

**MODELO NUMÉRICO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ABANICO ALUVIAL DE YOPAL
COMO HERRAMIENTA PARA REALIZAR UNA CORRECTA GESTIÓN DEL RECURSO
HÍDRICO**



SULMA MILENA CUTA GARCÍA

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
MAESTRÍA EN HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ - COLOMBIA**

2022

**MODELO NUMÉRICO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ABANICO ALUVIAL DE YOPAL
COMO HERRAMIENTA PARA REALIZAR UNA CORRECTA GESTIÓN DEL RECURSO
HÍDRICO**

Presentado por:

SULMA MILENA CUTA GARCÍA

Director:

Geólogo MSc. EFRÉN DAVID GÓMEZ ARÉVALO

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
MAESTRÍA EN HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ - COLOMBIA**

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de maestría “Modelo numérico de agua subterránea en el Abanico Aluvial de Yopal como herramienta para realizar una correcta gestión del recurso hídrico” presentado por la estudiante Sulma Milena Cuta García, para optar el título de Magister en Hidrogeología Ambiental de la Universidad Antonio Nariño, cumple con todos los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria.

Firma del director del trabajo de Maestría

Firma del Jurado

Firma del Jurado

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	24
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	26
2.1	ANTECEDENTES	26
2.2	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	28
2.2.1	<i>Formulación de la pregunta</i>	<i>28</i>
2.2.2	<i>Justificación</i>	<i>28</i>
3	LOCALIZACIÓN	30
4	OBJETIVOS	31
4.1	OBJETIVO GENERAL:	31
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	31
5	MARCO TEÓRICO	32
5.1	METODOLOGÍA GENERAL PARA LA EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS ...	33
5.1.1	<i>Geología</i>	<i>34</i>
5.1.2	<i>Exploración geofísica</i>	<i>35</i>
5.1.3	<i>Reconocimiento hidrogeológico</i>	<i>36</i>
5.1.4	<i>Perforaciones exploratorias</i>	<i>36</i>
5.1.5	<i>Evaluación Hidrodinámica</i>	<i>36</i>
5.1.6	<i>Caracterización Hidrogeoquímica</i>	<i>37</i>
5.1.7	<i>Caracterización hidrológica</i>	<i>38</i>
5.1.8	<i>Parámetros hidráulicos</i>	<i>38</i>
5.1.9	<i>Modelo hidrogeológico Conceptual</i>	<i>40</i>
5.1.10	<i>Modelo numérico</i>	<i>41</i>
5.2	SOFTWARES USADOS PARA MODELACIÓN NUMÉRICA:	43

6	METODOLOGÍA.....	49
6.1	RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL.....	50
6.1.1	<i>Mapa topográfico</i>	<i>51</i>
6.1.2	<i>Geología</i>	<i>51</i>
6.1.3	<i>Espesor, característica y límites de los acuíferos.....</i>	<i>55</i>
6.1.4	<i>Inventarios de puntos de agua.....</i>	<i>62</i>
6.1.5	<i>Direcciones de flujo</i>	<i>63</i>
6.2	HIDROLOGÍA.....	64
6.2.1	<i>Precipitación.....</i>	<i>64</i>
6.2.2	<i>Evapotranspiración</i>	<i>65</i>
6.2.3	<i>Cálculo de recarga potencial total anual</i>	<i>66</i>
6.3	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	67
6.3.1	<i>Definición de Unidades Hidrogeológicas.....</i>	<i>68</i>
6.4	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	70
6.4.1	<i>Software utilizado</i>	<i>70</i>
6.4.2	<i>Código numérico</i>	<i>71</i>
6.4.3	<i>Solucionador.....</i>	<i>72</i>
6.4.4	<i>Dominio de modelación.....</i>	<i>73</i>
6.4.5	<i>Condiciones de Fronteras</i>	<i>74</i>
6.4.6	<i>Parámetros hidráulicos</i>	<i>85</i>
6.5	CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO	86
6.5.1	<i>Paquete Head Observation</i>	<i>88</i>
7	RESULTADOS	91
7.1	SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO O PERMANENTE	91
7.1.1	<i>Balance hídrico</i>	<i>91</i>
7.1.2	<i>Carga hidráulica y tabla de agua</i>	<i>92</i>

7.2	SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO, ESCENARIO 1.....	95
7.2.1	<i>Balance hídrico</i>	95
7.2.2	<i>Carga hidráulica y tabla de agua</i>	96
7.2.3	<i>Escenario de bombeo</i>	100
7.3	SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO, ESCENARIO 2.....	103
7.3.1	<i>Balance hídrico</i>	103
7.3.2	<i>Resultados de carga hidráulica y tabla de agua</i>	104
7.3.3	<i>Escenario de bombeo</i>	107
7.4	CALIBRACIÓN DEL MODELO	110
7.4.1	<i>Análisis de sensibilidad</i>	110
8	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	112
8.1	SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO O PERMANENTE	112
8.1.1	<i>Balance hídrico</i>	112
8.1.2	<i>Carga hidráulica y tabla de agua</i>	112
8.2	SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO, ESCENARIO 1.....	114
8.2.1	<i>Balance hídrico</i>	114
8.2.2	<i>Carga Hidráulica y tabla de Agua</i>	115
8.2.3	<i>Escenario de bombeo</i>	117
8.3	SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO, ESCENARIO 2.....	119
8.3.1	<i>Balance hídrico</i>	119
8.3.2	<i>Escenario de bombeo</i>	122
8.4	CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	127
9	DISCUSIÓN	128
9.1	SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO O PERMANENTE	128
9.2	SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO.....	129
9.3	CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	131

10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	132
11	BIBLIOGRAFÍA.....	135
12	APÉNDICE.....	138
1	INTRODUCCIÓN	24
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	26
2.1	ANTECEDENTES.....	26
2.2	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	28
2.2.1	<i>Formulación de la pregunta.....</i>	<i>28</i>
2.2.2	<i>Justificación.....</i>	<i>28</i>
3	LOCALIZACIÓN	30
4	OBJETIVOS	31
4.1	OBJETIVO GENERAL:.....	31
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	31
5	MARCO TEÓRICO	32
5.1	METODOLOGÍA GENERAL PARA LA EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	33
5.1.1	<i>Geología.....</i>	<i>34</i>
5.1.2	<i>Exploración geofísica.....</i>	<i>35</i>
5.1.3	<i>Reconocimiento hidrogeológico.....</i>	<i>36</i>
5.1.4	<i>Perforaciones exploratorias.....</i>	<i>36</i>
5.1.5	<i>Evaluación Hidrodinámica.....</i>	<i>36</i>
5.1.6	<i>Caracterización Hidrogeoquímica.....</i>	<i>37</i>
5.1.7	<i>Caracterización hidrológica.....</i>	<i>38</i>
5.1.8	<i>Parámetros hidráulicos.....</i>	<i>38</i>
5.1.9	<i>Modelo hidrogeológico Conceptual.....</i>	<i>40</i>

5.1.10	<i>Modelo numérico</i>	41
5.2	SOFTWARES USADOS PARA MODELACIÓN NUMÉRICA:	43
6	METODOLOGÍA	49
6.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL.....	50
6.1.1	<i>Mapa topográfico</i>	51
6.1.2	<i>Geología</i>	51
6.1.3	<i>Espesor, característica y límites de los acuíferos</i>	55
6.1.4	<i>Inventarios de puntos de agua</i>	62
6.1.5	<i>Direcciones de flujo</i>	63
6.2	HIDROLOGÍA.....	64
6.2.1	<i>Precipitación</i>	64
6.2.2	<i>Evapotranspiración</i>	65
6.2.3	<i>Cálculo de recarga potencial total anual</i>	66
6.3	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	67
6.3.1	<i>Definición de Unidades Hidrogeológicas</i>	68
6.4	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	70
6.4.1	<i>Software utilizado</i>	70
6.4.2	<i>Código numérico</i>	71
6.4.3	<i>Solucionador</i>	72
6.4.4	<i>Dominio de modelación</i>	73
6.4.5	<i>Condiciones de Fronteras</i>	74
6.4.6	<i>Parámetros hidráulicos</i>	85
6.5	CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO	86
6.5.1	<i>Paquete Head Observation</i>	88
7	RESULTADOS	91
7.1	SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO O PERMANENTE	91

7.1.1	<i>Balance hídrico</i>	91
7.1.2	<i>Carga hidráulica y tabla de agua</i>	92
7.2	SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO, ESCENARIO 1.....	95
7.2.1	<i>Balance hídrico</i>	95
7.2.2	<i>Carga hidráulica y tabla de agua</i>	96
7.2.3	<i>Escenario de bombeo</i>	100
7.3	SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO, ESCENARIO 2.....	103
7.3.1	<i>Balance hídrico</i>	103
7.3.2	<i>Resultados de carga hidráulica y tabla de agua</i>	104
7.3.3	<i>Escenario de bombeo</i>	107
7.4	CALIBRACIÓN DEL MODELO	110
7.4.1	<i>Análisis de sensibilidad</i>	110
8	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	112
8.1	SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO O PERMANENTE	112
8.1.1	<i>Balance hídrico</i>	112
8.1.2	<i>Carga hidráulica y tabla de agua</i>	112
8.2	SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO, ESCENARIO 1.....	114
8.2.1	<i>Balance hídrico</i>	114
8.2.2	<i>Carga Hidráulica y tabla de Agua</i>	115
8.2.3	<i>Escenario de bombeo</i>	117
8.3	SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO, ESCENARIO 2.....	119
8.3.1	<i>Balance hídrico</i>	119
8.3.2	<i>Escenario de bombeo</i>	122
8.4	CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	127
9	DISCUSIÓN	128
9.1	SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO O PERMANENTE	128

9.2	SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO.....	129
9.3	CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	131
10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	132
11	BIBLIOGRAFÍA	135
12	APÉNDICE	138

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	30
FIGURA 2.	FLUJO DIAGRAMA CONCEPTUAL DE EXPLORACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	34
FIGURA 3.	RANGOS DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA,	39
FIGURA 4.	DIAGRAMA PARA CREAR UN MODELO CONCEPTUAL EN MOD-FLOW A PARTIR DE UN MODELO NUMÉRICO. 45	
FIGURA 5.	FLUJOGRAMA, METODOLOGÍA	49
FIGURA 6.	TOPOGRAFÍA	51
FIGURA 7.	GEOLOGÍA.....	52
FIGURA 8.	COLUMNA LITOLÓGICA DEL METRO 0 AL METRO 75.....	56
FIGURA 9.	COLUMNA LITOLÓGICA DEL METRO 76 AL METRO 172.....	57
FIGURA 10.	COLUMNA LITOLÓGICA DEL METRO 173 AL METRO 267	58
FIGURA 11.	COLUMNA LITOLÓGICA DEL METRO 268 AL METRO 365.	59
FIGURA 12.	COLUMNA LITOLÓGICA DEL METRO 366 AL METRO 460.	60
FIGURA 13.	COLUMNA LITOLÓGICA DEL METRO 461 AL METRO 555.	61
FIGURA 14.	INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA.....	62
FIGURA 15.	ISOPIEZAS Y DIRECCIÓN DE FLUJO ABANICO DE YOPAL (Q2AB).	64
FIGURA 16.	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN YOPAL.....	65
FIGURA 17.	MAPA DE ETP TOTAL ANUAL PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.	66
FIGURA 18.	RECARGA POTENCIAL DEL ÁREA DE ESTUDIO	66
FIGURA 19.	RECARGA POTENCIAL POR UNIDAD GEOLÓGICA EN EL ÁREA DE ESTUDIO	67

FIGURA 20.	MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL ABANICO ALUVIAL DE YOPAL (Q2AB)	69
FIGURA 21.	PERFIL ABANICO ALUVIAL DE YOPAL (Q2AB)	69
FIGURA 22.	PROCESAMIENTO EN SOFTWARE MODEL MUSE	70
FIGURA 23.	DOMINIO DE MODELACIÓN	73
FIGURA 24.	CAPAS DEL MODELO	74
FIGURA 25.	RECARGA DEL ÁREA DE ESTUDIO	75
FIGURA 26.	EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO	76
FIGURA 27.	RÍOS Y DRENAJES SENCILLOS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	77
FIGURA 28.	FRONTERA CAUCHY GHB.....	78
FIGURA 29.	PRUEBAS DE BOMBEO REALIZADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	79
FIGURA 30.	NIVELES PIEZOMÉTRICOS DE ALJIBES PARA CALIBRACIÓN	88
FIGURA 31.	CARGA HIDRÁULICA ESTADO ESTACIONARIO CON TRAZO DE PERFIL, CAPA A1	92
FIGURA 32.	PERFIL FRONTAL CON TABLA DE AGUA, CAPA A1	93
FIGURA 33.	PERFIL LADO, CAPA A1	93
FIGURA 34.	CARGA HIDRÁULICA ESTADO ESTACIONARIO CON TRAZO DE PERFIL, CAPA A2	94
FIGURA 35.	PERFIL FRONTAL CAPA A2	94
FIGURA 36.	PERFIL LADO, CAPA A2	95
FIGURA 37.	CARGA HIDRÁULICA A1, AÑO 1.....	96
FIGURA 38.	CARGA HIDRÁULICA A1, AÑO 4.....	96
FIGURA 39.	CARGA HIDRÁULICA A1, AÑO 10.....	96
FIGURA 40.	CARGA HIDRÁULICA A1, AÑO 15.....	96

FIGURA 41.	PERFIL FRONTAL A1 CON TABLA DE AGUA DEL AÑO 1 Y 15, CAPA A1.....	97
FIGURA 42.	PERFIL LADO, CAPA A1	98
FIGURA 43.	CARGA HIDRÁULICA A2, AÑO 1.....	98
FIGURA 44.	CARGA HIDRÁULICA A2, AÑO 4.....	98
FIGURA 45.	CARGA HIDRÁULICA A2, AÑO 10.....	98
FIGURA 46.	CARGA HIDRÁULICA A2, AÑO 15.....	98
FIGURA 47.	PERFIL FRONTAL, CAPA A2	99
FIGURA 48.	PERFIL LADO, CAPA A2	100
FIGURA 49.	CURVAS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 1	100
FIGURA 50.	RANGOS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 1.....	100
FIGURA 51.	CURVAS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 4	100
FIGURA 52.	RANGOS DE ABATIMIENTO, A1 AÑO 4.....	100
FIGURA 53.	CURVAS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 10	101
FIGURA 54.	RANGOS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 10.....	101
FIGURA 55.	RANGOS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 15.....	101
FIGURA 56.	RANGOS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 15.....	101
FIGURA 57.	CURVAS DE ABATIMIENTO A2, AÑO 1	102
FIGURA 58.	RANGOS DE ABATIMIENTO A2, AÑO 1.....	102
FIGURA 59.	CURVAS DE ABATIMIENTO A2, AÑO 4	102
FIGURA 60.	RANGOS DE ABATIMIENTO A2, AÑO 4.....	102
FIGURA 61.	CURVAS DE ABATIMIENTO A2, AÑO 10	102

FIGURA 62.	RANGOS DE ABATIMIENTO A2, AÑO 10.....	102
FIGURA 63.	CURVAS DE ABATIMIENTO A2, AÑO 15	102
FIGURA 64.	RANGOS DE ABATIMIENTO A2, AÑO 15.....	102
FIGURA 65.	CARGA HIDRÁULICA A1, AÑO 1.....	104
FIGURA 66.	CARGA HIDRÁULICA A1, AÑO 4.....	104
FIGURA 67.	CARGA HIDRÁULICA A1, AÑO 10.....	104
FIGURA 68.	CARGA HIDRÁULICA A1, AÑO 15.....	104
FIGURA 69.	PERFIL FRONTAL A1 CON TABLA DE AGUA DEL AÑO 1 Y 15, CAPA A1.....	105
FIGURA 70.	PERFIL LADO, CAPA A1	106
FIGURA 71.	CARGA HIDRÁULICA A2, AÑO 1.....	106
FIGURA 72.	CARGA HIDRÁULICA A2, AÑO 4.....	106
FIGURA 73.	CARGA HIDRÁULICA A2, AÑO 10.....	107
FIGURA 74.	CARGA HIDRÁULICA A2, AÑO 15.....	107
FIGURA 75.	CURVAS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 1	107
FIGURA 76.	RANGOS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 1.....	107
FIGURA 77.	CURVAS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 4	107
FIGURA 78.	RANGOS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 4.....	107
FIGURA 79.	CURVAS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 10	108
FIGURA 80.	RANGOS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 10.....	108
FIGURA 81.	CURVAS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 15	108
FIGURA 82.	RANGOS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 15.....	108

FIGURA 83.	CURVAS DE ABATIMIENTO A2, AÑO 1	109
FIGURA 84.	RANGOS DE ABATIMIENTO A2, AÑO 1.....	109
FIGURA 85.	CURVAS DE ABATIMIENTO A2, AÑO 4	109
FIGURA 86.	RANGOS DE ABATIMIENTO A2, AÑO 4.....	109
FIGURA 87.	CURVAS DE ABATIMIENTO A2, AÑO 10	109
FIGURA 88.	RANGOS DE ABATIMIENTO A2, AÑO 10.....	109
FIGURA 89.	CURVAS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 15	109
FIGURA 90.	RANGOS DE ABATIMIENTO A1, AÑO 15.....	109
FIGURA 91.	VALORES SIMULADOS VS VALORES OBSERVADOS.....	110
FIGURA 92.	GRAFICA DE BALANCE HÍDRICO ESTADO ESTACIONARIO	112
FIGURA 93.	CARGA HIDRÁULICA DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL.....	113
FIGURA 94.	CARGA HIDRÁULICA DEL MODELO HIDROGEOLOGICO NUMÉRICO	113
FIGURA 95.	DIRECCIÓN DEL FLUJO HIDRICO	113
FIGURA 96.	COMPARACIÓN DE ENTRADAS DEL BALANCE HÍDRICO AÑO 1 Y 15.....	114
FIGURA 97.	COMPARACIÓN DE SALIDAS DEL BALANCE HÍDRICO AÑO 1 Y AÑO 15.....	114
FIGURA 98.	DIFERENCIA HIDRAULICA A1, AÑO 1 Y AÑO 15.....	116
FIGURA 99.	DIFERENCIA HIDRAULICA A2, AÑO 1 Y AÑO 5.....	116
FIGURA 100.	DIFERENCIAS EN EL DESCENSO DEL NIVEL DE AGUA A1, ENTRE EL AÑO 1 Y 15.....	118
FIGURA 101.	DIFERENCIAS EN EL DESCENSO DEL NIVEL DE AGUA A2, ENTRE EL AÑO 1 Y 15.....	119
FIGURA 102.	COMPARACIÓN DE ENTRADAS DEL BALANCE HÍDRICO AÑO 1 Y 15.....	120
FIGURA 103.	COMPARACIÓN DE SALIDAS DEL BALANCE HÍDRICO AÑO 1 Y AÑO 15.....	120

FIGURA 104.	DIFERENCIA HIDRAULICA A1, AÑO 1 Y AÑO 15.....	121
FIGURA 105.	DIFERENCIA HIDRAULICA A2, AÑO 1 Y AÑO 5.....	122
FIGURA 106.	DIFERENCIAS EN EL DESCENSO DEL NIVEL DE AGUA A1, ENTRE EL AÑO 1 Y 15	126
FIGURA 107.	DIFERENCIAS EN EL DESCENSO DEL NIVEL DE AGUA A2, ENTRE EL AÑO 1 Y 15	127

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.	PUNTOS DE AGUA POR UNIDAD GEOLÓGICA.....	62
TABLA 2.	LEYENDA HIDROGEOLÓGICA.....	68
TABLA 3.	PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE POZOS PROFUNDOS – ESCENARIO 1.....	80
TABLA 4.	POZOS PROFUNDOS PARA ESCENARIO 2	82
TABLA 5.	VALORES DE CONDUCTIVIDAD USADOS EN EL MODELO	86
TABLA 6.	NIVELES PIEZOMÉTRICOS DE ALIBES PARA CALIBRACIÓN	89
TABLA 7.	BALANCE HÍDRICO.....	91
TABLA 8.	BALANCE HIDRICO AÑO 1 Y AÑO 15	95
TABLA 9.	BALANCE HIDRICO AÑO 1 Y AÑO 15	103
TABLA 10.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	111
TABLA 11.	PROFUNDIDAD DE DESCENSO	117
TABLA 12.	PROFUNDIDAD DE DESCENSO ENTRE EL AÑO 1 Y AÑO 15	122
TABLA 1.	PUNTOS DE AGUA POR UNIDAD GEOLÓGICA.....	62
TABLA 2.	LEYENDA HIDROGEOLÓGICA.....	68
TABLA 3.	PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE POZOS PROFUNDOS – ESCENARIO 1.....	80
TABLA 4.	POZOS PROFUNDOS PARA ESCENARIO 2	82
TABLA 5.	VALORES DE CONDUCTIVIDAD USADOS EN EL MODELO	86
TABLA 6.	NIVELES PIEZOMÉTRICOS DE ALIBES PARA CALIBRACIÓN	89
TABLA 7.	BALANCE HÍDRICO	91

TABLA 8.	BALANCE HIDRICO AÑO 1 Y AÑO 15.....	95
TABLA 9.	BALANCE HIDRICO AÑO 1 Y AÑO 15.....	103
TABLA 10.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	111
TABLA 11.	PROFUNDIDAD DE DESCENSO.....	117
TABLA 12.	PROFUNDIDAD DE DESCENSO ENTRE EL AÑO 1 Y AÑO 15.....	122

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios por la vida y por permitirme terminar este proceso académico.

Al profesor Geólogo MSc Efrén David Gómez Arévalo, por dirigir la presente tesis, ya que; sin su apoyo, horas de dedicación, esfuerzo y aportes de conocimiento, no hubiese sido posible desarrollar el presente trabajo en el tiempo ejecutado, al profesor PhD Andrew S. Reeve por sus aportes, y recomendaciones de ajustes.

A mi esposo Daniel Combariza y mi madre Nubia García por su amor, comprensión y constante motivación.

También agradezco a la Universidad Antonio Nariño (UAN) por contar con el programa de Maestría en Hidrogeología Ambiental y al director y coordinador Andrés Carvajal por la gran disposición y atención a las consultas requeridas, así como darle continuidad al programa en tiempos de pandemia por el COVID 19.

RESUMEN

El crecimiento poblacional y el colapso de la Planta de Tratamiento de Agua Potable desde el año 2011 en el municipio de Yopal ha ocasionado que la fuente principal de abastecimiento sean las aguas subterráneas, mediante la explotación de acuíferos a través de pozos, aljibes y manantiales, aumentando significativamente la demanda para diferentes usos como agrícola, pecuario, industrial y principalmente consumo humano, dada la problemática de escasez de agua y la necesidad de realizar una adecuada gestión de recurso hídrico subterráneo. En el presente estudio se realizó una modelación numérica del abanico aluvial de Yopal (Qab) a partir de información secundaria del modelo hidrogeológico conceptual con el fin de predecir comportamientos futuros del acuífero, que puedan ser utilizados como base en la toma de decisiones y estudios asociados a la administración del recurso hídrico subterráneo.

El modelo numérico es una herramienta para la gestión de aguas subterráneas en el municipio de Yopal que permitió comprender las aguas subterráneas a nivel regional y evaluar escenarios predictivos. Para la elaboración del modelo se seleccionó como dominio de modelación un área de 344998133.17 m², la cual corresponde al área de abanico aluvial de Yopal, en este dominio se definió una grilla o cuadrícula numérica de 500 m, y dos (2) capas que se extiende desde la superficie, hasta una primera capa de 219 m de profundidad que corresponde a la unidad hidrogeológica A1 conformada la unidad geológica abanico aluvial (Q2ab) y depósitos de Planicie aluvial (Q1pal) y una segunda capa que corresponde a la unidad hidrogeológica A2 conformada por la formación Caja (N1c) modelada a una profundidad de 500 m.

La topografía del área de estudio fue modelada con un modelo de elevación digital DEM de la NASA (proyecto SRTM) con resolución espacial de 30x30 metros.

Se asignaron cinco (5) tipos de condiciones de frontera con datos de recarga, evapotranspiración, conductancia de los ríos Charte, Cravo Sur y Río meta y valores de

bombeo de 33 pozos profundos para el escenario uno y 109 pozos profundos para el escenario dos.

El flujo de aguas subterráneas en el abanico de Yopal se representó numéricamente a través del código MODFLOW 2005 del Servicio Geológico de Estados Unidos el cual emplea un método de resolución numérica de diferencias finitas que simula flujos de aguas subterráneas en régimen permanente y transiente. El modelo numérico en estado permanente valida la información del modelo conceptual contribuyendo en la cuantificación de la incertidumbre inherente a la conceptualización misma, obteniéndose en la calibración del modelo un RMS de 6.28%. Las simulaciones en estado transitorio en el abanico aluvial de Yopal permitieron simular las variables inmersas en el modelo a lo largo del tiempo en un periodo de quince (15) años y predecir los cambios de carga hidráulica y abatimiento en el acuífero, observándose descensos de hasta trece (13) metros de profundidad los cuales a partir del quinto año se estabilizan comportándose el acuífero a partir de este periodo de tiempo como un régimen cuasi permanente.

En la simulación de los bombeos actuales en el municipio de Yopal, se observa decaimiento a futuro de la carga hidráulica lo cual deberá ser validado a través mediciones piezométricas y pruebas de bombeo a los pozos profundos, que permitirán mejorar el entendimiento del acuífero, y validar y utilizar el modelo como herramienta predictiva.

ABSTRACT

Population growth and the collapse of the Potable Water Treatment Plant since 2011 in the municipality of Yopal has caused the main source of supply to be groundwater, through the exploitation of aquifers through wells, cisterns and springs. significantly increasing the demand for different uses such as agriculture, livestock, industry and mainly human consumption, given the problem of water scarcity and the need to carry out adequate management of underground water resources. In the present study, a numerical modeling of the Yopal alluvial fan (Qab) was carried out based on secondary information from the conceptual hydrogeological model in order to predict future behavior of the aquifer, which can be used as a basis for decision-making and associated studies. to the administration of groundwater resources.

The numerical model is a tool for groundwater management in the municipality of Yopal that allowed understanding groundwater at the regional level and evaluating predictive scenarios. For the elaboration of the model, an area of 344998133.17 m² was selected as a modeling domain, which corresponds to the Yopal alluvial fan area. In this domain, a grid or numerical grid of 500 m was defined, and two (2) layers that were It extends from the surface to a first layer 219 m deep that corresponds to the A1 hydrogeological unit made up of the alluvial fan geological unit (Q2ab) and alluvial plain deposits (Q1pal) and a second layer that corresponds to the A2 hydrogeological unit made up of by the Caja formation (N1c) modeled at a depth of 500 m.

The topography of the study area was modeled with a NASA DEM digital elevation model (SRTM project) with a spatial resolution of 30x30 meters.

Five (5) types of boundary conditions were assigned with data on recharge, evapotranspiration, conductance of the Charste, Cravo Sur and Río meta rivers and pumping values of 33 deep wells for scenario one and 109 deep wells for scenario two.

Groundwater flow in the Yopal fan was represented numerically through the United States Geological Survey MODFLOW 2005 code, which uses a finite-difference numerical resolution method that simulates steady-state and transient groundwater flows. The numerical model in permanent state helped to interpret the information of the conceptual model contributing in the quantification of the uncertainty inherent to the conceptualization itself, obtaining in the calibration of the model an RMS of 6.28%. The simulations in a transitory state in the Yopal alluvial fan allowed simulating the variables immersed in the model over time in a period of fifteen (15) years and predicting changes in hydraulic load and depletion in the aquifer, observing decreases of up to thirteen (13) meters deep, which after the fifth year stabilize, the aquifer behaving as of this period of time as a quasi-permanent regime.

In the simulation of the current pumping in the municipality of Yopal, a future decay of the hydraulic load is observed, which must be validated through piezometric measurements and pumping tests to deep wells, which will improve the understanding of the aquifer, and validate and use the model as a predictive tool.

1 INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un recurso natural que constituye la principal reserva de agua dulce no congelada del planeta (Feth, 1973). Este recurso es utilizado principalmente para el abastecimiento de agua potable, desde pequeñas viviendas hasta aglomeraciones urbanas.

El uso de este recurso se ha incrementado por el aumento de la densidad poblacional, el agotamiento de fuentes superficiales y la contaminación de las mismas; en la actualidad se estima que más de la mitad de la población mundial depende del agua subterránea (Coughanowr & Gladwell, 1992). Grandes ciudades como Bangkok, Mombasa, Buenos Aires, Miami, Calcuta y Ciudad de México usan el agua subterránea para el abastecimiento de su población (Vélez, 1999).

La alta explotación del recurso hídrico en algunas ocasiones genera cambios en las condiciones naturales del terreno y problemas futuros en el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo. Algunos autores llaman “sobreexplotación” a este uso intensivo del agua subterránea, mientras que otros, por razones técnicas y de interpretación, lo denominan explotación intensiva del recurso (Custodio & LLamas, 1996), lo que puede llegar a generar cambios en las condiciones naturales del terreno y futuros problemas en el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo.

En Colombia el estado del conocimiento referente al agua subterránea sigue siendo incipiente porque se encuentra a un nivel muy general para determinar a detalle el aporte hidrogeológico (IDEAM, 2015). Por lo que se hace necesario para el país, que existan profesionales competentes en el estudio y conocimiento del agua subterránea, ya que esto permite una solución casi inmediata para resolver los conflictos por el uso del agua, el cual

cada vez cobra mayor importancia a nivel nacional y mundial, tanto por factores actuales como el cambio climático, como por el inadecuado uso, siendo el factor antrópico el de mayor afectación al ciclo hidrológico.

En este trabajo de maestría se realizó un modelo numérico del abanico aluvial del municipio de Yopal a partir de la información secundaria existente en el “Modelo hidrogeológico conceptual del Servicio Geológico Colombiano del año 2018” con el fin de identificar escenarios futuros de abastecimiento de agua subterránea.

En la elaboración del modelo numérico hidrogeológico, los escenarios buscan identificar los posibles impactos al abanico aluvial que se puedan llegar a presentar por la explotación subterránea del recurso hídrico.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 ANTECEDENTES

El municipio de Yopal se localiza en la cuenca hidrográfica del río Cravo Sur, en la cordillera oriental colombiana, en el piedemonte llanero siendo este un lugar de procesos geomorfológicos activos, tales como; los de erosión, desestabilización y sedimentación de las rocas parentales de la cordillera oriental, en donde se encuentra Yopal.

En el año 2013 el Servicio Geológico Colombiano elaboró el Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia, el cual presenta en forma resumida la situación de este recurso en el país, en cuanto a su localización y las características geomorfológicas, geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas plasmadas en mapas temáticos, los cuales cuentan con varios niveles de información que se representan en planchas a Escala 1:500000.

El mes mayo del año 2011, según registros meteorológicos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el municipio de Yopal tuvo el pico más alto de precipitación 528.63 mm y esto propicio fisuras que permitieron infiltrar y acumular grandes cantidades de agua en las laderas de los cerros que cubren el municipio de Yopal, estos depósitos de agua generaron la recarga del talud que llevaron a una falla rotacional propiciando desprendimientos de grandes masas de terreno del Cerro de Buenavista donde funcionaba y operaba la Planta de Tratamiento de Agua Potable PTAP. (Felipe & Vargas, 2021).

De acuerdo al informe de la Alcaldía de Yopal y la EAAAY, el 29 mayo del año 2011 inicia la crisis por el agua potable en Yopal, debido a causa de un movimiento geológico de tipo

rotacional con tendencia retrogresiva que llevó a la destrucción de la única PTAP, acabando con la prestación continua del servicio a los hogares del municipio.

Lo que conlleva a que la población Yopaleña incrementara en la demanda del recurso hídrico subterránea ya que esta ciudad cuenta con crecimiento poblacional del 7.5% anual durante el periodo 1993-2005 y 4.9% anual durante el periodo 2005-2018 (Datos Dane Censo 2018) tasas muy superiores 2.8% del promedio departamental; al 1.01% del promedio nacional y el 0.9% de ciudades mayores como Bogotá, Medellín, Cali.

Dada la problemática de escasez de agua presentada en el municipio de Yopal y con el fin de buscar alternativas y conocer detalladamente el potencial de agua subterránea almacenada en el subsuelo de todo el municipio, las áreas de recarga y la calidad de las mismas, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en el año 2018 entregó el Modelo Hidrogeológico Conceptual del municipio de Yopal (MHCY) a las autoridades locales y regionales del departamento del Casanare.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El municipio de Yopal Casanare cuenta con un acuífero libre el cual a causa del colapso de la planta de tratamiento de agua potable y el crecimiento poblacional ha venido siendo explotado a través de pozos, aljibes y manantiales, aumentando significativamente la demanda para diferentes usos como agrícola, pecuario, industrial y principalmente consumo humano, creciendo de manera exponencial el número de pozos profundos desde año 2011 a la fecha, lo cual se puede observar en el modelo hidrogeológico presentado por el Servicio Geológico Colombiano en el año 2018, es por esta razón que se hace necesario realizar el modelo hidrogeológico numérico del municipio de Yopal que predecir comportamientos futuros del acuífero en el abanico aluvial de Yopal y que permita a las entidades territoriales (Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia, alcaldía municipal de Yopal y gobernación del departamento de Casanare) administrar de forma sostenible el agua subterránea.

2.2.1 Formulación de la pregunta

¿Cuáles son los escenarios futuros de abastecimiento de agua subterránea en el abanico aluvial de Yopal?

2.2.2 Justificación

El agua subterránea es un recurso natural de gran importancia en el desarrollo de la sociedad, siendo una alternativa para el consumo humano en las zonas con problemas de suministro de agua potable (Ramos Monroy, 2021).

El crecimiento poblacional y el colapso de la Planta de Tratamiento de Agua Potable en el municipio de Yopal ha ocasionado que actualmente, el agua subterránea sea la principal fuente de abastecimiento del municipio de Yopal, siendo usado para diferentes usos como agrícola, pecuario, industrial y principalmente consumo humano los cuales se obtienen mediante la explotación de pozos, aljibes y manantiales. No obstante el recurso hídrico subterráneo no es ilimitado y la sobre explotación del abanico aluvial de Yopal puede generar a mediano y largo plazo la afectación del acuífero, por el aumento de los costes de bombeo al descender el nivel freático, disminución de la productividad de pozos subterráneos, hundimiento del terreno, deterioro de la calidad de las aguas subterráneas entre otras afectaciones.

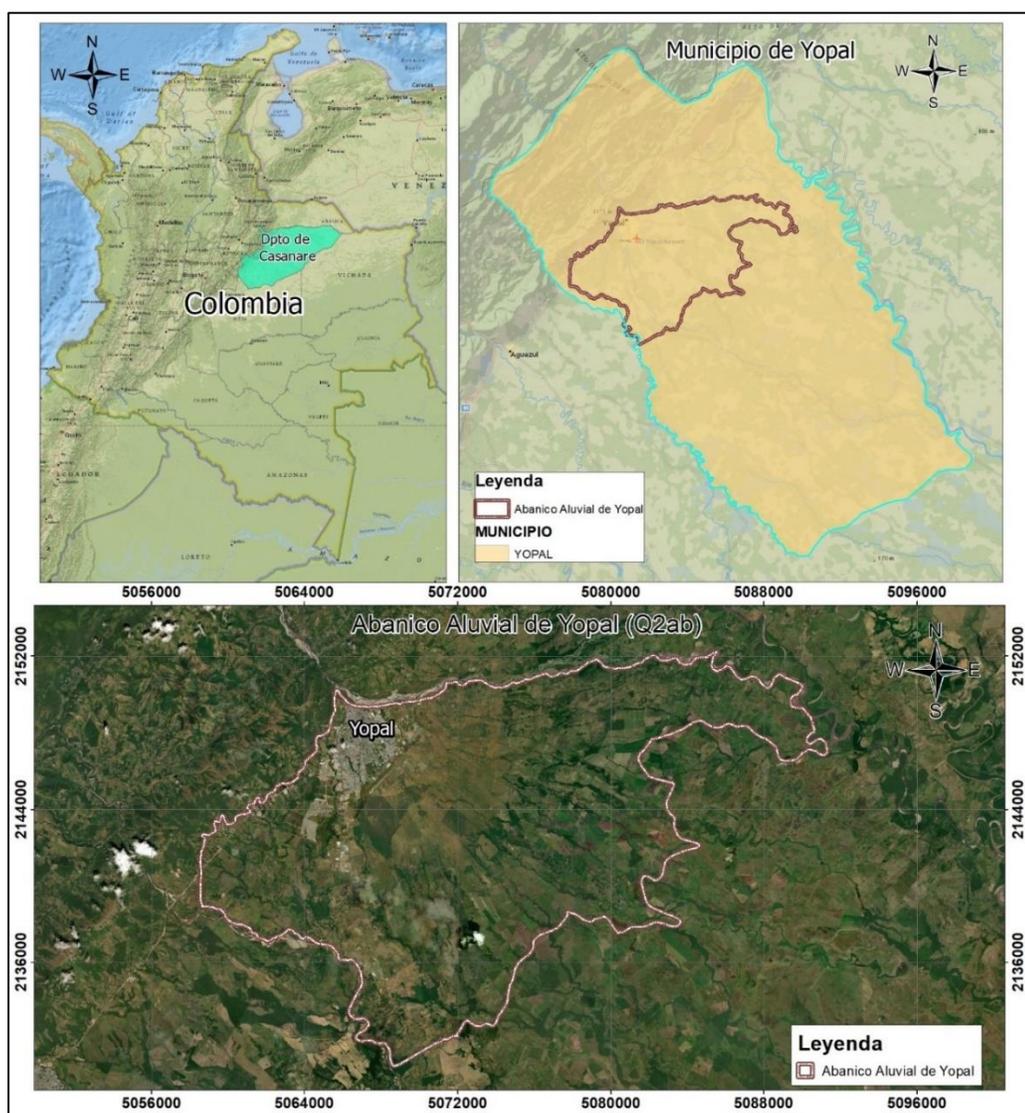
El presente trabajo se orientó en el desarrollo de un Modelo Hidrogeológico numérico, en el abanico aluvial de Yopal, a partir de la información secundaria existente “modelo hidrogeológico conceptual del Servicio Geológico Colombiano del año 2018” con el fin de predecir comportamientos futuros del acuífero, que puedan ser utilizados como base en la toma de decisiones y estudios asociados a la administración del recurso hídrico subterráneo.

