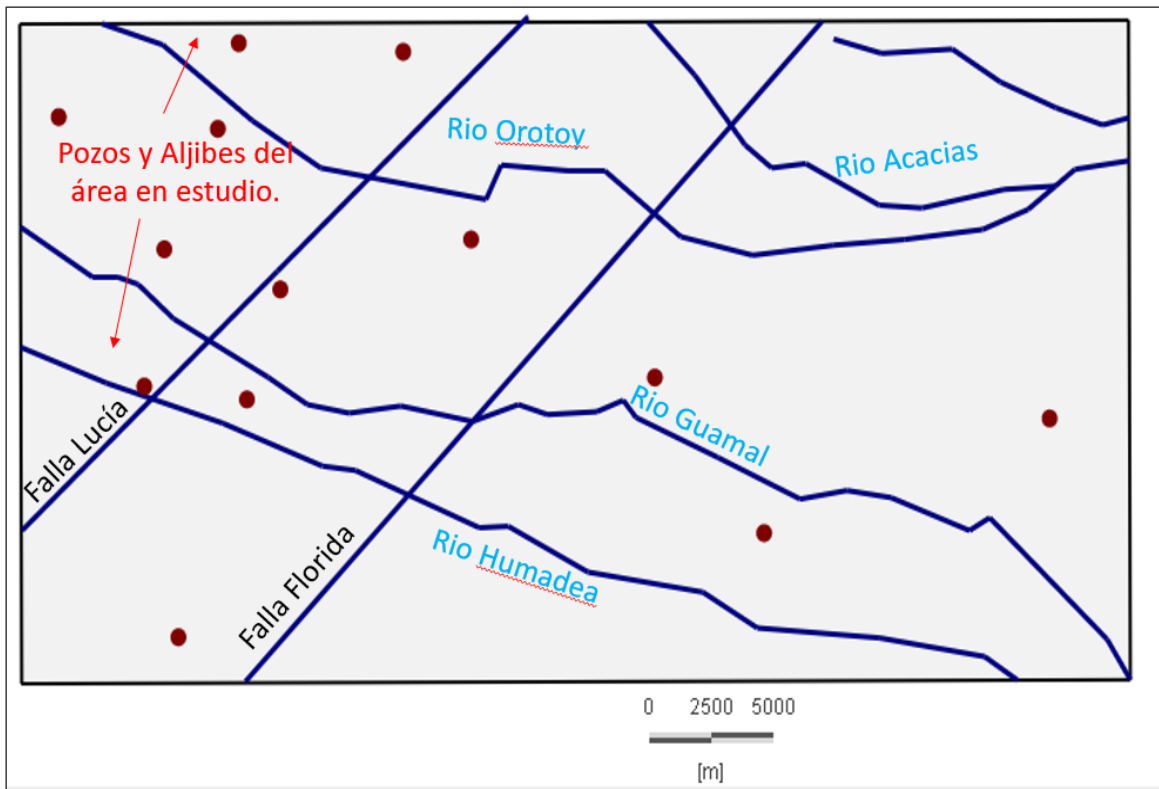


FIGURA 4-15 Supermesh Feflow del dominio del modelo.

4.4.1.2 Red de elementos finitos y geometría de la red

Una vez definida la supermesh se procedió a enmallar el dominio con elementos finitos. Feflow da la opción de enmallar y refinar las zonas de importancia según objetivo del modelo. Las opciones de enmallado que utiliza Feflow se presenta en la FIGURA 4-16

Property	Value
Quality Mesh	<input checked="" type="checkbox"/> True
Minimum Angle	20 [DEG]
Forces Delaunay	<input type="checkbox"/> False
Fill Holes	<input type="checkbox"/> False
Delaunay Algorithms	Divide-and-conq...
Quiet Mode	<input checked="" type="checkbox"/> True
Steiner Points Insert...	Allow at all borders
Mesh Anisotropy	1.00
Refine Polygons	<input type="checkbox"/> False
Edge Refine Mode	SELECTED
Polygon Gradation	2
Polygon Target Size	0.2 [m]
Refine Lines	<input checked="" type="checkbox"/> True
Line Gradation	2
Line Target Size	250 [m]
Refine Points	<input checked="" type="checkbox"/> True
Point Gradation	2
Point Target Size	100 [m]

FIGURA 4-16 Opciones de enmallado (Meshing)

El dominio del modelo se enmalló con elementos finitos tipo triángulo, con un ángulo interno mínimo de 20° y una gradación en las líneas y puntos de dos, respectivamente. En la FIGURA 4-17 se presenta la malla estructurada definida para la construcción del modelo numérico, la cual se diseñó con 10498 elementos.

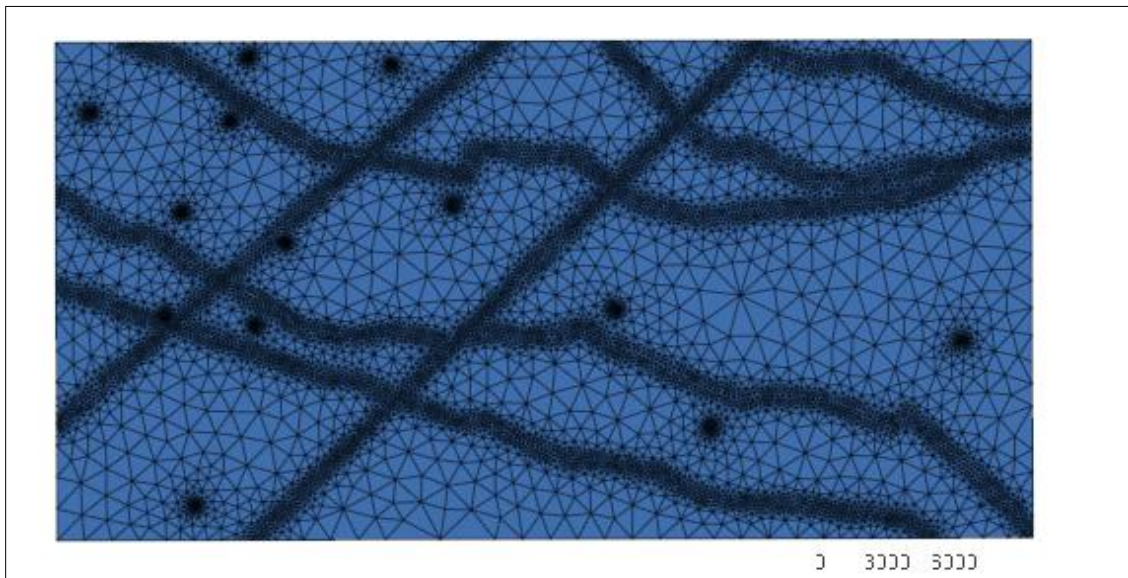


FIGURA 4-17 Modelo de la malla estructurada definida para el modelo numérico.

Una vez definida la malla estructurada del modelo numérico se verificó el cumplimiento de los ángulos máximos y mínimos de cada uno de los elementos. En la FIGURA 4-18 se presentan los ángulos internos de cada uno de los elementos definidos antes de realizar la verificación (Ángulo mínimo 60, Ángulo máximo 140).

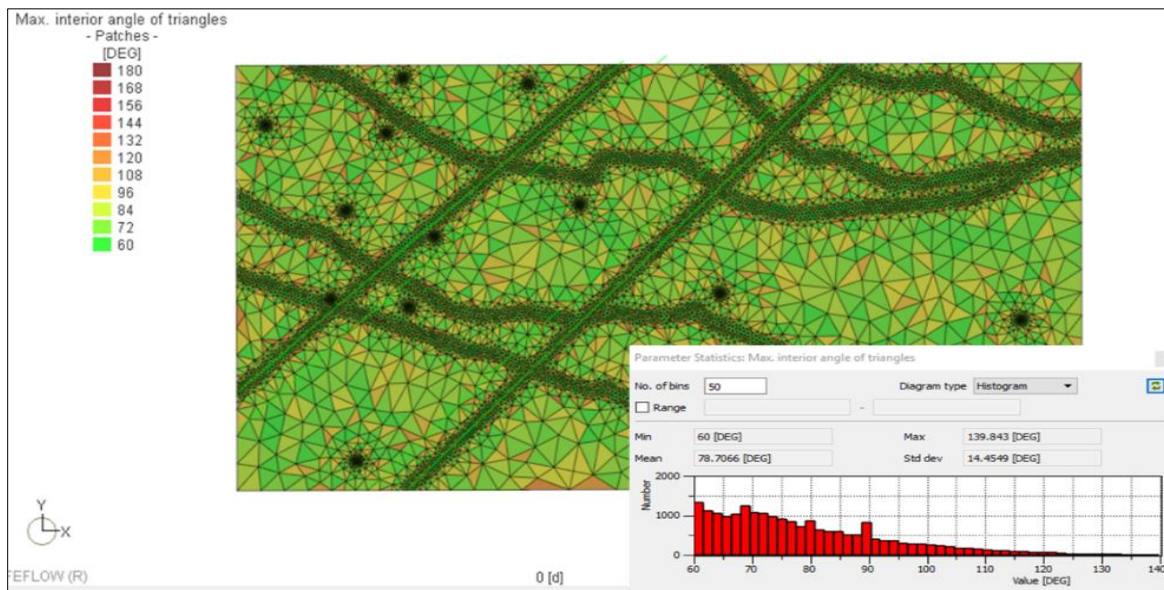


FIGURA 4-18 Ángulos internos de los elementos definidos.

La modificación de los ángulos internos de cada uno de los elementos se desarrolló con la opción “2D Mesh Smoothing”. Se obtuvo un cambio en los ángulos máximos de la malla, ángulo mínimo 60° y ángulo máximo 120° (FIGURA 4-19).

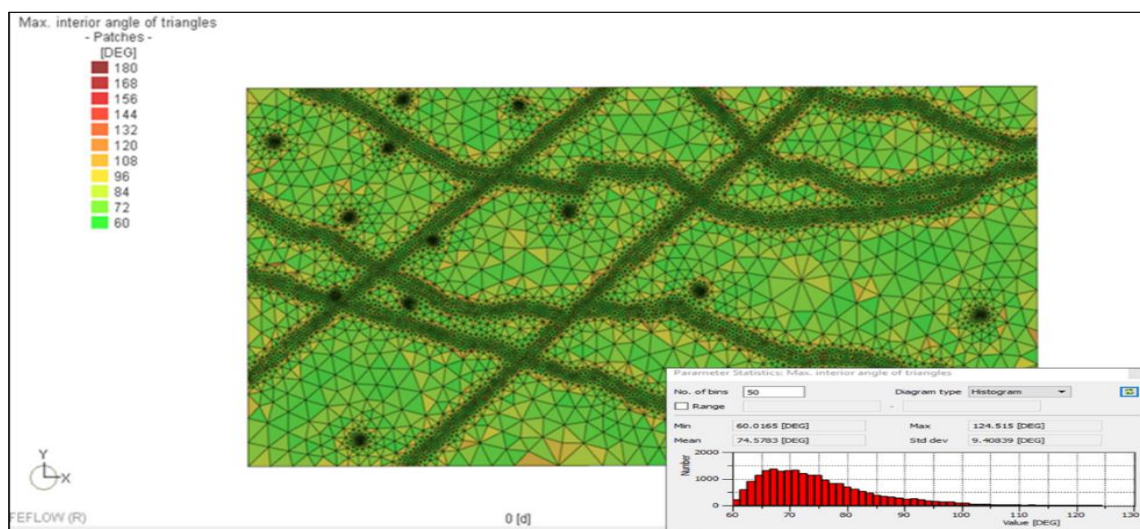


FIGURA 4-19 Ángulos internos después de realizar el suavizado.

4.5 Configuración del modelo en 3D

La geometría del acuífero quedó definida de acuerdo con el modelo conceptual. Para el modelo numérico se definieron tres capas principales con las características y espesores que se presentan en la TABLA 4-3.

TABLA 4-3 Capas definidas para el modelo conceptual

Capa	Tipo de acuífero	Unidad	Nombre	Espesor medio (m)	Descripción hidrogeológica
1	Libre a semiconfinado.	Qt, Qal, Qc y Q1ab	Depósitos cuaternarios	50 -210	Agrupar los sistemas acuíferos formados en depósitos recientes, extensivos y altamente productivos conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial y lacustre.
3	Acuícludo	Formación León	Formación León	90 - 180	Acuícludo continuo, Secuencia de arcillolitas grises, constituyendo la roca sello regional.
2	Semiconfinado a confinado	Carbonera	Carbonera	200	Acuífero continuo, extensión regional y ambiente predominantemente continental conformado por intercalaciones de areniscas y lodolitas

El modelo numérico quedo delimitado en superficie por la topografía superficial y en fondo por la proyección de capas acorde con los perfiles geológicos disponibles para la zona. En la FIGURA 4-20 se presenta el modelo en 3D.

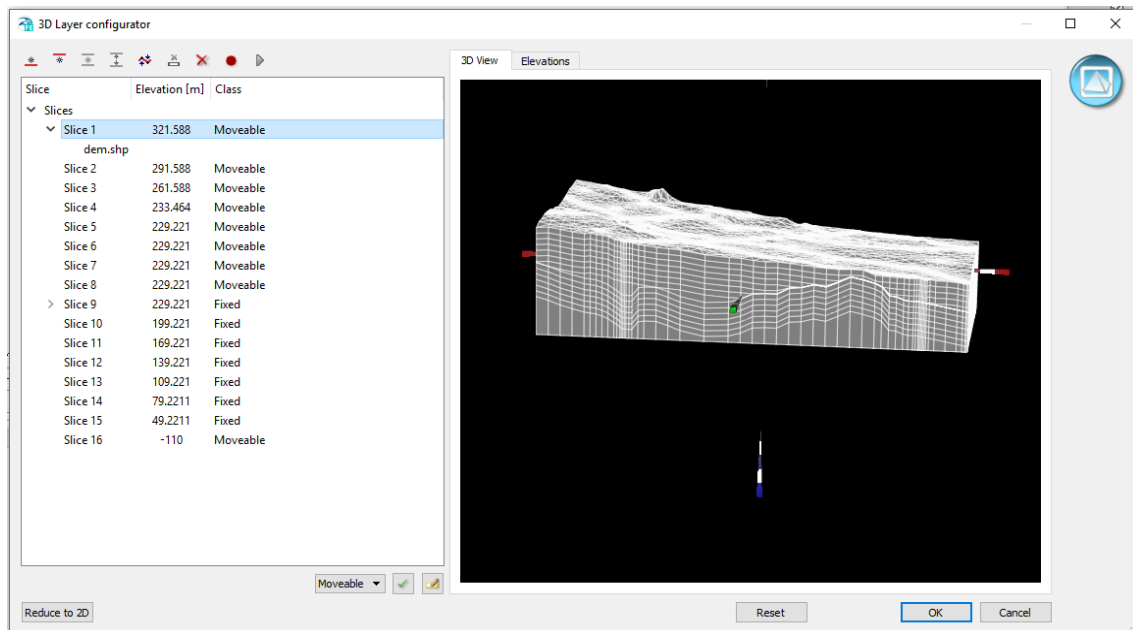


FIGURA 4-20 Configuración de espesores del modelo 3D de la malla estructurada.