Desde el punto de vista académico es un ejercicio para la aplicación de los conocimientos adquiridos durante la maestría en Hidrogeología Ambiental, integrando diferentes disciplinas, obteniendo una visión general de la generación de un Modelo Hidrogeológico numérico con información obtenida a través de un modelo hidrogeológico conceptual.

3 LOCALIZACIÓN

El área de estudio corresponde al abanico aluvial el cual se localiza en el municipio de Yopal, departamento de Casanare, en el piedemonte de la cordillera Oriental (ver **Figura 1**), el abanico aluvial cuyo ápice se encuentra en la salida del río Cravo Sur hace parte de las subzonas hidrográficas del río Cravo Sur y subzona hidrográfica del Río Cusiana y directos al Meta entre río Cusiana y río Cravo Sur delimitada por el IDEAM.

Figura 1. Localización del área de estudio



Fuente: Autor

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL:

Realizar modelación numérica del abanico aluvial de Yopal (Qab) a partir de información secundaria del modelo hidrogeológico conceptual con el fin de predecir comportamientos futuros del acuífero, que puedan ser utilizados como base en la toma de decisiones y estudios asociados a la administración del recurso hídrico subterráneo.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- ✓ Colectar, organizar y analizar mediante métodos heurísticos y hermenéuticos la información y datos geológicos, geofísicos, hidrológicos, hidráulica, disponible en las diferentes fuentes bibliográficas consultadas de entidades públicas, como insumo para el modelo hidrogeológico numérico.
- ✓ Determinará las condiciones de fronteras del sistema de aguas subterráneas.
- ✓ Realizar la implementación de un modelo matemático con MODFLOW y observar el comportamiento de las aguas subterráneas de área de estudio.
- ✓ Calibrar el modelo matemático y predecir mediante modelación numérica (MODFLOW) comportamientos futuros del área de estudio.

5 MARCO TEÓRICO

El continuo crecimiento poblacional, la creación de industrias de diversos tipos y la concentración de individuos en espacios reducidos, requieren de abastecimiento de agua suficiente y de buena calidad. En muchas ciudades el agua subterránea es la fuente principal del suministro para la población. A su vez, las actividades antropogénicas vierten grandes volúmenes de aguas residuales y efluentes industriales. (Dávila & Gómez, 2011).

La hidrogeología urbana, es capaz de explicar el comportamiento hidrodinámico de los acuíferos en las peculiares características de las áreas urbanas y en su diversidad de situaciones e interrelaciones entre las aguas subterráneas y el conjunto de edificaciones, espacios, vías de comunicación, dispositivos y servicios que conforman una ciudad. (Dávila & Gómez, 2011).

Dada la dependencia de las aguas subterráneas de muchas de las principales zonas de producción alimentaria, el descenso de nivel de los acuíferos y la extracción continuada de aguas subterráneas no renovables supone un riesgo cada vez mayor para la producción de alimentos a escala local y mundial. (FAO, 2011)

Para entender la circulación de agua subterránea en el subsuelo se necesita definir lo que se conoce como modelo hidrogeológico conceptual, el cual permite identificar las condiciones de recarga y descarga del agua, las características litológicas y geométricas de la roca permeable, las secuencias estratigráficas y las respectivas condiciones hidrogeológicas locales: direcciones de flujo del agua subterránea, gradientes hidráulicos, transmisividad y capacidad de almacenamiento, entre otras. (Vélez et al., 2011)

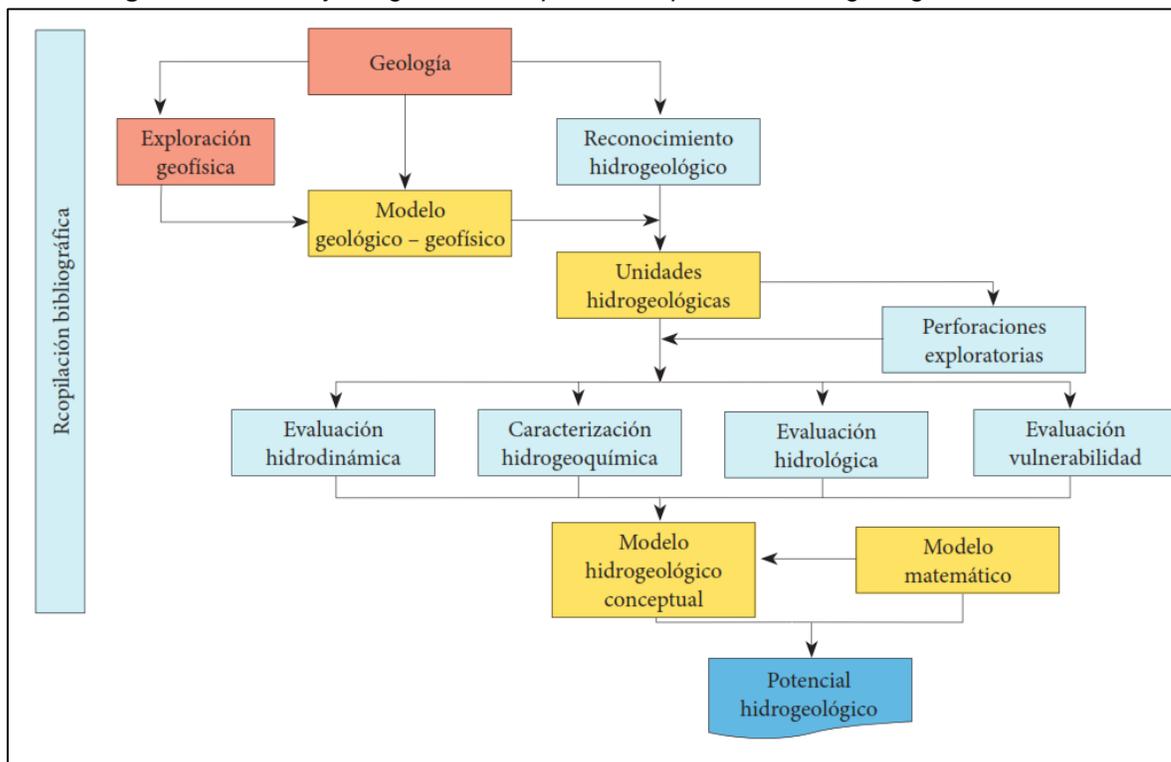
Es por esto que los modelos conceptuales, en principio, y matemáticos calibrados, resultan ser fundamentales, ya que constituyen la herramienta básica a través de la cual se puede evaluar y predecir el comportamiento de las aguas subterráneas.(Mejías D. et al., 2011).

5.1 METODOLOGÍA GENERAL PARA LA EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

INGEOMINAS hoy Servicio Geológico Colombiano, definió en el año 2004 pautas claras para la exploración y evaluación de aguas subterráneas, en el documento Programa de Exploración de Aguas Subterráneas, en el cual se indica que la exploración regional de aguas subterráneas comprende todos los estudios encaminados a la localización, definición de las dimensiones y caracterización de las zonas favorables para la acumulación de aguas subterráneas. Al respecto existe una metodología con estándares internacionales y con suficiente difusión en documentos técnicos.

El nivel de evaluación y el alcance de la exploración hidrogeológica dependen de la escala de trabajo, los estudios de exploración hidrogeológica regional son trabajos interdisciplinarios con metodologías bien definidas, que deben tener un orden secuencial en su realización, ya que cada una de las fases aporta información fundamental e indispensable, para esto se deben cumplir las siguientes etapas:

Figura 2. Flujo diagrama conceptual de exploración hidrogeológica



Fuente: Ingeominas, 2004

5.1.1 Geología

La geología es la información base para los estudios hidrogeológicos, ya que define las propiedades de las rocas y las estructuras geológicas favorables para almacenar aguas subterráneas. La cartografía geológica debe hacerse enfatizando en la litología, textura, cambios de facies, tipo de porosidad, ambientes de depositación, estructuras tectónicas y geomorfológicas, así como composición mineralógica de los sedimentos y rocas. Se deben utilizar herramientas y disciplinas, tales como interpretación de fotografías aéreas, imágenes de radar y satélite, levantamiento de las secuencias estratigráficas, sedimentología, vulcanología y geología estructural, principalmente; para el caso de rocas ígneas y metamórficas es indispensable estudiar con detalle las formas e intensidades del fracturamiento, todos los sistemas de discontinuidades de los macizos rocosos utilizando técnicas de campo y

estadísticas que permitan conocer los sistemas dominantes de fracturas y sus condiciones de conductividad hidráulica, como por ejemplo ancho, continuidad, rugosidad y relleno. (Vélez et al., 2011)

Existen circunstancias especiales en que la geomorfología del lugar cumple un papel dominante en la forma como se infiltra el agua, en la manera en que se transmite al sistema fracturado y de éste a las zonas de almacenamiento y alimentación de las fuentes superficiales. Un adecuado conocimiento de las formas superficiales facilita la identificación, en ocasiones, de las zonas más adecuadas para cartografiar la extensión de áreas de recarga de los acuíferos. (Vélez et al., 2011).

5.1.2 Exploración geofísica

La geofísica estudia las propiedades físicas del subsuelo y permite correlacionarlas con la geología de superficie que se efectuó en las etapas anteriores, lo cual, en el caso de la exploración de aguas subterráneas, contribuye a determinar la presencia y la geometría de los acuíferos o zonas acuíferas, al final que la obtención de un modelo conceptual que, a su vez, se valida con perforaciones exploratorias. Se debe hacer uso de las metodologías geofísicas convencionales, tales como resistividad, gravimetría, sísmica, magnetometría, electromagnetismo, registros geofísicos de pozos y nuevas técnicas, como la resonancia magnética de protones o nuclear. La exploración geofísica se utiliza también para calcular el nivel de la profundidad del agua subterránea, estimar el espesor de la zona no saturada y de la porosidad de la roca, contribuir a la identificación de los ambientes de depositación, determinar el grado de mineralización de las aguas subterráneas, localizar fracturas, e identificar reservorios geotérmicos y aguas termales. (Vélez et al., 2011).

5.1.3 Reconocimiento hidrogeológico

Esta clase de reconocimiento, que se constituye en la fase esencial e inicial en exploración de aguas subterráneas, comprende las siguientes etapas: recolección de datos en el campo mediante el inventario de puntos de agua, discriminados en manantiales, aljibes, pozos, humedales y corrientes de agua, y diseño y desarrollo de la red de monitoreo para confirmar el modelo conceptual. Los datos obtenidos en esta fase son la base para clasificar y caracterizar las unidades geológicas y así determinar las características hidrogeológicas preliminares del área. (Vélez et al., 2011).

5.1.4 Perforaciones exploratorias

Las perforaciones exploratorias son necesarias para validar los modelos geológico-geofísicos e hidrogeológicos conseguidos en las fases de trabajo anteriores y para la caracterización de los acuíferos desde los puntos de vista hidráulico y químico. La ubicación y el diseño de estas perforaciones dependerán de las particularidades hidrogeológicas de cada área. Además, si en los modelos se identifica que la densidad de puntos existentes no cumple con los requerimientos de exploración, se deben hacer perforaciones adicionales. (Vélez et al., 2011).

5.1.5 Evaluación Hidrodinámica

La evaluación hidrodinámica de las aguas subterráneas se refiere al estudio de su movimiento en las rocas y sedimentos, desde las zonas de recarga hacia las de descarga (dirección del flujo subterráneo). Los principales elementos hidrodinámicos son la presión

piezométrica, el gradiente y los parámetros hidráulicos del acuífero (conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento) que caracterizan el flujo y almacenamiento de agua en los diferentes acuíferos. La protección y el manejo racional de los acuíferos requieren igualmente el conocimiento de estos parámetros. Los parámetros hidráulicos se determinan a partir de ensayos de acuífero (pruebas de bombeo). Los sitios y duración de estas pruebas deben determinarse a partir de las fases previas. (Vélez et al., 2011).

5.1.6 Caracterización Hidrogeoquímica

La Hidrogeoquímica tienen que ver con el origen, los procesos y la evolución de la composición del agua almacenada en las unidades hidro- geológicas (acuíferos). Ésta es una herramienta básica que, además de determinar la calidad natural del agua para diferentes usos, mediante análisis fisicoquímicos e isotópicos, aporta la siguiente información al modelo hidrogeológico conceptual: identificación de zonas de recarga y descarga, dirección del flujo subterráneo, mezclas e interconexiones de agua de diversos orígenes (aguas superficiales y subterráneas, entre acuíferos), origen del agua subterránea, tiempo de residencia de las aguas subterráneas, identificación de ocurrencias de aguas termales y minerales. (Vélez et al., 2011).

La composición química del agua subterránea depende del tipo y características de la roca, de la composición del agua infiltrada y de procesos microbiológicos del suelo. En el momento en que el agua precipitada se infiltra y pasa a través del suelo y la roca, hay disolución de los materiales con el agua subterránea, cambiando su composición. Los elementos químicos se presentan en todas las etapas del ciclo hidrológico, como gases atmosféricos, partículas de polvo o aerosoles alrededor de los cuales se condensan las gotas de lluvia, como elementos en suspensión o disueltos en el agua. La composición natural del agua lluvia dependerá de la localización geográfica del sitio que se esté analizando y de los

factores climáticos que influyen en la precipitación local. Esta composición, así como la interrelación con el suelo y las rocas definirán entonces la composición del agua subterránea. (Vélez et al., 2011).

5.1.7 Caracterización hidrológica

El análisis de las fluctuaciones del nivel freático permitió además identificar una zona de recarga preferencial en el sector medanoso central que se correlacionaría con un mayor espesor de la cobertura de arenas. (Palacio, 2012).

De acuerdo con (Betancur & Palacio, 2009) Un modelo numérico se implementa con el propósito de ayudar a entender la hidrodinámica del sistema acuífero y debe permitir al momento de alcanzar la calibración en estado estacionario representar y explicar la hidrodinámica del sistema acuífero.

Las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas forman parte del ciclo hidrológico y se encuentran constantemente en interacción. Además, la principal fuente de alimentación de las aguas subterráneas son las aguas meteóricas. Por lo anterior, es de gran importancia evaluar las condiciones meteorológicas e hidrológicas, para contribuir al modelo hidrogeológico con información sobre posibles fuentes y zonas de recarga y descarga de aguas subterráneas, a cerca de la disponibilidad del agua para la recarga (balance hídrico superficial). (Vélez et al., 2011).

5.1.8 Parámetros hidráulicos

5.1.8.1 Conductividad Hidráulica (K) (l/t)

La conductividad hidráulica se define como el caudal que pasa por una sección unitaria del acuífero bajo un gradiente (Custodio & Llamas, 1976).

Este parámetro K o coeficiente de permeabilidad, tiene las dimensiones de una

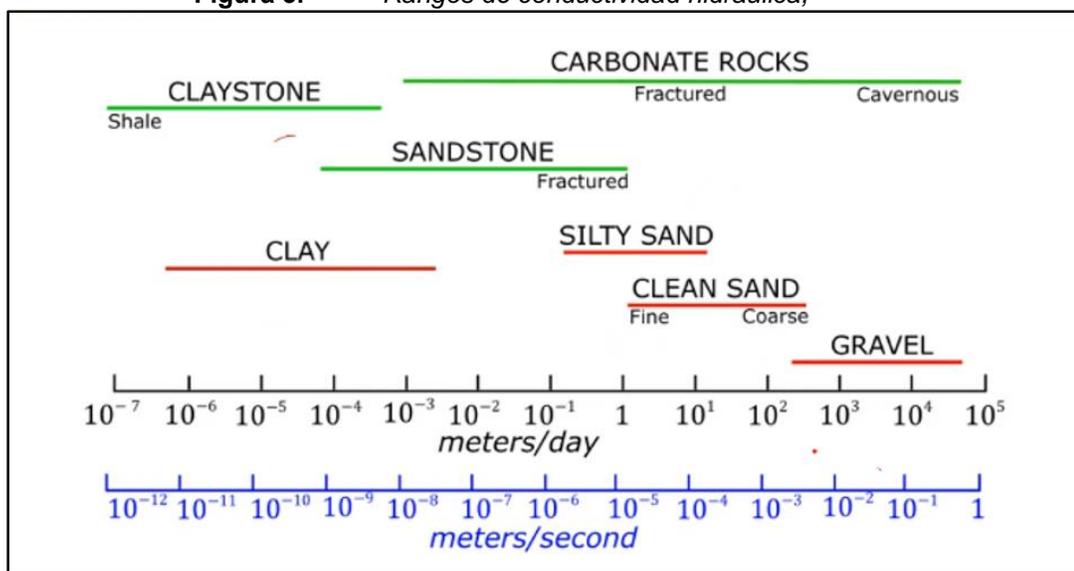
velocidad, como indica la ecuación siguiente ecuación:

$$(K) = \frac{Q}{A \left(\frac{dh}{dl} \right)}$$

Donde Q, es el caudal y A el área. Sustituyendo A como L² y el gradiente hidráulico queda expresado en forma de la siguiente ecuación:

$$(K) = \frac{\frac{L^3}{T}}{\left(\frac{L}{L} \right) L^2} = \frac{L}{T}$$

Figura 3. Rangos de conductividad hidraulica,



Fuente: Freeze & Cherry, 1979, ajustado por (Gomez, 2020)

5.1.9 Modelo hidrogeológico Conceptual

El propósito de construir un modelo conceptual es simplificar el problema de campo y organizar los datos de manera que el sistema pueda ser analizado de manera efectiva. La simplificación es necesaria porque una reconstrucción completa del sistema es imposible, un modelo conceptual es la idea básica o construida de cómo operan los sistemas y procesos. (Betancur & Palacio, 2009).

Los modelos Hidrogeológicos Conceptuales son representaciones en dos o tres dimensiones de las condiciones estáticas y dinámicas de sistemas hidrogeológicos. Esta representación incluye la geometría de los acuíferos, delimitación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con sus posibilidades de almacenar y transmitir agua, características hidráulicas de los acuíferos, posición de los niveles piezométricos, condiciones del flujo de las aguas subterráneas y su relación con los componentes del ciclo hidrológico, características hidroquímicas y eventualmente isotópicas y delimitación de zonas de recarga, tránsito y descarga. (IDEAM, 2010)

De acuerdo con (Gimena & Cabrera, 2013) Los métodos de estudio hidrogeológicos tienen como objetivo caracterizar y medir el agua subterránea en lo que hace referencia al agua (flujo), a las sustancias disueltas que transporta (transporte de masa) y a los intercambios de agua y solutos con el medio (relación roca-agua). Esto se hace para:

- Establecer el modelo conceptual de funcionamiento de los sistemas acuíferos para entender su funcionamiento.

- Cuantificar el flujo y el transporte del agua subterránea por los sistemas acuíferos.
- Establecer las relaciones con otras partes del ciclo hidrológico: aguas superficiales, mar, otros acuíferos y la biosfera, y también con los procesos geodinámicos internos y externos en los que intervienen las aguas subterráneas, incluyendo la génesis de minerales.
- Proporcionar métodos y parámetros que permitan evaluar y cuantificar los efectos de las actividades del hombre (efectos antrópicos) sobre los sistemas acuíferos, Estos efectos pueden ser causados por el aprovechamiento de las aguas subterráneas, construcciones, la agricultura las obras públicas, el medio urbano y la minería, en donde a su vez se tiene en cuenta la variabilidad climática y el cambio climático futuro.

5.1.10 Modelo numérico

Un modelo matemático es el conjunto de conjuntos de datos numéricos que transmiten el modelo conceptual y el paquete de ecuaciones codificadas por computadora que permiten calcular los cambios en el nivel del agua o las presiones en los diversos estratos geológicos. (Arenas et al., 2020)

Los modelos numéricos proporcionan una estructura para sistematizar la información de campo, para responder preguntas sobre el funcionamiento de un acuífero, y pueden ayudar a identificar áreas donde se requiere información adicional. (Betancur & Palacio, 2009).

La modelación numérica en hidrogeología se ha convertido en una labor frecuente, tanto, que al menos en lo concerniente al flujo representa casi una actividad rutinaria si se reconoce el valor de los modelos exploratorios. No obstante, en este campo hay muchos retos por afrontar y limitaciones por vencer: la cantidad y calidad de la información a partir de la cual

se obtienen los modelos conceptuales o con la que se busca la validación numérica; así la confianza en la calibración y los márgenes de incertidumbre siempre estarán presentes con nuevos requerimientos. (Betancur & Palacio, 2009).

Para la implementación de un modelo numérico, se tienen en cuenta la extensión del área a modelar, el nivel de detalle de la información disponible y la escala de trabajo a la cual se desea construir el modelo hidrogeológico conceptual; para así definir, inicialmente, el número de capas y el espaciamiento nodal que arrojará un número de celdas adecuado y a la vez razonable, en términos de la magnitud de memoria computacional a ocupar y del tiempo de ejecución de cada corrida del modelo. Antes de iniciar el ejercicio de ajuste de fronteras y parámetros para correr el modelo en estado permanente, se practican pruebas de análisis de sensibilidad que permitan definir las condiciones iniciales y establecer los criterios de convergencia con los que se ejecutará el programa. Luego, aplicando fundamentalmente el método de ensayo y error y, con ocasionales exploraciones mediante módulos de calibración automática, se busca la solución que reproduzca condiciones hidrológicamente lógicas y ajustadas lo mejor posible a las condiciones de campo. La modelación numérica de del flujo subterráneo sugiere ideas al hidrogeólogo en relación con la hidrodinámica del sistema, a las posibles interacciones entre unidades hidrogeológicas, y entre unidades hidrogeológicas y aguas. Una vez lograda la calibración del modelo en estado permanente se realiza un nuevo análisis de sensibilidad de parámetros para cuantificar el peso de la incertidumbre asociada a la información disponible. La historia de los repetidos ensayos y resultados debe consignarse en un diario de modelación en el que se registra para cada intento: fecha, propósito, condiciones del modelo, condiciones de la simulación y resultados. (Betancur & Palacio, 2009).

La modelación en estado estacionario, adelantada desde las fases iniciales de construcción de un modelo hidrogeológico, se traduce sin dudas en el mejor modelo conceptual

que con la información disponible pueda obtenerse. De ahí en adelante, la calibración en estado transitorio y la utilización de la modelación con propósitos de simulación, irán allanando el camino en términos de una mayor certidumbre en los resultados que se logren. (Betancur & Palacio, 2009).

5.2 SOFTWARES USADOS PARA MODELACIÓN NUMÉRICA:

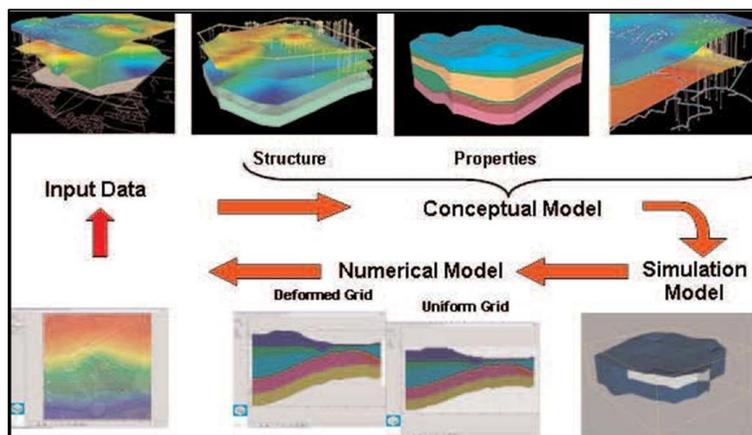
La tecnología GIS brinda un amplio apoyo al modelado ambiental, especialmente al modelado de aguas subterráneas. Se han desarrollado numerosas aplicaciones GIS para definir el modelo conceptual hidrogeológico, así como el modelo numérico. Sin embargo, hay escasez de herramientas para implementar el modelo conceptual en plataformas de modelado numérico. Esta transición necesita de metodologías específicas para adaptar las geometrías y datos alfanuméricos del modelo conceptual al modelo numérico para obtener resultados numéricos óptimos. Aunque la mayoría de las necesidades pueden satisfacerse con herramientas SIG inherentes, existen pasos particulares en la implementación del modelo conceptual hidrogeológico en el software de modelado numérico que aún no se han automatizado y ensamblado. En su mayoría están relacionados con la generación de mallas de elementos finitos. (Enric Vázquez-Suñé, 2017).

MODFLOW: Es un paquete de software de modelado de flujo de agua subterránea de dominio público. consiste en un modelo de flujo saturado en diferencias finitas y un programa modular, de ordenador asociado. A pesar de ser diseñado para modelar en 3D, es usado comúnmente para la modelación multicapa. La división del programa en módulos, permite examinar características hidrológicas específicas del modelo independiente y además facilita el desarrollo de capacidades adicionales al poder añadir paquetes al programa.(Arenas et al., 2020).

MODFLOW es un programa tridimensional para agua subterránea el cual trabaja bajo una expresión de diferencias finitas de aproximación. Mod-Flow fue desarrollado por el USGS de los Estados Unidos de América bajo el sistema de Fortran 88 y documentado en los años 1995 – 1996, el programa fue generado por un proceso matemático y matrices complejas bajo la ley de Darcy y sus resultados finales presentaban una calidad muy pobre. Posteriormente la Universidad de Waterloo logró codificar un módulo para una mejor calidad visual en los resultados el cual le dieron el nombre de Visual Mod-Flow. Hoy en día se han estructurado diferentes módulos codificados para otras aplicaciones particulares y otras nuevas compatibilidades.

MODFLOW puede simular un fluido en estado transitorio y estacionario, combinando varios tipos de capas, así como tipo de acuíferos confinados y semiconfinados, también puede calcular el movimiento de una partícula, es decir modelos de transportes de contaminantes. El modelo puede requerir de varios parámetros, depende del cual sea su aplicación requiere datos como; pozos de extracción o de inyección, área de recarga, flujos y drenes, conductividad hidráulica, conductividad hidráulica vertical, topografía, flujos de entrada y salida, coeficiente de almacenamiento, condiciones de fronteras, coordenadas para capas horizontales, geometría del acuífero.

Figura 4. Diagrama para crear un modelo conceptual en Mod-Flow a partir de un modelo numérico.



Fuente: Tomado de Schlumberger, año 2007

Los modelos son, por definición, aproximaciones y simplificaciones de un sistema natural. Las suposiciones y las soluciones de compromiso debidas a las limitaciones en la capacidad de cómputo, la precisión limitada del proceso de solución, la escasez de fondos y la insuficiencia de los datos de entrada, pueden combinar los resultados y las predicciones.

Los primeros modelos matemáticos estaban limitados por la capacidad de cómputo y la poca disponibilidad de información hidrogeológica; el tamaño de la malla era grueso y los datos eran limitados. Hoy en día, el tamaño de las celdas puede ser mucho más pequeño debido a que los sistemas de cómputo se encuentran muy avanzados tanto en su capacidad como en memoria. Sin embargo, la información hidrogeológica no ha aumentado a la misma velocidad que la capacidad de simular la presencia y el movimiento del agua subterránea utilizando celdas muy pequeñas. Actualmente el tamaño de la celda está limitado más bien por el objetivo del modelo y los datos hidrogeológicos, y no por el tiempo de cómputo.

Un modelo de aguas subterráneas es una representación de un sistema acuífero natural, existen varios tipos de modelos de aguas subterráneas: como los modelos conceptuales, modelos matemáticos, entre otros. Un modelo matemático de aguas

subterráneas utiliza las ecuaciones de flujo y conservación de la masa para simular flujo de agua subterránea y transporte de solutos donde se incorporan los rasgos físicos del sistema natural como expresiones matemáticas:



Los objetivos de un modelo matemático tomando en cuenta la conservación del acuífero son principalmente tres:

- 1) Implementar un modelo de simulación hidrodinámica del acuífero para hacer balances.
- 2) Elaborar escenarios de manejo del acuífero.
- 3) Hacer recomendaciones para la administración del agua subterránea, operando los escenarios de incremento paulatino de extracción.

Mod-Flow resuelve las ecuaciones diferenciales parciales usando el método de diferencias finitas, donde cada celda de Mod-Flow es un volumen unitario. En general la ecuación de flujo de aguas subterráneas que emplea Mod-Flow es la siguiente:

Variables,

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right)}_{\text{Flujo de aguas subterráneas}} + \underbrace{W}_{\text{Fuentes y}} = S_s \underbrace{\frac{\partial h}{\partial t}}_{\text{Cambio de}}$$

Donde:

K = conductividad hidráulica en las direcciones horizontal (x,y) y vertical (z). H = carga hidráulica.

W = flujo volumétrico por unidad de volumen, que representa fuentes o sumideros de

agua.

S_s = coeficiente de almacenamiento específico del medio.

t = tiempo.

$\partial x, \partial y, \partial z$ = Discretización en tres dimensiones

La ecuación de flujo anterior debe satisfacer las condiciones iniciales y de frontera

dadas por:

$$h(x_i, 0) = h_0(x_i)$$

$$h(x_i, t) \text{ en } r_1 = h_0(x_i, t)$$

$$V_i \cdot n_i \text{ en } r_2 = -V_n(x_i, t) \text{ Donde:}$$

H_0 = carga inicial

h = carga preestablecida en la frontera de tipo Dirichlet r_1

$n = (n_1, n_2, n_3)$ vector unitario normal hacia fuera de una frontera tipo Neumann r_2

V_n = flujo lateral preestablecido por unidad de área en una frontera r

(V_n es positivo para el flujo que entra al dominio y negativo para el flujo que sale del dominio)

Cuando r_2 es una frontera impermeable y $V_n = 0$, entonces $V_i \cdot n_i \text{ en } r_2 = 0$.

En la ecuación tridimensional de flujo saturado en un medio poroso, combinada con las condiciones iniciales y de frontera adecuadas, representan una expresión matemática del sistema de flujo de agua subterránea.

Parámetros de entrada - Usados para construir el modelo, del cual tenemos tres elementos importantes:

- Geometría del modelo
- Extensión del dominio horizontal y vertical, estructuras de las capas.
- Propiedades

- Conductividad hidráulica, porosidad, coeficiente de almacenamiento.
- Fronteras
- Localización, valores. Observaciones – usadas para calibrar el modelo:
- Flujo - Carga hidráulica, gradiente hidráulico.
- Otro punto importante es definir las fronteras naturales que limitan al sistema de flujo de aguas subterráneas, esto definirá la extensión del área.

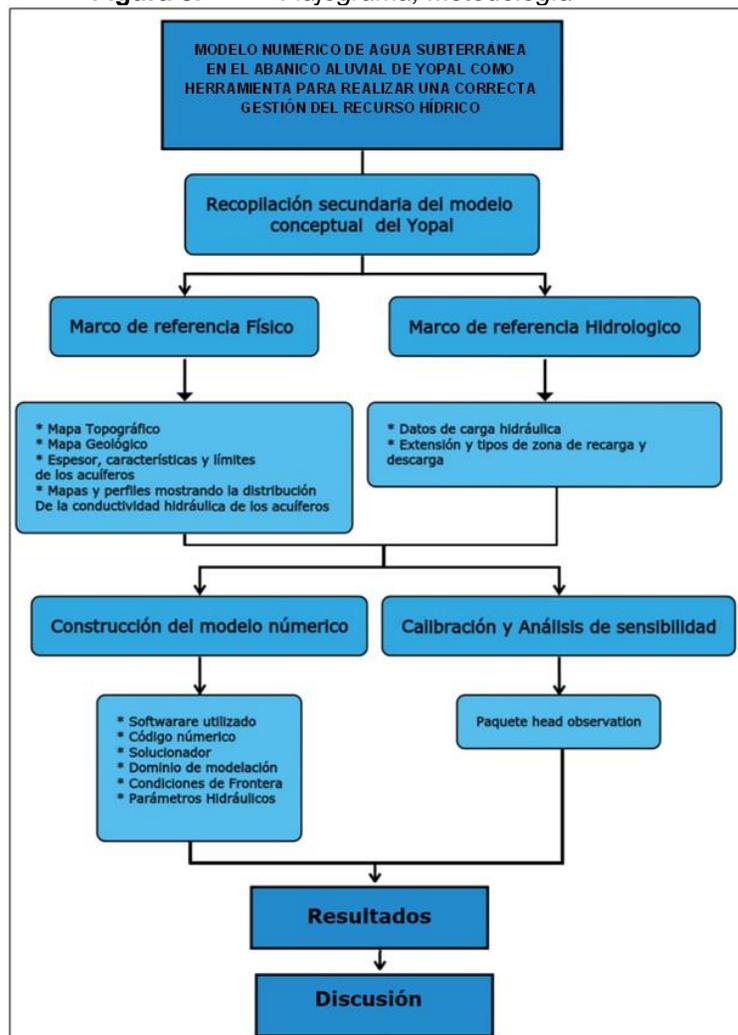
Las capas que simulan a un área determinada pueden funcionar como libres, confinadas o una combinación de ambas. Mod-Flow también permite modelar esfuerzos externos al sistema tales como pozos de extracción o de inyección, recarga, evapotranspiración, ríos, drenes y calcular el balance de una zona determinada por medio de “Zonal Budget” entre otros.

Finalmente, un modelo de agua subterránea es el resultado de todo un estudio geohidrológico llevado a cabo en un área determinada, donde se obtienen todos los parámetros que alimentan al modelo desde censos de aprovechamientos, geología, geofísica, pruebas de bombeo, etc.