Como se observa, en la figura anterior el modelo quedó definido por tres formaciones principales, las cuales se subdividieron en capas para poder representar la geometría de la zona. Los depósitos cuaternarios se dividieron en siete capas de 30 metros, la formación León se dividió en seis capas de 30 metros y a la base del modelo se le definió un espesor de -110 msnm.

En la FIGURA 4-21 se presenta el modelo en 3D, que quedó configurado por 133622 nodos y 395086 elementos.

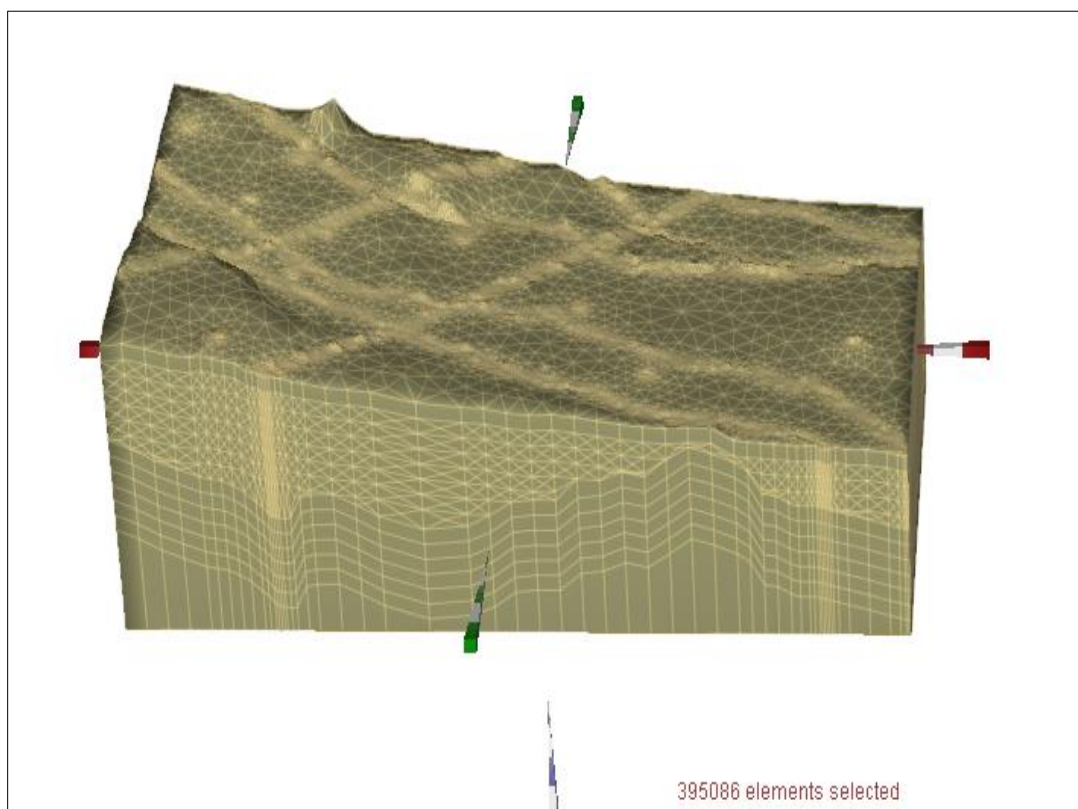


FIGURA 4-21 Malla estructurada del modelo en 3D.

En la FIGURA 4-22 se presentan las zonas de fallas definidas, las cuales se representaron como selecciones con conductividades teóricas y no como elementos discretos por la falta de información requerida por el modelo.

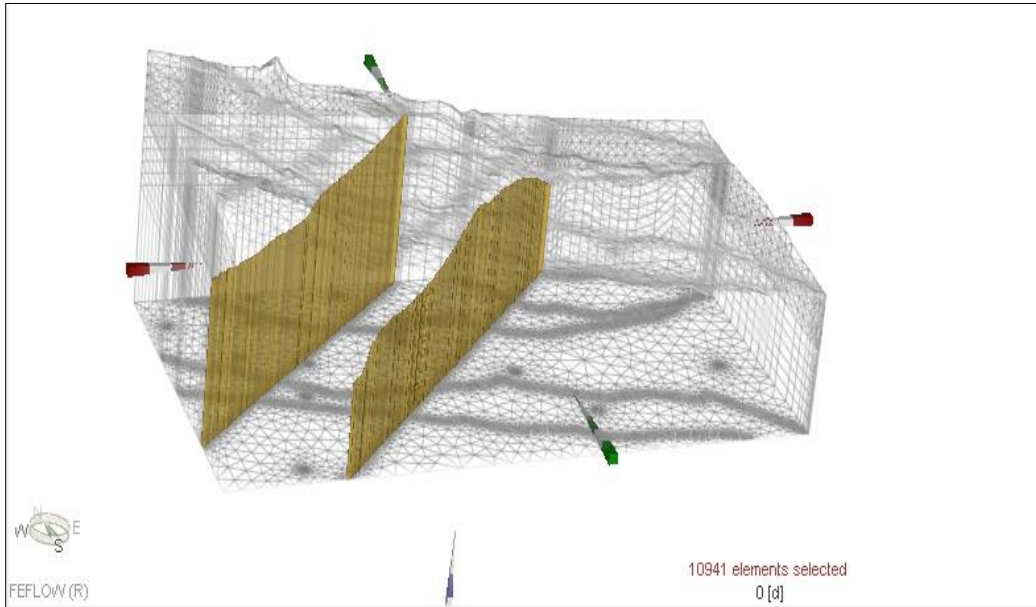


FIGURA 4-22 Fallas del área en estudio.

4.6 Propiedades hidráulicas

Las propiedades hidráulicas se obtuvieron a partir del análisis de los ensayos tipo pruebas de bombeo e información secundaria. El resumen de las propiedades hidráulicas definidas para las capas del modelo antes de la calibración se presenta en la TABLA 4-4.

TABLA 4-4 Propiedades hidráulicas

Capa	Tipo de acuífero	Unidad	Nombre	Espesor medio (m)	KX , KY (m/d)	Kz (m/d)	Ss (1/m)
1	Libre a semiconfinado.	Qt,	Depósitos cuaternarios	50 -250	5	0.5	0.01
		Qal, Qc y Q1ab		50 -250	8	0.8	0.01
2	Acuícludo	Formación León	Formación León	90 - 180	0.001	0.0001	1.00E-04
3	Semiconfinado a confinado	Carbonera	Carbonera	200	0.01	0.001	1.00E-04
4	Falla La Florida				0.1	0.01	1.00E-04
5	Falla Villa Lucía				0.1	0.01	1.00E-04

En las siguientes figuras se pueden observar la conductividad hidráulica definida para cada una de las capas y las fallas del modelo.

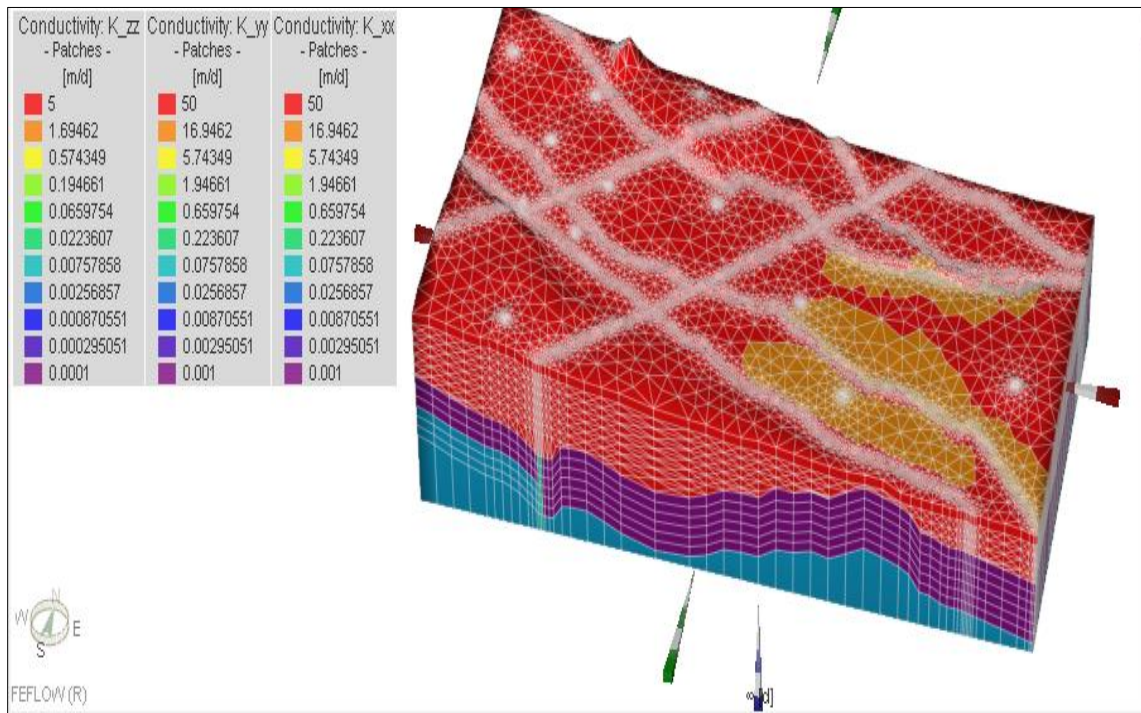


FIGURA 4-23 Conductividad hidráulica para las capas del modelo.

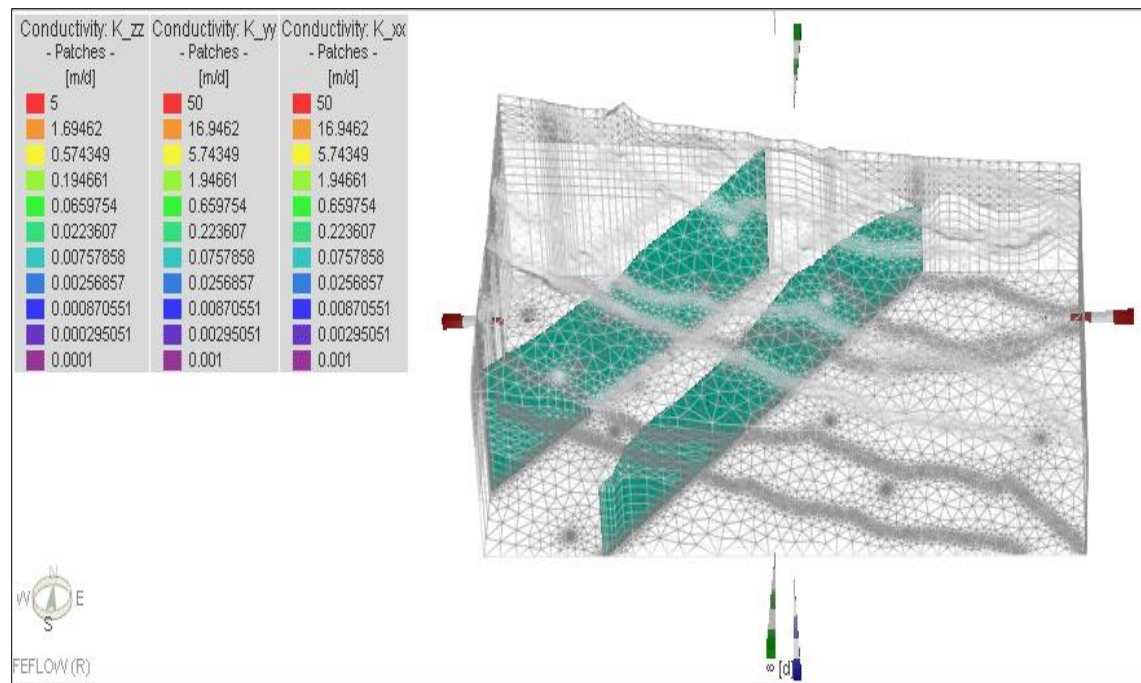


FIGURA 4-24 Conductividad de las fallas (área del modelo).

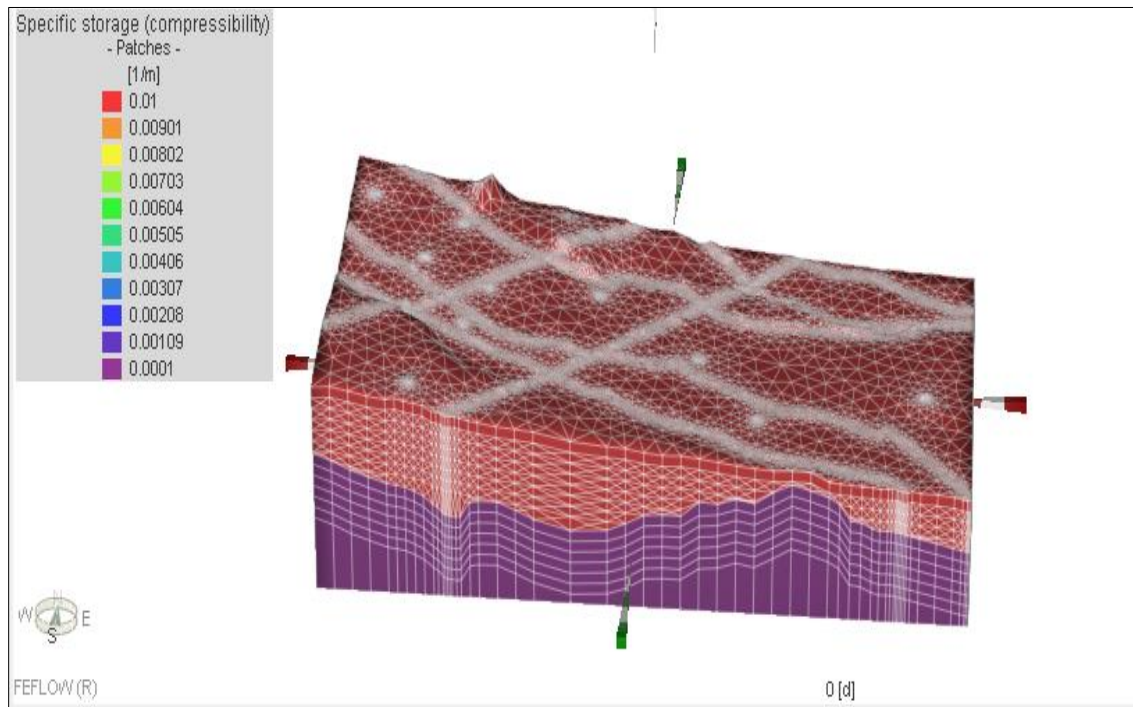


FIGURA 4-25 Coeficientes de almacenamiento.

4.7 Condiciones de frontera

La resolución de las ecuaciones diferenciales que emplea un modelo numérico exige el conocimiento de las condiciones de todo el contorno y a lo largo del periodo simulado. De acuerdo con lo anterior, para el modelo se definieron condiciones de frontera tipo I (Dirichlet), con series temporales y restricciones de carga hidráulica, condiciones de frontera tipo II. Es una condición de contorno de flujo prescrito (recarga) y condiciones iniciales tipo III (Cauchy) para los cuerpos de agua. Las condiciones de frontera establecidas para el modelo se presentan en la FIGURA 4-26.

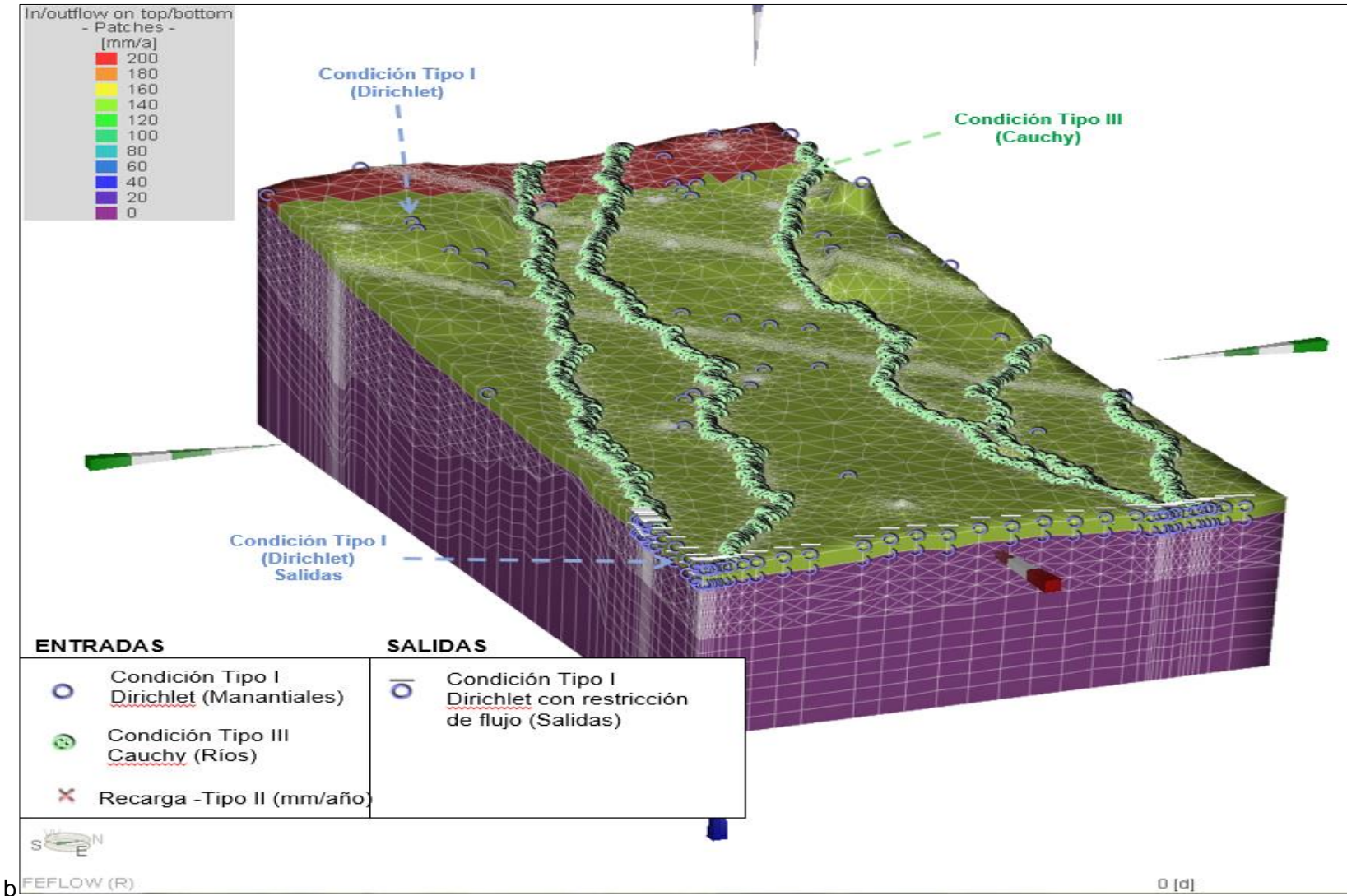


FIGURA 4-26 Condiciones de contorno en el modelo matemático.

- **Tipo I o Dirichlet (carga hidráulica impuesta)**

- Es una condición de contorno de carga hidráulica conocida y puede variar en el espacio (Anderson et al., 2015). La aplicación directa es la asignación de un valor potencial (nivel del agua subterránea conocido en el límite). Está definida por la unidad de longitud (L) (Diersch, 2014).
- La condición tipo I, carga hidráulica impuesta, se asignó en los puntos donde se conocía la carga hidráulica. En el modelo esta condición se fijó a los puntos conocidos como manantiales.
- También se utilizó la condición tipo I con restricción de flujo para simular las salidas del modelo, lo cual permite que la condición sólo saque agua del modelo.

- **Tipo II o Neumann (flujo impuesto)**

- Es una condición de contorno de flujo prescrito (flujo de Darcy) en los nodos de los elementos que están a lo largo de una línea (2D) o a los nodos que conforman las caras de los elementos (3D). Las condiciones de contorno de este tipo se aplican cuando el gradiente de velocidad o flujo de entrada/flujo de salida se conoce de antemano y es normal a la superficie (Bear, 2012). Se aplica para las entradas de un acuífero. En el modelo hidrogeológico actual se asignó para simular la recarga en el área, teniendo los valores de recarga calculados en el modelo conceptual, el valor se asignó por unidad de área en todo el espacio.
Si esta condición tiene valor de 0 significa que no hay flujo ni velocidad. Esto es típico en bordes impermeables, por lo tanto, es indispensable incluirla dentro del modelo.

- **Tipo III o Cauchy (flujo condicionado por la variación de la carga hidráulica)**

- A esta condición de contorno también se le denomina de tipo mixta porque relaciona las condiciones de contorno de carga hidráulica (Dirichlet) con las de flujo (Neumann). En algunas situaciones el flujo cruza una parte del contorno de la superficie y cambia dentro del acuífero en respuesta a las variaciones de la carga hidráulica. Esto sucede en el caso de ríos o lagos con conexión limitada con las aguas subterráneas (nivel de agua superficial = nivel de agua subterránea) o acuíferos semiconfinados en los que el goteo condiciona la transferencia de flujo entre los medios permeable y semipermeable. Está definida por la unidad de longitud (L). Este tipo de condición se le asignó a los ríos Orottoy, Guamal y Humadea.

4.8 Calibración del modelo

El proceso de calibración consiste en ajustar simultáneamente los parámetros hidrogeológicos hasta lograr que los valores de los niveles freáticos simulados tengan una coincidencia aceptable con los valores observados (validación). Para la calibración se utilizaron catorce puntos de observación, los cuales corresponden a piezómetros, aljibes y pozos dentro del área de estudio definida. La localización de los puntos de observación utilizados para la calibración se presenta en la FIGURA 4-27.

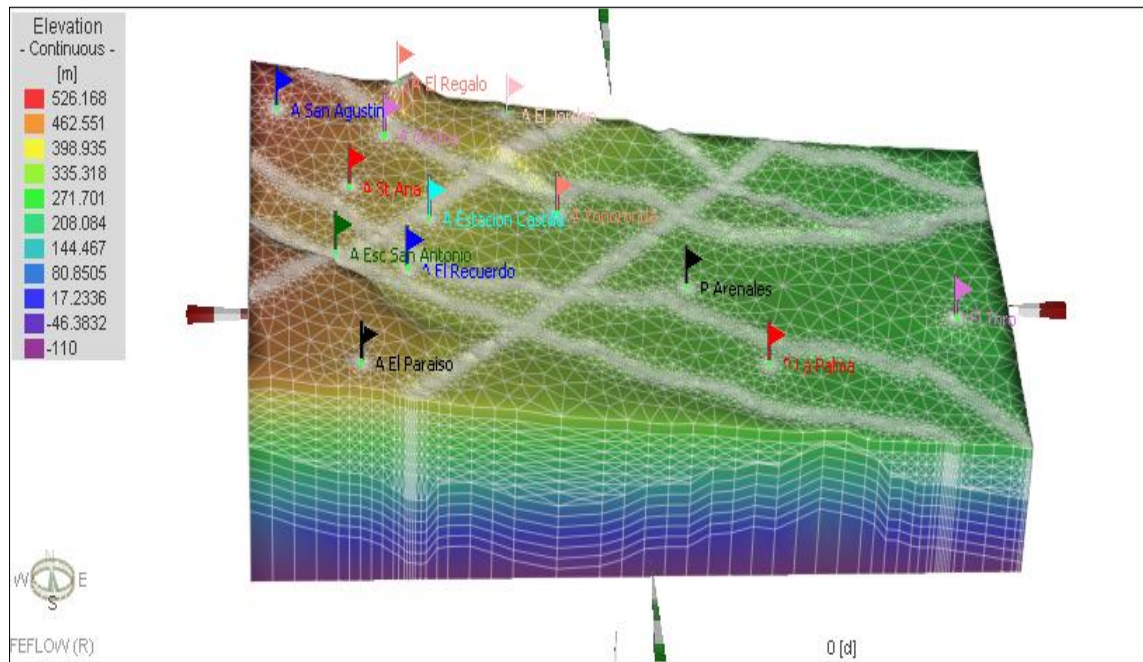


FIGURA 4-27 Puntos de observación del modelo.

La calibración del modelo se realizó unificando dos métodos.

- **Calibración manual**

Consiste en cambiar manualmente los parámetros hidráulicos del modelo hasta conseguir valores de niveles agua subterránea similares a los puntos de observación definidos,

- **Calibración con el software acoplado FePEST V 7.0.6.2001**

Para la calibración se empleó el software acoplado FePEST V 7.0.6.2001, utilizando los catorce puntos de observación definidos (ver FIGURA 4-27).

4.8.1 Resultados de la calibración

Los resultados de calibración se presentaron en gráficos de dispersión o *Scatter plot*, que permiten comparar los valores observados y calculados. Estos gráficos se presentan con los valores observados en la abscisa y los valores calculados en la ordenada. Si se han definido intervalos de confianza para los puntos de observación se muestran como barras horizontales. Los puntos con resultados dentro del rango de aceptación se dibujan en negro y los puntos fuera del rango de aceptación se dibujan en rojo. El gráfico se complementa mostrando la diferencia de medias, el error medio cuadrático (RMS) y la desviación estándar (σ) en la línea de fondo.

La calibración del modelo consistió en realizar simulaciones en estado estacionario, buscando que los niveles piezométricos de los modelos se ajustaran a la información de los niveles estáticos de los pozos ya identificados en la FIGURA 4-27. Para la calibración se modificaron el valor de las conductividades hidráulicas y los parámetros de recarga en diferentes zonas del modelo. Los resultados y el error asociado para cada una de las mallas que comprenden el análisis de sensibilidad se presentan en la FIGURA 4-28, donde se presentan los resultados de la calibración del modelo para las propiedades y condiciones de frontera definidas en el modelo conceptual.

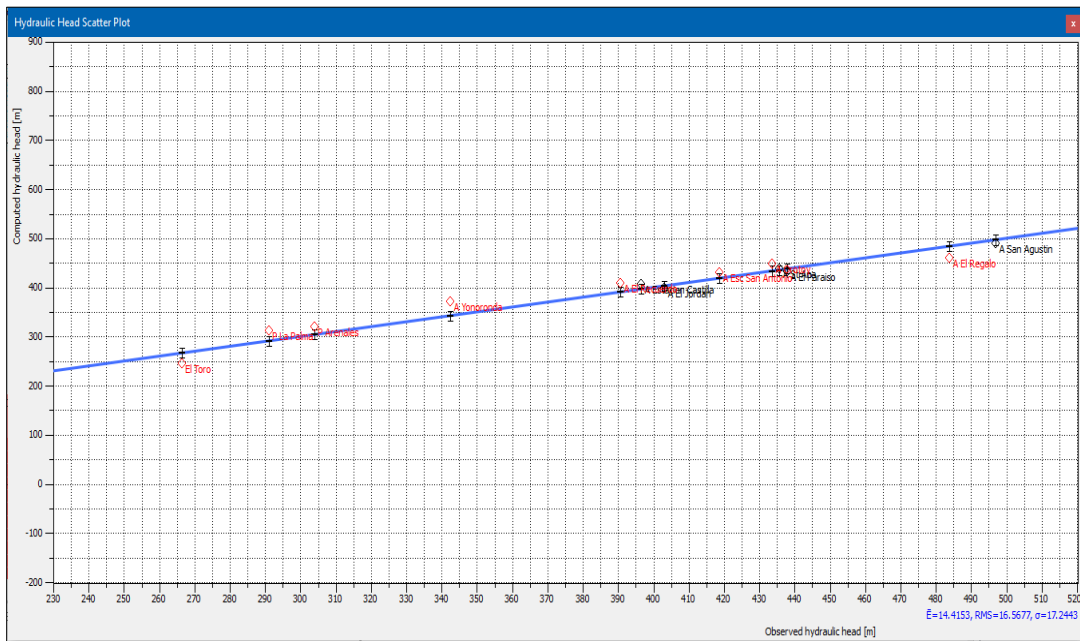


FIGURA 4-28 Resultados de la calibración.

Como se observa en la figura anterior (resultados de calibración), de los puntos de observación propuestos cinco entraron en el rango de aceptación. Se calculó un RMS = 16.567 y una $\sigma = 17.2443$. A partir de los resultados del modelo anterior, se definió solo realizar cambios a la conductividad hidráulica, teniendo en cuenta que los niveles se encuentran cercanos a los rangos de aceptación. A partir de los resultados de la calibración manual se decidió utilizar el *software* FePEST para graduar finalmente el modelo.