6 METODOLOGÍA

La metodología utilizada en la ejecución de la presente monografía contempló cinco fases las cuales corresponde a recopilación de información secundaria del modelo conceptual del municipio de Yopal, construcción del modelo numérico, calibración y Análisis de Sensibilidad del modelo, resultados y discusión, las cuales se relacionan en el flujo grama (ver **Figura 5**). Teniendo en cuenta este flujograma y estas fases se realiza un análisis con el fin de predecir comportamientos futuros del acuífero en el abanico aluvial de Yopal el cual inicia con las siguientes etapas:

Figura 5. *Flujograma, Metodología*



Fuente: Modificado de (Gomez, 2020)

6.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

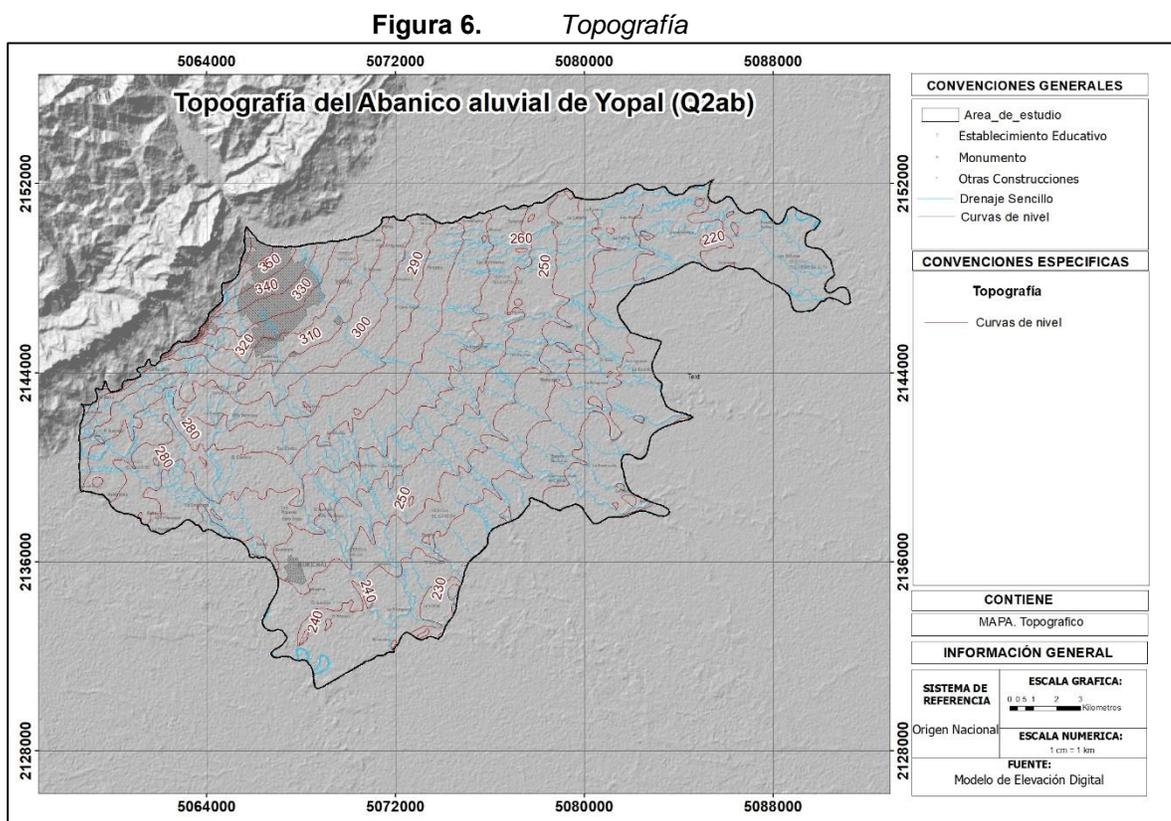
Esta fase inicia con la colecta de información secundaria para posteriormente organizar y analizar mediante métodos heurísticos y hermenéuticos la información de datos geológicos, geofísicos, hidrológicos, hidráulica, disponible en las diferentes fuentes bibliográficas consultadas de entidades públicas, como insumo para el modelo hidrogeológico numérico.

En esta etapa se organiza la información previamente recogida de geología, geofísica, hidrológicos, hidráulica, para facilitar el análisis del abanico aluvial, esto con el fin de evitar pasar por alto información relevante e incluir información que no corresponda.

Con base en los resultados obtenidos por el servicio geológico colombiano (Plancha 193 Yopal, y Estudio hidrogeológico Yopal 2018), se integra la información geológica e hidrológica con el modelo de elevación digital empleando el software ArcGIS.

6.1.1 Mapa topográfico

La topografía de área de estudio se obtuvo a través del modelo digital de terreno (DEM) de 30 metros de resolución espacial correspondiente al proyecto STRM de la NASA del cual se extrajeron las curvas de nivel del área de estudio cada 10m. Observándose que en el área de estudio se localiza en topografía plana que va desde los 380 msnm hasta los 220 msnm (ver Figura 6).



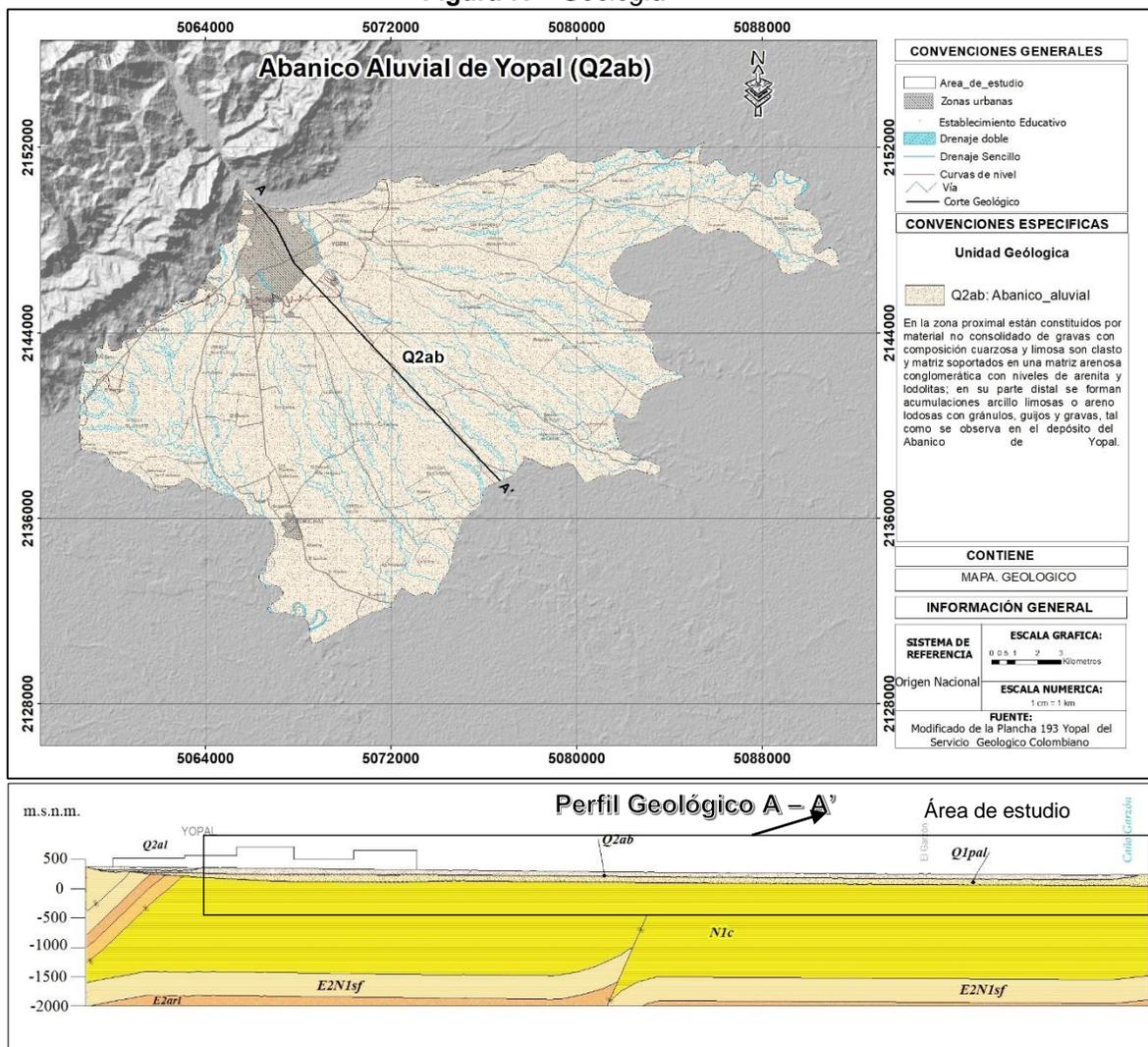
Fuente: SCG, Modificado por el Autor

6.1.2 Geología

A través de la plancha 193 de SCG y del estudio hidrogeológico conceptual se obtuvo la unidades geológicas del área de estudio la cuales corresponde a tres unidades geológicas las

cuales definen la Hidroestratigrafía del área de estudio y corresponden al abanico aluvial (Qab) el cual de acuerdo con la columna litoestratigráfica del SGC, 2018 cuenta con un espesor aproximado de 119 m, Depósito de Planicie Aluvial (Q1pal) suprayaciendo 100 m de espesor del abanico aluvial y la Formación caja la cual se localiza desde los 219m hasta los 905m de profundidad, no obstante para el presente estudio se tendrá en cuenta hasta una profundidad de 500m (ver **Figura 7**).

Figura 7. Geología



Fuente: SCG, Modificado por el Autor

6.1.2.1 Depósitos de Abanico (Q2ab)

Los depósitos de abanico aluvial están constituidos en la zona proximal por material no consolidado de gravas con composición cuarzosa y limosa, son clasto y matriz soportados en una matriz arenosa conglomerática con niveles de arenita y lodolitas; en su parte distal se forman acumulaciones arcillo limosas o arena lodosas con gránulos, guijos y gravas, Por sus características texturales y composicionales, los depósitos de abanico se constituyen en un acuífero libre localmente confinado.

De acuerdo con los datos obtenidos por el Servicio Geológico Colombiano, **La recarga potencial anual estimada para el área en la que afloran los depósitos de Abanico (382 km²) es del orden de 7'154.959 m³**, constituyéndose en la unidad geológica que recarga y almacena mayor volumen de agua dependiendo en gran medida, de su composición litológica y distribución.

Los parámetros hidráulicos obtenidos a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo realizadas por el SGC, 2018 presentan **transmisividades (T) entre 64 y 590 m²/día**, cuyo promedio se encuentra cercano a **300 m²/día**.

6.1.2.2 Depósitos de Planicie Aluvial (Q1pal)

De acuerdo con la plancha geológica 191 del SGC, los depósitos de planicie aluvial están constituido por materiales arena limosos, arenas limpias finas a muy finas y limo arcillosas en menor proporción; con selección moderada, granos subangulares a subredondeados, subesféricos a subredondeados. Es común encontrar guijos redondeados de arenisca cuarzosa y fragmentos de rocas oxidadas. Por sus características texturales y composicionales, los depósitos de abanico se constituyen en un acuífero libre, localmente

confinado.

Los parámetros hidráulicos obtenidos a partir de la interpretación de la prueba de bombeo realizadas por el (SGC, 2018) en uno de los pozos inventariados en esta unidad, sugiere puntualmente una Transmisividad (T) cercana a $600 \text{ m}^2/\text{día}$.

6.1.2.3 Formación Caja (N1c)

De acuerdo con la plancha geológica 191 del SGC la formación caja está compuesta por capas discontinuas de areniscas de grano fino a medio, de composición cuarzosa, estructura cuneiforme y tabular plana paralela continua con estratificación laminar y en algunos sectores ondulada, con capas centimétricas de lodolitas y arcillolitas; ocasionalmente niveles de conglomerados. Morfológicamente se caracteriza por presentar una intercalación de crestas y valles. La Formación Caja por sus características texturales, composicionales y estructurales de las capas supra e infrayacentes, lo constituye en un acuífero multicapa de tipo confinado a semiconfinado.

Los parámetros hidráulicos obtenidos a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo realizadas por el SGC, 2018 en los pozos profundos Central de Abastos, Núcleo Urbano y SGC Yopal 1, sugieren unas **Transmisividades (T) del orden de $223 \text{ m}^2/\text{día}$ a $496 \text{ m}^2/\text{día}$** .

6.1.3 Espesor, característica y límites de los acuíferos

6.1.3.1 Registro Litológico

En el año 2018 el servicio Geológico Colombiano realizó la perforación del pozo Braulio donde se tomaron muestras de ripio de perforación metro a metro, cuya descripción permitió establecer la columna litológica del pozo. Ver de la **Figura 8** a la **Figura 13**.

De acuerdo a la columna litológica los primeros 119 m corresponden al Depósito de Abanico Aluvial (Abanico de Yopal - Q2ab), suprayaciendo 100 m de espesor del Depósito de Planicie Aluvial (Q1pal) luego, desde los 219m hasta los 905m de profundidad se encontró la Formación Caja (N1c).

Figura 8. Columna litológica del metro 0 al metro 75.

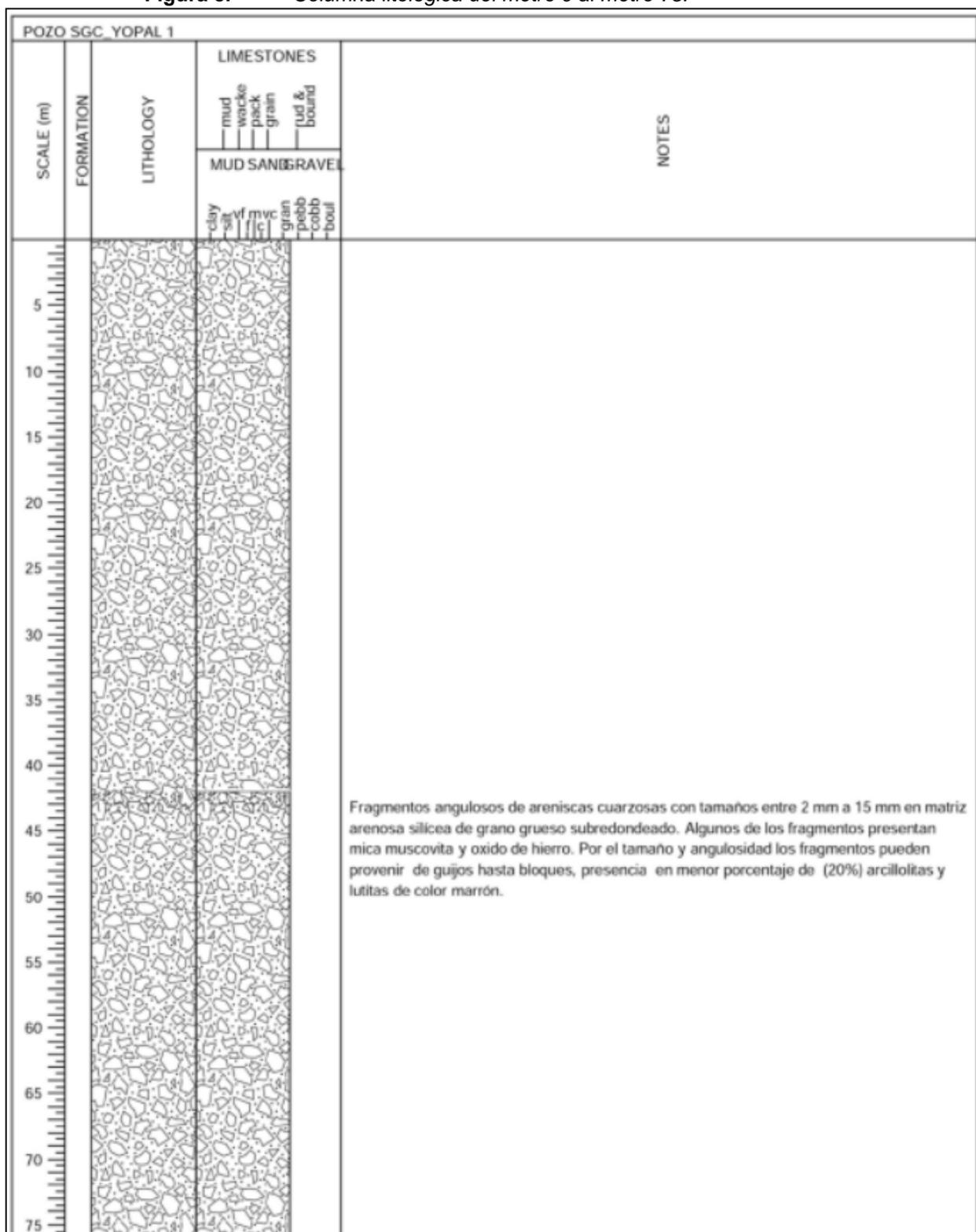


Figura 9. Columna litológica del metro 76 al metro 172.

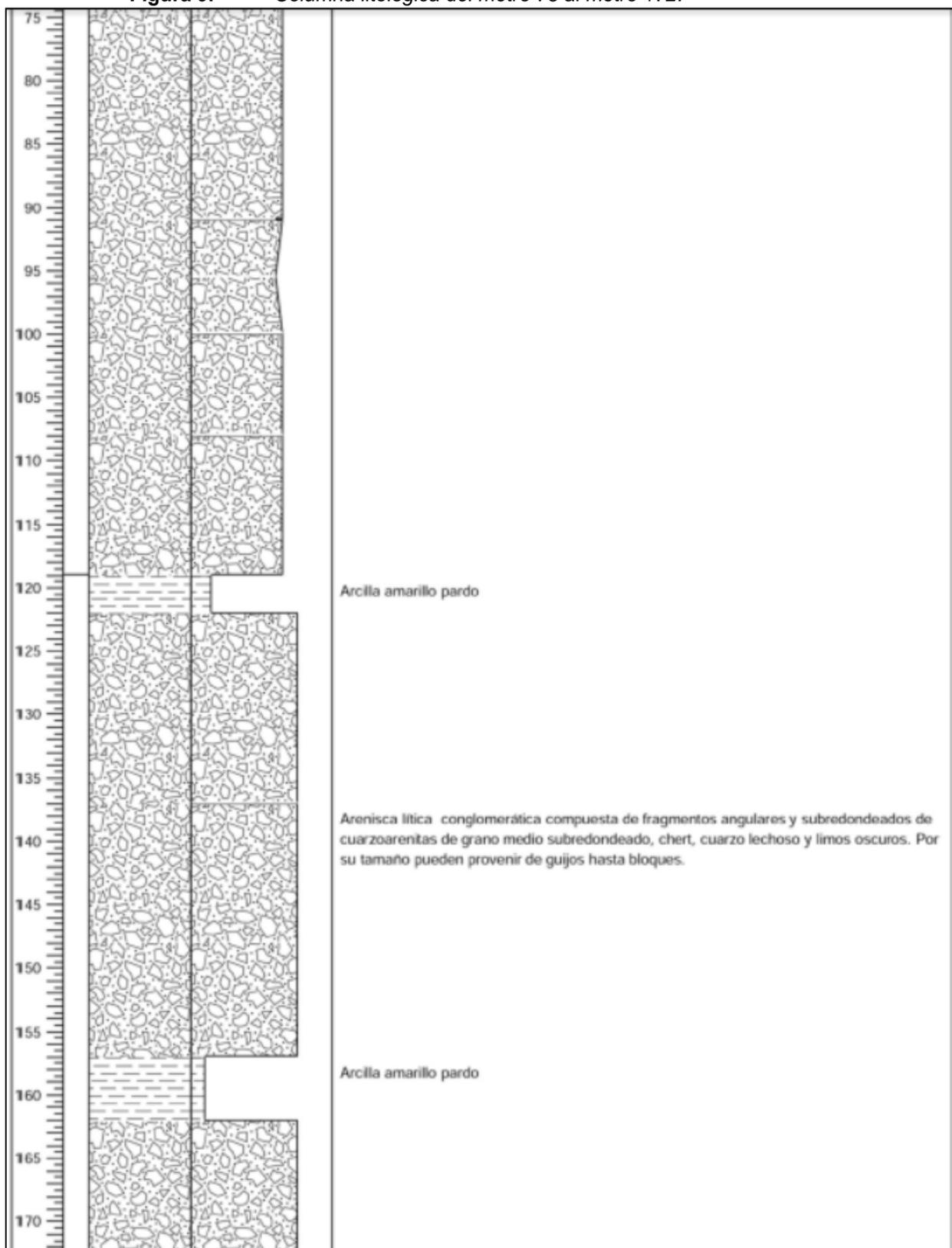


Figura 10. Columna litológica del metro 173 al metro 267

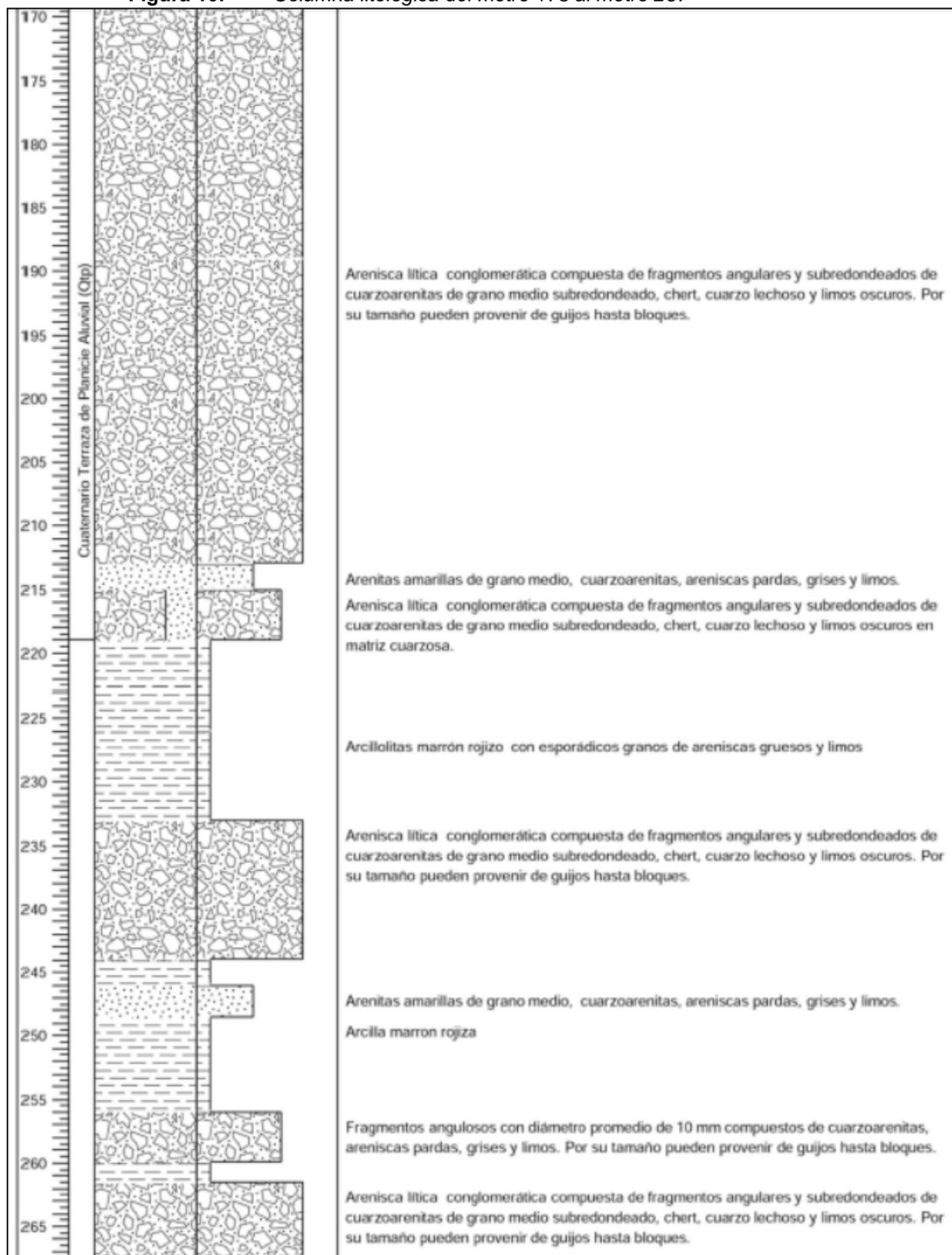


Figura 11. Columna litológica del metro 268 al metro 365.

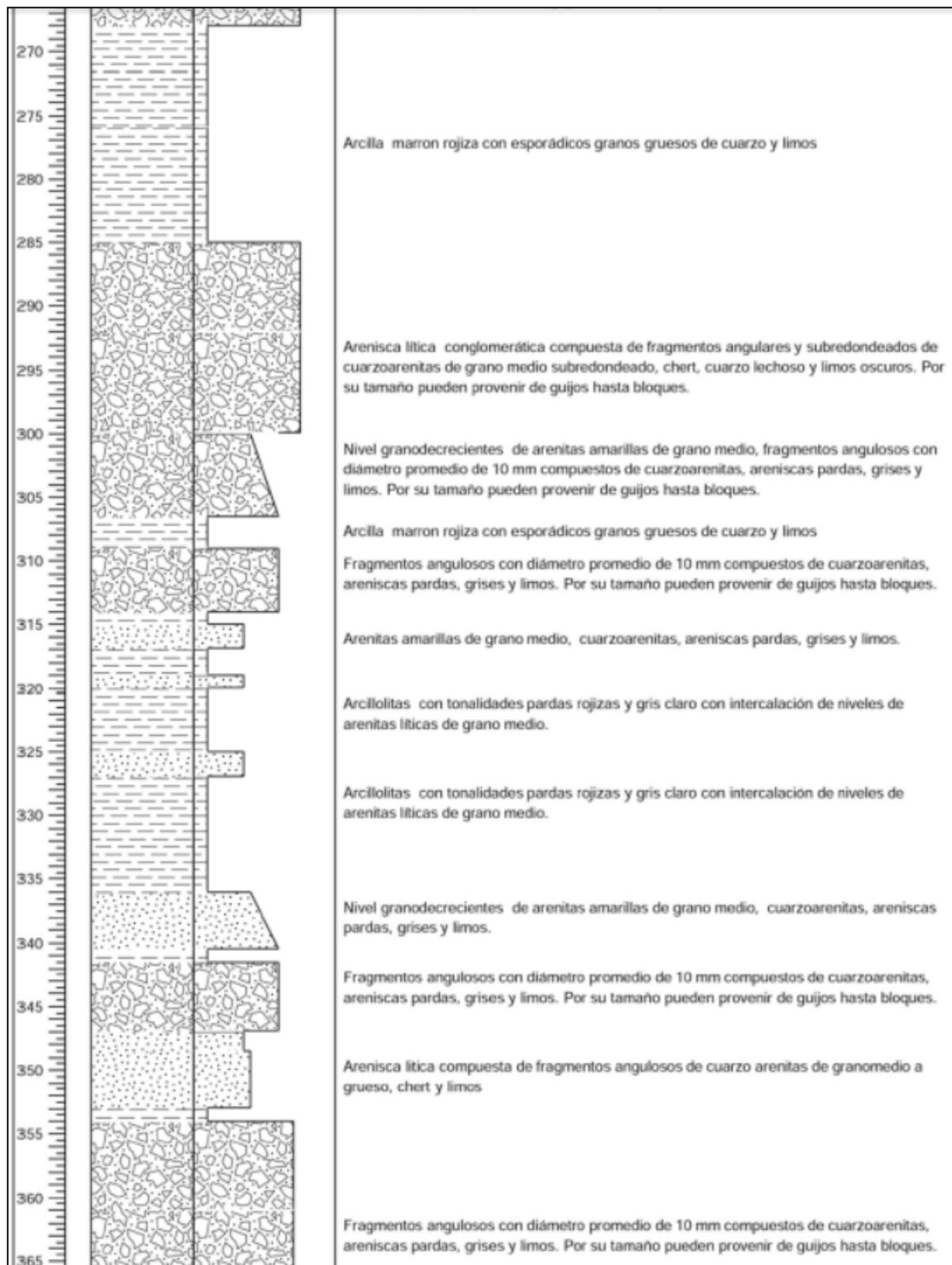


Figura 12. Columna litológica del metro 366 al metro 460.

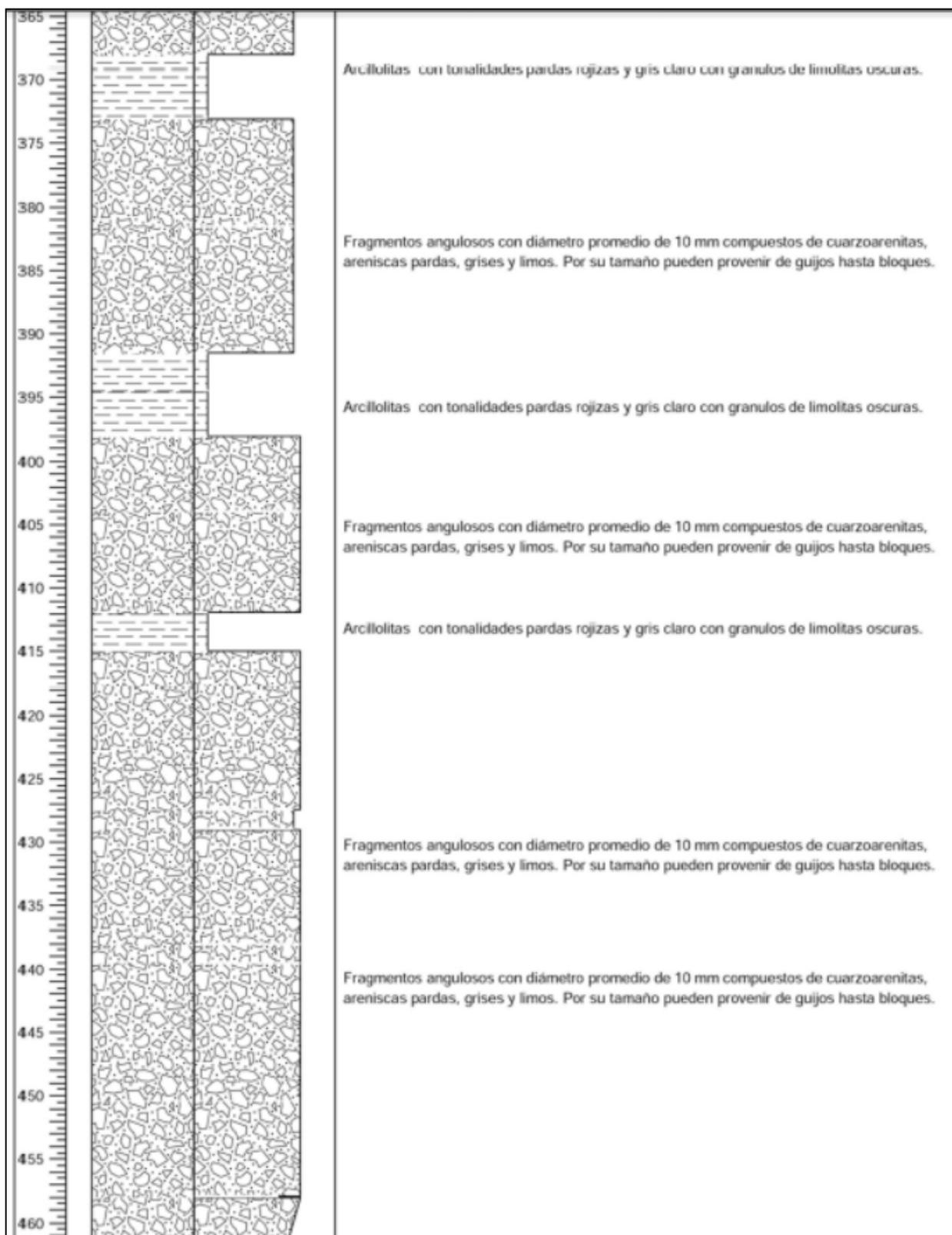
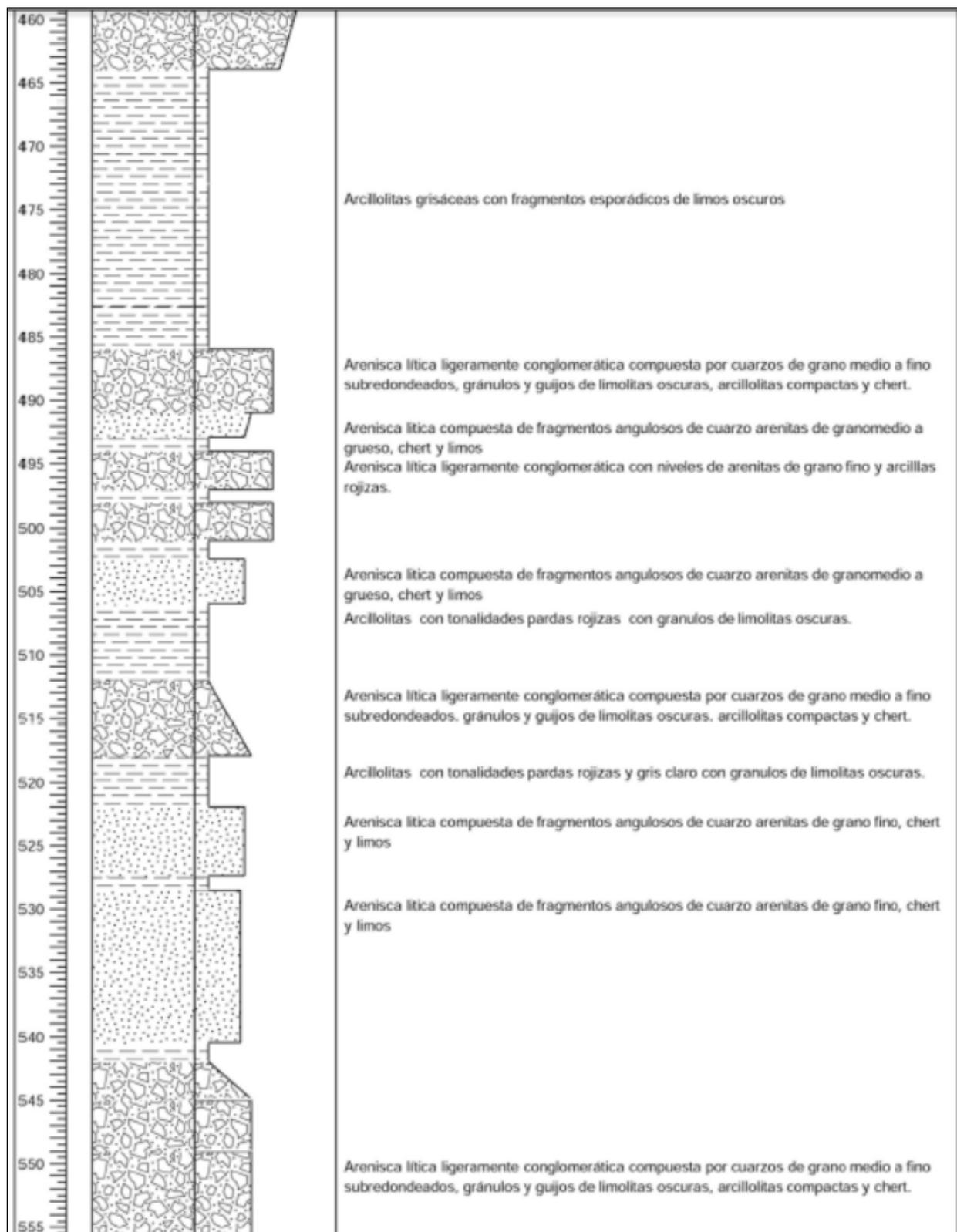


Figura 13. Columna litológica del metro 461 al metro 555.



6.1.4 Inventarios de puntos de agua

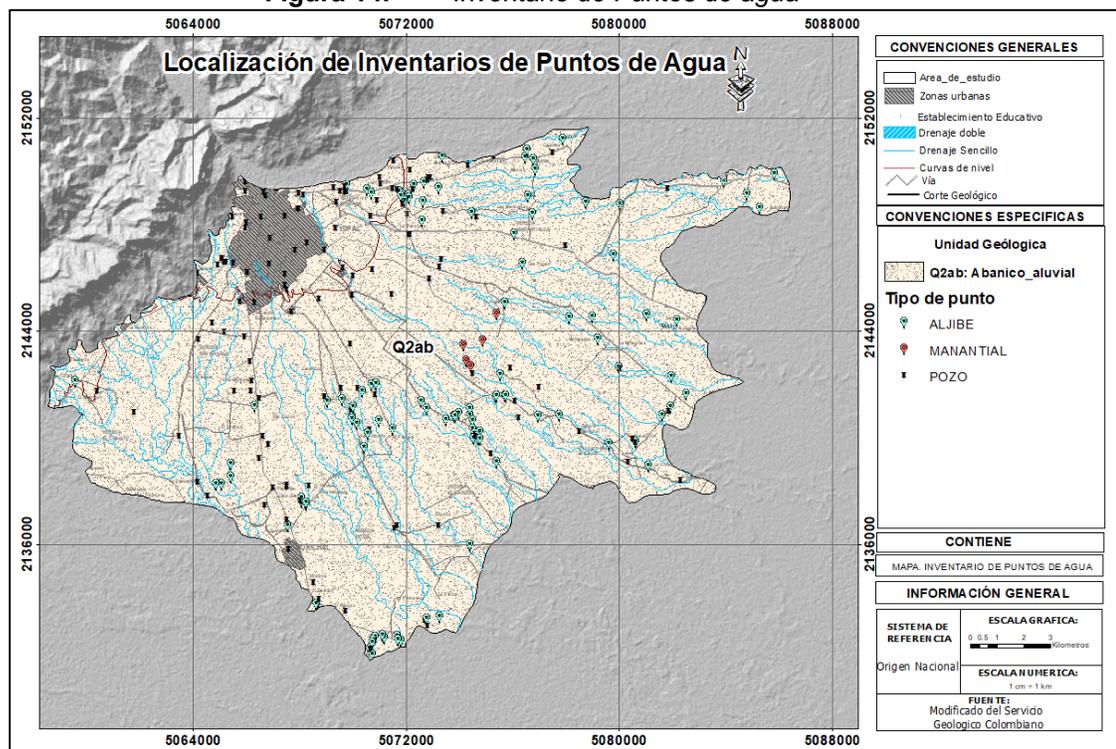
De 860 puntos de agua inventariados en el estudio hidrogeológico de Yopal, realizado por el servicio Geológico Colombiano en el año 2018, 245 se localizan en el área de estudio, (ver **Tabla 1** y **Figura 14**).

Tabla 1. Puntos de Agua por unidad geológica.