4.8.2 Calibración con FePEST

PEST es un *software* ampliamente utilizado en la modelación ambiental para calibrar modelos numéricos, determinar la incertidumbre asociada con los parámetros y las predicciones y para tareas relacionadas. Hoy en día PEST es probablemente el *software* más utilizado para calibrar modelos de aguas subterráneas.

FePEST permite calibrar todo el dominio o subdominios. Los parámetros se pueden estimar por zonas constantes o espacialmente-variable (método puntos piloto). La estimación de los parámetros para la calibración final del modelo se estimó por los dos métodos: método de zonas constantes y método de puntos pilotos. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

4.8.2.1 Calibración por el método de zonas constantes

La calibración por este método se desarrolla definiendo inicialmente los parámetros que queremos estimar. Para el modelo numérico se decidió valorar los parámetros de conductividad de los depósitos cuaternarios teniendo en cuenta su peso en la calibración del modelo. Los parámetros que se estiman por el método de zonas constantes se presentan en la FIGURA 4-29.

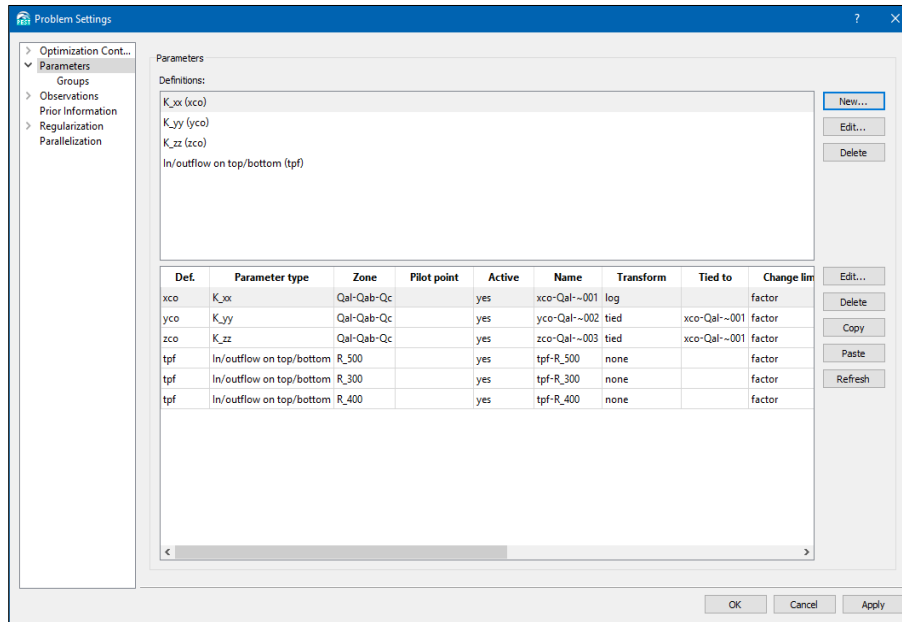


FIGURA 4-29 Parámetros de optimización.

En la FIGURA 4-30 se presentan los puntos de observación que se tuvieron en cuenta para estimar los parámetros definidos.

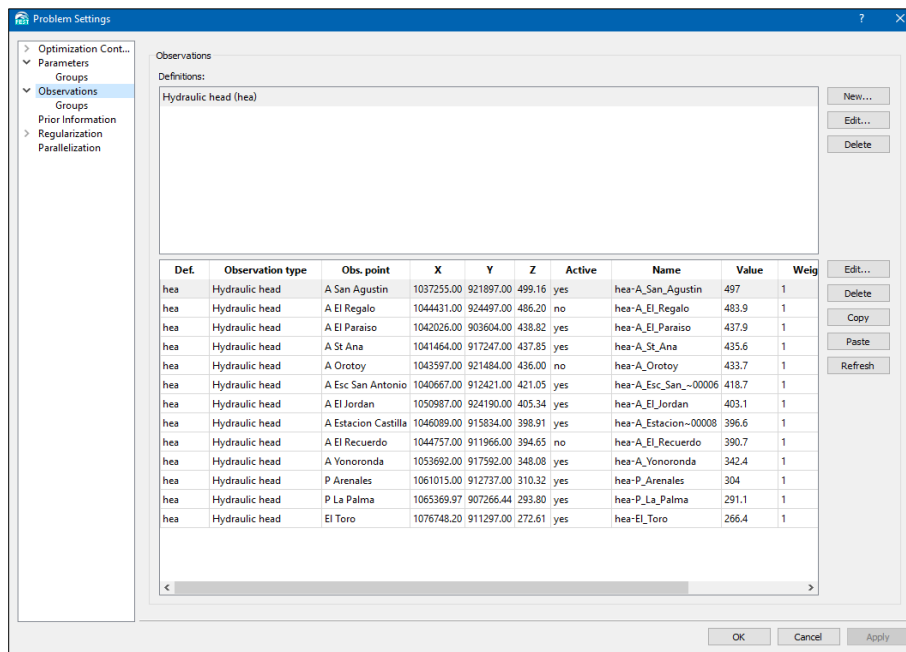


FIGURA 4-30 Puntos de observación.

En la FIGURA 4-31 se presentan las conductividades hidráulicas estimadas con FePEST.

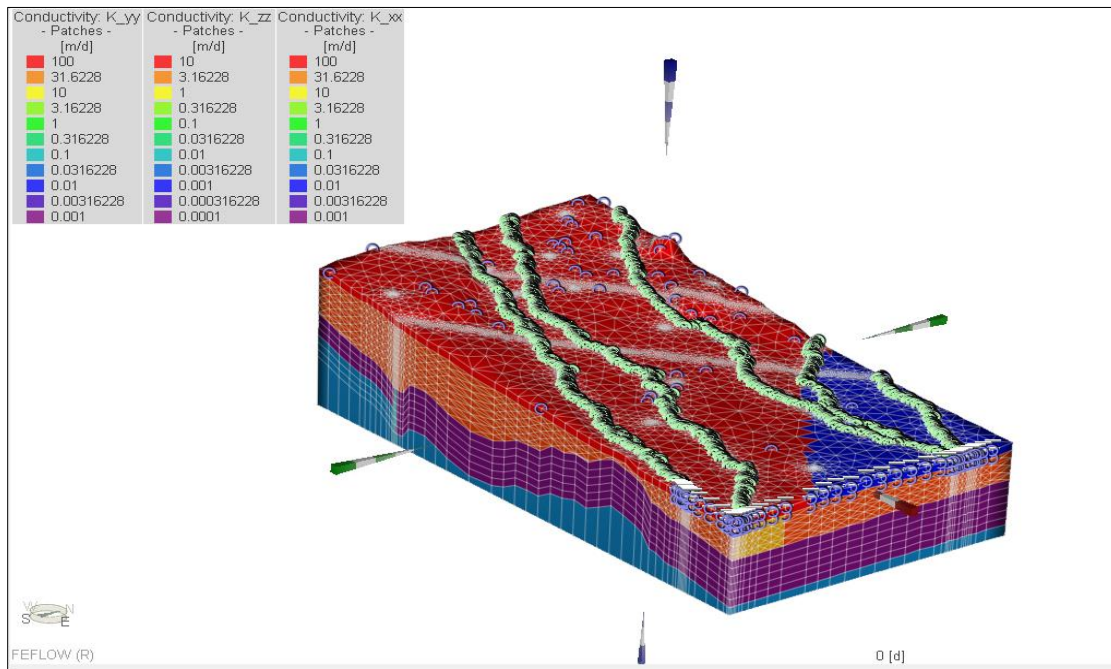


FIGURA 4-31 Conductividades hidráulicas calculadas con FePEST.

En la figura anterior se puede observar que se calcularon zonas con altas conductividades, de hasta 100 m/d, y otras con muy bajas conductividades (0,01m/d), resultados que están dentro del rango de los obtenidos en las pruebas de bombeo, pero que tienen un comportamiento no acorde con la realidad. En la FIGURA 4-32 se presentan los resultados de la calibración después de utilizar los parámetros calculados con FePEST.

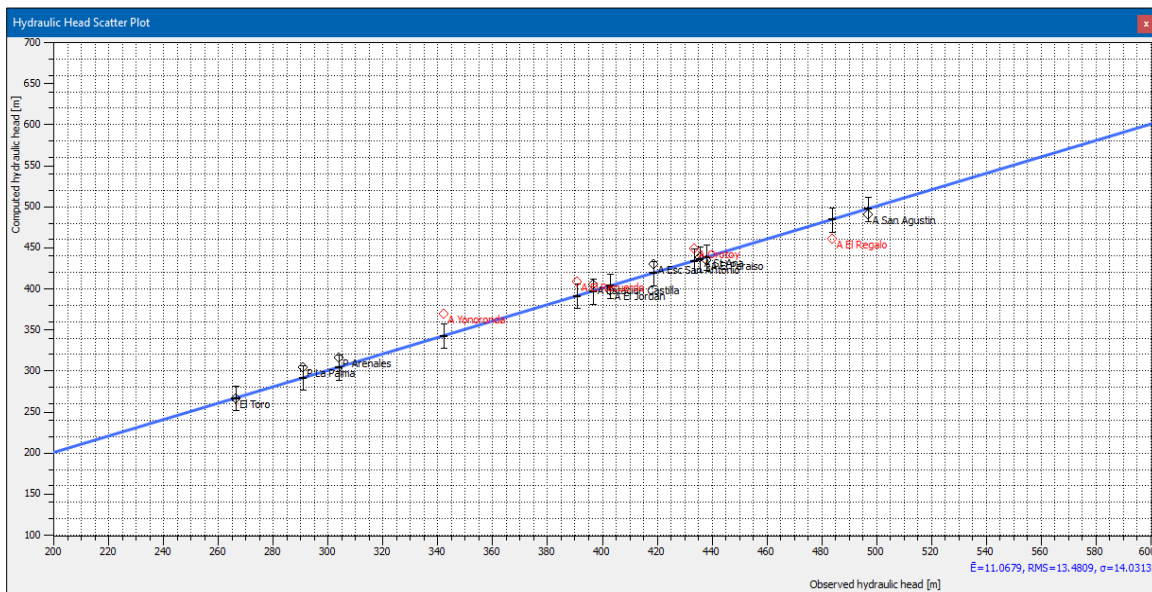


FIGURA 4-32 Resultados de la calibración FePEST.

Con los cambios realizados en la calibración se calculó un RMS de 13,481 y una σ de 14.031. Los resultados calculados mejoraron en comparación con los obtenidos con la calibración manual, pero se observó que las conductividades aumentaron quedando hasta el límite máximo dado para la estimación de la conductividad. Esto indica que se debe tener cuidado con este tipo de calibraciones.

4.8.2.2 Calibración por puntos piloto

Para utilizar la estimación de parámetros por el método de puntos piloto inicialmente fue necesario realizar la configuración del PEST, en el cual es necesario definir los siguientes controles:

- De optimización
- De parámetros
- Observaciones
- Análisis predictivo

- **Control de optimización**

Para la optimización se utilizaron los criterios de terminación que se presentan en la FIGURA 4-33.

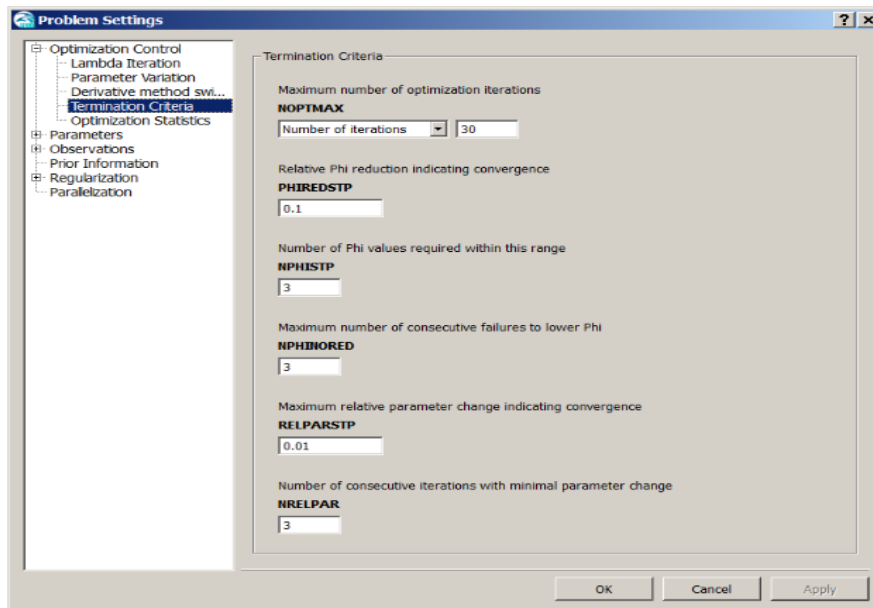


FIGURA 4-33 Criterios de terminación FePEST.

- **Definición de parámetros**

En este apartado se definieron los parámetros que se estimaron con el método de los puntos piloto. Para este caso se calculó la conductividad hidráulica K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} para los depósitos cuaternarios. La información definida para la estimación se presenta en la FIGURA 4-34, donde para cada zona geológica se definieron 20 puntos piloto.

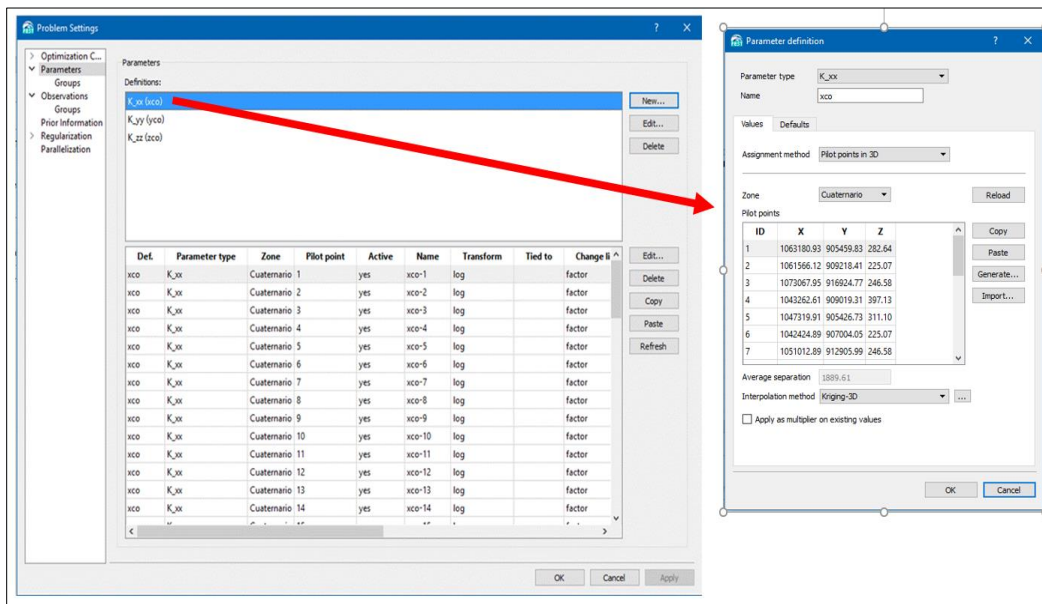


FIGURA 4-34 Definición de parámetros FePEST.

Pest calibra los valores de los parámetros en cada punto piloto de forma individual. Posteriormente, interpola (o extrapola) los valores sobre la zona especificada. Para la interpolación se escogió el método de Kriging.

- **Definición de observaciones**

Para utilizar el Pest es necesario definir las mediciones de referencia. Los parámetros que se utilizaron en la calibración fueron los niveles de agua subterránea medidos en los pozos y aljibes durante el inventario de puntos de aguas subterráneas. Las observaciones definidas para la corrida con Pest se presentan en la FIGURA 4-35.

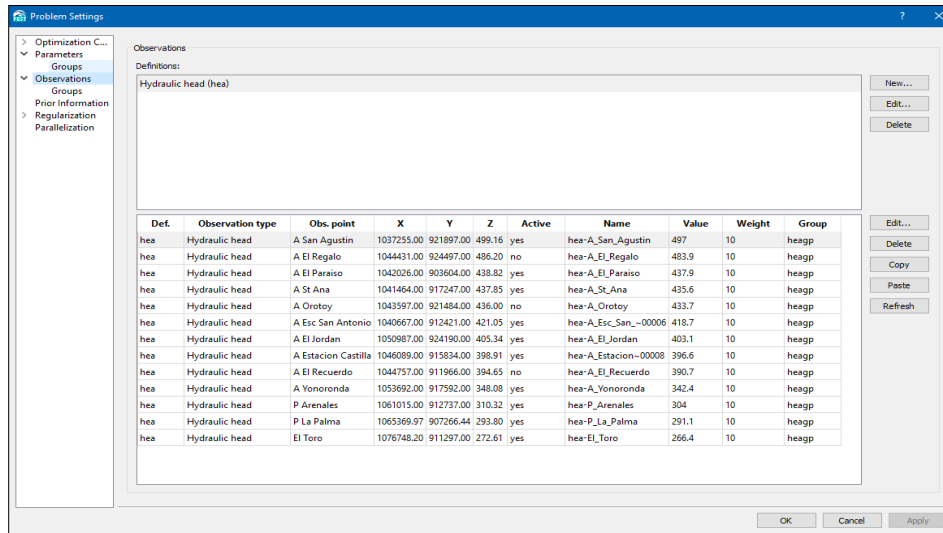


FIGURA 4-35 Puntos de observación FePEST.

- **Análisis predictivo**

El uso de puntos piloto para estimar la distribución de conductividad requiere una regularización. FePEST ofrece varias opciones de regularización: regularización Tikhonov, descomposición singular del valor (SVD), SVD-Assist y regularización de mínimos cuadrados (LSQR). Para la calibración se utilizó el método de regularización de descomposición de valor singular, SVD.

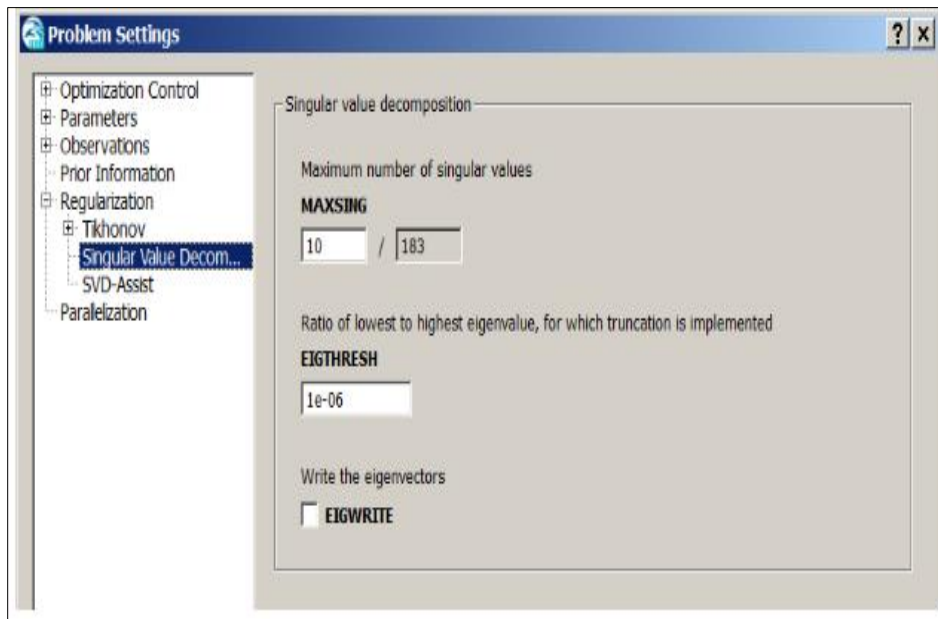


FIGURA 4-36 Información SVD.

Una vez definida la información necesaria para utilizar Pest, se corrió el programa y se calcularon las conductividades que se presentan en la en la FIGURA 4-31.

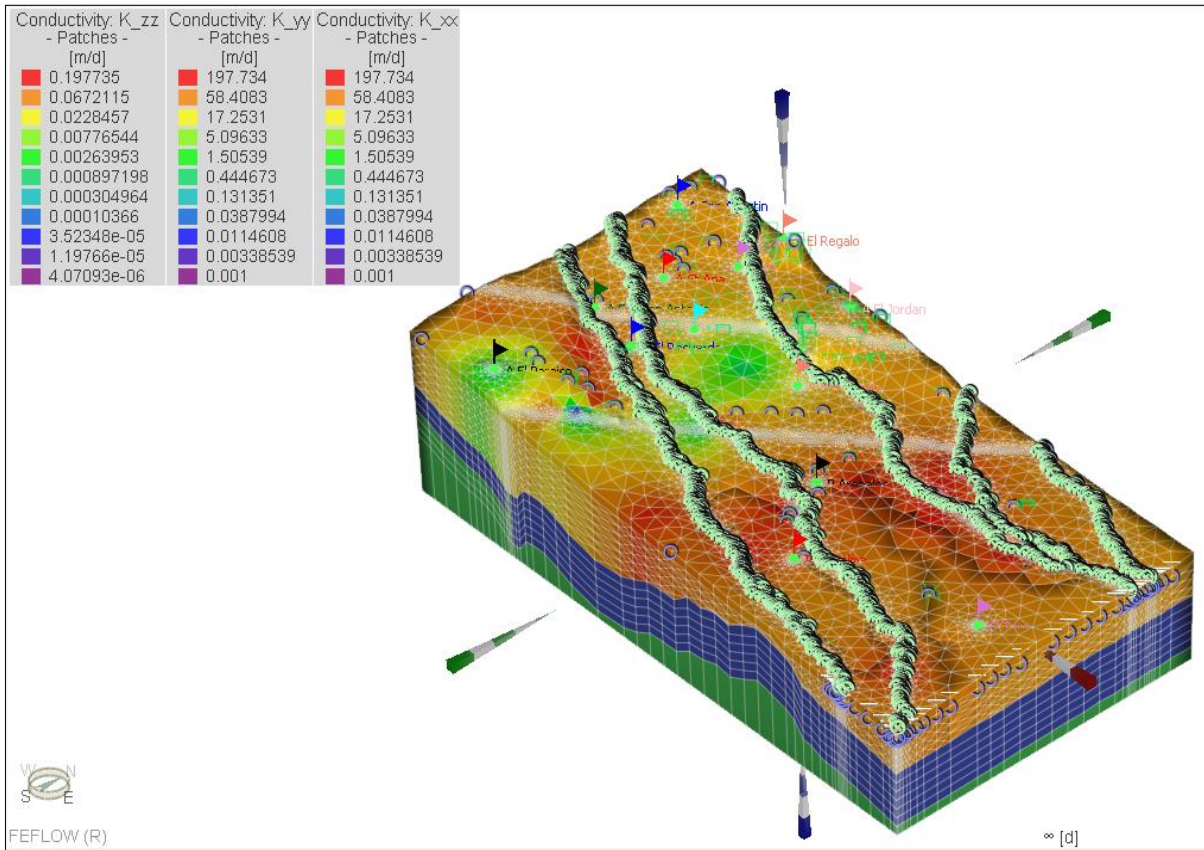


FIGURA 4-37 Conductividades hidráulicas calculadas con FePEST por el método de los puntos piloto.

Como se observa en la figura anterior, FePEST cálculo conductividades que varían en X, Y y Z. En la FIGURA 4-32 se presentan los resultados de la calibración después de utilizar los parámetros calculados con FePEST por el método de los puntos piloto.

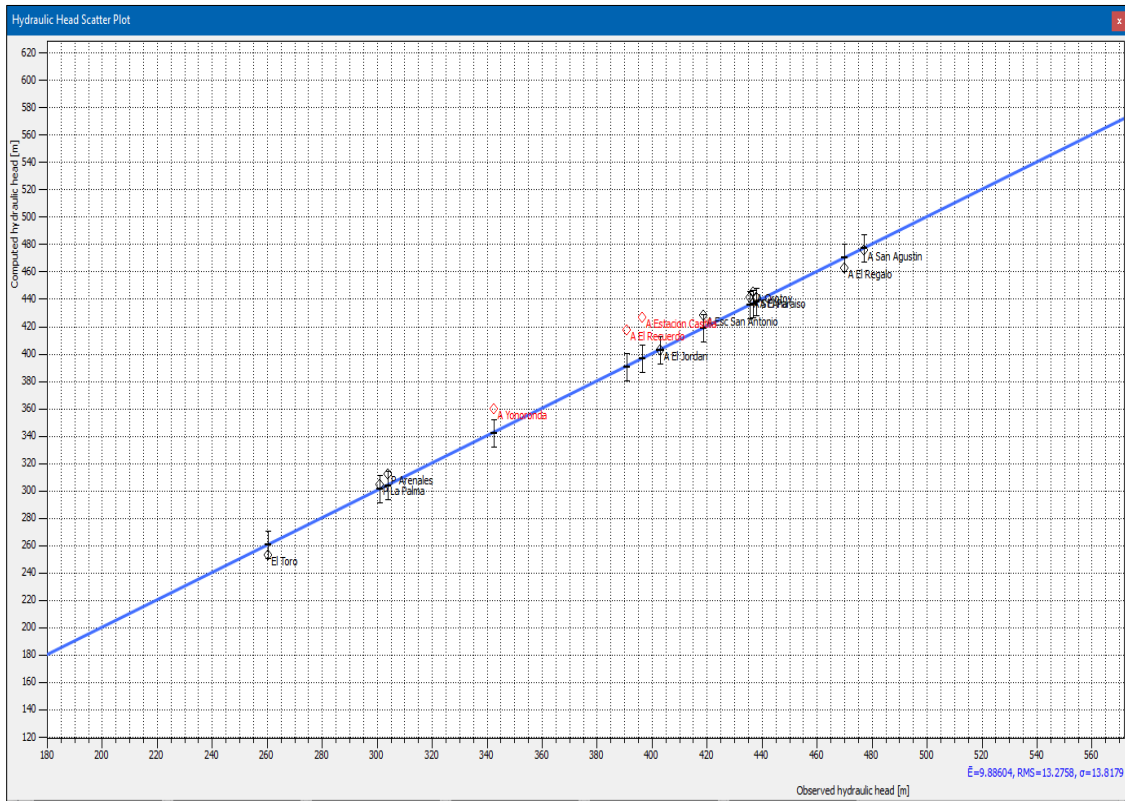


FIGURA 4-38 Resultados de la calibración FePEST.

Con las conductividades calculadas con FePEST se estimó un $RMS = 13,27$ y una $\sigma = 13,81$. El resultado de la calibración obtenida con las conductividades calculadas con FePEST por el método de puntos piloto fue la mejor que se pudo obtener. De los catorce puntos de observación definidos, once quedaron dentro del rango de aceptación y sólo tres quedaron por fuera, con un error medio de 13,27.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La información de estudios de licenciamiento ambiental desarrollados por diversas empresas que existen en Colombia se pueden utilizar para crear modelos hidrogeológicos conceptuales y matemáticos, teniendo en cuenta que disponen de información sobre hidrología, hidrogeología, geología y geofísica, entre otras.
- Para desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual es necesario utilizar sistemas de información geográfica para representar las características hidrogeológicas de un área en estudio. Para este trabajo se utilizó la base cartográfica de los estudios de licenciamiento ambiental, a partir de la cual se realizaron las ediciones necesarias para extraer la información para el desarrollo de los modelos como: fallas, ríos, pozos, manantiales, unidades hidrogeológicas.
- El modelo hidrogeológico conceptual del presente estudio se realizó para el municipio de Castilla La Nueva, ubicado en el departamento del Meta. El comportamiento del sistema se basa en un balance de flujo en el cual las entradas menos las salidas son equivalentes a la variación de almacenamiento en el dominio. El área en estudio se encuentra sobre la cuenca del río Mética, localmente sobre las cuencas de los ríos Acacias y Humeada. La recarga del área en estudio se presenta hacia el piedemonte llanero y las zonas de descarga siguen la pendiente hasta descargar en los ríos y manantiales que atraviesan el área en estudio.
- El modelo conceptual hidrogeológico del área en estudio se desarrolló con base en tres submodelos: geológico, hidrológico e hidráulico, que en conjunto permiten evaluar las variables hidrogeológicas más relevantes.
- El modelo geológico se desarrolló para evaluar la geometría y el tipo de roca, y delimitar las unidades hidrogeológicas y los sistemas de acuíferos del área en estudio.
- La evaluación de la geometría y del tipo de roca del área en estudio se desarrolló a través de información secundaria de métodos indirectos como Geofísica (SEV) y sísmica (Línea sísmica mg-1989-1250 interpretada y Perfil geológico a-a' plancha 285 SGC). Esta información permitió entender la distribución de la geología de la zona y con la ayuda del *software* Move 2013.1 se desarrollaron las capas geológicas del área en estudio, con lo cual se pudo representar la geología local. Localmente el área de estudio se encuentra en la planicie oriental de la cuenca de los Llanos Orientales, las unidades geológicas presentes en el área de estudio, de base a tope son las siguientes: Formación Lutitas de Pipiral (D2), Formación Une (K2), Grupo Guadalupe

(K1 Superior), Formación Mirador, Formación Carbonera, Formación León (L), Depósitos cuaternarios.