Unidad Geológica	Tipo de punto				
	Aljibe	Pozo	Manantial	Agua Superficial	Total
Depósitos de Abanico Aluvial (Q2ab)	110	136	5	0	251

Fuente: SCG, Modificado por el Autor

Figura 14. Inventario de Puntos de agua



Fuente: SCG, Modificado por el Autor

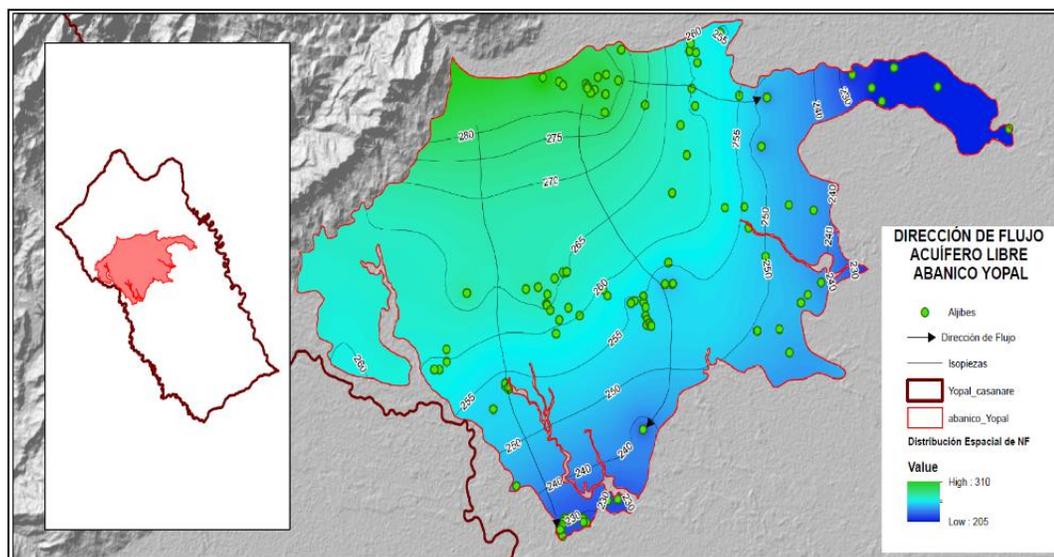
6.1.5 Direcciones de flujo

El Servicio Geológico Colombiano a partir de la sustracción entre los valores de los niveles estáticos medidos en campo durante las campañas de inventario en los aljibes y algunos pozos de poca profundidad y las cotas del terreno extraídas del modelo de elevación del terreno (DEM) para esos mismos puntos obtuvo los niveles piezométricos. Con estas mediciones específicas se construyeron los mapas de isopiezas que surgen de la interpolación espacial de los niveles piezométricos, teniendo en cuenta las unidades y estructuras geológicas o barreras existentes así como los cuerpos de agua y la topografía en la zona de estudio. La red o dirección de flujo del agua subterránea se proyecta desde la mayor hasta la menor cota piezométrica cortando las isopiezas perpendicularmente (SGC, 2018).

Para el acuífero superficial las unidades geológicas de mayor extensión, cubrimiento de puntos de agua y por ende de mayor interés hidrogeológico en el Municipio de Yopal son los Depósitos de Abanico (Q2ab), el Cuaternario Terraza de Planicie Aluvial (Q1pal).

Como se puede observar en la siguiente figura las isopiezas para el acuífero superficial en el Abanico de Yopal (Q2ab) presentan su máxima altura piezométrica en la cota de 280m.s.n.m y su mínima altura en la cota de 230 m.s.n.m; la red de flujo para el acuífero superficial mantiene una dirección predominante N-S, partiendo del ápice del abanico de Yopal, estimándose este como zona de recarga y posible conexión hidráulica permanente con el río Cravo Sur

Figura 15. *Isopiezas y dirección de flujo Abanico de Yopal (Q2ab).*



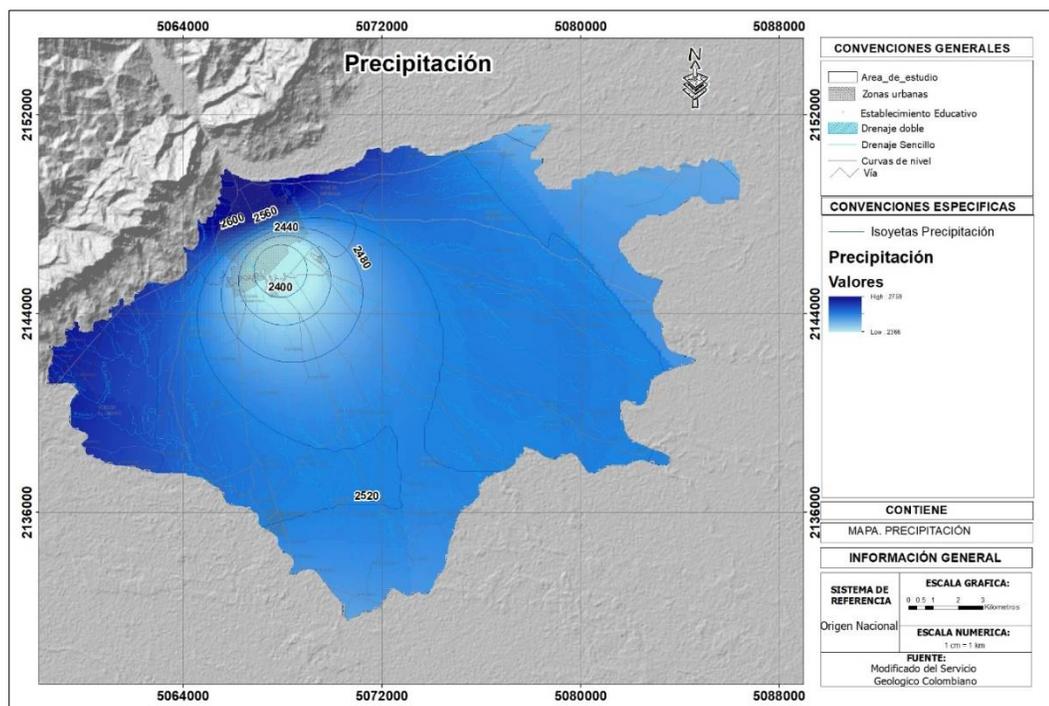
Fuente: SCG

6.2 HIDROLOGÍA

6.2.1 Precipitación

En el abanico aluvial de Yopal los rangos de la precipitación media anual oscilan entre 2.759 mm/años medidos al extremo noroccidente y 2.336 mm/años medidos en la parte sur occidente (ver **Figura 16**).

Figura 16. *Precipitación media anual en Yopal.*

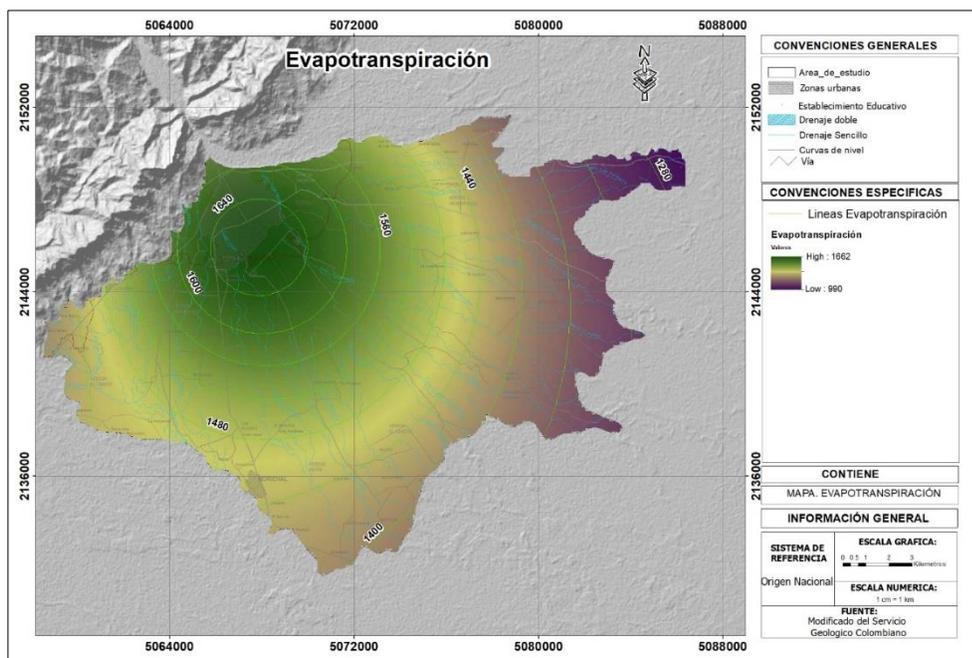


Fuente: SCG, Modificado por el Autor

6.2.2 Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial para el Abanico aluvial de Yopal oscila entre 990 mm medidos en la parte baja del abanico y 1662mm calculados en el casco urbano del municipio de Yopal, para un promedio de 1326 mm/año (ver **Figura 17**).

Figura 17. Mapa de EVT total anual para el área de estudio.

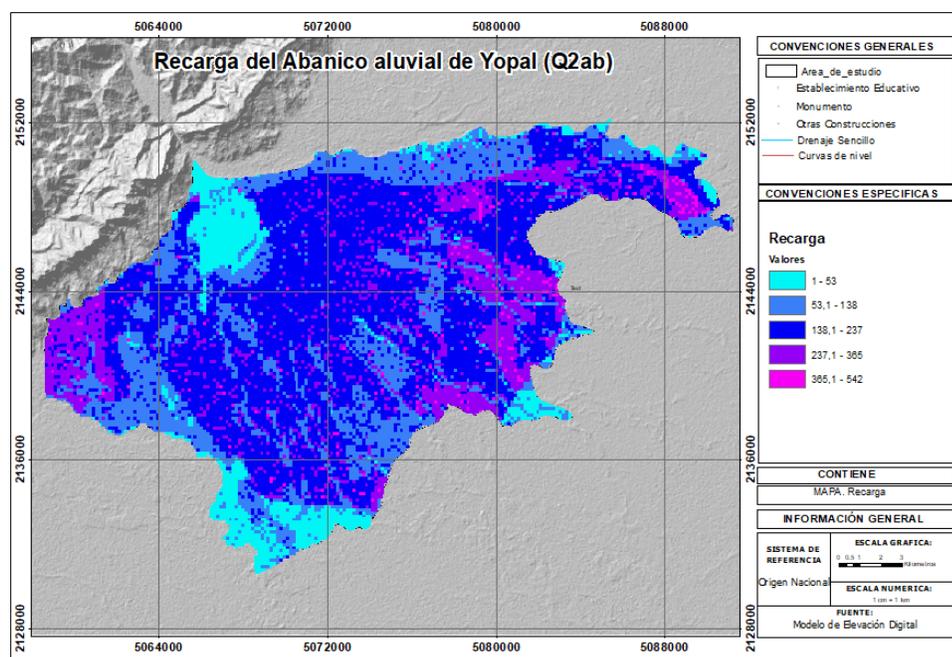


Fuente: SCG, Modificado por el Autor

6.2.3 Cálculo de recarga potencial total anual

La recarga en el abanico aluvial varía desde 1 mm a 542 mm anuales (ver Figura 18).

Figura 18. Recarga potencial del área de estudio



Fuente: SCG, Modificado por el Autor

De acuerdo con los datos obtenidos por el Servicio Geológico Colombiano las unidades geológicas con mayores almacenamientos de agua corresponden a el Depósito de Abanico Aluvial (Q2ab) con aproximadamente 7'154.959,28 m³/año y el Depósito de Planicie Aluvial (Q1pal) con cerca de 7'045.678,28 m³/año, y formación (N1c) con 2'178.146,24 m³/año.

Figura 19. *Recarga Potencial por unidad geológica en el área de estudio.*

Recarga Potencial Anual			
Unidad Geológica	Área (Km²)	Recarga Efectiva Anual (mm)	Recarga Efectiva Anual (m³)
N1c	220,51	9,88	2178146,24
Q1pal	1240,96	5,68	7045678,52
Q2ab	381,88	18,74	7154959,28
TOTAL	1843,35	34,3	16378784,04

Fuente: Autor

6.3 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Un modelo conceptual es una representación gráfica y teórica del sistema de flujo del agua subterránea que se realiza incorporando toda la información geológica e hidrogeológica en un esquema del modelo a realizar. El primer paso para la elaboración de dicho esquema es elabora un modelo conceptual definiendo la litología, los espesores, continuidades estructuras de los acuíferos y las unidades confinantes. El modelo conceptual de los acuíferos admite la teoría de Hubbert en la que se considera heterogeneidad del medio. (IDEAM, 2010)

A continuación se presenta una descripción de las unidades hidrogeológicas de la zona de estudio.

6.3.1 Definición de Unidades Hidrogeológicas

6.3.1.1 Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular

Unidad Hidrogeológica A1:

Sistemas acuíferos continuos, libres a localmente semiconfinados a confinados de extensión regional, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente aluvial Con transmisividades del orden de 100 a 600 m²/día (A1). (SGC, 2018)

En este sistema acuífero se clasifican los depósitos de Abanico (Q2ab) y de Planicie Aluvial (Q1pal).

Unidad Hidrogeológica A2:

Sistemas acuíferos semiconfinados a confinados, de extensión semiregional, conformados por rocas sedimentarias terciarias semiconsolidadas a consolidadas. Con transmisividades del orden de 200 a 400 m²/día (A2). (SGC, 2018)

En este sistema acuífero se clasifico la Formación Caja (N1c).

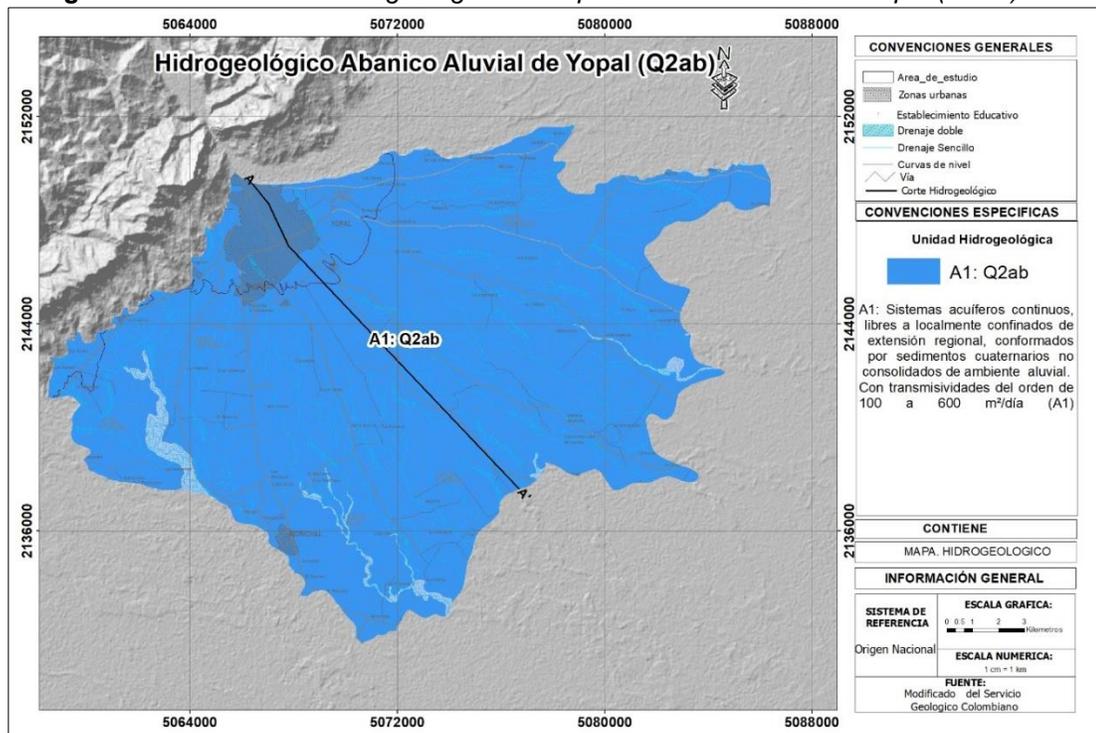
Tabla 2. Leyenda Hidrogeológica

SISTEMA ACUÍFERO	CARACTERÍSTICA HIDROGEOLÓGICAS	UNIDADES GEOLÓGICAS
SEDIMENTOS Y ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE INTERGRANULAR		
A1	Sistemas continuos libres a localmente confinados de extensión regional, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidado de ambiente aluvial con transmisividad 100 a 600 m ² /día.	Q2ab: Depósitos de abanico Q1pal: Depósitos de planicie aluvial
A2	Sistemas acuíferos confinados de extensión	N1c: Formación Caja

SISTEMA ACUÍFERO	CARACTERÍSTICA HIDROGEOLÓGICAS	UNIDADES GEOLÓGICAS
SEDIMENTOS Y ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE INTERGRANULAR		
	semiregional, conformados por rocas sedimentarias terciarias semiconsolidadas a consolidadas con transmisividad de orden de 200 a 500 m ² /día.	

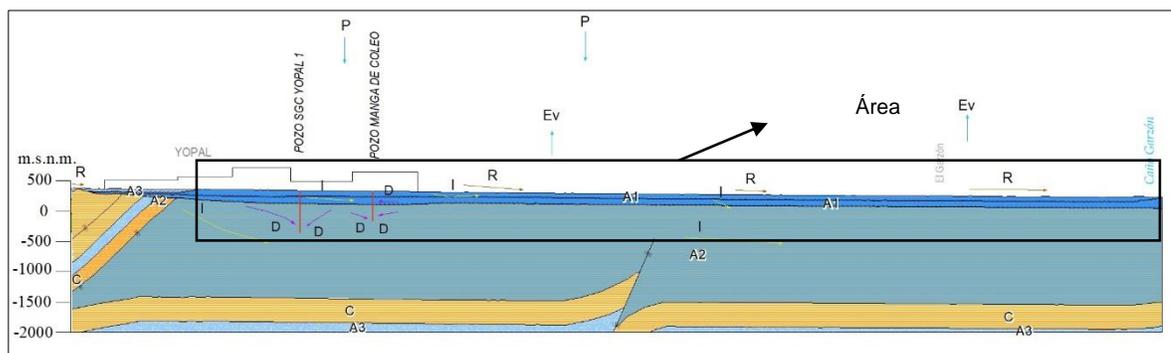
Fuente: SCG, Modificado por el Autor

Figura 20. Modelo Hidrogeológico conceptual abanico aluvial de Yopal (Q2ab)



Fuente: SCG, Modificado por el Autor

Figura 21. Perfil abanico aluvial de Yopal (Q2ab)



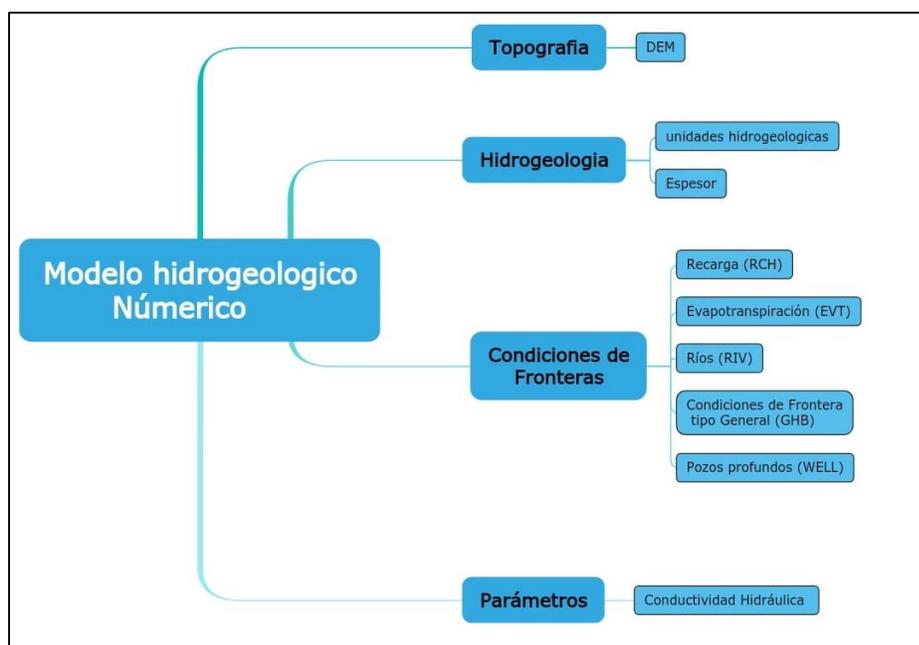
Fuente: SCG, Modificado por el Autor

6.4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Luego de la definición del modelo hidrogeológico se procede al desarrollo de un modelo numérico que realice una aproximación matemática del comportamiento de las aguas subterráneas en la zona de interés.

Los modelos de flujo o modelos matemáticos de aguas subterráneas consisten en una ecuación gobernante (Governing equation), condiciones de borde (Boundary conditions) y condiciones iniciales (initial conditions).

Figura 22. *Procesamiento en software Model Muse*



Fuente: Autor

6.4.1 Software utilizado

Para la realización del modelo se empleó el código MODFLOW 2005 del Servicio

Geológico de Estados Unidos (USGS - United States Geological Survey). El cual emplea un método de resolución numérica de diferencias finitas para las ecuaciones de flujo y transporte.

Modflow es un modelo de flujo saturado que utiliza una aproximación en diferencias finitas centradas en el bloque con estructura modular, es decir, que cuenta con subrutinas, módulos o paquetes que realizan funciones concretas como los paquetes de acciones externas relacionados con la simulación de ríos (RIV), pozos (WELL), contornos de potencial constante (GHB) entre otros.

6.4.2 Código numérico

El movimiento del agua subterránea con densidad constante y en medio poroso se puede describir a partir de la siguiente ecuación gobernante:

Variables,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = Ss \frac{\partial h}{\partial t} + W$$

Ley de Darcy = **Principio de Continuidad**

K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} son las conductividades hidráulicas [L/T]

W son las excitaciones adicionales del sistema, como la recarga o los bombeos [L³/T]

Ss es el almacenamiento específico [L-1]

h es la carga hidráulica o nivel de agua [L]

La ecuación describe el flujo de agua subterránea en condiciones sin equilibrio en un medio heterogéneo y anisotrópico.

Para resolver esta ecuación, MODFLOW utiliza el método de diferencias finitas, donde el sistema continuo descrito por la ecuación es reemplazado por un set finito de puntos discretos en el espacio y en el tiempo. Las derivadas parciales son reemplazadas por términos calculados de la diferencia en valores de carga hidráulica en esos puntos.

6.4.3 Solucionador

MODFLOW incorpora múltiples métodos de solución, y cada uno de ellos se llama paquete solucionador (solver package). El paquete hidrológico y el paquete solucionador representa todo el trabajo del programa, sin embargo, un componente adicional es necesario para llevar a cabo el control del programa. Este sistema de control es llamado paquete básico (Basic package). (Gidahatari, 2012).

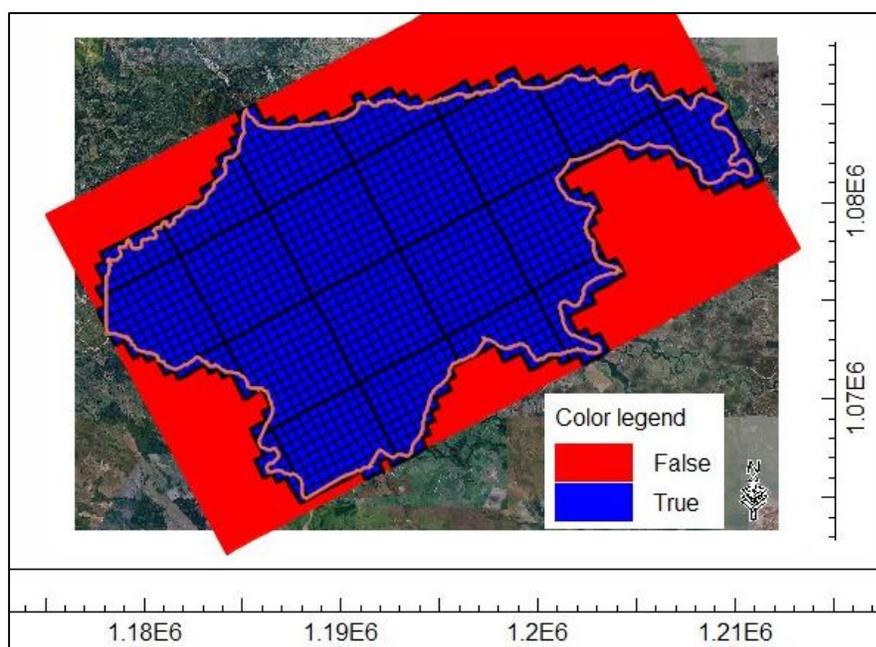
El paquete Preconditioned Conjugate Gradient Package Pane (PCG) es el paquete de resolución más utilizado porque es rápido y optimiza memoria computacional. (MODFLOW, 2005).

El solucionador PCGN utiliza dos niveles de iteración: iteraciones externas e iteraciones internas. Las iteraciones externas actualizan los parámetros hidrogeológicos que se ven afectados por carga hidráulica (por ejemplo, transmisividad, flujos dependientes de la carga) y las iteraciones internas mejoran estabilidad de la solución mientras continúa hasta que se cumplan los criterios de convergencia finales o el especificado se ejecuta el máximo número de iteraciones internas (Hill, 1997).

6.4.4 Dominio de modelación

Con el fin de modelar el comportamiento del área de estudio se selecciona como dominio de modelación un área de 344998133.17 m², la cual corresponde al abanico aluvial del municipio de Yopal, en este dominio se definió una grilla o cuadrícula numérica de 500 m (ver **Figura 23**).

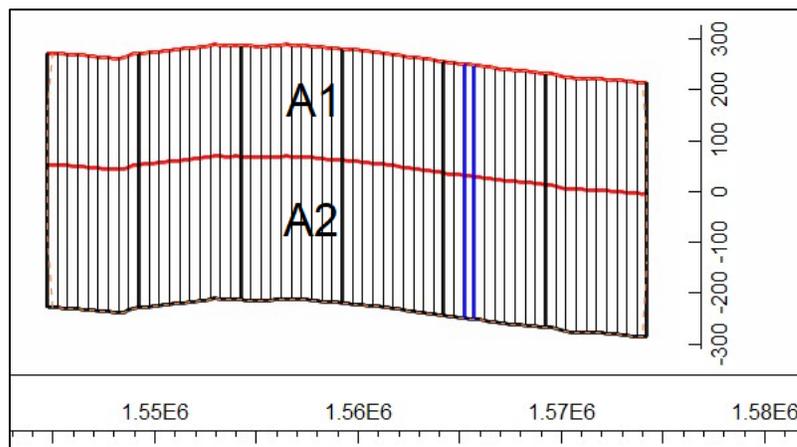
Figura 23. Dominio de Modelación



Fuente: Autor

El modelo tiene dos (2) capas que se extiende desde el Model Top, hasta una primera capa de 219 m de profundidad que corresponde a la unidad hidrogeológica A1 conformada por el abanico aluvial (Q2ab) y depósitos de Planicie aluvial (Q1pal) y una segunda capa que corresponde a la unidad hidrogeológica A2 conformada por la formación Caja (N1c) modelada a una profundidad de 500 m (ver **Figura 24**). La topografía del área de estudio fue modelada con un modelo de elevación digital DEM de la NASA (proyecto SRTM) con resolución espacial de 30x30 metros.

Figura 24. Capas del modelo



Fuente: Autor

6.4.5 Condiciones de Fronteras

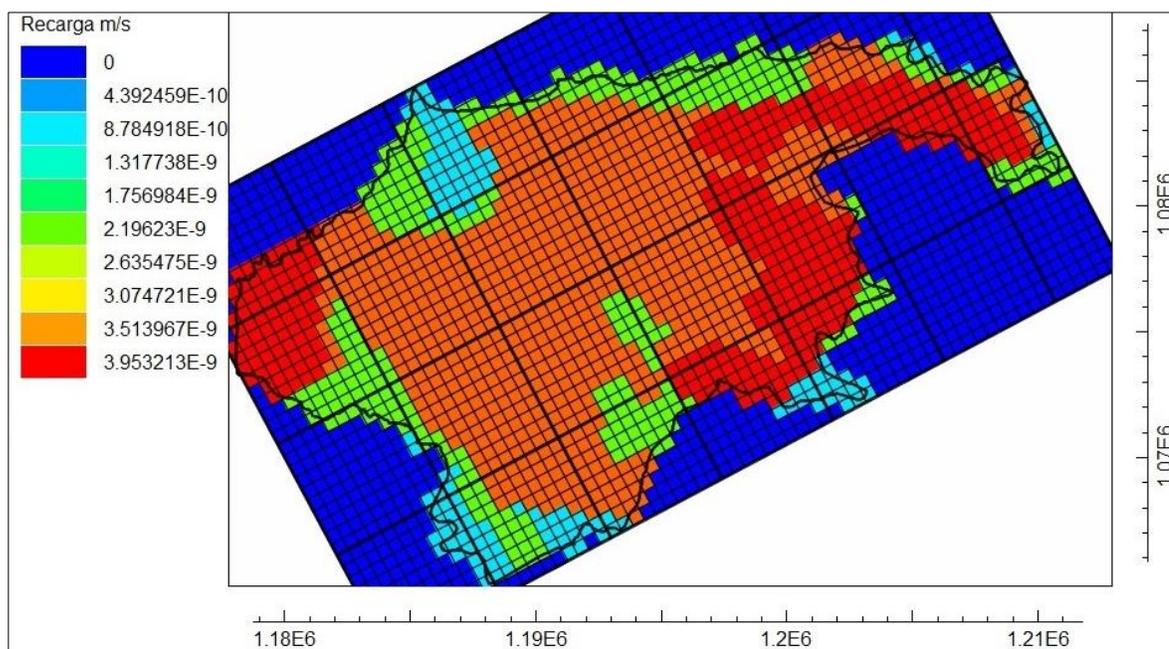
Se asignaron cinco (5) tipos de condiciones de frontera las cuales corresponden a recarga (RCH), evapotranspiración (EVT), ríos (RIV), pozos (WELL) y condiciones de fronteras de carga general (GHB).

6.4.5.1 Recarga (RCH)

El paquete de recarga (RCH) se diseñó para simular una distribución real de la recarga del sistema de agua subterránea. Frecuentemente una real recarga ocurre como el resultado de la precipitación que percola al sistema de agua subterránea. (McDonald & Harbaugh, 1988).

Para la recarga se utilizaron las zonas definidas en el modelo hidrogeológico conceptual realizado por el SGC en el año 2018, en el cual encontramos zonas de recarga desde 1mm a 542 mm anuales, incluidas al software a través de shp en polígonos (ver **Figura 18** y **Figura 25**).

Figura 25. Recarga del área de estudio



Fuente: Autor

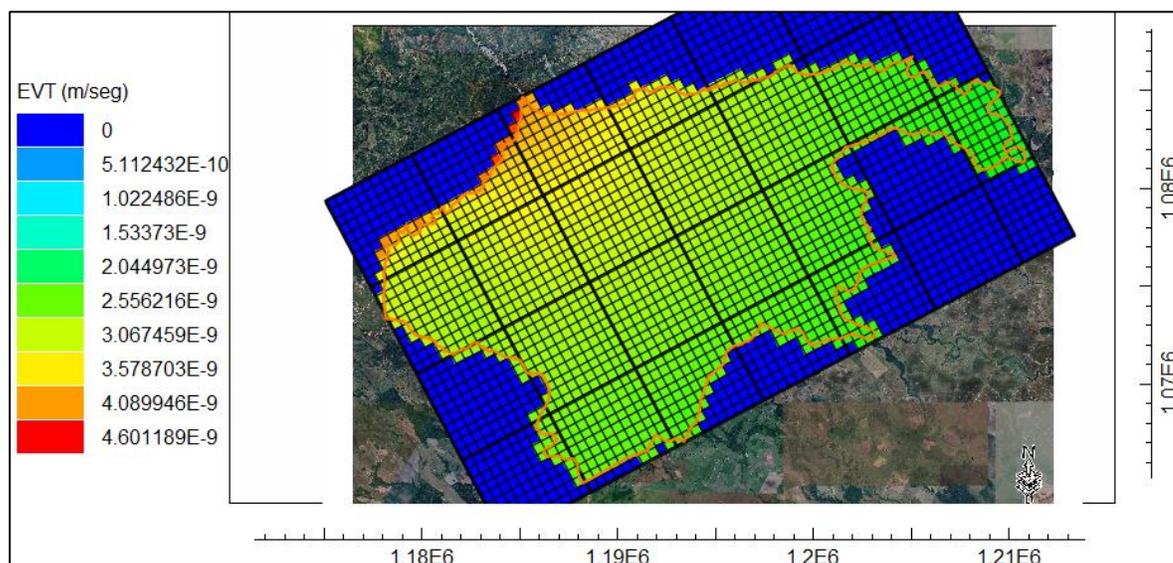
6.4.5.2 Evapotranspiración (EVT)

El paquete de evapotranspiración (ET) simula los efectos de la evapotranspiración de las plantas y la evaporación directa del agua removida del régimen saturado del agua subterránea (McDonald & Harbaugh, 1988).

En términos generales y de acuerdo con el modelo hidrogeológico conceptual del municipio de Yopal realizado en el año 2018 por el SGC, se asignó una evapotranspiración usando una ecuación lineal la cual varía por su elevación en la parte más plana del abanico aluvial hasta el ápice del abanico, casco urbano del municipio de Yopal (ver **Figura 17** y **Figura 26**). El cual se contrastó con los resultados de evapotranspiración en el POMCH del río Cravo Sur.

La ecuación usada en el modelo corresponde a: $(Model_Top * 4.534E-10) / 50$.

Figura 26. *Evapotranspiración del area de estudio*



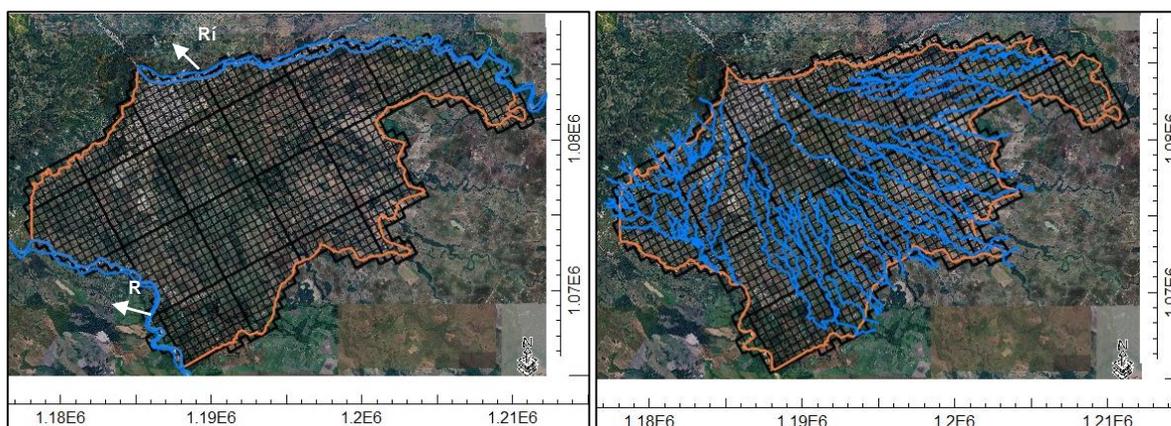
Fuente: Autor

6.4.5.3 Ríos (RIV)

Los ríos y la escorrentía aportan o drenan agua a los sistemas de agua subterránea, dependiendo del gradiente hidráulico entre el río y el régimen del agua subterránea. El paquete Río (RIV) simula los efectos del flujo entre las características de la superficie del agua y los sistemas de agua subterránea. los términos de filtración que representan las características desde o hacia la superficie deben añadirse a la ecuación de flujo de aguas subterránea para cada celda afectada por la infiltración. (McDonald & Harbaugh, 1988)

Los ríos Cravo Sur, río Charte y drenajes sencillos en un nivel medio constante, se simularon en el paquete RIV asumiendo que la elevación de la lámina de agua es la elevación del DEM-0.5 m. Dentro del paquete, la conductancia es la propiedad que permite la entrada y salida de agua de la condición de borde y se expresa por ($4E-7$ para el río Charte y río Cravo Sur, y $4E-8$ para los drenajes sencillos) (ver **Figura 27**).