- Para evaluar los acuíferos del área en estudio se partió del Estudio Nacional del Agua, IDEAM 2014, y la información secundaria de los estudios de licenciamiento ambiental. El sistema hidrogeológico del área en estudio está compuesto por un acuífero superior, tipo libre con variación a semiconfinado de extensión regional, el cual está compuesto por las unidades geológicas cuaternarias que se dividen en las unidades hidrogeológicas I-1 y I-2. Debajo de los depósitos cuaternarios se encontró la formación León, un sistema acuífero de tipo acuícludo, definido por la unidad hidrogeológica III, que constituye una base impermeable y sirve como soporte del modelo matemático.
- El modelo hidrológico permitió conocer los recursos y la oferta del área en estudio. Para su desarrollo se utilizó información hidrológica para el cálculo de recarga y de los inventarios de puntos de agua subterránea. Con el inventario de los puntos de agua subterránea se evaluó la Localización de las zonas de recarga y descarga del área en estudio. El flujo del agua subterránea se presenta en sentido NW-SE noreste a suroeste, siguiendo la pendiente natural de los terrenos. La circulación de las aguas subterráneas en la zona superficial del acuífero libre es preferencial y relativamente independiente, siguiendo la morfología del terreno. La zona de recarga del área en estudio se localiza en el piedemonte llanero y descarga en los principales cuerpos de agua de la zona.
- El cálculo de recarga para el presente proyecto se desarrolló a partir del método de balance de agua de Thomas o ABCD y de métodos empíricos. Para este cálculo, el método de Thomas requiere unos datos de entrada: lluvia, evapotranspiración potencial y el valor de los cuatro parámetros (a, b, c, d). Para el presente trabajo de grado se utilizó el *software* Solver para el desarrollo del método, pero también se recomienda Matlab para calcular la recarga con un mayor grado de exactitud. Por el método de Thomas se calculó una recarga para el área en estudio de 298 mm/año.
- Para calcular la recarga del presente trabajo de grado también se utilizaron los métodos empíricos Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1988) y Sehgal (1973). La recarga calculada por estos dos métodos varía en un 50 % en magnitud para una misma zona. Razón por la cual se recomienda utilizar otro método para validar la información calculada. Por el método de Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1988) se calculó una

recarga promedio de 320 mm/año y por el método de Sehgal (1973) se calculó una recarga promedio de 690 mm/año.

- El modelo hidráulico se desarrolló con el fin de conocer las propiedades hidráulicas del área en estudio. Este análisis se realizó con la reinterpretación de trece pruebas de bombeo realizadas entre los años 2014 y 2015 en pozos y aljibes. Para los aljibes se utilizó el método de Papadoupulos & Cooper y para las pruebas realizadas en los pozos se utilizó el método de Hantusth y Theis. La reinterpretación de las pruebas de bombeo se realizó con el *software* Aquifer test. Para las pruebas de bombeo se recomienda hacerlo en pozos de agua que tengan pozo de observación, con el fin de calcular con certeza el coeficiente de almacenamiento.
- Las unidades hidrogeológicas se determinaron según la capacidad específica y las características hidroestratigráficas de las formaciones geológicas del área en estudio. La definición de estas se debe generar según características específicas de la zona. las unidades hidrogeológicas que afloran en el área en estudio son las unidades I-1 y I-2. Debajo de los depósitos cuaternarios se encontró la formación León, un sistema acuífero de tipo acuicludo, definido por la unidad hidrogeológica III, la cual constituye la base impermeable.
- Para construir un modelo numérico de aguas subterráneas es indispensable desarrollar el modelo conceptual del área, que debe contar mínimo con la siguiente información: geología, hidrogeológica, hidrología e hidráulica.
- Los parámetros hidráulicos calculados en el modelo conceptual son un insumo clave y decisivo para el modelador. Si no se cuenta con una debida caracterización hidráulica los modelos pueden tener asociada una incertidumbre y sus resultados no ser acordes con el comportamiento hidráulico de las formaciones de un área en estudio.
- En la actualidad, el desarrollo computacional ha permitido aminorar los tiempos de cálculo y resolver problemas complejos que matemáticamente sería imposible de hacer de forma manual o tomaría mucho tiempo. Para la elaboración del modelo numérico del presente proyecto se utilizó el *software* de elementos finitos Feflow V 7.0® (p6), que tiene la capacidad de resolver ecuaciones de flujo, masa y transporte en medios porosos.
- Para utilizar Feflow se recomienda mucha organización con el manejo de las selecciones, teniendo en cuenta que cuando se pasa al modelo no estructurado no

es posible seleccionar capas, lo cual ocasiona que no se puedan incluir cambios en el modelo matemático.

- Para elaborar un modelo hidrogeológico matemático es fundamental utilizar sistemas de información geográfica, ya que son la base para representar la información que se requiere incluir en un modelo matemático
- Para configurar un modelo numérico es necesario definir un dominio con una malla de elementos o celdas. En el caso de problemas complejos se recomienda que estas mallas sean no estructuradas y empleen elementos finitos por su utilidad y flexibilidad en la definición adecuada de estructuras geológicas complejas.
- Para el desarrollo del modelo numérico, el área del modelo se definió de forma rectangular, la cual incluyo las cuencas principales del área en estudio.
- Para construir la geometría del presente modelo hidrogeológico matemático se utilizaron elementos finitos. Se observó que dichos elementos se ajustaron con precisión para representar la estructura geológica de la zona, incluyendo las fallas y las formas geológicas del área en estudio.
- Todo modelo numérico requiere de condiciones iniciales para el cálculo numérico de la solución en estado estacionario o transitorio. Para este caso se utilizaron condiciones de contorno tipo I o Dirichlet (carga hidráulica impuesta), tipo II o Neuman (que se representa con la recarga) y tipo III o Cauchy (flujo condicionado por la variación de la carga hidráulica). La condición de contorno tipo I o de carga impuesta se debe utilizar con precaución, ya que el valor de la condición de frontera es el valor de inicio para el proceso iterativo.
- Respecto al análisis de sensibilidad paramétrica realizado entre los parámetros hidráulicos y los descensos calculados frente a los observados se encontró que el parámetro más sensible del modelo matemático es la conductividad o permeabilidad (K). Al tener variaciones dentro del orden de magnitud de este parámetro el resultado cambió drásticamente, con incrementos o disminución de los niveles en los depósitos cuaternarios. Durante la calibración el parámetro de coeficiente de almacenamiento (S) no varió.
- La calibración del modelo se realizó mezclando la calibración manual y el *software* acoplado FePEST V 7.0.6.2001. Se recomienda iniciar con la calibración manual y, una vez los parámetros no se puedan variar en magnitudes significativas, utilizar el *software* FePEST para obtener una calibración más exacta.

- El resultado de la calibración con las conductividades calculadas con FePEST por el método de puntos piloto fue la mejor. De los catorce puntos de observación definidos once quedaron dentro del rango de aceptación y sólo tres por fuera, con un error medio de 13,27. Se debe tener en cuenta que las calibraciones exactas son muy difíciles de realizar por las variables que intervienen en el sistema hidrogeológico.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Barrero, D. P. (2007). *Colombian sedimentary basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal*. Bogota: Agencia Nacional de Hidrocarburos – ANH - Edited and compiled by: ANH and B&M Exploration Ltda.
- Barreto, L., & Torres, L. (2015). *Estimación de caudales mensuales en la cuenca alta del Magdalena, usando métodos de transferencia*.
- Campbell, C. J., & Burgl, H. (1965). section through the Eastern Cordillera of Colombia.- Bulletin of the Geological Society of America, v.76(5),.
- CATHALAC. (2015). *Diplomado en aguas subterráneas para América latina y el caribe, Modelación hidrogeológica*. Panamá.
- CATHALAC. (2015). *Diplomado en aguas subterráneas para América latina y el caribe*. Panamá: CATHALAC.
- Diersch, H.-J. G. (2014). *FEFLOW, Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Hettner, A. (1892). Die Kordillere von Bogotá. Peterm. Mitt., Erg.
- Hubach, E. (1931). *Contribuciones a las unidades estratigráficas de Colombia*. En: *Compilación de estudios Geológicos oficiales en Colombia. Tomo XVI*. Bogotá.: Instituto geológico nacional Informe 1212.
- Hubach, E. (1957). *Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia*. Bogotá: Servicio geológico nacional Informe 1212.
- IDEAM. (2004). *Metodología cálculo índice de escases*. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM. (s.f.). <http://www.ideam.gov.co/web/agua/ia>.
- INGEOMINAS. (1988). *Memoria explicativa, Mapa geológico de Colombia escala 1:1.500.000*.
- Julivert, M. (1968). La estratigrafía del Cretáceo al W del Macizo de Santander (parte N del Valle Medio del Magdalena y región de Mesas y Cuestas). Paris: L'exique Stratigraphique International, CNRS - UISG.

- Kroonenberg, G. (1982). A Grenvillian granulite belt in the Colombian Andes and its relations to the Guiana Shield. *Geologie en Mijnbouw*, .
- Lopez, G. (2013). *Inventario de fuentes y mamantiales de término municipal de Almansa*. Albacete: Universidad de Castilla-La Mancha.
- MEGAOIL. (2014). *Estudio de impacto ambiental CPO 10 Sur* . Bogotá.
- MEGAOIL. (2014). *Estudio de impacto ambiental CPO10 Norte* . Bogotá.
- MEGAOIL. (2014). *Estudio de impacto ambiental Sokay* . Bogotá.
- MEGAOIL. (2014). *Estudio de impacto ambiental Taray* . Bogotá.
- MEGAOIL. (2014). *Estudio de impacto ambiental 50k*. Bogotá.
- MEGAOIL. (2014). *Estudio de impacto ambiental Avila*. Bogotá.
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (2014). *GUÍA METODOLÓGICA PARA LA FORMULACIÓN DE PLANES DE MANEJO AMBIENTAL DE ACUÍFEROS*.
- Morel evangelista, I. (2008). Los Manantiales. En A. Castillo Martín, *Manantiales de Andalucía* (págs. 28-35). Sevilla, España.
- Pérez, G., & Salazar, A. (1978). Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. *Geología Colombiana 10- UNIVERSIDAD NACIONAL*, 7-86.
- Pulido, G. O., & Gómez, V. L. (2001). *Geología de la Plancha 266 – Villavicencio, Escala 1:100000. Memoria explicativa*. INGEOMINAS.
- Reduction United Nations Office for Disaster Risk. (s.f.). Obtenido de <http://www.unisdr.org/we/inform/events/29510>
- Renzoni, G. (1968). Geología del Macizo de Quetame. *Geología Colombiana. No. 5, Universidad Nacional, Facultad de Ciencias, Bogotá*, 75-127.
- S.G.I L.t.d.a. (2015). *Estudio de impacto ambiental Cubarral*. Bogotá.
- Sánchez, J. (2012). *Clasificación de formaciones geológicas segun su comportamiento hidrogeológico*. España: Dpto Geología Universidad Salamanca.
- Segovia, A., & Renzoni, G. (1965). *Geología del cuadrángulo L-12, Medina, Servicio Geológico Nacional e Inventario Minero Nacional, Mapa geológico I: 200.000*.

- Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Memoria explicativa Plancha 1:100.000 285*. Bogotá.
- Smith, L., & Weathcraft, J. (1993). *Groundwater Flow*.
- Suescún, L. C. (2016). *Modelación analítica y numérica para predicción y calibración de caudales de infiltración en obras subterráneas - Túneles*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Toussaint, J. F. (1993). *Evolución Geológica de Colombia*. Universidad Nacional.
- Ulloa, C., & Rodríguez, E. (1976). *Mapa Geológico Preliminar – Plancha 170 Vélez (Escala 1:100000) y Reseña explicativa del Mapa Geológico Preliminar 170 Vélez*. INGEOMINAS.
- Ulloa, C., Pérez, E., & Balvis, B. (1988). *Actas unidades litoestratigráficas del Ordovícico de los llanos orientales de Colombia*.
- Ulloa, M. C., & Rodríguez, M. E. (1979). Geología del Cuadrángulo K – 12, Guateque. *Boletín Geológico*, 22, 1, 3 – 56.
- Velandia, F., Ferreira, P., Rodriguez, G., & Nuñez, A. (1996). *Memoria explicativa levantamiento geológico de la plancha 366-Garzon*. Bogota: INGEOMINAS.
- Villanueva Martínez, M., & Iglesias López, A. (1984). *Pozos y Acuíferos*. España: Instituto Geológico y Minero de España.

ANEXO 1. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO

Project: TESIS

Number:

Client:

Location:

Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA

Pumping Well: A EL JORDAN

Test Conducted by: SGI LTDA

Test Date: 4/02/2012

Discharge Rate: 1.13 [l/s]

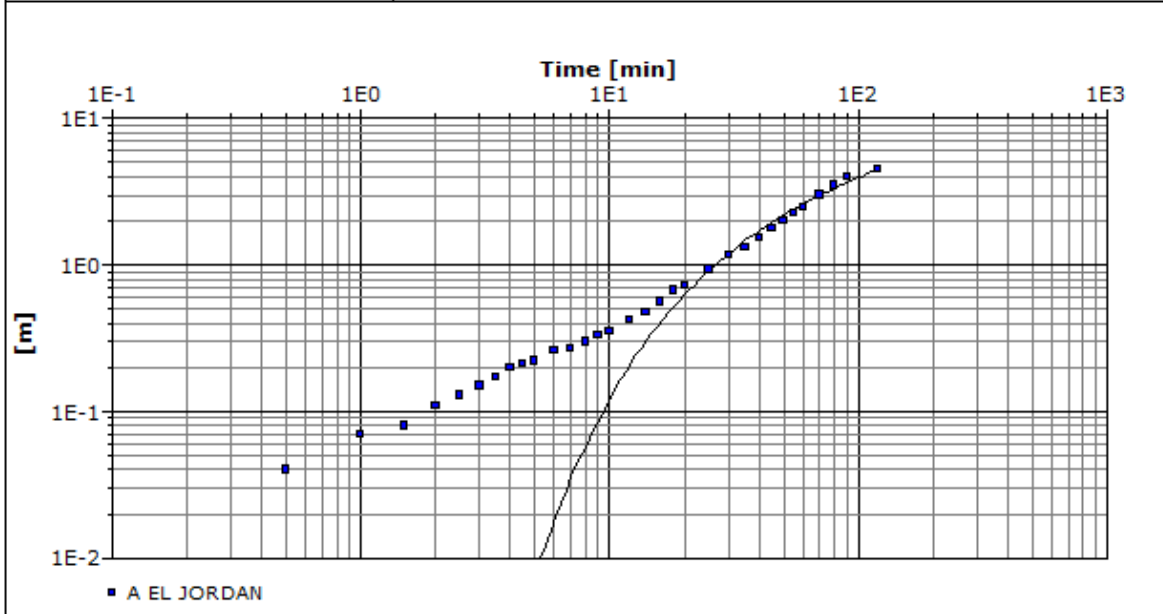
Observation Well: A EL JORDAN

Static Water Level [m]: 1.18

Radial Distance to PW [m]: -

	Time [min]	Water Level [m]	Drawdown [m]
1	0.5	1.22	0.04
2	1	1.25	0.07
3	1.5	1.26	0.08
4	2	1.29	0.11
5	2.5	1.31	0.13
6	3	1.33	0.15
7	3.5	1.35	0.17
8	4	1.38	0.20
9	4.5	1.39	0.21
10	5	1.40	0.22
11	6	1.44	0.26
12	7	1.45	0.27
13	8	1.48	0.30
14	9	1.51	0.33
15	10	1.53	0.35
16	12	1.60	0.42
17	14	1.66	0.48
18	16	1.74	0.56
19	18	1.85	0.67
20	20	1.91	0.73
21	25	2.12	0.94
22	30	2.34	1.16
23	35	2.50	1.32
24	40	2.72	1.54
25	45	2.95	1.77
26	50	3.20	2.02
27	55	3.44	2.26
28	60	3.68	2.50
29	70	4.19	3.01
30	80	4.69	3.51
31	90	5.17	3.99
32	120	5.69	4.51