Figura 27. Ríos y Drenajes sencillos del área de estudio



Fuente: Autor

6.4.5.4 Condiciones de Fronteras de Tipo General GHB:

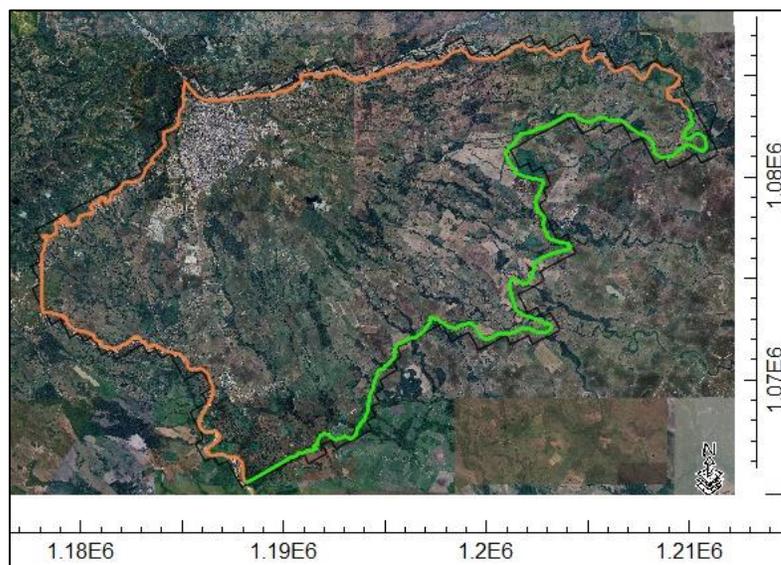
Las GHB son fronteras de Cauchy, las cuales representan en un modelo hidrogeológico una carga conocida que está ubicada fuera del dominio del modelo, y que se conecta a este a través de un medio isotrópico y homogéneo. La conexión de la carga hidráulica se da a través de un factor conocido como conductancia. Lo anterior permite limitar el dominio de modelación sin desconocer medios cercanos. (McDonald & Harbaugh, 1988).

Esta frontera se definió al suroriente del abanico aluvial (ver **Figura 28**) los valores requeridos para la definición de esta frontera son la cota del nivel de agua conocido (Boundary Head), que para el presente estudio fue la cota del río Meta, en donde desemboca la cuenca (ya que el agua fluye en la superficie) y la conductancia (C) el cual es un parámetro que representa la “resistencia” al flujo entre la frontera y las celdas activas del modelo numérico. Este parámetro es calculado automáticamente por MODFLOW – 2005 con los demás datos al realizar el trazado de las fronteras, mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{K * (L * W)}{D}$$

En donde C = Conductancia (m^2/d), K = Conductividad hidráulica promedio del material del área de estudio (m/d), $L*W$ = Área de la celda (m) y D = Distancia desde la zona de definición de la frontera hasta el nivel conocido (m). El área de la celda es calculada directamente por MODFLOW-2005, En el área de estudio se usó un valor de conductancia de $7E-6$ la cual corresponde al valor extraído en relación a la distancia que hay entre el río Meta, río en el cual desemboca las aguas del área de estudio (95 km) y la elevación a la cual se encuentra esta fuente hídrica (135 msnm).

Figura 28. *Frontera Cauchy GHB*



Fuente: Autor

6.4.5.5 pozos (WELL)

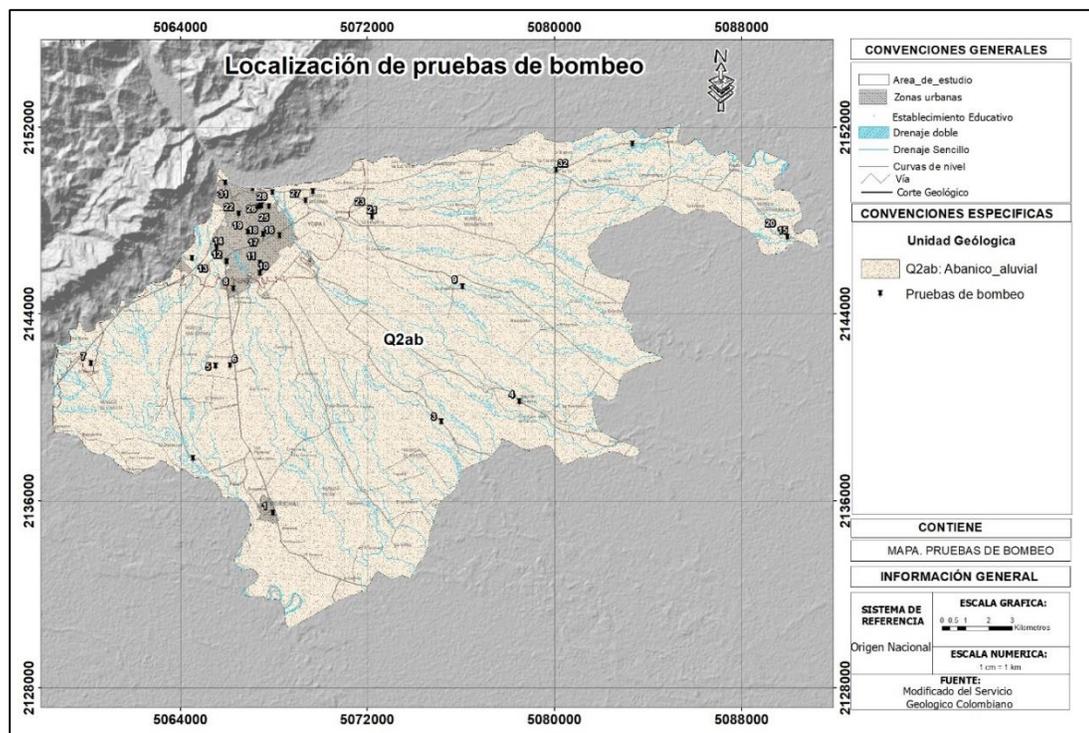
El paquete Well se usa para simular pozos que se encuentran en el área de estudio, conectando el pozo simulado a múltiples celdas en la cuadrícula de diferencias finitas. (Konikow et al., 2009). Después del primer período de estrés utilizado para alcanzar un estado estacionario de referencia, distinto de cero.

Las estimaciones de la extracción de agua por bombeo suelen ser datos muy importantes para el modelado de aguas subterráneas, especialmente para las predicciones de reducción de niveles piezométricos y efectos de abatimientos (Rodríguez, 2010).

Los pozos utilizados en la simulación del área de estudio en el escenario 1, corresponde a 33 pozos, que cuenta con pruebas de bombeo y se encuentran en modelo hidrogeológico conceptual del municipio de Yopal realizado en el año 2018 por SGC, los cuales cuentan con parámetros como Nivel Piezométrico (PZ), Caudal (Q), Nivel Estático (NE), Nivel Dinámico (ND), Tiempo de Abatimiento (TA), Tiempo de recuperación (TR), Profundidad (P), Almacenamiento (S), Conductividad Hidráulica (K), Capacidad Específica (CE) y Transmisividad (T) (ver **Tabla 3** y **Figura 29**).

En la elaboración del modelo matemático se incluyó la profundidad y caudal de bombeo de los datos obtenidos en las 33 pruebas de bombeo.

Figura 29. *Pruebas de bombeo realizadas en el área de estudio*



Fuente: SCG, 2018 Modificado por el Autor

Tabla 3. Parámetros hidráulicos de pozos profundos – Escenario 1

N o	FINCA	COORDENADA MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		AL T	Q _{lp} s	N _{Est} m	N _{Din} Max	T _{Abat} max	T _{Recup} min	Pro f	Nivel PZ
		NORTE	ESTE								
1	ACUEDUCTO VEREDAL	1069843	1187492	247	12	7.3	12.3	420	40	78	239.7
2	ACUEDUCTO VDAL	1072180	1184070	260	4.6	11.1	14.47	360	30	83	248.9
3	LA ENVIDIA	1073773	1194713	241	2	1.02	7.36	360	30	73	240.0
4	ACUEDUCTO VDAL LA UNION	1074644	1198037	230	3.5	1.65	2.84	420	40	84	228.4
5	SAN CARLOS PIECOS	1076144	1185046	283	5.5	13.5	20.78	360	25	120	269.5
6	BASE ISMOCOL	1076155	1185662	284	2.07	12.87	34.65	300	30	82	271.1
7	INPEC YOPAL	1076238	1179705	285	7.4	36.02	60.32	360	120	170	249.0
8	JAC SAN JORGE	1079463	1185792	298	10.4	37.9	51.91	540	50	130	260.1
9	VILLA LUZ	1079569	1195594	258	1.5	1.4	4.28	360	30	55	256.6
10	ESTADIO MUNICIPAL	1080126	1186928	312	5.2	33.27	42.37	300	20	100	278.7
11	SENA	1080557	1186921	319	4.3	43.33	55.85	420	30	160	275.7

N o	FINCA	COORDENADA MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		AL T	Q_ip s	N_Est_ m	N_Din Max	T_Aba t max	T_Recu p min	Pro f	Nivel PZ
		NORTE	ESTE								
12	CENTRAL DE ABASTOS	1080612	1185506	329	3.2	17.42	21.36	300	25	100	311.6
13	SENDEROS DE LA COLINA	1080763	1184019	329	3	72.89	79.68	360	50	150	256.1
14	CLUB EL ALCARAVÁN	1081198	1185065	332	3.6	60.06	64	300	10	120	271.9
15	JAC	1081707	1209506	211	0.41	3.8	4.44	240	20	53	207.2
16	ALTOS DE MANARE I	1081738	1187758	324	6.5	37.54	107.93	360	85	167	286.5
17	HACIENDA CASABLANCA	1081779	1187070	330	5	41.2	46.05	300	15	150	288.8
18	SOPT	1081785	1187058	331	3	25.6	37.65	420	120	90	305.4
19	BOMBEROS	1081885	1186403	334	3.3	15.16	18.59	300	25	100	318.8
20	COLEGIO EL TRIUNFO	1082012	1209205	213	1	3.7	5.2	360	15	50	209.3
21	PLAN DE VIVIENDA ALHAMBRA	1082539	1191727	292	5	0	13.13	360	15	102	292.0
22	CRUZ ROJA	1082664	1186021	346	3	16.14	18.84	300	25	100	329.9
23	COOMULGA	1082907	1191632	293	4.93	13.28	22.67	420	15	82	279.7
24	PROYECTO DE VIVIENDA LUMA	1082963	1186858	342	2.8	41.35	48.19	360	50	102	300.7
25	BARRIO VILLA MARÍA 1	1082982	1187306	340	10.32	28.79	47.4	1320	60	164	311.2
26	BARRIO VILLA MARÍA 2	1083004	1186985	341	30	84.21	110.14	480	70	460	256.8
27	UNISANGIL	1083234	1188869	322	2.5	19.24	29.74	300	180	78	302.8
28	CAMINOS DE SIRIVANA	1083586	1187451	339	1.7	16.81	42.6	360	9	82	322.2
29	HOTEL SIRIVANA	1083630	1189193	319	2.5	9.85	12.53	240	10	82	309.2
30	HOSPITAL REGIONAL	1083744	1186616	349	3.8	40.76	48.15	360	25	200	308.2
31	EJERCITO NACIONAL BR. 16	1083988	1185444	365	4.5	20.54	52.55	300	60	118	344.5
32	HACIENDA EMMANUEL	1084566	1199583	238	5	3.85	10.22	360	15	84	234.2
33	ESCUELA LA CALCETA	1085694	1202851	224	2.3	2.95	5.15	300	30	60	221.1

Fuente: SCG, Modificado por el Autor

Los pozos usados para el escenario 2 corresponde a los 33 pozos, usados en el escenario 1 y 76 pozos profundos inventariados por el SGC 2018, (ver **Tabla 4**) los cuales no cuentan con pruebas de bombeo y por lo tanto no se cuenta con un valor de caudal, por lo que para la simulación se les asigno un valor de 5lt/seg el cual corresponde al valor promedio de los caudales inventariados por el SGC.

Tabla 4. Pozos profundos para escenario 2

No	SITIO	COORDENADA MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		PROF (m)	NIVEL PZ (m)
		NORTE	ESTE		
1	COMANDO DE POLICIA DEPARTAMENTAL	1082473	1185468	200	277
2	SEDE POLICIA MUNICIPAL	1083518	1187636	200	283
3	BARRIO RAUDAL AMERICAS	1080794	1189121	126	269
4	BASE AEREA (GRUPO AEREO DEL CASANARE)	1079955	1186990	126	289
5	URB. VILLA DOCENTE 2	1078173	1185439	70	284
6	BARRIO LLANO LINDO	1078559	1183935	110	285
7	BARRIO BERLIN	1078067	1183671	120	284
8	HOTEL CAMORUCO	1083612	1186147	100	330
9	EDS TERPEL LA LLANERA	1080881	1184405	94	307
10	BASE EQUION (ANTES BP)	1081451	1185319	160	276
11	HALLIBURTON	1079482	1185236	190	295
12	BJ SERVICES	1080940	1184371	80	313
13	SEDE ADMINISTRATIVA MIKOS SAS	1081446	1188428	80	293
14	BALNEARIO PALO GRANDE	1083643	1189012	60	307
15	INPROARROZ	1080979	1184667	50	299
16	PERENCO LTDA	1081954	1187642	80	307
17	URBANIZACION BOND HABITAD	1082625	1184815	143	289

No	SITIO	COORDENADA MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		PROF (m)	NIVEL PZ (m)
		NORTE	ESTE		
18	PURIFICADORA DE AGUA ALCARAVAN	1082219	1186630	93	304
19	SERVICENTRO LA 24	1081544	1186255	84	296
20	AGUA BRISAS DEL MORICHAL	1080476	1184231	120	281
21	SUBASTA GANADERA	1082031	1191583	80	276
22	CARCEL DE YOPAL 2	1076111	1179880	151	247
23	SAN JOSE DE MATEPANTANO / PROYECTO UTOPIA	1080596	1197578	184	243
24	SP INGENIEROS SAS	1075852	1185981	80	267
25	ASOMILLO	1074442	1186117	100	256
26	GIMNASIO DE LOS LLANOS	1074126	1186319	70	255
27	LAGUNAS DE OXIDACION	1077158	1185187	100	282
28	MATADERO MUNICIPAL	1073623	1185989	100	250
29	EDS LA CAMPANILLA	1077251	1185641	80	282
30	MOLINO DIANA KM 5 VIA MORICHAL	1076519	1185733	63.5	275
31	CASA DEL MENOR INFRACTOR	1081769	1189005	62	303
32	HOTEL LA BENDICIÓN	1083826	1188773	60	324
33	LOS CANELOS	1079763	1183364	100	275
34	CENTRO DE HIPOTERAPIA	1080039	1183479	120	309
35	VILLA GLADYS	1077920	1189381	55	272
36	COLINA CAMPESTRE	1080562	1183648	120	288
37	HACIENDA EMMANUEL	1083080	1196161	84	253
38	C. R. COMFACASANARE	1083943	1190525	60	289
39	LAGUNA VIEJA	1084173	1190491	70	297
40	PORTALES DE SIRIVANA 0	1083625	1191158	60	296

No	SITIO	COORDENADA MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		PROF (m)	NIVEL PZ (m)
		NORTE	ESTE		
41	SENDEROS DE SIRIVANA	1084182	1192398	30	280
42	LOS ARRAYALES	1083328	1190405	60	304
43	BELLA FLOR	1083772	1190991	68	301
44	VILLA ELISA	1084127	1191234	65	298
45	CAÑA VERAL	1083826	1191402	40	294
46	RESTAURANTE HATO GRANDE	1084197	1192343	30	282
47	BUENOS AIRES	1084357	1193285	36	278
48	EL GARCERO	1084979	1194814	10	271
49	CLUD CAMPESTRE CASA VIEJA	1085444	1196076	120	257
50	LA CHINATA	1083971	1201304	36	190
51	EL RETIRO Y CON ESTO TENGO	1084001	1201747	30	227
52	AMAZONA DE ORO	1083880	1202623	60	222
53	EL TAPARITO	1083791	1207769	40	208
54	TRANQUILANDIA	1083701	1206417	42	209
55	LOS LAURELES	1083394	1207771	42	209
56	FINCA CAMPO HERMOSO	1081860	1208663	42	208
57	SAN ALEJO	1083058	1208082	43	207
58	EL DIAMANTE	1083843	1205928	42	213
59	BARSOBIA	1083967	1205828	40	210
60	EL WUISARAL	1075776	1195616	42	245
61	ESCUELA EL GARZON	1074458	1194101	30	241
62	ESTACION VORD AERO CIVIL	1075275	1182986	30	272
63	SABANAS DEL SIMARUA	1075230	1183053	80	275
64	MANATIALES	1074433	1182944	65	267
65	VILLA JULINA 2	1072569	1184801	40	260
66	NAPOLES	1072512	1185422	20	255
67	LOS COCHES	1072506	1186520	43	258
68	CONDominio SAN RAFAEL	1072201	1186199	100	256
69	VILLA JULIANA 1LOTE #3	1071492	1185314	35	254
70	ISLANDA	1068322	1188228	20	233

No	SITIO	COORDENADA MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		PROF (m)	NIVEL PZ (m)
		NORTE	ESTE		
71	ESCUELA EL MILAGRO	1066857	1190728	48	227
72	MIRALINDO	1066885	1191160	42	228
73	EL MORICHE	1068949	1188027	30	235
74	PARAISO	1068369	1192055	22	229
75	LA CABAÑA	1066450	1190175	45	227
76	VILLA DEL SOL	1066662	1190262	12	226

Fuente: SCG, Modificado por el Autor

6.4.6 Parámetros hidráulicos

La conductividad hidráulica (K) que se define como una medida de la habilidad del acuífero de transmitir agua subterránea. Dentro de la medida que caracterizan a una formación geológica desde el punto de vista hidráulico, la conductividad hidráulica horizontal (K_x , K_y) y vertical (K_z), (o la transmisividad) y el coeficiente de almacenamiento, son parámetros que se deben incluir en los modelos utilizados para simulaciones transitorias. (Sanchez, 2009)

Los datos para estos parámetros suelen ser en muchas ocasiones escasos y por eso, en grandes áreas de los modelos se estiman sus valores. Los modelos generalmente utilizan conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento basadas en registros de pozos (pruebas de bombeos, perforaciones de suelos, muestras de suelos, cortes litológicos) y valores corregidos durante la calibración. (Rodríguez, 2010)

De acuerdo con los datos obtenidos por el SGC, en los parámetros hidráulicos derivados a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo realizadas en algunos de los pozos inventariados el abanico aluvial del municipio de Yopal (Qab) presentan transmisividades (T) entre 64 y 590 $m^2/día$, cuyo promedio se encuentra cercano a 300 $m^2/día$, de la prueba de bombeo realizada en uno de los pozos inventariados de la unidad de Q1pal, sugiere

puntualmente una Transmisividad (T) cercana a 600 m²/día, Los parámetros hidráulicos obtenidos a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo realizadas en los pozos profundos Central de Abastos, Núcleo Urbano y SGC Yopal 1 que captan en profundidad de la unidad de la formación caja (N1c) sugieren unas Transmisividades (T) del orden de 223 m²/día a 496 m²/día. Teniendo en cuenta que Transmisividad es igual a:

$$\text{Transmisividad} = \text{Conductividad hidráulica} * \text{Espesor}$$

Se calcula a través de la fórmula los valores de conductividad hidráulica ya que contamos con los espesores de las unidades geológicas y valores de transmisividad hidráulica.

$$\text{Conductividad} = \text{Transmisividad} / \text{Espesor}$$

Tabla 5. *Valores de conductividad usados en el modelo*

Formación o zona de conductividad	Espesor	Transmisividad (m ² /día)	Conductividad hidráulica (m ² /día)	Conductividad hidráulica ingresada al modelo
Q2ab y Q1pal	219 m	64 -590	1.01 – 2.69	1.86E-05
N1c	281 m	223 -496	0.79 – 1.76	1.07E-06

Fuente: SCG, Modificado por el Autor

6.5 CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO

La calibración es el ajuste de los parámetros o un grupo de propiedades hidráulicas o condiciones de frontera ajustadas, que concuerden con los valores medidos en campo dentro de un rango de error preestablecido (Rodríguez, 2010), Existen dos procedimientos generales para la calibración: del modelo, el ajuste manual por ensayo y error, y la estimación automatizada de parámetros (WinPEST). El ajuste manual suele ser la más utilizada hoy en día para los modelos, sin embargo suele ser muy subjetivo y conducente a resultados difícil de evaluar (Carrera y Neuman, 1986), En este ajuste el modelador calibra su modelo de acuerdo

con la información y todo el contexto del área de estudio con parámetros como conductividades, recarga, evapotranspiración entre otras, así mismo se esperan un resultado que se acerque más a los resultados reales previstos de un modelo conceptual y piezometría ya existente.

Una vez determinado el dominio de modelación, definidas las fronteras y las condiciones de parámetros hidráulicos, se procede a realizar una evaluación simple del ajuste del modelo, a través de la calibración.

La calibración de un modelo de flujo consiste en encontrar un conjunto de parámetros, condiciones de contorno y esfuerzos capaces de producir cargas y flujos hidráulicos medidos en campo (Anderson & Woessner, 1992)

La calibración del modelo consistió en realizar simulaciones en estado estacionario buscando que los niveles piezométricos y pozos profundos se ajustaran a la información representada, para la calibración se modificaron los valores de las conductividades hidráulicas y los parámetros de evapotranspiración.

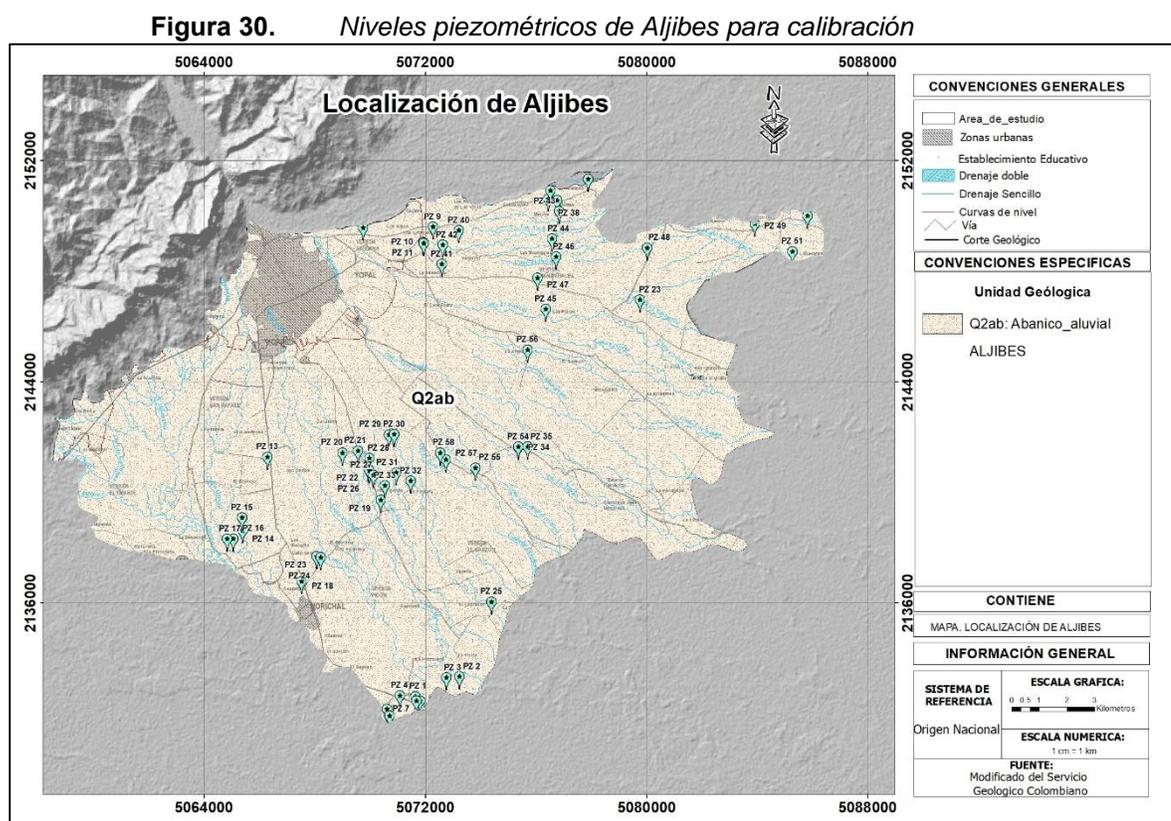
El análisis de sensibilidad tiene por objeto evaluar la confianza en los valores hidráulicos asignados. y la importancia de los parámetros del acuífero para las simulaciones de aguas (Martín & Whiteman, 1990).

El error medio cuadrático en inglés (root mean square, RMS), corresponde a la raíz cuadrada del promedio de los valores al cuadrado. Es decir, representa una medida promedio del valor absoluto de los residuos.

6.5.1 Paquete Head Observation

Para facilitar la calibración se utiliza, el paquete Head Observación el cual permite estimar cargas observadas con cargas simuladas calculadas por MODFLOW (Hill et al., 2000).

Para tal fin se emplean niveles piezómetros encontrados en el área de estudio y la profundidad en m de los datos de aljibes inmerso en el modelo hidrogeológico conceptual del SGC, 2018 (ver **Figura 30** y **Tabla 6**), de igual forma con el fin facilitar la calibración se incluye los valores de niveles piezométricos de las 33 pruebas de bombeo (ver **Tabla 3** y **Figura 29**).



Fuente: SCG, 2018 Modificado por el Autor

Tabla 6. Niveles piezométricos de Aljibes para calibración

NUMERO	NOMBRE	SITIO	ESTE	NORTE	COTA	PROF (m)	NIVEL	NP_LIBRE
PZ 1	ALJIBE	MIRALINDO	1191184	1066891	239	7	ESTATICO	229.1
PZ 2	ALJIBE	LA CALLENA	1192777	1067620	228	6	ESTATICO	222.7
PZ 3	ALJIBE	CARITO	1192312	1067578	225	6	ESTATICO	226.8
PZ 4	ALJIBE	LA ENVIDIA	1190618	1066932	238	3	ESTATICO	230.9
PZ 5	ALJIBE	FINQUITA LA CABAÑA	1190149	1066428	247	4	ESTATICO	227.4
PZ 6	ALJIBE	LA MILAGROSA	1190242	1066193	243	6	ESTATICO	226.3
PZ 7	ALJIBE	CHAPARRAL	1191345	1066738	231	7	ESTATICO	224.2
PZ 8	ALJIBE	LA PRADERA	1191210	1066747	233	3	ESTATICO	229.5
PZ 9	ALJIBE	LA RESERVA	1191784	1083884	298	12	ESTATICO	295.1
PZ 10	ALJIBE	VILLA LAURA	1191428	1083336	320	0	ESTATICO	292.5
PZ 11	ALJIBE	LA ESPERANZA	1191446	1083284	317	0	ESTATICO	292.3
PZ 12	ALJIBE	FINCA SAN MARCOS	1189254	1083852	332	0	ESTATICO	311.6
PZ 13	ALJIBE	SECADORA EL GUANAPALO	1185819	1075551	302	1.8	ESTATICO	276.5
PZ 14	ALJIBE	FINCA LA CHIROSA	1184916	1072887	274	15	ESTATICO	258.6
PZ 15	ALJIBE	FINCA COMPROMISO	1184902	1073353	268	20	ESTATICO	264.4
PZ 16	ALJIBE	FINCA LA TORMENTA	1184580	1072588	274	0	ESTATICO	255.4
PZ 17	ALJIBE		1184352	1072586	274	0	ESTATICO	259.0
PZ 18	ALJIBE	LADRILLERA GARCIA	1187061	1071064	264	17	ESTATICO	250.2
PZ 19	ALJIBE	FINCA LA PERLA	1189917	1073998	256	4	ESTATICO	256.6
PZ 20	ALJIBE	FINCA LA GIRALDA	1188531	1075710	294	0	ESTATICO	273.1
PZ 21	ALJIBE	FINCA EL NARANJAL	1189087	1075787	288	8	ESTATICO	272.7
PZ 22	ALJIBE	ESCUELA	1189467	1075131	278	3.2	ESTATICO	267.7
PZ 23	ALJIBE	FINCA EL CAFETAL	1187594	1071964	269	8	ESTATICO	253.7
PZ 24	ALJIBE	VILLA CAMILA	1187738	1071927	266	6	ESTATICO	251.4
PZ 25	ALJIBE	HACIENDA CASCABELES	1193924	1070328	233	0	ESTATICO	225.4
PZ 26	ALJIBE	HOGAR DE PASO CORPORINOQUIA	1189495	1075076	276	4	ESTATICO	268.8
PZ 27	ALJIBE	FINCA LA FORTUNA	1189652	1074890	279	3.5	ESTATICO	264.9
PZ 28	ALJIBE	FINCA CLARINAS	1189503	1075515	283	0	ESTATICO	271.7
PZ 29	ALJIBE	NUEVA GRANADA	1190210	1076362	283	12	ESTATICO	265.8
PZ 30	ALJIBE	VILLA LEIDY	1190387	1076378	285	0	ESTATICO	266.2

NUMERO	NOMBRE	SITIO	ESTE	NORTE	COTA	PROF (m)	NIVEL	NP_LIBRE
PZ 31	ALJIBE	LA FINCA	1190477	1074990	286	5	ESTATICO	261.3
PZ 32	ALJIBE		1190997	1074690	282	0	ESTATICO	259.8
PZ 33	ALJIBE	FINCA MI RANCHITO	1190061	1074520	274	5	ESTATICO	259.6
PZ 34	ALJIBE	PISCICOLA VILLA LUZ	1194893	1075926	248	3.6	ESTATICO	246.9
PZ 35	ALJIBE	FINCA FUNDO BONITO	1195234	1075929	248	7	ESTATICO	246.6
PZ 36	ALJIBE	JAPON	1197394	1085624	259	4.16	ESTATICO	250.5
PZ 37	ALJIBE	VILLA ANGIE	1196277	1084862	255	4.68	ESTATICO	258.9
PZ 38	ALJIBE	ESCUELA PALOMAS	1195962	1084902	269	5.42	ESTATICO	259.9
PZ 39	ALJIBE	FINCA PIÑALITO	1196037	1085202	258	4.34	ESTATICO	256.8
PZ 40	ALJIBE	LA ENVIDIA	1192731	1083755	288	4.09	ESTATICO	284.7
PZ 41	ALJIBE	MALABARES 2	1192103	1082537	301	11.42	ESTATICO	287.3
PZ 42	ALJIBE	GUARATARO	1192137	1083231	290	8.54	ESTATICO	286.3
PZ 43	ALJIBE	VILLA MARIANA	1196348	1084454	269	2.81	ESTATICO	255.3
PZ 44	ALJIBE	COROZAL	1196089	1083461	280	4.9	ESTATICO	258.0
PZ 45	ALJIBE	LAS FLORES	1195874	1080918	260	2.25	ESTATICO	262.1
PZ 46	ALJIBE	VILLA MARINA	1196243	1082803	263	2.67	ESTATICO	256.4
PZ 47	ALJIBE	TANITOS	1195575	1082048	283	3.84	ESTATICO	262.9
PZ 48	ALJIBE	FINCA	1199537	1083144	247	8	ESTATICO	238.2
PZ 49	ALJIBE	FINCA	1203438	1084028	226	8	ESTATICO	220.2
PZ 50	ALJIBE	FINCA	1205349	1084300	219	6	ESTATICO	215.7
PZ 51	ALJIBE	FINCA	1204800	1083022	219	6	ESTATICO	214.2
PZ 52	ALJIBE	FINCA	1210636	1081982	207	5	ESTATICO	205.1
PZ 23	ALJIBE	FINCA SANTA LUCIA	1199287	1081258	248	8	ESTATICO	239.2
PZ 54	ALJIBE	PISCICOLA VILLA LUZ	1194890	1075936	265	3.5	ESTÁTICO	247.5
PZ 55	ALJIBE	SAN ANTONIO	1193332	1075175	265	3.2	ESTÁTICO	249.3
PZ 56	ALJIBE	LA ARGENTINA	1195217	1079443	264	5.9	ESTÁTICO	262.6
PZ 57	ALJIBE	JOSE LEONIDES	1192265	1075470	262	3.58	ESTÁTICO	256.5
PZ 58	ALJIBE	EL DIVINO NINO	1192062	1075714	266	5.2	ESTÁTICO	257.5

Fuente: SCG, Modificado por el Autor

7 RESULTADOS

7.1 SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO O PERMANENTE

7.1.1 Balance hídrico

El balance de agua para simulación en estado permanente (sin bombeo) en el área de estudio (abanico aluvial de Yopal), nos muestra que el mayor ingreso al modelo es por recarga, luego por ríos y finalmente por GHB, de igual forma se observa que la mayor salida del modelo es por evapotranspiración, posteriormente GHB y por ultimo ríos, en el cual se observa un total de entradas igual al de salidas con un valor de 2.2635 los valores de recarga y descarga del abanico, con una diferencia $7.8678E-06$ y un porcentaje de discrepancia de 0.00 (ver **Tabla 7**).

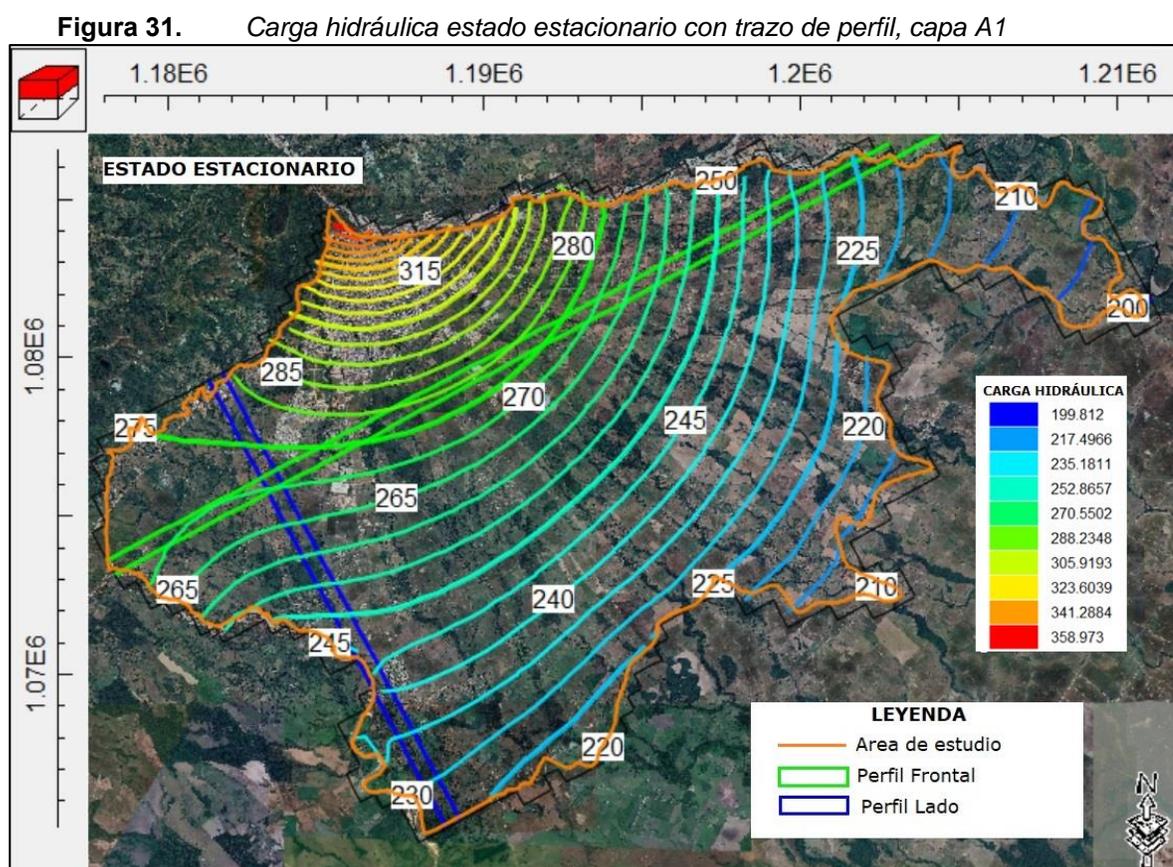
Tabla 7. Balance hídrico

VOLUMEN ACUMULADO	ESTADO ESTACIONARIO	
	ENTRADAS	SALIDAS
	m ³ /seg	m ³ /seg
ALMACENAMIENTO	0	0
RÍOS	0.914	0.5398
EVT	0	1.0582
GHB	0.03996	0.6655
RECARGA	1.3095	0
TOTAL ENTRADA - SALIDAS	2.2635	2.2635
ENTRADAS - SALIDAS	7.87E-06	
PORCENTAJE DE DISCREPANCIA	0	

Fuente: Autor

7.1.2 Carga hidráulica y tabla de agua

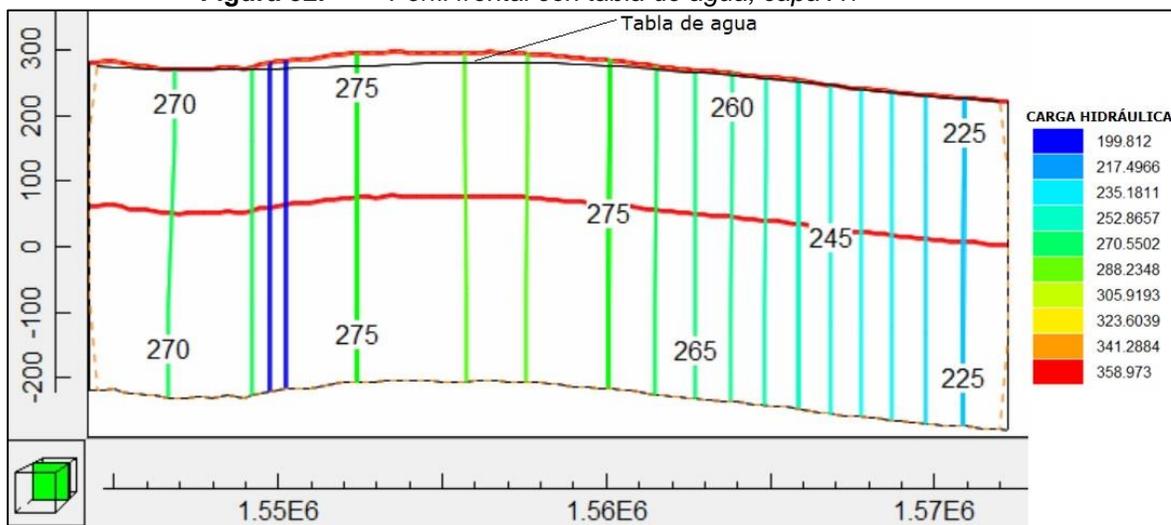
En la **Figura 31**, se observan las cargas hidráulicas del área del área de estudio en capa del acuífero libre A1, observándose valores alturas piezométricas que van desde 350 m en la parte más alta del abanico a 200 m en la parte baja, con una orientación de noroccidente a este. (Imagen de fondo de Google maps).