TESIS MAESTRIA CARLOS MARIO		Pumping Test Analysis Report	
		Project: TESIS	
		Number:	
		Client:	
Location:	Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA	Pumping Well: A EL JORDAN	
Test Conducted by: SGI LTDA		Test Date: 4/02/2012	
Analysis Performed by:	EL JORDAN	Analysis Date: 31/07/2017	
Aquifer Thickness: 3.00 m	Discharge Rate: 1.13 [l/s]		

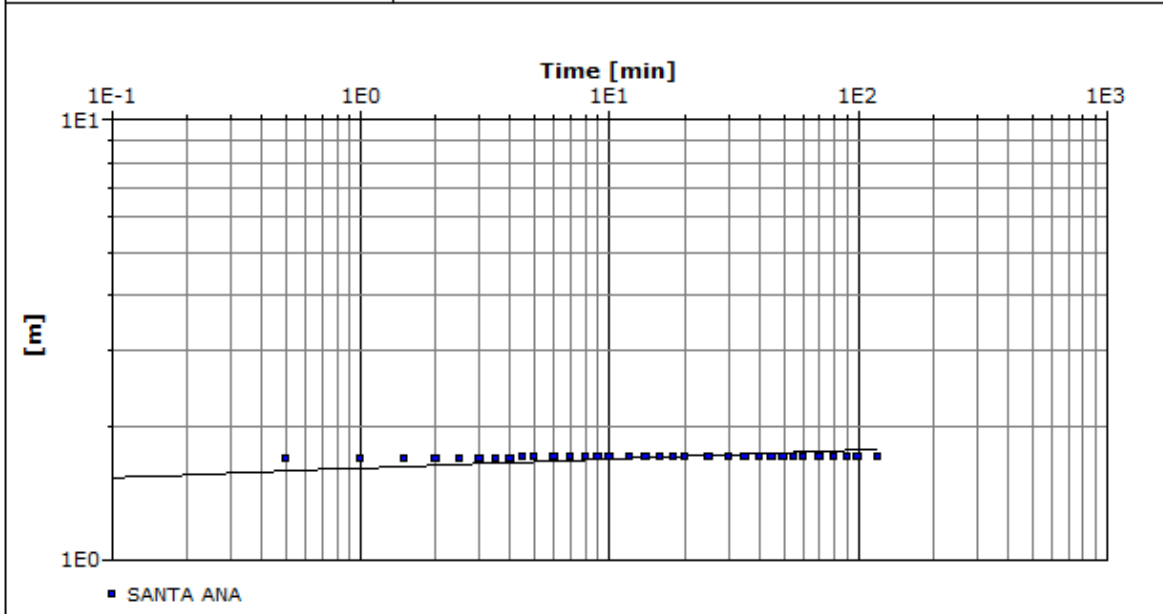


Calculation using Papadopoulos & Cooper

Observation Well	Transmissivity [m ² /d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]
A EL JORDAN	2.21×10^0	7.38×10^{-1}	9.57×10^{-2}	1.2

TESIS MAESTRIA CARLOS MARIO		Pumping Test - Water Level Data		Page 1 of 1
		Project: TESIS		
		Number:		
		Client:		
Location:		Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA	Pumping Well: SANTA ANA	
Test Conducted by:		Test Date: 4/02/2012	Discharge Rate: 0.5 [l/s]	
Observation Well: SANTA ANA		Static Water Level [m]: 2.22	Radial Distance to PW [m]: -	
	Time [min]	Water Level [m]	Drawdown [m]	
1	0	3.89	1.67	
2	0.5	3.91	1.69	
3	1	3.92	1.70	
4	1.5	3.92	1.70	
5	2	3.92	1.70	
6	2.5	3.92	1.70	
7	3	3.92	1.70	
8	3.5	3.92	1.70	
9	4	3.92	1.70	
10	4.5	3.93	1.71	
11	5	3.93	1.71	
12	6	3.93	1.71	
13	7	3.93	1.71	
14	8	3.93	1.71	
15	9	3.93	1.71	
16	10	3.93	1.71	
17	12	3.93	1.71	
18	14	3.93	1.71	
19	16	3.93	1.71	
20	18	3.93	1.71	
21	20	3.93	1.71	
22	25	3.93	1.71	
23	30	3.93	1.71	
24	35	3.93	1.71	
25	40	3.93	1.71	
26	45	3.93	1.71	
27	50	3.93	1.71	
28	55	3.93	1.71	
29	60	3.93	1.71	
30	70	3.93	1.71	
31	80	3.93	1.71	
32	90	3.93	1.71	
33	100	3.93	1.71	
34	120	3.93	1.71	

TESIS MAESTRIA CARLOS MARIO		Pumping Test Analysis Report	
		Project: TESIS	
		Number:	
		Client:	
Location:	Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA	Pumping Well: SANTA ANA	
Test Conducted by:		Test Date: 4/02/2012	
Analysis Performed by: SANTA ANA		Analysis Date: 31/07/2017	
Aquifer Thickness: 3.00 m		Discharge Rate: 0.5 [l/s]	

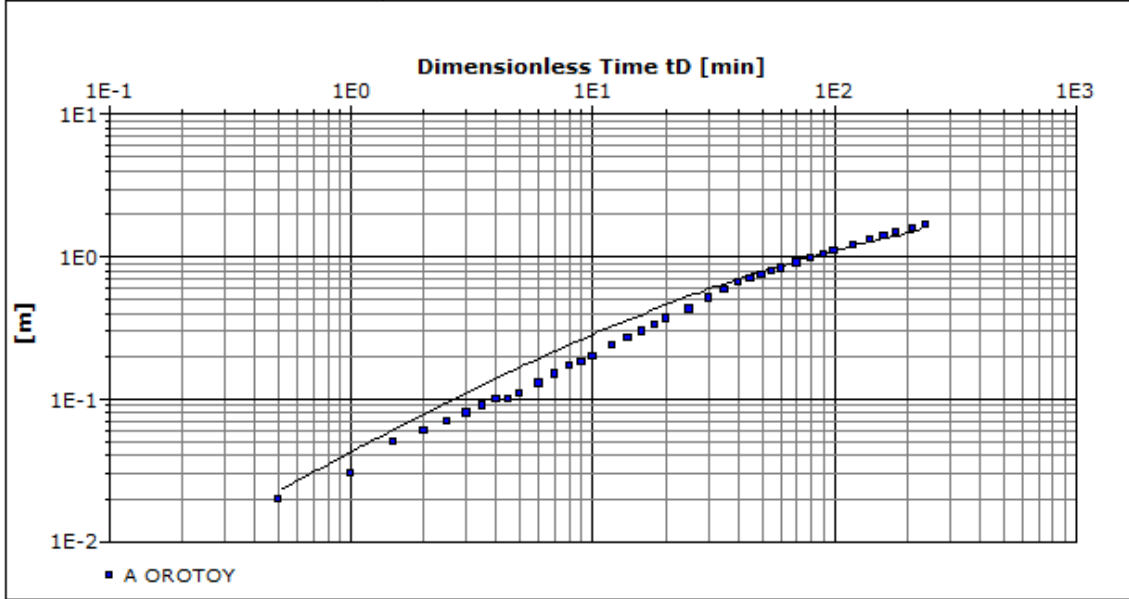


Calculation using Theis					
Observation Well	Transmissivity [m ² /d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Ratio K(v)/K(h)	Radial Distance to PW [m]
SANTA ANA	9.80×10^1	3.27×10^1	3.68×10^{-20}	1.00×10^{-3}	0.2

--	--	--	--	--	--

TESIS MAESTRIA CARLOS MARIO		Pumping Test - Water Level Data		Page 1 of 1
Project: TESIS				
Number:				
Client:				
Location:	Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA	Pumping Well: A OROTOY		
Test Conducted by:	Test Date: 4/02/2012	Discharge Rate: 0.56 [l/s]		
Observation Well: A OROTOY	Static Water Level [m]: 2.22	Radial Distance to PW [m]: -		
	Time [min]	Water Level [m]	Drawdown [m]	
1	0.5	2.24	0.02	
2	1	2.25	0.03	
3	1.5	2.27	0.05	
4	2	2.28	0.06	
5	2.5	2.29	0.07	
6	3	2.30	0.08	
7	3.5	2.31	0.09	
8	4	2.32	0.10	
9	4.5	2.32	0.10	
10	5	2.33	0.11	
11	6	2.35	0.13	
12	7	2.37	0.15	
13	8	2.39	0.17	
14	9	2.40	0.18	
15	10	2.42	0.20	
16	12	2.46	0.24	
17	14	2.49	0.27	
18	16	2.52	0.30	
19	18	2.55	0.33	
20	20	2.59	0.37	
21	25	2.65	0.43	
22	30	2.73	0.51	
23	35	2.81	0.59	
24	40	2.88	0.66	
25	45	2.92	0.70	
26	50	2.97	0.75	
27	55	3.01	0.79	
28	60	3.05	0.83	
29	70	3.12	0.90	
30	80	3.20	0.98	
31	90	3.26	1.04	
32	100	3.32	1.10	
33	120	3.43	1.21	
34	140	3.53	1.31	
35	160	3.61	1.39	
36	180	3.69	1.47	
37	210	3.80	1.58	
38	240	3.88	1.66	

TESIS MAESTRIA CARLOS MARIO		Pumping Test Analysis Report	
		Project: TESIS	
		Number:	
		Client:	
Location:	Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA	Pumping Well: A OROTOY	
Test Conducted by:		Test Date: 4/02/2012	
Analysis Performed by: OROTOY		Analysis Date: 31/07/2017	
Aquifer Thickness: 3.00 m		Discharge Rate: 0.56 [l/s]	



Calculation using Papadopulos & Cooper					
Observation Well	Transmissivity [m ² /d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]	
A OROTOY	6.22×10^0	2.07×10^0	9.90×10^{-1}	0.45	

Project: TESIS

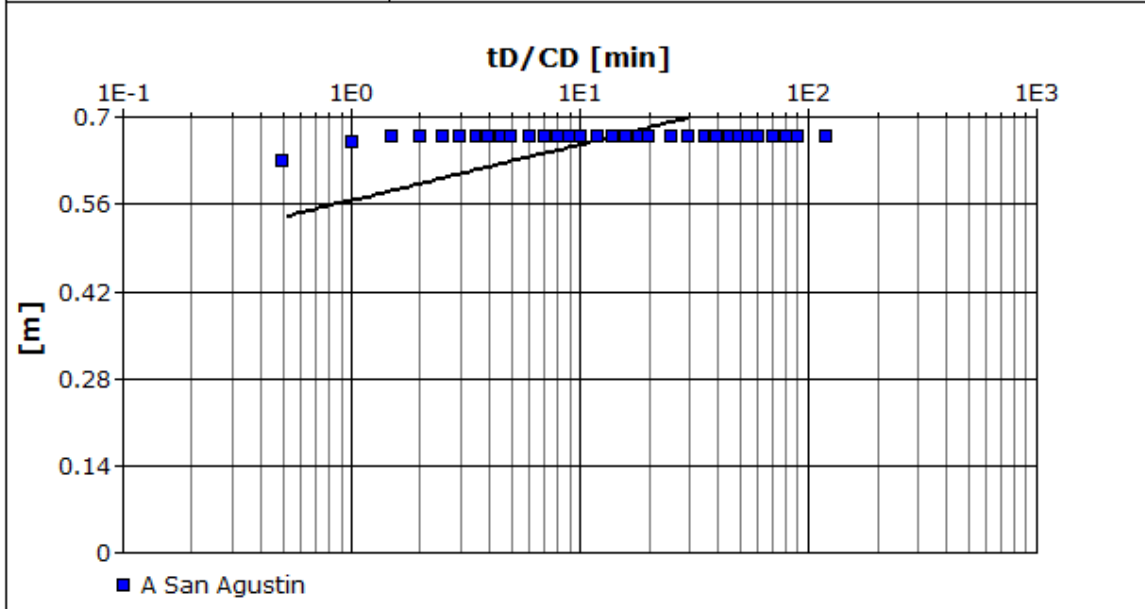
Number:

Client:

Location:	Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA	Pumping Well: A San Agustin
Test Conducted by:	Test Date: 4/02/2012	Discharge Rate: 1.06 [l/s]
Observation Well: A San Agustin	Static Water Level [m]: 2.09	Radial Distance to PW [m]: -

	Time [min]	Water Level [m]	Drawdown [m]
1	0.5	2.72	0.63
2	1	2.75	0.66
3	1.5	2.76	0.67
4	2	2.76	0.67
5	2.5	2.76	0.67
6	3	2.76	0.67
7	3.5	2.76	0.67
8	4	2.76	0.67
9	4.5	2.76	0.67
10	5	2.76	0.67
11	6	2.76	0.67
12	7	2.76	0.67
13	8	2.76	0.67
14	9	2.76	0.67
15	10	2.76	0.67
16	12	2.76	0.67
17	14	2.76	0.67
18	16	2.76	0.67
19	18	2.76	0.67
20	20	2.76	0.67
21	25	2.76	0.67
22	30	2.76	0.67
23	35	2.76	0.67
24	40	2.76	0.67
25	45	2.76	0.67
26	50	2.76	0.67
27	55	2.76	0.67
28	60	2.76	0.67
29	70	2.76	0.67
30	80	2.76	0.67
31	90	2.76	0.67
32	120	2.76	0.67