Fuente: Autor

En la **Figura 32**, se observa el perfil frontal del área de estudio en la capa A1, en donde se aprecia una profundidad de la tabla de agua que va desde 19 m hasta profundidades inferiores a 1 m.

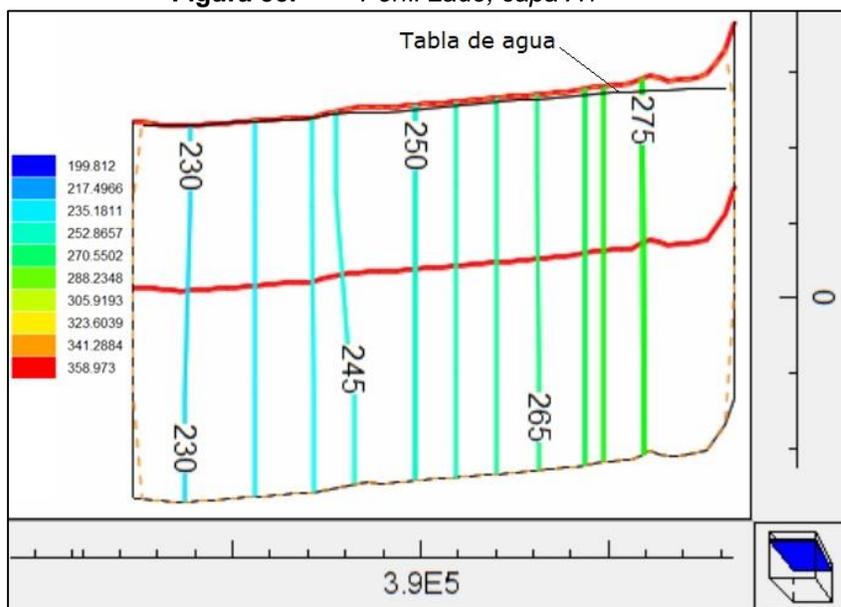
Figura 32. Perfil frontal con tabla de agua, capa A1



Fuente: Autor

En la **Figura 33** se observa el perfil de lado de la capa A1, del área de estudio apreciándose profundidades de la tabla de agua que van desde 23 m hasta profundidades inferiores a 1 m.

Figura 33. Perfil Lado, capa A1

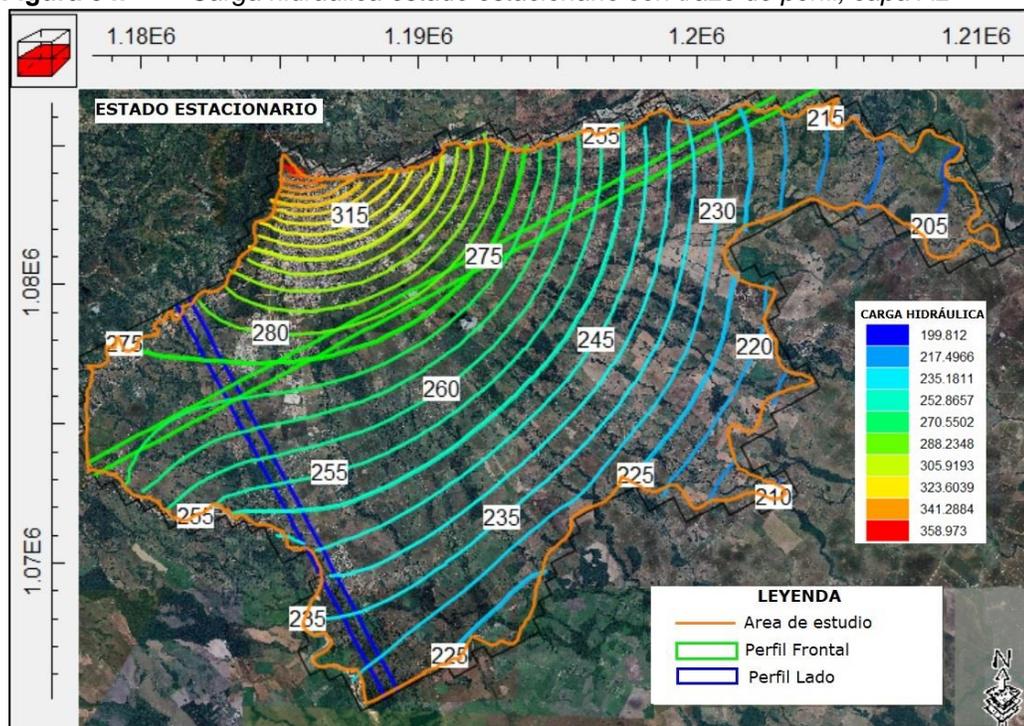


Fuente: Autor

En la **Figura 34**, se observan las cargas hidráulicas del área del abanico aluvial en la

capa del acuífero semi confinado A2, observándose valores alturas piezométricas que van desde 350 m en la parte más alta del abanico a 205 m en la parte baja, con una orientación de noroccidente a este. (Imagen de fondo de Google maps).

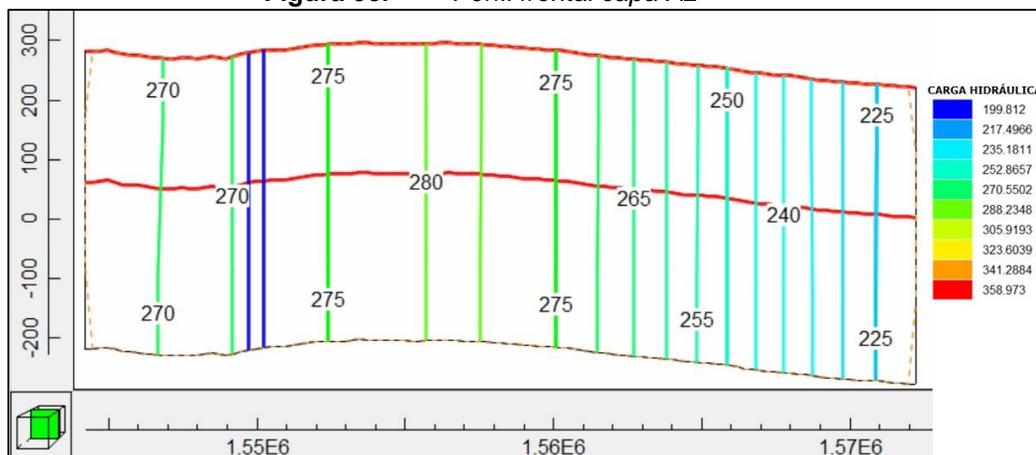
Figura 34. Carga hidráulica estado estacionario con trazo de perfil, capa A2



Fuente: Autor

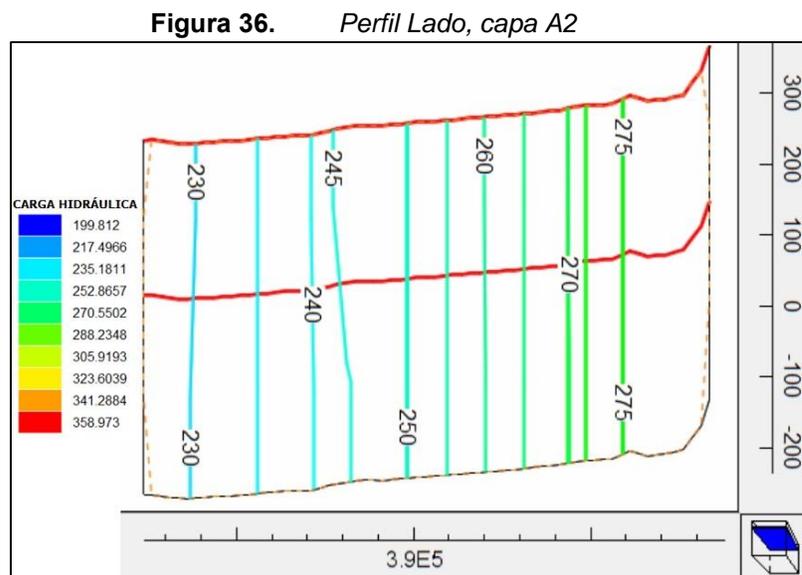
En la **Figura 35**, se observa el perfil frontal del área de estudio en la capa A2.

Figura 35. Perfil frontal capa A2



Fuente: Autor

En la **Figura 36** se observa el perfil de lado del área de estudio en la capa A2.



Fuente: Autor

7.2 SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO, ESCENARIO 1

7.2.1 Balance hídrico

Se realizó simulaciones para un periodo de estrés de 15 años, con una medición anual y con los escenarios de bombeo de 33 pozos profundos (ver **Tabla 3**), conservando el caudal para el periodo del 1 al 15 año, observándose una diferencia de entradas vs salidas de $3.4332\text{E-}05 \text{ m}^3/\text{año}$ para el periodo uno y una diferencia de $5.9605\text{E-}06 \text{ m}^3/\text{año}$ para el periodo quince, (ver **Tabla 8**).

Tabla 8. Balance Hidrico año 1 y año 15

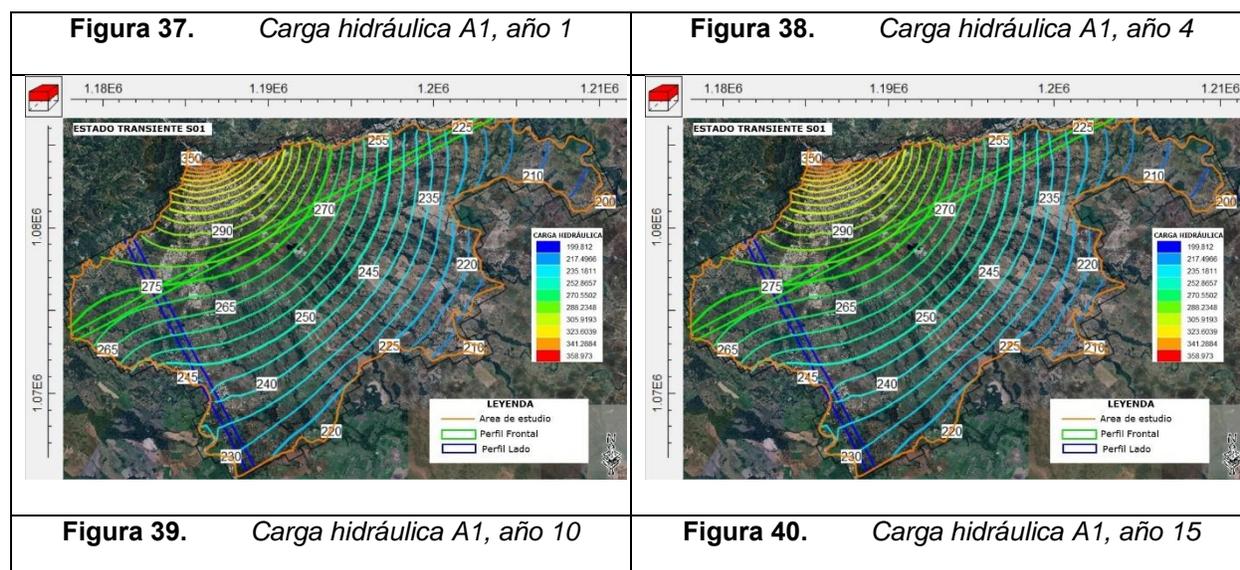
VOLUMEN ACUMULADO	AÑO 1		AÑO 15	
	ENTRADAS m^3/seg	SALIDAS m^3/seg	ENTRADAS m^3/seg	SALIDAS m^3/seg
ALMACENAMIENTO	0.1968	8.94E-03	5.5255-07	2.72E-08

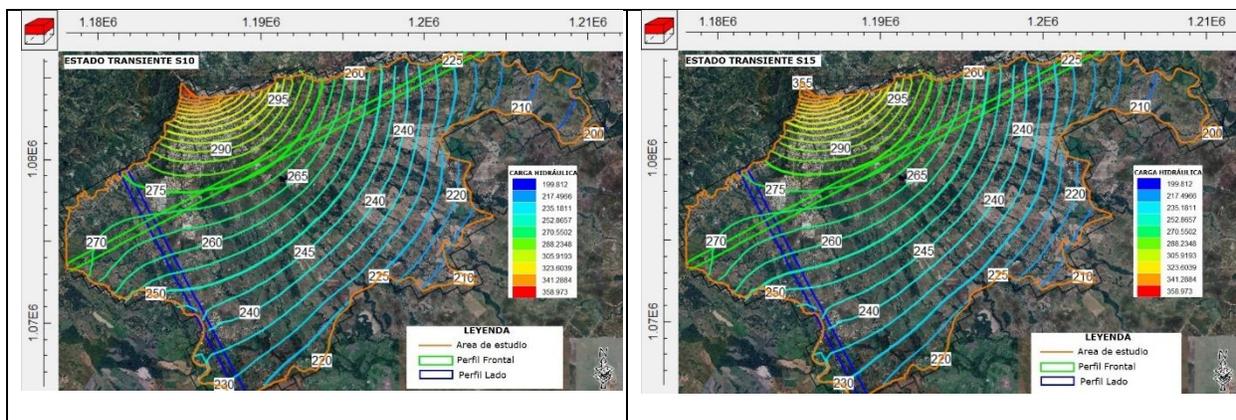
VOLUMEN ACUMULADO	AÑO 1		AÑO 15	
	ENTRADAS m ³ /seg	SALIDAS m ³ /seg	ENTRADAS m ³ /seg	SALIDAS m ³ /seg
POZOS	0	0.1638	0	0.1638
RÍOS	0.917	0.5485	1.0168	0.5052
EVT	0	1.0612	0	1.0532
GHB	3.90E-02	0.6797	4.1046-02	0.652
RECARGA	1.3095	0	1.3095	0
TOTAL ENTRADA - SALIDAS	2.4622	2.4622	2.3674	2.3674
ENTRADAS - SALIDAS	3.43E-05		5.2452-06	
PORCENTAJE DE DISCREPANCIA	0		0	

Fuente: Autor

7.2.2 Carga hidráulica y tabla de agua

De la **Figura 37** a la **Figura 40** se observan las cargas hidráulicas para los años uno, cuatro, diez y quince, en la capa del acuífero libre A1, observándose valores alturas piezométricas que van desde 200 a 350 para el año uno y cuatro y alturas piezométricas de 200 a 355 para el año diez y quince. (Imagen de fondo de Google maps).

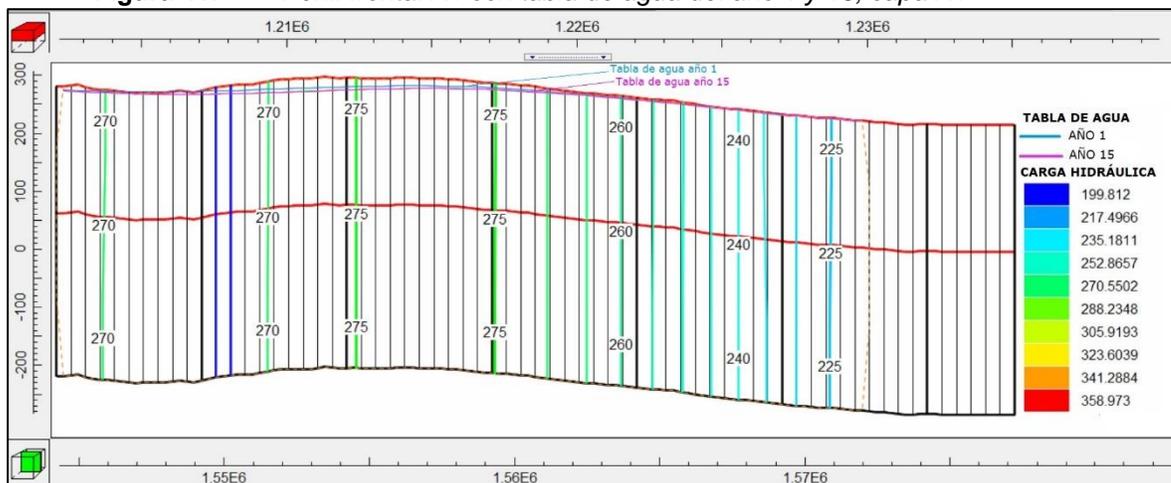




Fuente: Autor

En la **Figura 41**, se observa el perfil frontal del área de estudio en la capa A1, en donde se aprecia una diferencia en la tabla de agua de 2 a 6 m entre el año 1 al año 15, una diferencia aproximada de 1 m entre el año 4 al año 10, y finalmente una diferencia de 0 m entre el año 10 y el año 15.

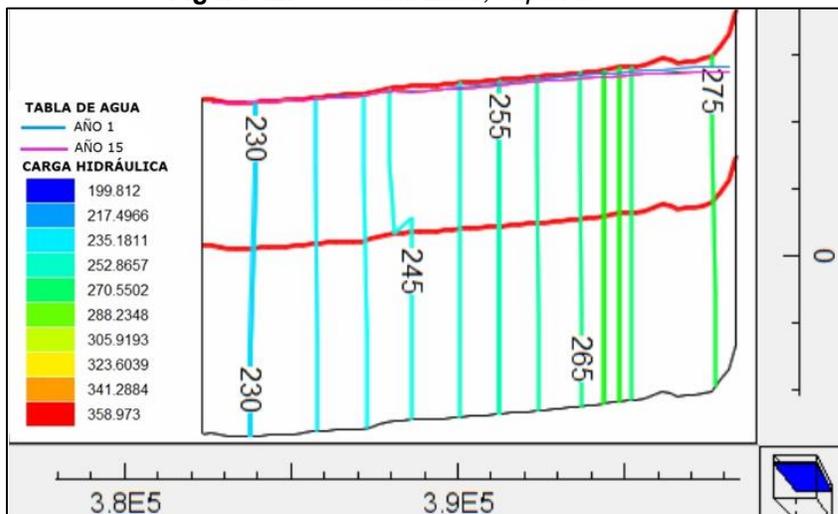
Figura 41. Perfil frontal A1 con tabla de agua del año 1 y 15, capa A1



Fuente: Autor

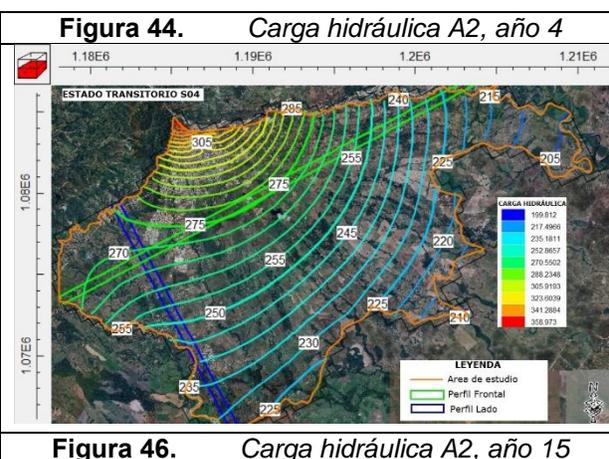
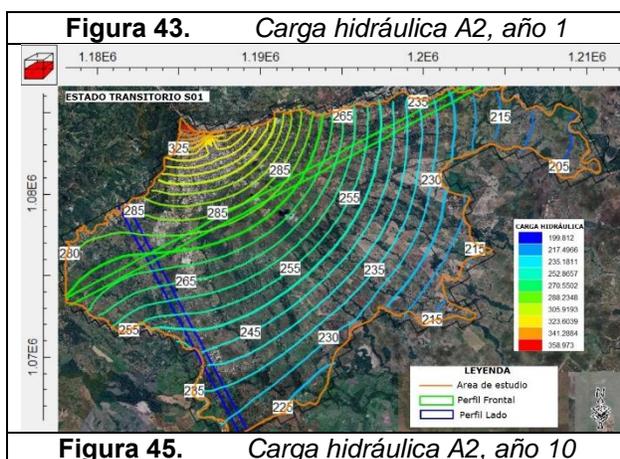
En la **Figura 42** se observa el perfil de lado de la capa A1, del área de estudio con una diferencia en la tabla de agua de 1 a 5 m entre el año 1 al año 15.

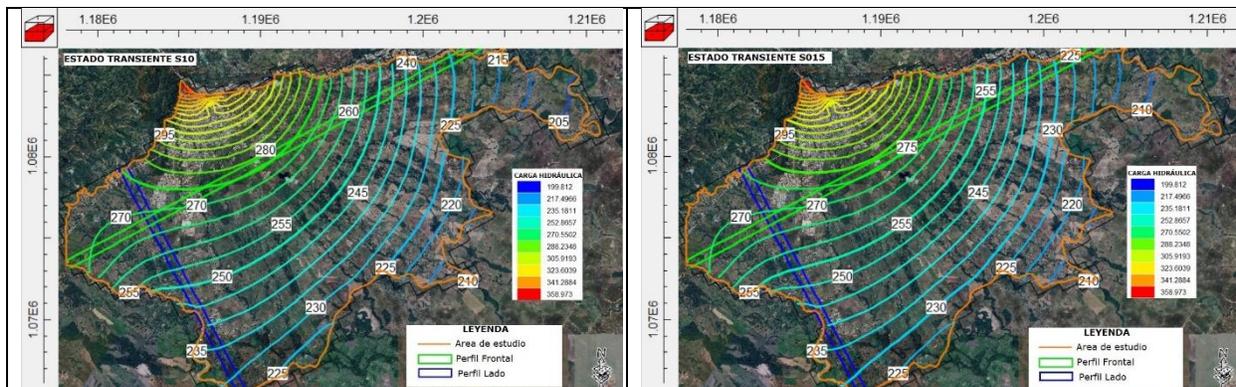
Figura 42. Perfil Lado, capa A1



Fuente: Autor

De la **Figura 43** a la **Figura 46**, se observan las cargas hidráulicas del área de estudio para los años uno, cuatro, diez y quince, en la capa del acuífero semi confinado A2, observándose valores alturas piezométricas que van desde 205 m a 350 m para el año uno, cuatro y diez y alturas piezométricas de 210 m a 355 m para el quince. (Imagen de fondo de Google maps).

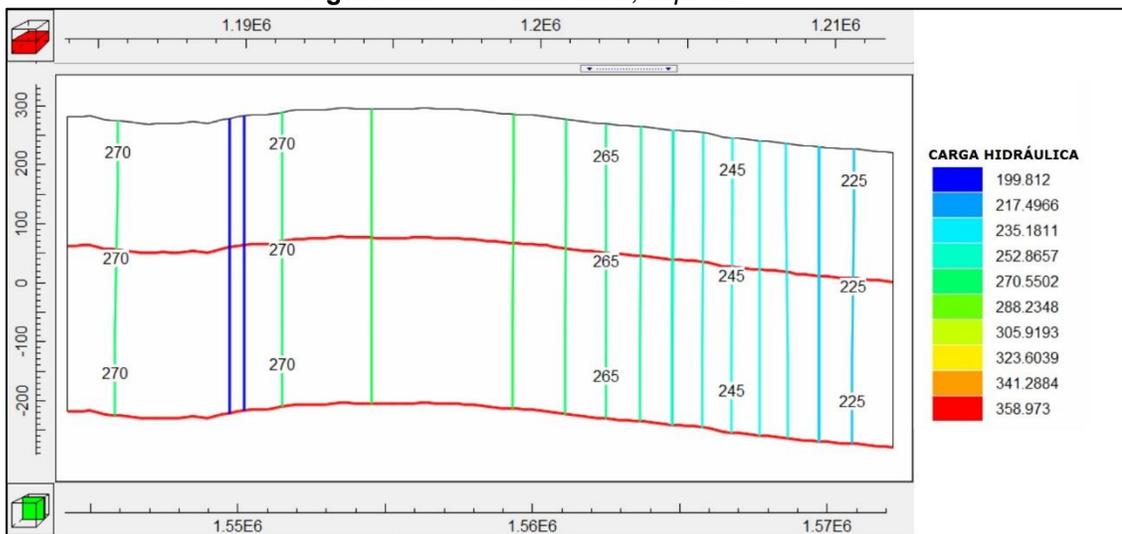




Fuente: Autor

En la **Figura 47**, se observa el perfil frontal del área de estudio en la capa A2.

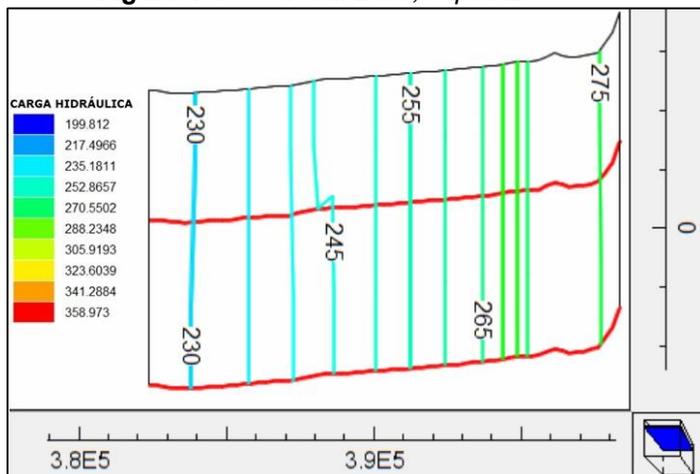
Figura 47. Perfil frontal, capa A2



Fuente: Autor

En la **Figura 48** se observa el perfil de lado de la capa A2, del área de estudio.

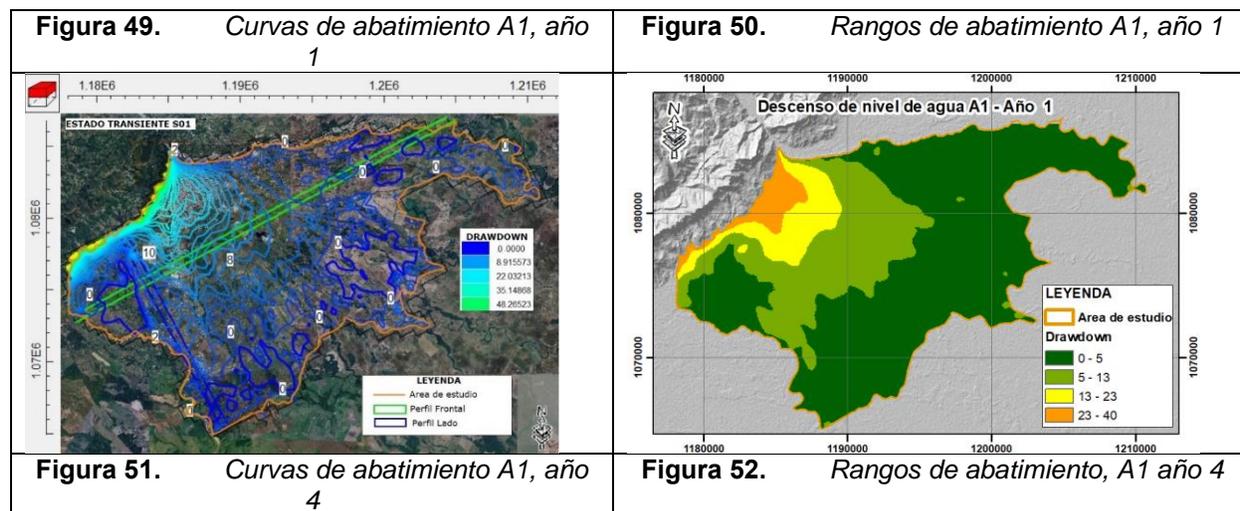
Figura 48. Perfil Lado, capa A2



Fuente: Autor

7.2.3 Escenario de bombeo

De la **Figura 49** a la **Figura 56** se observan valores de descenso de nivel de agua (abatimiento) para los años uno, cuatro, diez y quince, en la capa del acuífero libre A1, observándose valores de entre 0 a 40, (Imagen de fondo de Google maps).



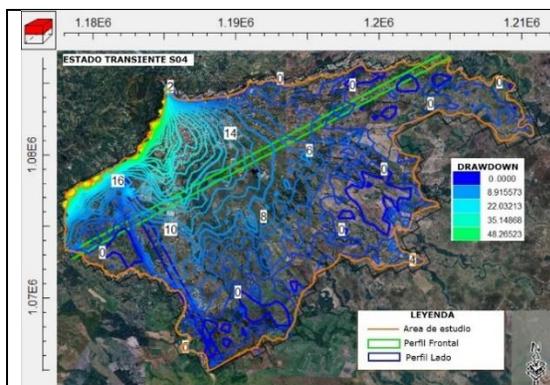


Figura 53. Curvas de abatimiento A1, año 10

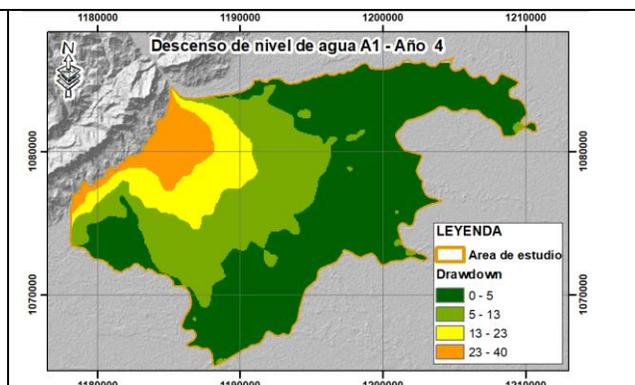


Figura 54. Rangos de abatimiento A1, año 10

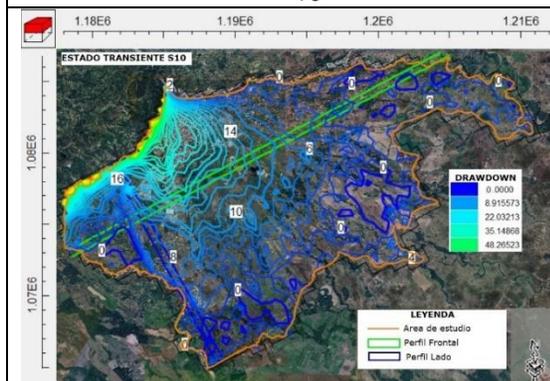


Figura 55. Rangos de abatimiento A1, año 15

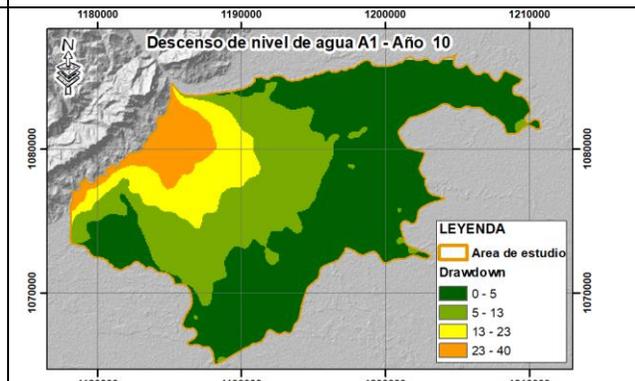
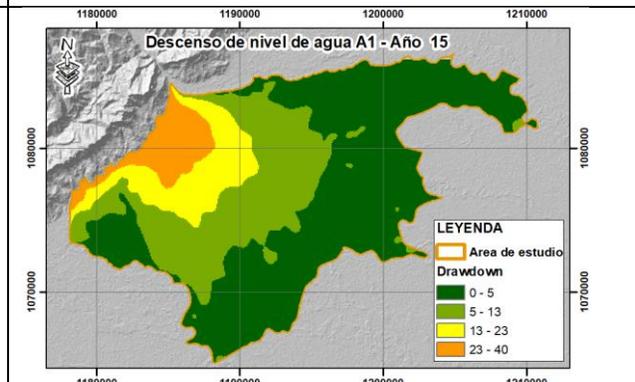
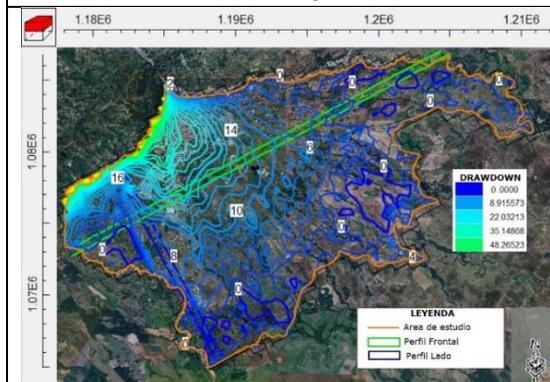


Figura 56. Rangos de abatimiento A1, año 15



Fuente: Autor

De la **Figura 71** a la **Figura 74** se observan valores de descenso de nivel de agua (abatimiento) para los años uno, cuatro, diez y quince, en la capa acuífero semiconfinado A2, observándose valores entre 0 a 48. (Imagen de fondo de Google maps).

Figura 57. Curvas de abatimiento A2, año 1

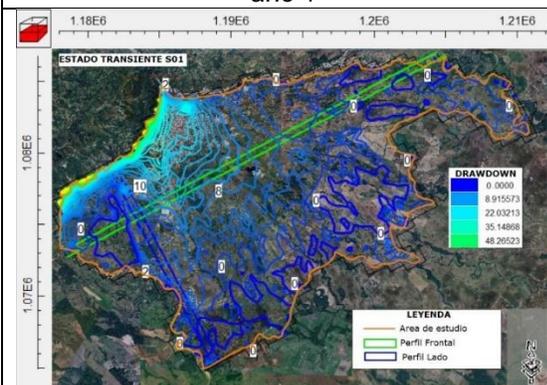


Figura 59. Curvas de abatimiento A2, año 4

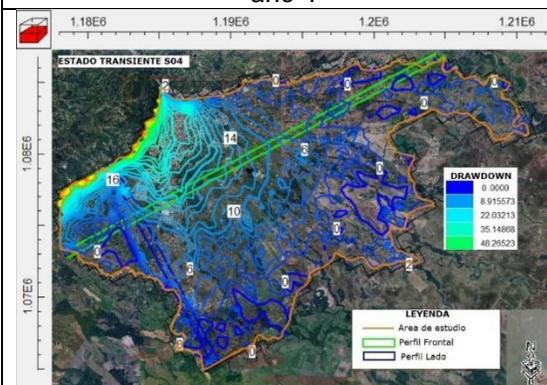


Figura 61. Curvas de abatimiento A2, año 10

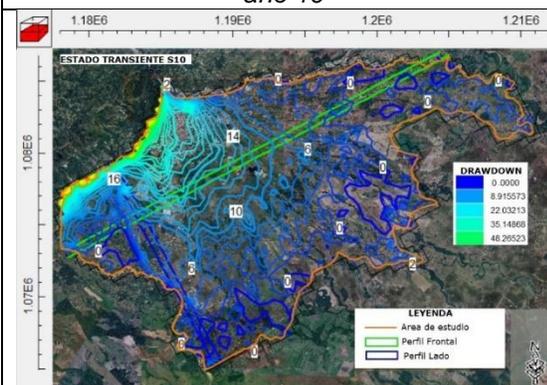


Figura 63. Curvas de abatimiento A2, año 15

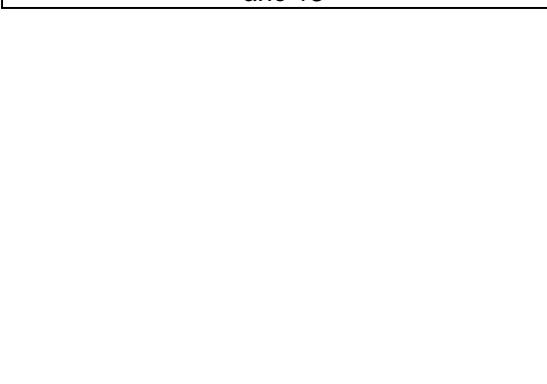


Figura 58. Rangos de abatimiento A2, año 1

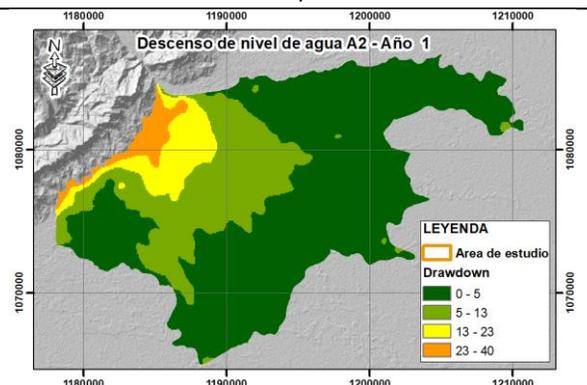


Figura 60. Rangos de abatimiento A2, año 4

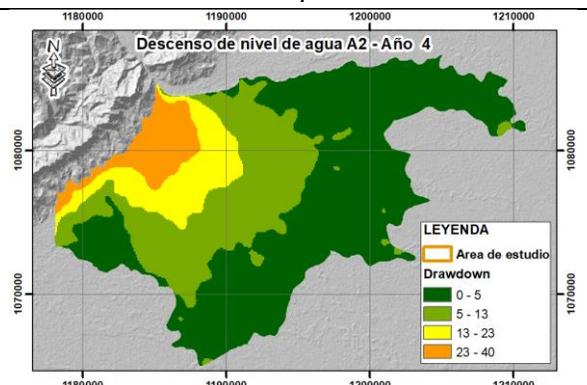


Figura 62. Rangos de abatimiento A2, año 10

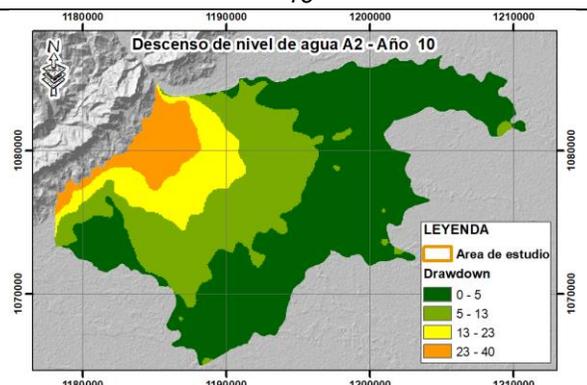
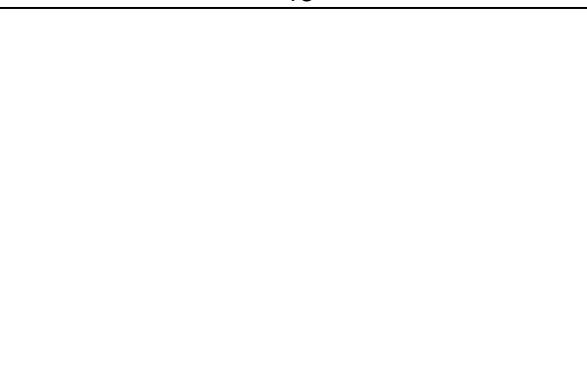
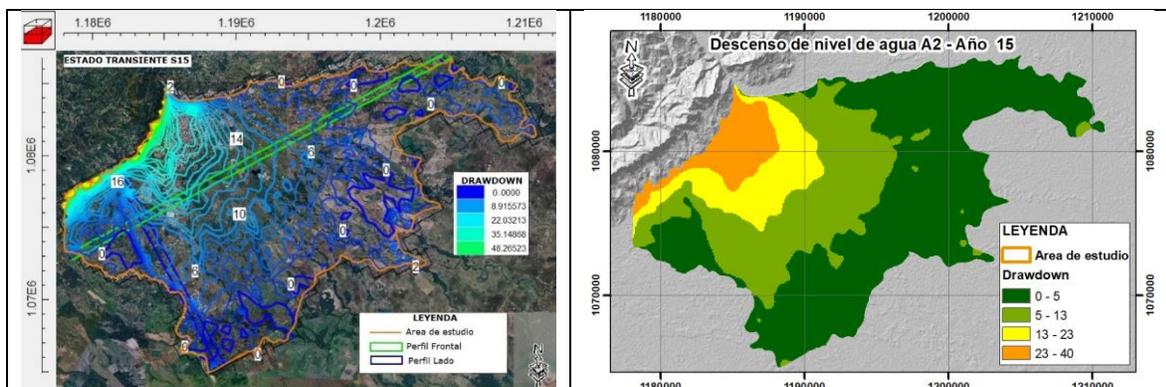


Figura 64. Rangos de abatimiento A2, año 15





Fuente: Autor

7.3 SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO, ESCENARIO 2

7.3.1 Balance hídrico

Para el modelo transitorio 2 se realizó simulaciones para un periodo de estrés de 15 años, con una medición anual y con los escenarios de bombeo para 76 pozos profundos con un caudal de 5 l/seg y 33 pozos profundos con los caudales registrados en las pruebas de bombeo, (ver **Tabla 3**), conservando los caudales para los periodos del 1 al 15, observándose una diferencia de entradas vs salidas de $3.4332E-05$ m³/año para el periodo uno y una diferencia de $-5.9605E-06$ m³/año para el periodo quince, (ver **Tabla 9**).

Tabla 9. Balance Hidrico año 1 y año 15

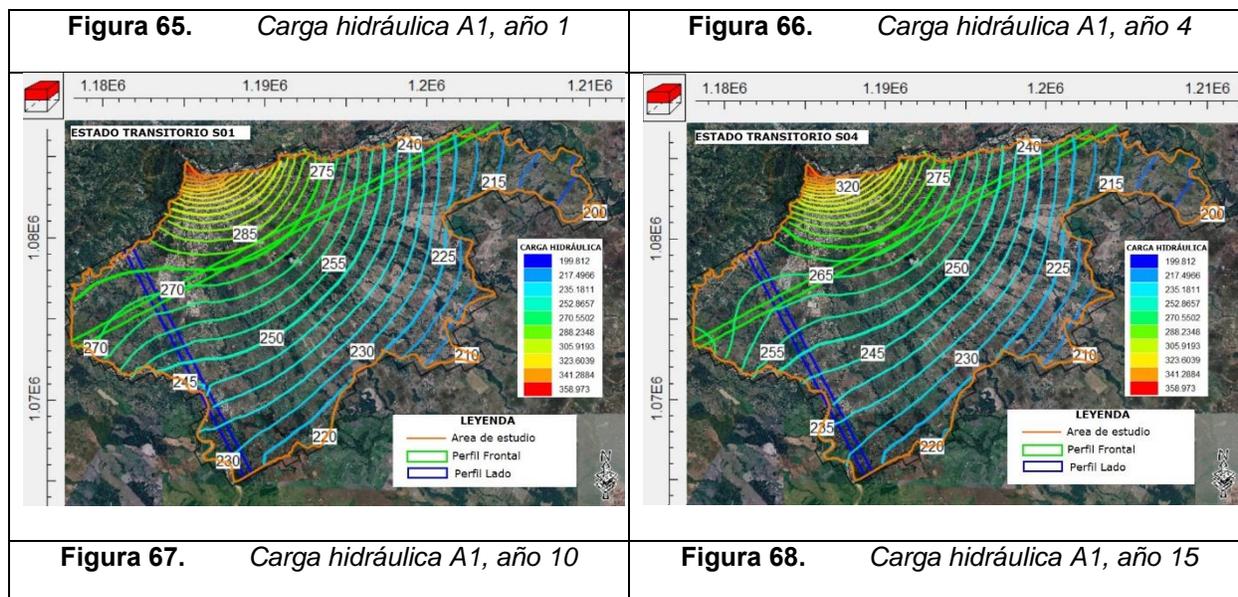
VOLUMEN ACUMULADO	AÑO 1		AÑO 15	
	ENTRADAS m ³ /seg	SALIDAS m ³ /seg	ENTRADAS m ³ /seg	SALIDAS m ³ /seg
ALMACENAMIENTO	0.2594	4.07E-03	7.9884-07	4.12E-08
POZOS	0	0.51	0	0.51
RÍOS	1.0565	0.4822	1.1902	0.4264
EVT	0	1.0538	0	1.0423
GHB	4.51E-02	0.6203	4.8327-02	0.5694
RECARGA	1.3095	0	1.3095	0

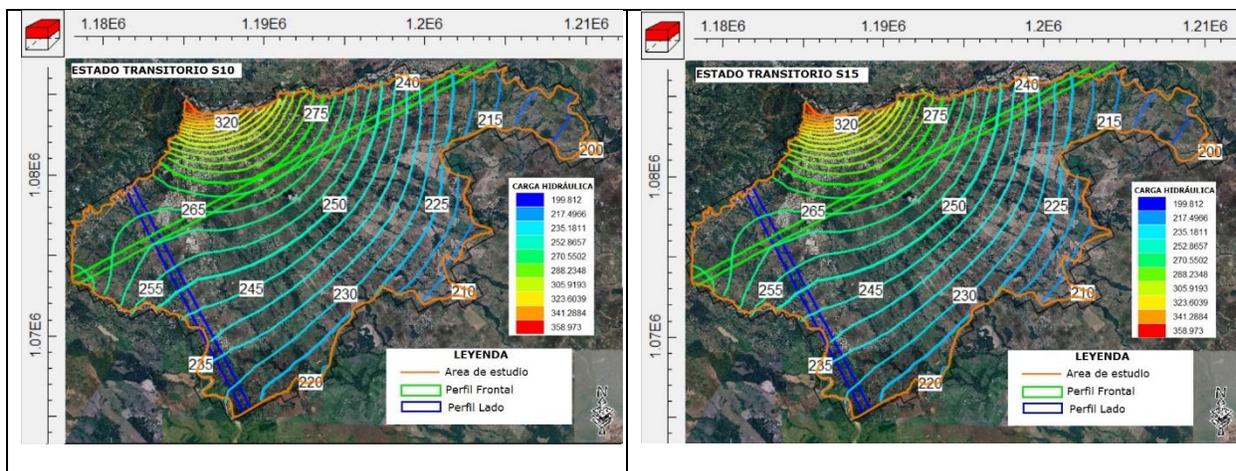
VOLUMEN ACUMULADO	AÑO 1		AÑO 15	
	ENTRADAS m ³ /seg	SALIDAS m ³ /seg	ENTRADAS m ³ /seg	SALIDAS m ³ /seg
TOTAL ENTRADA - SALIDAS	2.6704	2.6704	2.548	2.5481
ENTRADAS - SALIDAS	3.43E-05		-5.96E-06	
PORCENTAJE DE DISCREPANCIA	0		0	

Fuente: Autor

7.3.2 Resultados de carga hidráulica y tabla de agua

De la **Figura 65** a la **Figura 68** se observan las cargas hidráulicas para los años uno, cuatro, diez y quince, en la capa del acuífero libre A1, observándose valores alturas piezométricas que van desde 200 m a 350 m. (Imagen de fondo de Google maps).

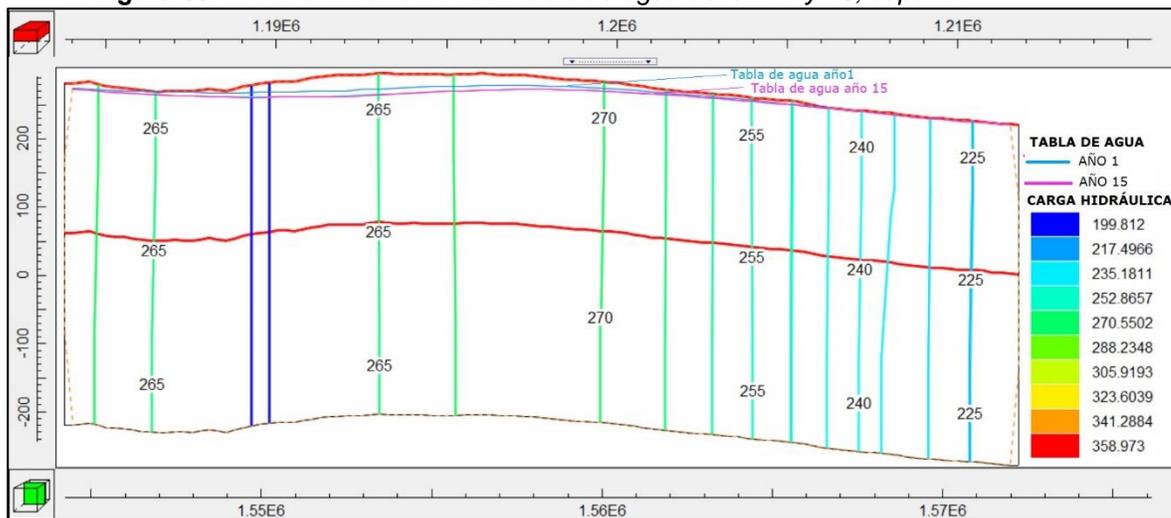




Fuente: Autor

En la **Figura 69**, se observa el perfil frontal del área de estudio en la capa A1, en donde se aprecia una diferencia en la tabla de agua de 2 a 6 m entre el año 1 al año 15, una diferencia aproximada de 1 m entre el año 4 al año 10, y finalmente una diferencia de 0 m entre el año 10 y el año 15.

Figura 69. Perfil frontal A1 con tabla de agua del año 1 y 15, capa A1

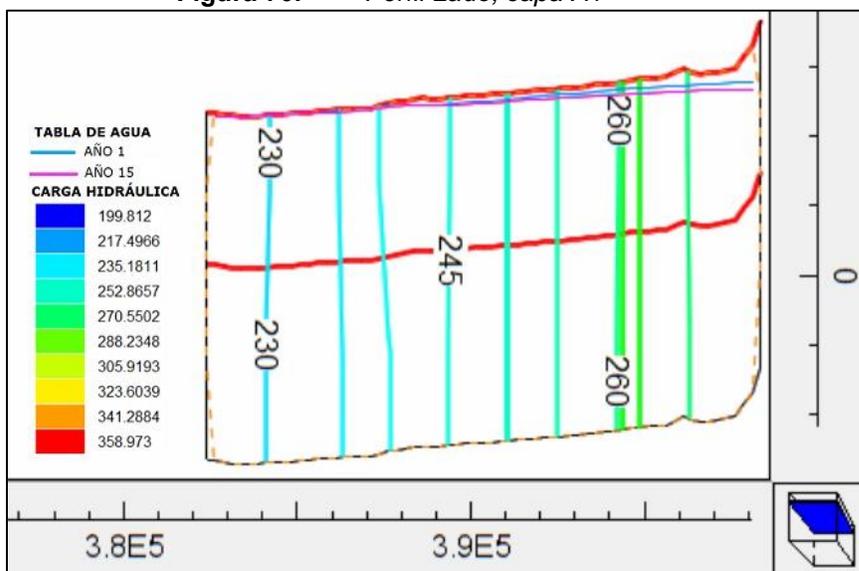


Fuente: Autor

En la **Figura 70** se observa el perfil de lado de la capa A1, del área de estudio con una diferencia en la tabla de agua de 1 a 5 m entre el año 1 al año 15 y una diferencia de 0 entre el

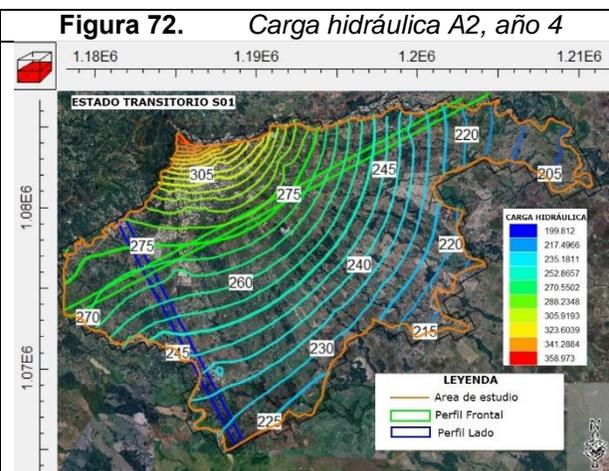
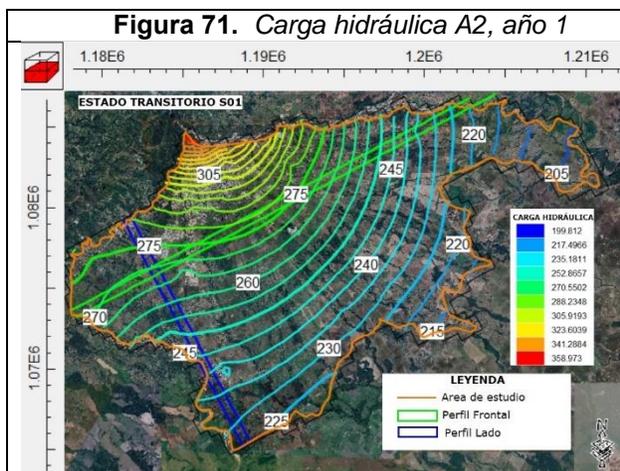
año 10 al año 15.

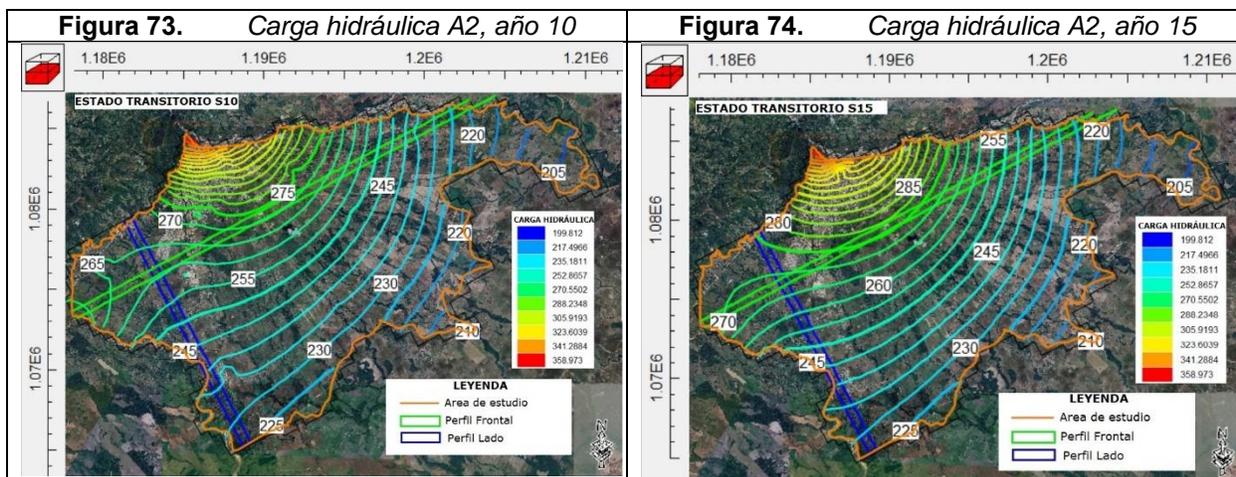
Figura 70. Perfil Lado, capa A1



Fuente: Autor

De la **Figura 71** a la **Figura 74**, se observan las cargas hidráulicas del área de estudio para los años uno, cuatro, diez y quince, en la capa del acuífero semi confinado A2, observándose valores alturas piezométricas que van desde 350 a 205 m para el año uno y alturas piezométricas de 250 m a 350 m. (Imagen de fondo de Google maps).

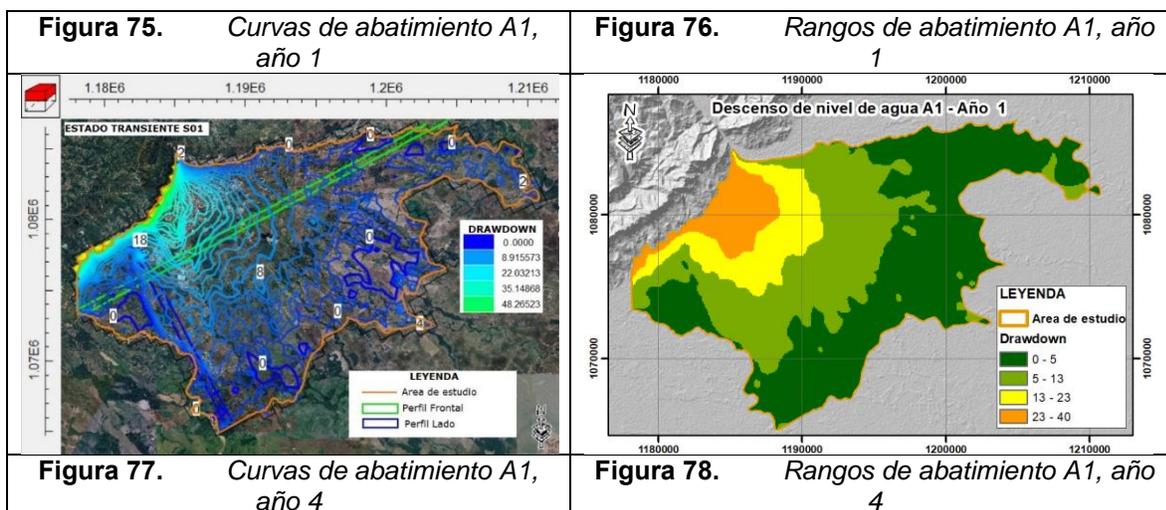


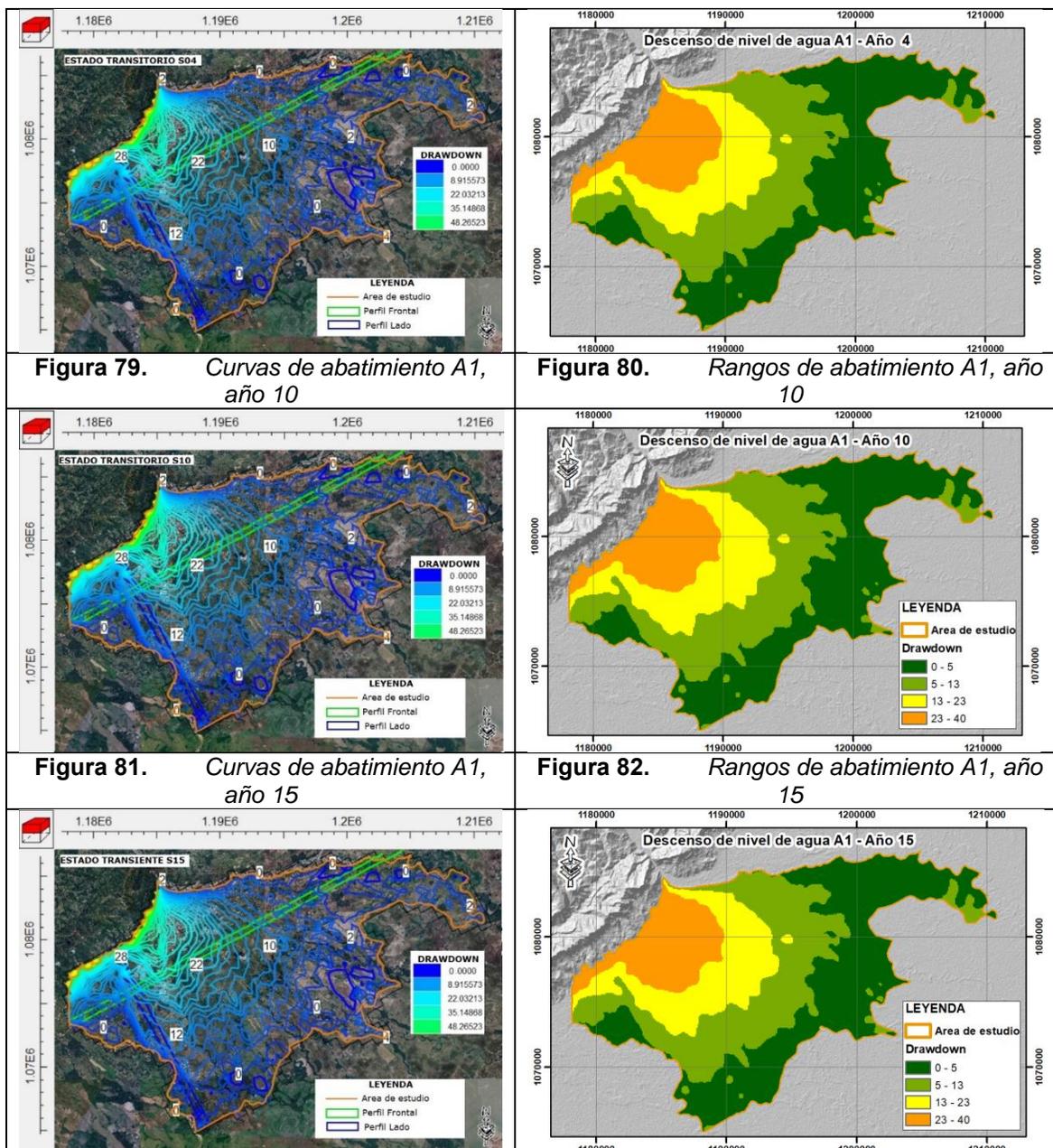


Fuente: Autor

7.3.3 Escenario de bombeo

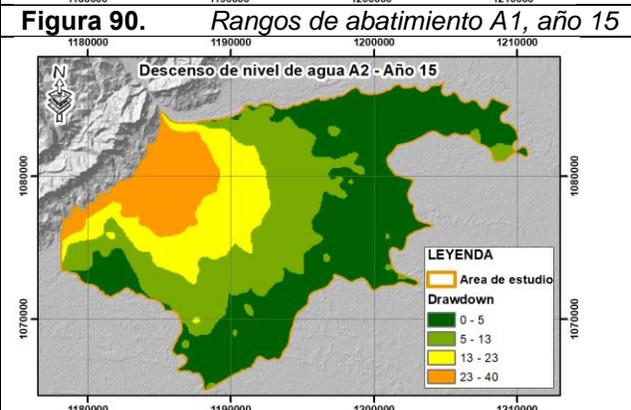
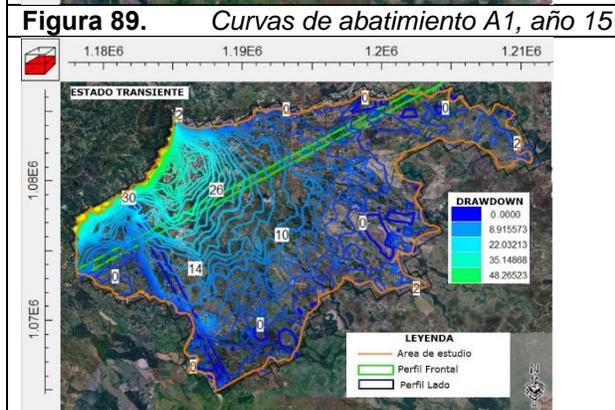
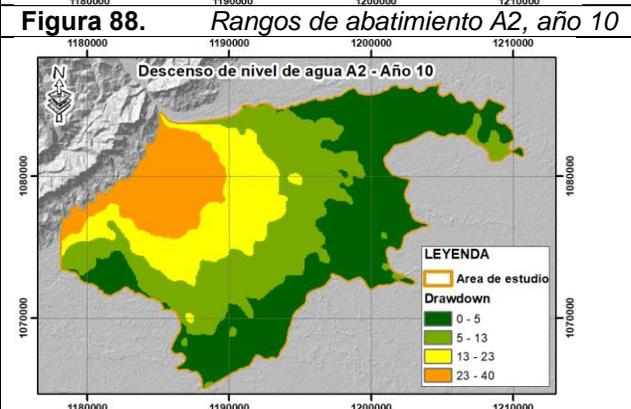
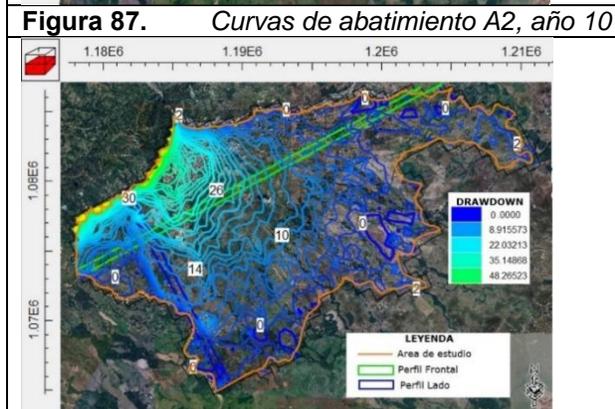
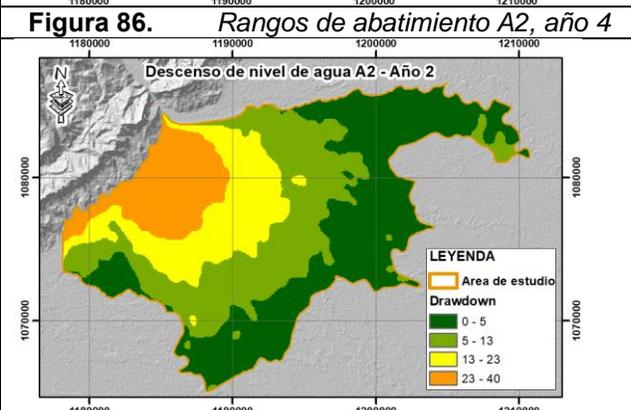
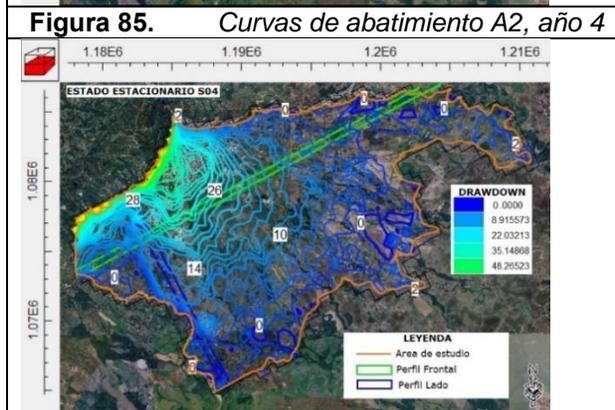
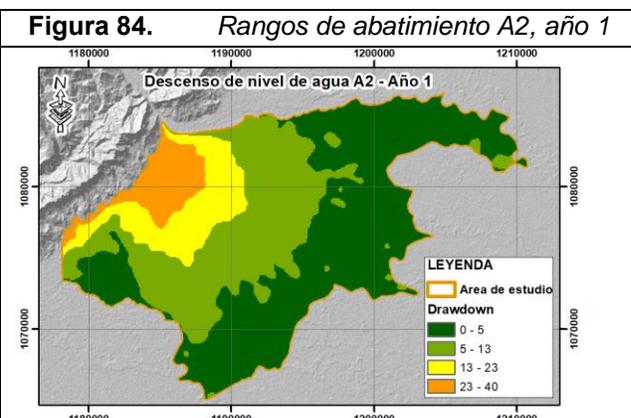
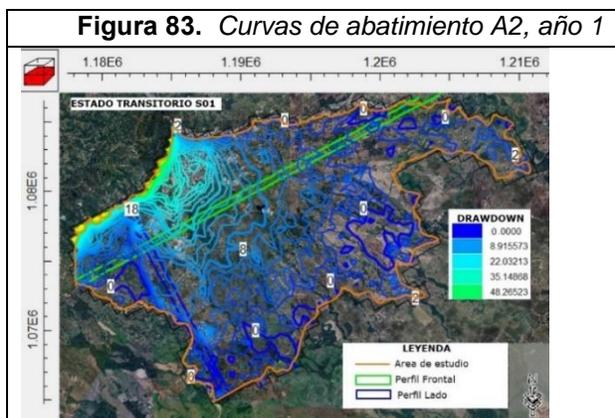
De la **Figura 75** a la **Figura 82** se observan valores de descenso de nivel de agua para los años uno, cuatro, diez y quince, en la capa del acuífero libre A1, observándose valores de 0 m a 45 m. (Imagen de fondo de Google maps).





Fuente: Autor

De la **Figura 83** a la **Figura 90** se observan valores de descenso de nivel de agua para los años uno, cuatro, diez y quince, en la capa del acuífero semi confinado A2, observándose valores 0 m a 45 m. (Imagen de fondo de Google maps).

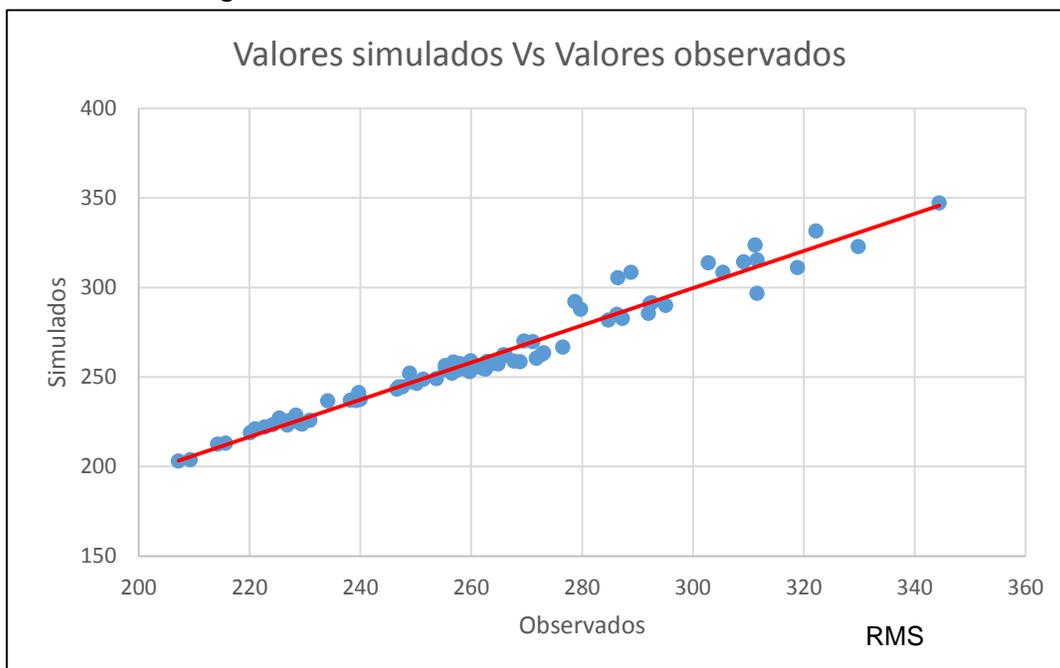


Fuente: Autor

7.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para el proceso de calibración se realizó el ensayo prueba y error, en el que se modificaron manualmente los parámetros hidráulicos hasta llegar a la convergencia y lograr que los niveles piezométricos ingresado de los aljibes y pozos profundos se acercaran a los valores observados y encontrar la relación marginal de sustitución (RMS) menor a 10%, siendo que la variable RMS evalúa la capacidad del modelo en representar la realidad hidrogeológica tal como se observa en la **Figura 91**. En donde se obtuvo un RMS de 6.28%.

Figura 91. *Valores simulados Vs Valores observados*



Fuente: Autor

7.4.1 Análisis de sensibilidad

La sensibilidad del modelo de agua subterránea se evaluó multiplicando la línea base

seleccionada restando un (-50%) y un (+50%) y evaluando la respuesta del modelo frente a los cambios, comparados con los resultados obtenidos en el modelo calibrado en el cual se obtuvo un RMS de 6.2806.