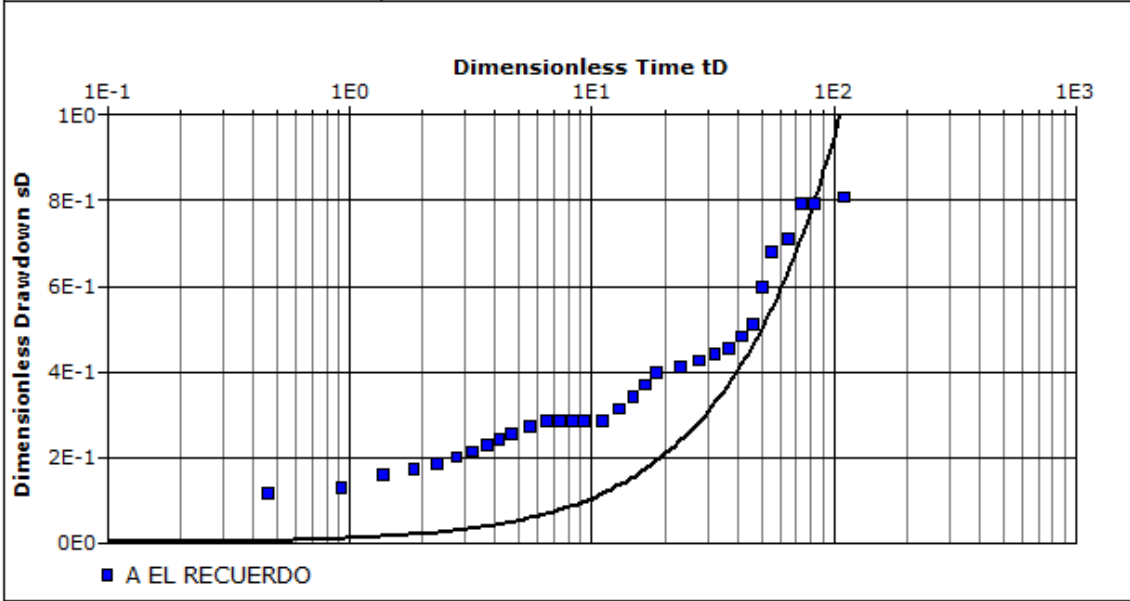
TESIS MAESTRIA CARLOS MARIO		Pumping Test Analysis Report	
		Project: TESIS	
		Number:	
		Client:	
Location:	Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA	Pumping Well: A San Agustin	
Test Conducted by:		Test Date: 4/02/2012	
Analysis Performed by:		Analysis Date: 1/08/2017	
New analysis 1		Discharge Rate: 1.06 [l/s]	
Aquifer Thickness: 3.00 m			



Calculation using Theis					
Observation Well	Transmissivity [m ² /d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]	
A San Agustin	1.87×10^2	6.23×10^1	1.00×10^{-7}	1.2	

TESIS MAESTRIA CARLOS MARIO		Pumping Test - Water Level Data		Page 1 of 1
		Project: TESIS		
		Number:		
		Client:		
Location:		Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA	Pumping Well: A EL RECUERDO	
Test Conducted by:		Test Date: 4/02/2012	Discharge Rate: 0.53 [l/s]	
Observation Well: A EL RECUERDO		Static Water Level [m]: 3.80	Radial Distance to PW [m]: -	
	Time [min]	Water Level [m]	Drawdown [m]	
1	0.5	3.88	0.08	
2	1	3.89	0.09	
3	1.5	3.91	0.11	
4	2	3.92	0.12	
5	2.5	3.93	0.13	
6	3	3.94	0.14	
7	3.5	3.95	0.15	
8	4	3.96	0.16	
9	4.5	3.97	0.17	
10	5	3.98	0.18	
11	6	3.99	0.19	
12	7	4.00	0.20	
13	8	4.00	0.20	
14	9	4.00	0.20	
15	10	4.00	0.20	
16	12	4.00	0.20	
17	14	4.02	0.22	
18	16	4.04	0.24	
19	18	4.06	0.26	
20	20	4.08	0.28	
21	25	4.09	0.29	
22	30	4.10	0.30	
23	35	4.11	0.31	
24	40	4.12	0.32	
25	45	4.14	0.34	
26	50	4.16	0.36	
27	55	4.22	0.42	
28	60	4.28	0.48	
29	70	4.30	0.50	
30	80	4.36	0.56	
31	90	4.36	0.56	
32	120	4.37	0.57	

TESIS MAESTRIA CARLOS MARIO		Pumping Test Analysis Report	
		Project: TESIS	
		Number:	
		Client:	
Location:	Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA	Pumping Well: A EL RECUERDO	
Test Conducted by:		Test Date: 4/02/2012	
Analysis Performed by:		EL RECUERDO	Analysis Date: 14/07/2017
Aquifer Thickness: 2.00 m		Discharge Rate: 0.53 [l/s]	

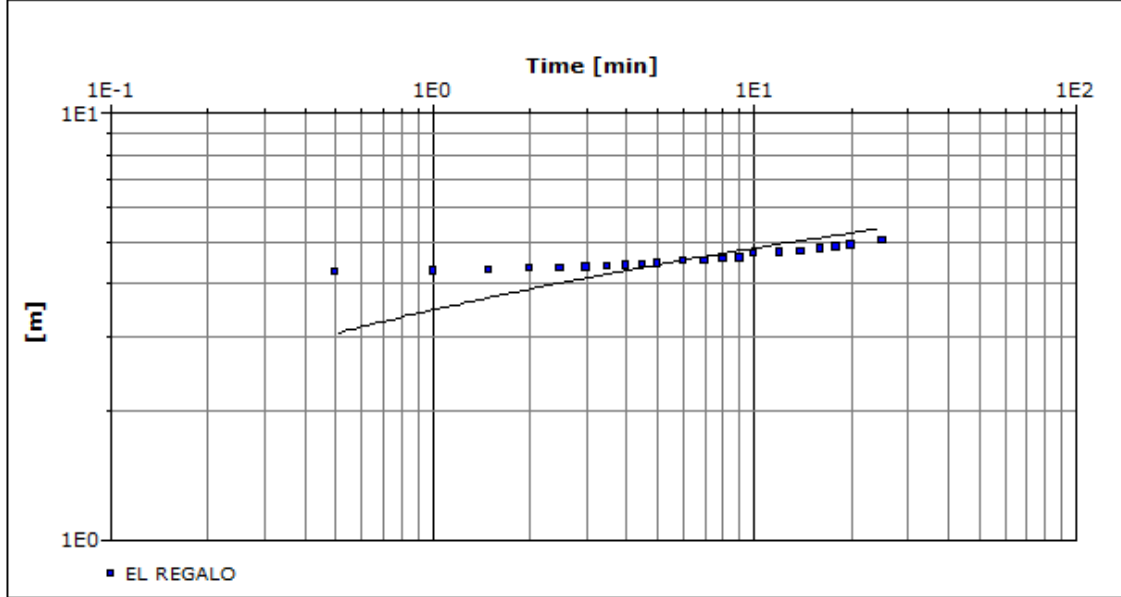


Calculation using Papadopolos & Cooper

Observation Well	Transmissivity [m ² /d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Well-bore storage coefficient	Radial Distance to PW [m]
A EL RECUERDO	5.16×10^0	2.58×10^0	2.68×10^{-3}	1.2

TESIS MAESTRIA CARLOS MARIO		Pumping Test - Water Level Data		Page 1 of 1
		Project: TESIS		
		Number:		
		Client:		
Location:		Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA	Pumping Well: EL REGALO	
Test Conducted by: SGI LTDA		Test Date: 4/02/2012	Discharge Rate: 0.98 [l/s]	
Observation Well: EL REGALO		Static Water Level [m]: 4.40	Radial Distance to PW [m]: -	
	Time [min]	Water Level [m]	Drawdown [m]	
1	0.5	8.65	4.25	
2	1	8.67	4.27	
3	1.5	8.68	4.28	
4	2	8.73	4.33	
5	2.5	8.75	4.35	
6	3	8.77	4.37	
7	3.5	8.79	4.39	
8	4	8.81	4.41	
9	4.5	8.83	4.43	
10	5	8.85	4.45	
11	6	8.90	4.50	
12	7	8.92	4.52	
13	8	8.96	4.56	
14	9	8.99	4.59	
15	10	9.10	4.70	
16	12	9.13	4.73	
17	14	9.15	4.75	
18	16	9.21	4.81	
19	18	9.26	4.86	
20	20	9.32	4.92	
21	25	9.43	5.03	

TESIS MAESTRIA CARLOS MARIO		Pumping Test Analysis Report	
		Project: TESIS	
		Number:	
		Client:	
Location:	Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA	Pumping Well: EL REGALO	
Test Conducted by: SGI LTDA		Test Date: 4/02/2012	
Analysis Performed by:	EL REGALO	Analysis Date: 31/07/2017	
Aquifer Thickness: 7.00 m	Discharge Rate: 0.98 [l/s]		

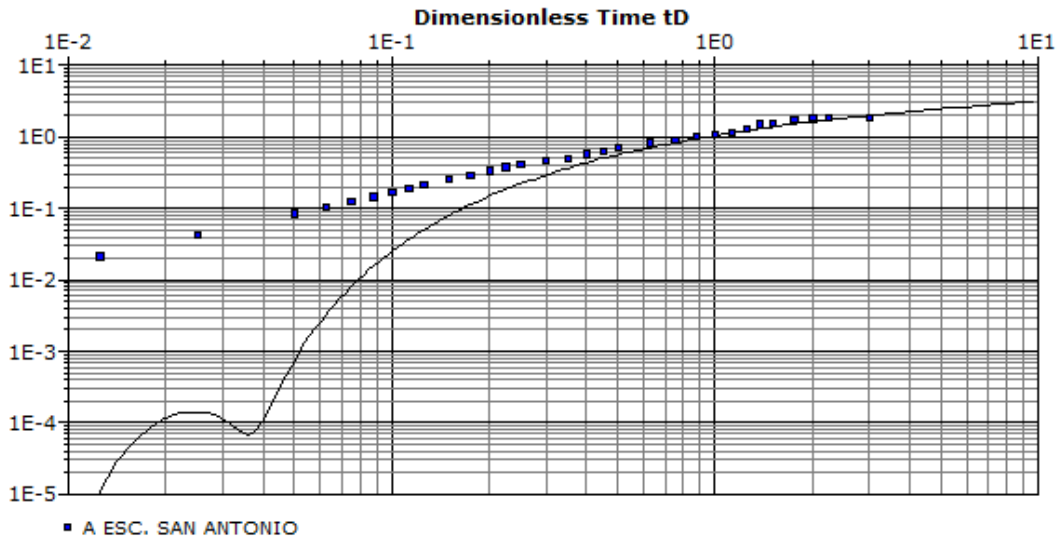


Calculation using Papadopoulos & Cooper

Observation Well	Transmissivity [m ² /d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Ratio K(v)/K(h)	Radial Distance to PW [m]
EL REGALO	1.13×10^{-1}	1.61×10^0	3.68×10^{-5}	1.00×10^{-1}	1.2

TESIS MAESTRIA CARLOS MARIO		Pumping Test - Water Level Data		Page 1 of 1
Location:		Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA		Pumping Well: A ESC. SAN ANTONIO
Test Conducted by: SGI LTDA		Test Date: 4/02/2012		Discharge Rate: 0.37 [l/s]
Observation Well: A ESC. SAN ANTONIO		Static Water Level [m]: 1.95		Radial Distance to PW [m]: -
	Time [min]	Water Level [m]	Drawdown [m]	
1	0.5	1.96	0.01	
2	1	1.97	0.02	
3	1.5	1.90	-0.05	
4	2	1.99	0.04	
5	2.5	2.00	0.05	
6	3	2.01	0.06	
7	3.5	2.02	0.07	
8	4	2.03	0.08	
9	4.5	2.04	0.09	
10	5	2.05	0.10	
11	6	2.07	0.12	
12	7	2.09	0.14	
13	8	2.11	0.16	
14	9	2.13	0.18	
15	10	2.15	0.20	
16	12	2.17	0.22	
17	14	2.19	0.24	
18	16	2.22	0.27	
19	18	2.25	0.30	
20	20	2.28	0.33	
21	25	2.34	0.39	
22	30	2.39	0.44	
23	35	2.44	0.49	
24	40	2.47	0.52	
25	45	2.51	0.56	
26	50	2.56	0.61	
27	55	2.67	0.72	
28	60	2.70	0.75	
29	70	2.77	0.82	
30	80	2.81	0.86	
31	90	2.82	0.87	
32	120	2.85	0.90	

TESIS MAESTRIA CARLOS MARIO		Pumping Test Analysis Report	
		Project: TESIS	
		Number:	
		Client:	
Location:	Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA	Pumping Well: A ESC. SAN ANTONIO	
Test Conducted by: SGI LTDA		Test Date: 4/02/2012	
Analysis Performed by:	SAN ANTONIO	Analysis Date: 31/07/2017	
Aquifer Thickness: 3.00 m	Discharge Rate: 0.37 [l/s]		



Calculation using Theis

Observation Well	Transmissivity [m ² /d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]
A ESC. SAN ANTONIO	5.19×10^0	1.73×10^0	9.90×10^{-2}	1.2

TESIS MAESTRIA CARLOS MARIO		Pumping Test - Water Level Data		Page 1 of 1
		Project: TESIS		
		Number:		
		Client:		
Location:		Pumping Test: CASTILLA LA NUEVA	Pumping Well: ARENALES	
Test Conducted by:		Test Date: 4/02/2012	Discharge Rate: 1.22 [l/s]	
Observation Well: ARENALES		Static Water Level [m]: 6.26	Radial Distance to PW [m]: -	
	Time [min]	Water Level [m]	Drawdown [m]	
1	1	6.31	0.05	
2	2	6.55	0.29	
3	3	6.59	0.33	
4	4	6.63	0.37	
5	5	6.67	0.41	
6	8	6.74	0.48	
7	10	6.78	0.52	
8	12	6.82	0.56	
9	15	6.84	0.58	
10	20	6.87	0.61	
11	25	6.89	0.63	
12	30	6.90	0.64	
13	40	6.93	0.67	
14	50	6.95	0.69	
15	60	6.97	0.71	
16	70	6.98	0.72	
17	80	6.98	0.72	
18	90	6.99	0.73	
19	100	6.99	0.73	
20	120	6.99	0.73	
21	140	7.00	0.74	
22	160	7.00	0.74	
23	180	7.01	0.75	
24	210	7.01	0.75	
25	240	7.01	0.75	
26	270	7.02	0.76	
27	300	7.02	0.76	
28	360	7.02	0.76	
29	420	7.03	0.77	
30	480	7.03	0.77	
31	540	7.03	0.77	