Tabla 10. *Análisis de sensibilidad*

CONDICIONES DE BORDE	VALOR ASIGNADO	-50%	50%	MARGEN DE ERROR - 50%	MARGEN DE ERROR + 50%
Conductividad A1	1.86E-05	9.31E-06	2.79E-05	6.6505	6.2891
Conductividad A2	1.07E-06	5.37E-07	1.61E-06	6.2289	6.2725
Evapotranspiración	4.53E-10	2.27E-10	6.80E-10	9.6549	7.3201
GHB	7.00E-06	3.50E-06	1.05E-05	6.2985	6.2945
RECARGA 0 -53 mm	8.40E-10	4.20E-10	1.26E-09	6.2487	6.3125
RECARGA 53 -138 mm	2.19E-09	1.09E-09	3.28E-09	6.259	6.3342
RECARGA 138 -237 mm	3.76E-09	1.88E-09	5.63E-09	7.9113	7.3899
RECARGA 237 -365 mm	4.75E-09	2.38E-09	7.13E-09	6.2936	6.3661
DRENAJES SENCILLOS	4.00E-08	2.00E-08	6.00E-08	6.2844	6.2844
RIO CHARTE	4.00E-07	2.00E-07	6.00E-07	6.2883	6.2826
RÍO CRAVO SUR	4.00E-07	2.00E-07	6.00E-07	5.8881	6.4416

Fuente: Autor

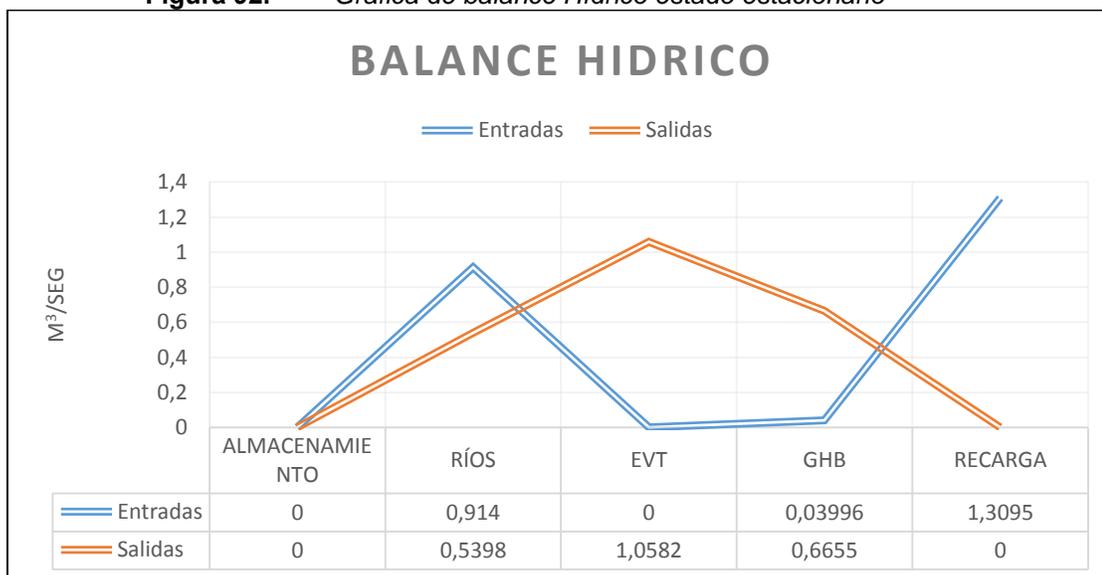
8 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

8.1 SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO O PERMANENTE

8.1.1 Balance hídrico

De acuerdo con el balance hídrico para estado estacionario se determina que en el área de estudio, la recarga representa el mayor ingreso de agua al modelo, seguido por de los ríos, de igual forma se observa que las salidas de agua esta representa en mayor proporción por la evapotranspiración, seguido la GHB y los ríos (ver **Figura 92**).

Figura 92. Grafica de balance Hídrico estado estacionario

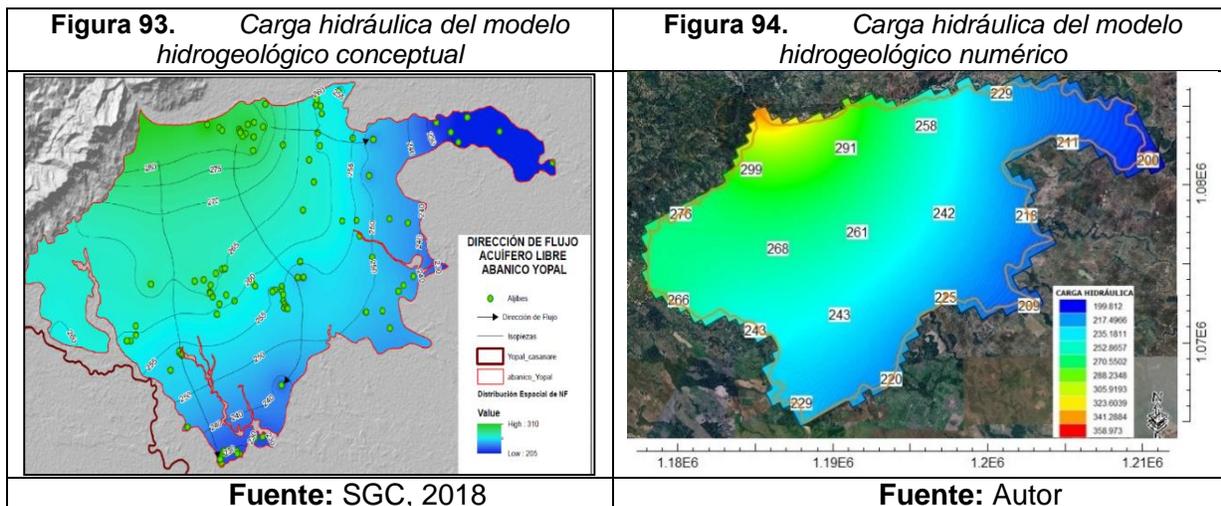


Fuente: Autor

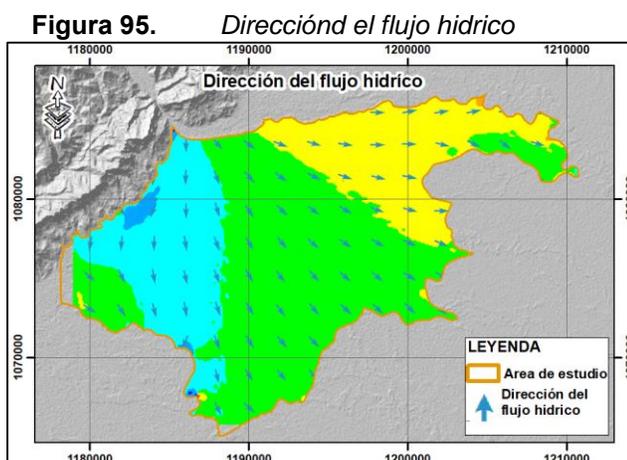
8.1.2 Carga hidráulica y tabla de agua

Una vez analizado el comportamiento de carga hidráulica y dirección de flujo hídrico realizado por el SGC en el año 2018, (ver **Figura 93**) y comparado con los resultados obtenidos en el modelo numérico (ver **Figura 94**), se observan grandes similitudes entre estos, ya que

tanto en el modelo conceptual como en el modelo numérico el flujo hídrico se desplaza de noroccidente al sur oriente (ver **Figura 95**), y hacia el oriente donde encontramos el área de estudio con topografía más baja y los valores de presentan menor carga hidraulica, lo que indica que las aguas subterráneas en el abanico aluvial de Yopal se recargan en las áreas con mayor elevación topográfica y descargan en la planicie (ver **Figura 93** y **Figura 94**). De igual forma se aprecia niveles piezométricos varían desde los 19 m de profundidad en las áreas más elevadas topográficamente hasta valores inferior a 1 en la parte baja del abanico (ver **Figura 32** y **Figura 33**).



Fuente: Autor

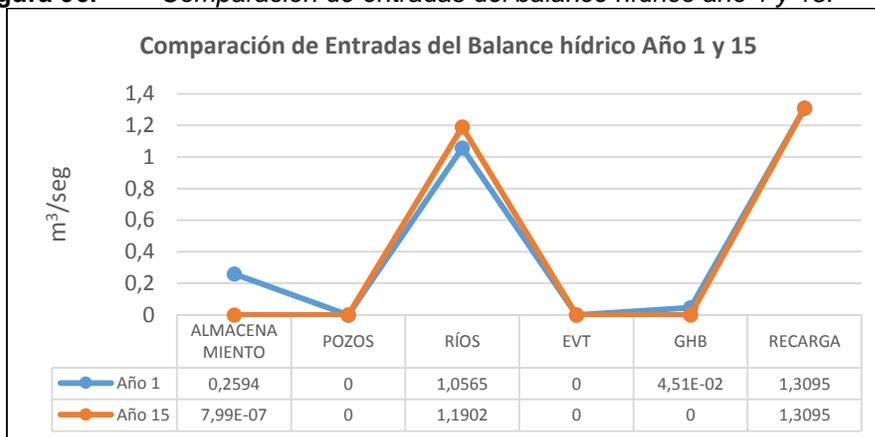


8.2 SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO, ESCENARIO 1

8.2.1 Balance hídrico

En la comparación del balance hídrico de régimen transitorio 1 del año 1 y año 15 se puede apreciar que las entradas al balance hídrico por almacenamiento disminuyen en gran proporción para el año 15, esto debido a que a partir del año 4 el modelo comienza a comportándose como un régimen cuasipermanente., de igual forma se puede apreciar que aumenta el ingreso de agua al modelo a través de los ríos (ver **Figura 96**).

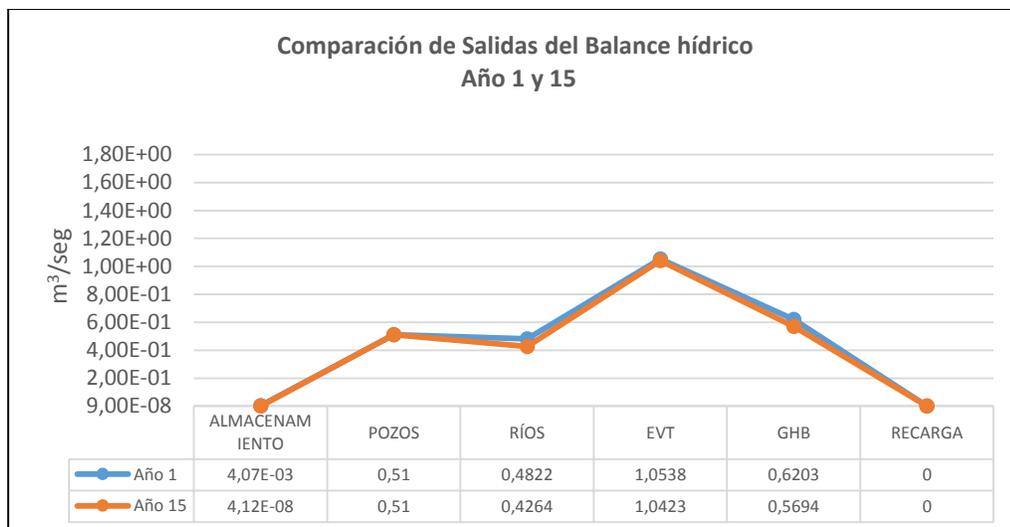
Figura 96. Comparación de entradas del balance hídrico año 1 y 15.



Fuente: Autor

En las salidas del modelo se aprecia que existe mayores salidas por río y GHB (descarga hacia al río Meta) en el año 1 que en año 15, de igual forma se observa que todos los parámetros de descarga o salidas del modelo decrecen para el año 15.

Figura 97. Comparación de salidas del balance hídrico Año 1 y Año 15

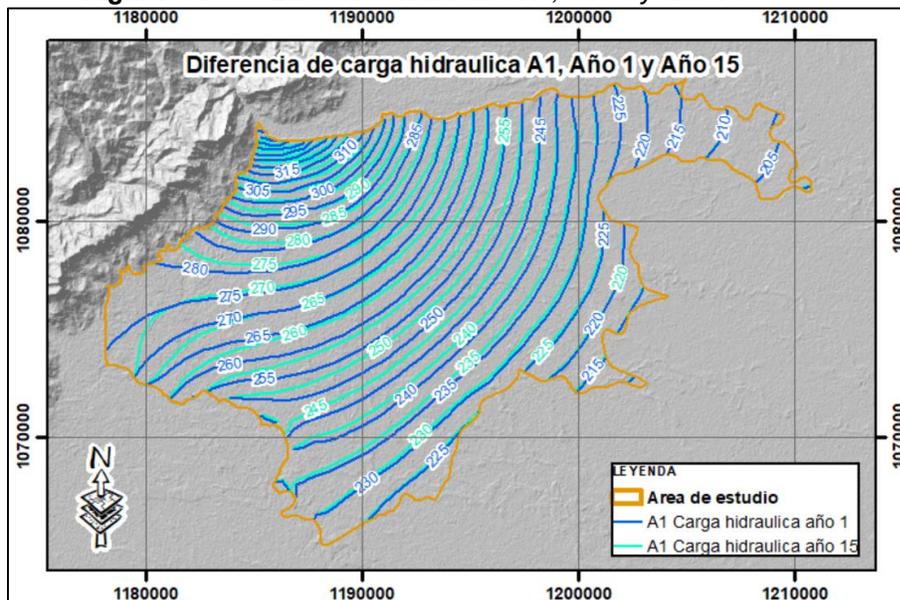


Fuente: Autor

8.2.2 Carga Hidráulica y tabla de Agua

Una vez comparados los valores de carga hidraulica del año 1 al año 15 se evidencia que la zona este del área de estudio se mantiene constante no obstante hacia sur y mayormente sur occidente se observan cambios en la diferencia de carga hidraulica (ver **Figura 98**), lo cual se relaciona con los valores representados por la tabla de agua en el perfil (ver **Figura 41**), donde se observa una diferencia entre nivel de agua de aproximadamente 6 metros.

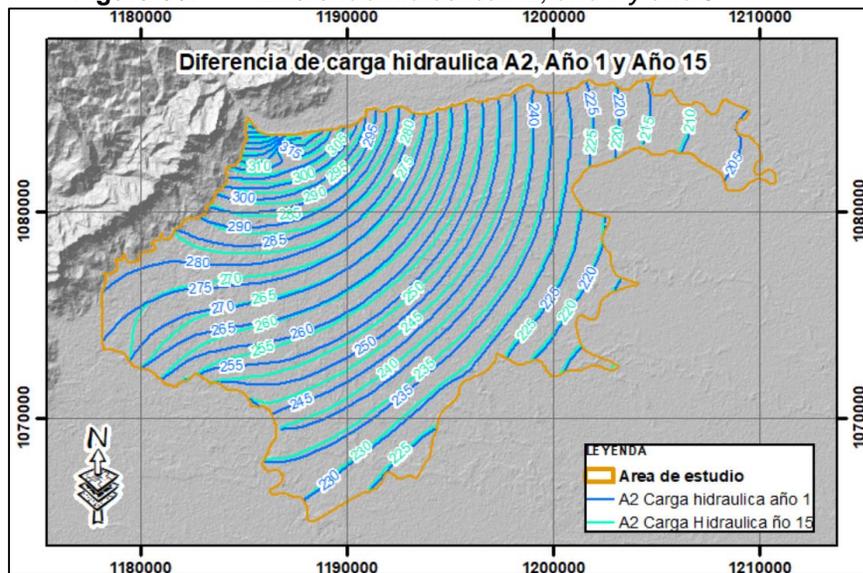
Figura 98. Diferencia hidraulica A1, año 1 y año 15



Fuente: Autor

En el acuífero A2 se observa que las diferencias hidráulicas entre el año 1 y año 15 se asemejan a las del acuífero A1 excepto en el área donde se localiza el pozo profundo Villa María 2, el cual realiza captación de este acuífero y donde se observan cambios bruscos en la carga hidráulica con valor 315 (ver **Figura 99**).

Figura 99. Diferencia hidraulica A2, año 1 y año 5



Fuente: Autor

8.2.3 Escenario de bombeo

Una vez comparados los valores de descenso del nivel de agua en el acuífero libre A1, entre el año 1 y el año 15 se aprecia descenso en los pozos profundos analizados de 0.02 metros de profundidad a 7.6 metros de profundidad (ver **Tabla 11**), de igual forma se observa que los rangos de nivel se van profundizando al sur, y sur este entre el periodo 1 al 15 en una longitud entre 0.2 a 2 kilómetros de distancia (ver **Figura 100**).

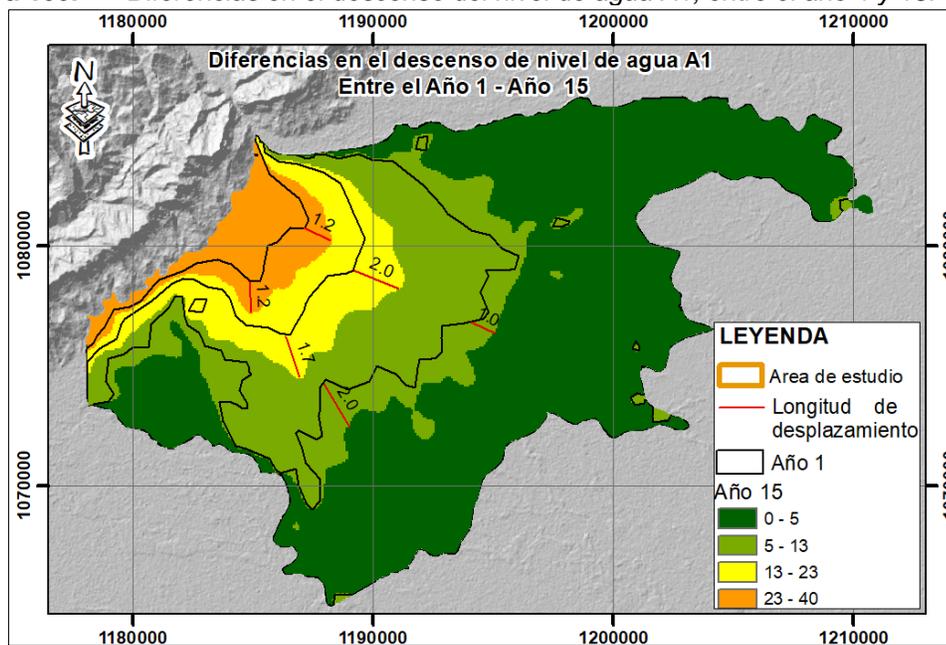
Tabla 11. Profundidad de descenso

No	FINCA	Q_lps	PROFUNDIDAD DE DESCENSO (m)
1	ACUEDUCTO VEREDAL	12	0.96
2	ACUEDUCTO VDAL	4.6	0.18
3	LA ENVIDIA	2	1.72
4	ACUEDUCTO VDAL LA UNION	3.5	0.49
5	SAN CARLOS PIECOS	5.5	5.02
6	BASE ISMOCOL	2.07	4.88
7	INPEC YOPAL	7.4	5.95
8	JAC SAN JORGE	10.4	6.74
9	VILLA LUZ	1.5	1.92
10	ESTADIO MUNICIPAL	5.2	5.67
11	SENA	4.3	5.52
12	CENTRAL DE ABASTOS	3.2	7.34
13	SENDEROS DE LA COLINA	3	6.54
14	CLUB EL ALCARAVÁN	3.6	6.38
15	JAC	0.41	0.76
16	ALTOS DE MANARE I	6.5	3.72
17	HACIENDA CASABLANCA	5	4.23
18	SOPT	3	4.23
19	BOMBEROS	3.3	4.31
20	COLEGIO EL TRIUNFO	1	1.05
21	PLAN DE VIVIENDA ALHAMBRA	5	1.83

22	CRUZ ROJA	3	3.80
23	COOMULGA	4.93	1.37
24	PROYECTO DE VIVIENDA LUMA	2.8	2.83
25	BARRIO VILLA MARÍA 1	10.32	1.96
26	BARRIO VILLA MARÍA 2	30	2.12
27	UNISANGIL	2.5	1.29
28	CAMINOS DE SIRIVANA	1.7	0.97
29	HOTEL SIRIVANA	2.5	0.95
30	HOSPITAL REGIONAL	3.8	1.14
31	EJERCITO NACIONAL BR. 16	4.5	0.20
32	HACIENDA EMMANUEL	5	0.02
33	ESCUELA LA CALCETA	2.3	3.3E-02

Fuente: Autor

Figura 100. Diferencias en el descenso del nivel de agua A1, entre el año 1 y 15.

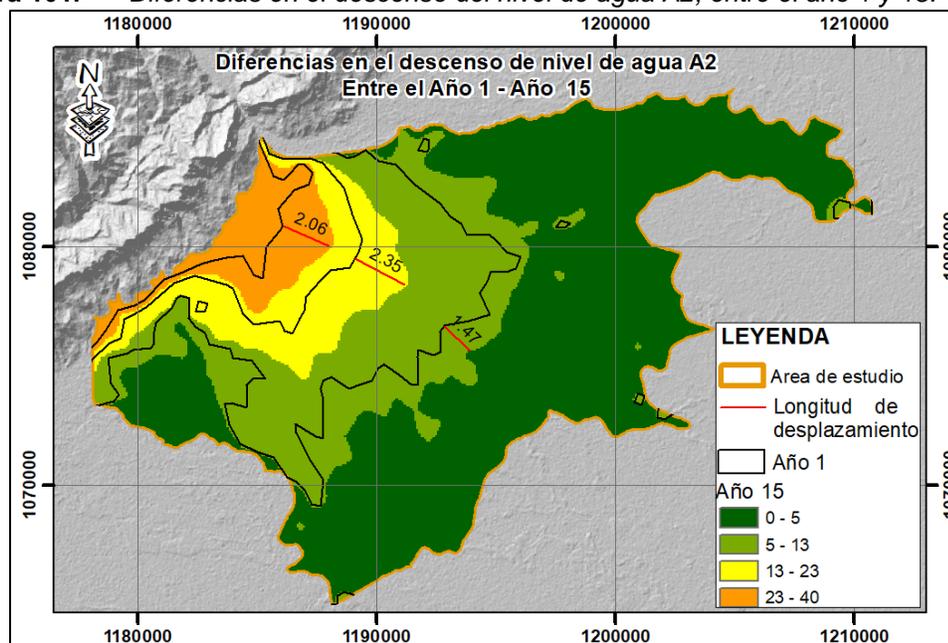


Fuente: Autor

Una vez comparados los valores de descenso del nivel de agua en el acuífero semiconfinado A2, entre el año 1 y el año 15 se aprecia descenso de 3 metros en el pozo profundo Villa Maria 2, el cual es el único pozo que se localiza sobre este acuífero en este escenario, de igual forma se observa que los rangos de nivel se van profundizando al sur, y sur

este entre el periodo 1 al 15 en una longitud entre 0.2 a 2.35 kilómetros de distancia (ver **Figura 100**).

Figura 101. Diferencias en el descenso del nivel de agua A2, entre el año 1 y 15.

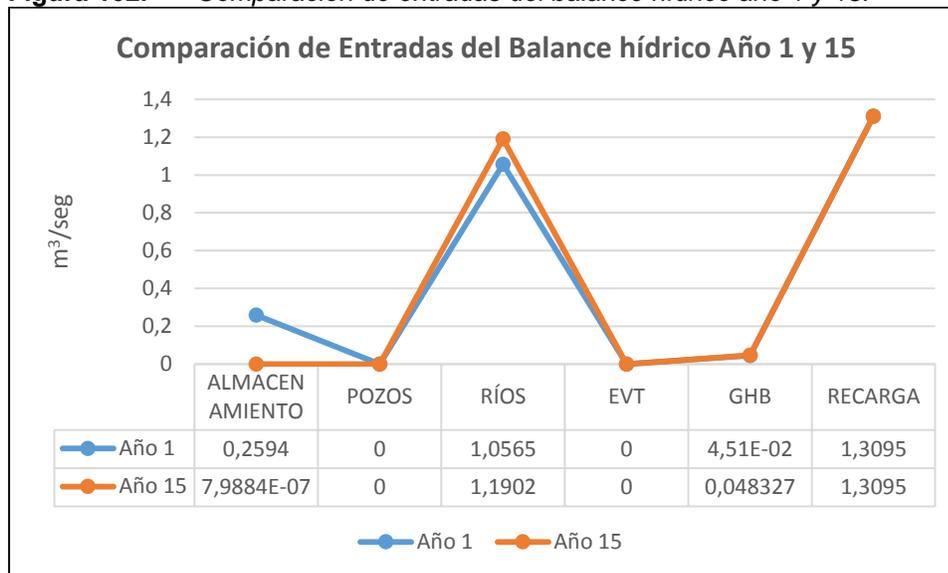


Fuente: Autor

8.3 SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO, ESCENARIO 2

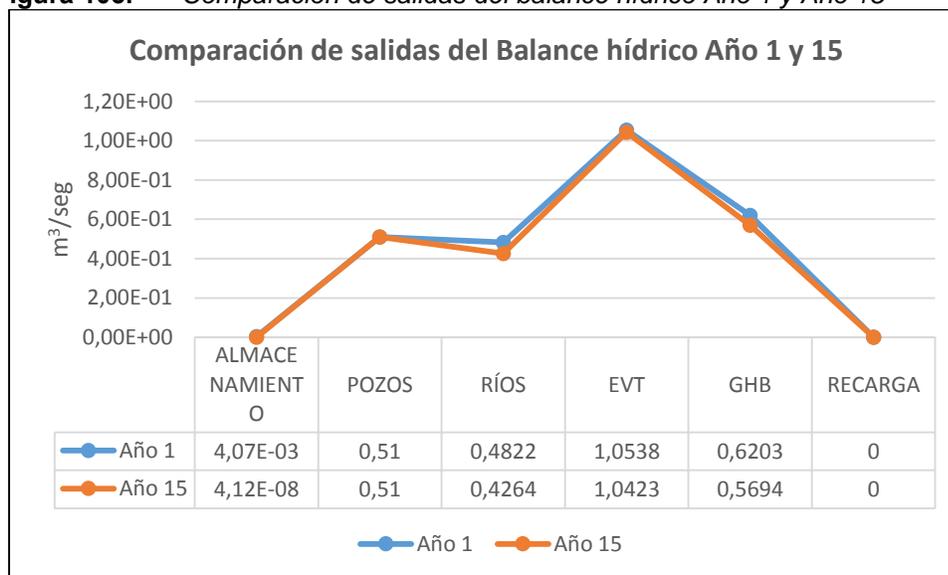
8.3.1 Balance hídrico

En la comparación del balance hídrico de régimen transitorio 1 del año 1 y año 15 se puede apreciar que las entradas al balance hídrico por almacenamiento disminuyen en gran proporción para el año 15, esto debido a que a partir del año 4 el modelo alcanza el régimen permanente y comienza a comportándose como un régimen estacionario, de igual forma se puede apreciar que aumenta el ingreso de agua al modelo a través de los ríos (ver **Figura 96**).

Figura 102. Comparación de entradas del balance hídrico año 1 y 15.

Fuente: Autor

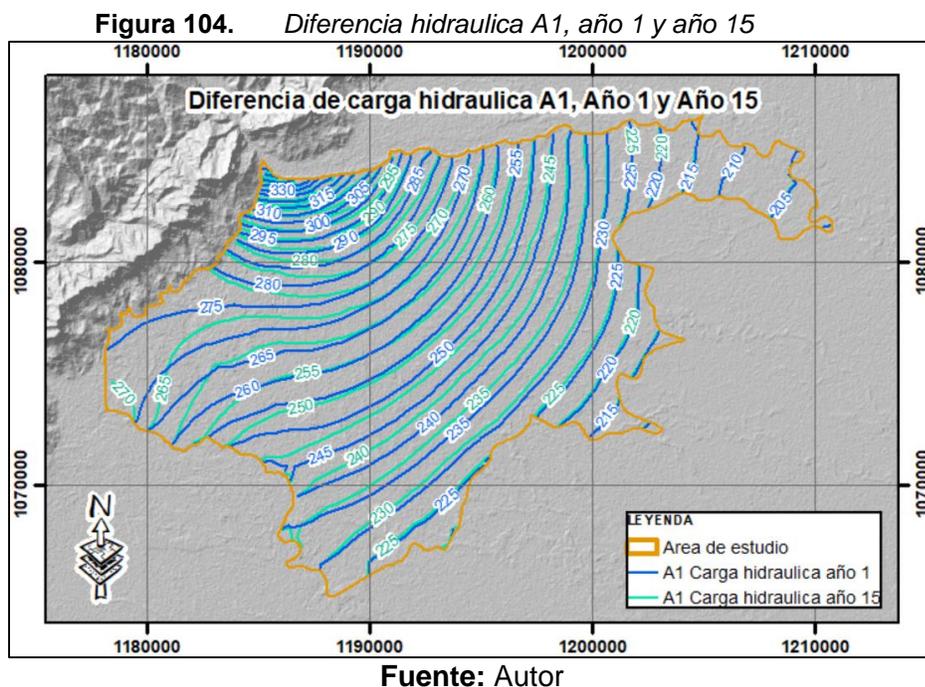
En las salidas del modelo se aprecia que existe mayores salidas por río y GHB (descarga hacia al río Meta) en el año 1 que en año 15, de igual forma se observa que todos los parámetros de descarga o salidas del modelo excepto pozos decrecen para el año 15.

Figura 103. Comparación de salidas del balance hídrico Año 1 y Año 15

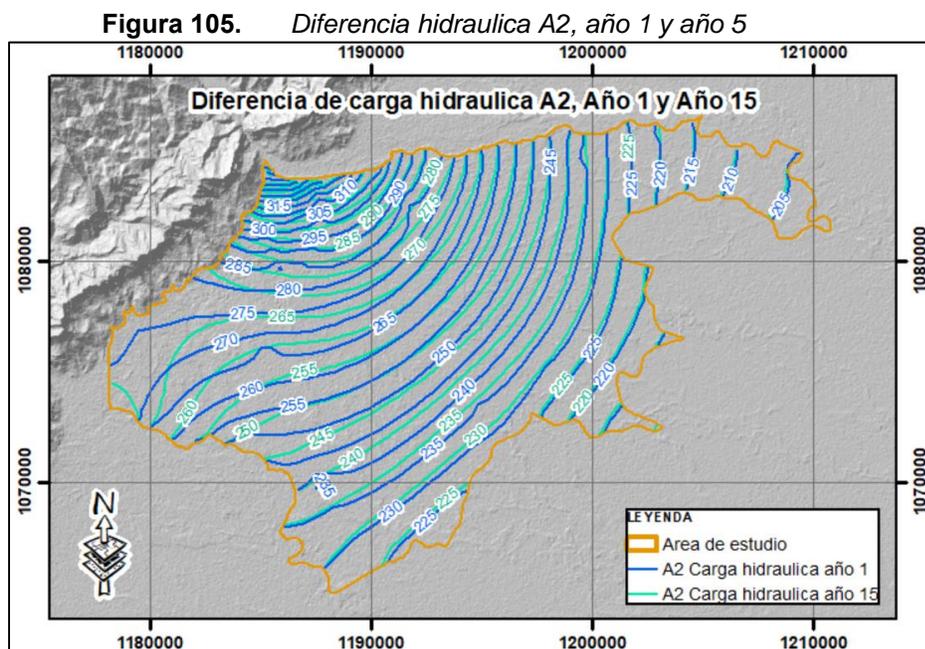
Fuente: Autor

Una vez comparados los valores de carga hidráulica del año 1 al año 15 se evidencia

que la zona este del área de estudio se mantiene constante no obstante hacia sur y mayormente sur occidente se observan mayores cambios de carga hidraulica (ver **Figura 104**), lo cual se relaciona con los valores representados por la tabla de agua del perfil (ver **Figura 69**).



En el acuífera A2 se observa que las diferencias hidráulicas entre el año 1 y año 15 cambian en todo el modelo, observándose valores de cambios muy pequeños al este en la carga hidraulica 205 a 225, y valores más pronunciados al sur oeste en las cargas hidráulicas de 270 a 285 (ver **Figura 105**).



Fuente: Autor

8.3.2 Escenario de bombeo

Una vez comparados los valores de descenso del nivel de agua en el acuífero libre A1, entre el año 1 y el año 15 se aprecia descenso en los pozos profundos analizados es de 0.01 metros de profundidad a 13.71 metros de profundidad (ver **Tabla 12**), de igual forma se observa que los rangos de nivel se van profundizando al sur, y sur este entre el periodo 1 al 15 en una longitud entre 0.3 a 3.37 kilómetros de distancia (ver **Figura 106**).

Tabla 12. Profundidad de descenso entre el año 1 y año 15

No	SITIO	Q_ips	PROFUNDIDAD DE DESCENSO	No	SITIO	Q_ips	PROFUNDIDAD DE DESCENSO
1	ACUEDUCTO VEREDAL	12	1.07	56	SAN JOSI DE MATEPANTANO / PROYECTO UTOPIA	5	1.83
2	ACUEDUCTO VDAL	4.6	1.36	57	SP INGENIEROS SAS	5	6.17
3	LA ENVIDIA	2	2.4	58	ASOMILLO	5	4.74

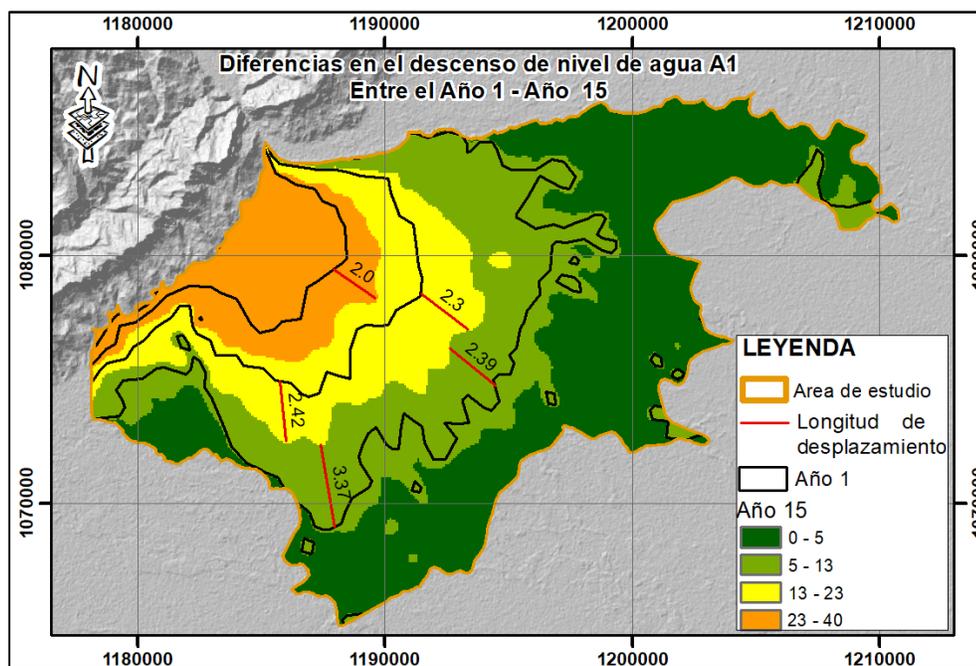
No	SITIO	Q_ips	PROFUNDIDAD DE DESCENSO	No	SITIO	Q_ips	PROFUNDIDAD DE DESCENSO
4	ACUEDUCTO VDAL LA UNION	3.5	0	59	GIMNASIO DE LOS LLANOS	5	4.54
5	SAN CARLOS PIECOS	5.5	6.98	60	LAGUNAS DE OXIDACIÓN	5	7.73
6	BASE ISMOCOL	2.07	7	61	MATADERO MUNICIPAL	5	4.49
7	INPEC YOPAL	7.4	5.7	62	EDS LA CAMPANILLA	5	7.89
8	JAC SAN JORGE	10.4	8.64	63	MOLINO DIANA KM 5 VIA MORICHAL	5	7.46
9	VILLA LUZ	1.5	2.59	64	CASA DEL MENOR INFRACTOR	5	4.26
10	ESTADIO MUNICIPAL	5.2	7.48	65	HOTEL LA BENDICION	5	0.54
11	SENA	4.3	6.72	66	LOS CANELOS	5	9.73
12	CENTRAL DE ABASTOS	3.2	7.76	67	CENTRO DE HIPOTERAPIA	5	13.72
13	SENDEROS DE LA COLINA	3	9.1	68	VILLA GLADYS	5	6.16
14	CLUB EL ALCARAVÁN	3.6	7.66	69	COLINA CAMPESTRE	5	8.9
15	JAC	0.41	0.04	70	HACIENDA EMMANUEL	5	1.17
16	ALTOS DE MANARE I	6.5	4.75	71	C. R. COMFACASANARE	5	1.05
17	HACIENDA CASABLANCA	5	5.23	72	LAGUNA VIEJA	5	0.85
18	SOPT	3	5.23	73	PORTALES DE SIRIVANA 0	5	1.5
19	BOMBEROS	3.3	5.52	74	SENDEROS DE SIRIVANA	5	0.73
20	COLEGIO EL TRIUNFO	1	0.27	75	LOS ARRAYALES	5	1.48
21	PLAN DE VIVIENDA ALHAMBRA	5	2.39	76	BELLA FLOR	5	1.38
22	CRUZ ROJA	3	3.67	77	VILLA ELISA	5	0.66
23	COOMULGA	4.93	2.01	78	CAÑA VERAL	5	1.7

No	SITIO	Q_ips	PROFUNDIDAD DE DESCENSO	No	SITIO	Q_ips	PROFUNDIDAD DE DESCENSO
24	PROYECTO DE VIVIENDA LUMA	2.8	2.69	79	RESTAURANTE HATO GRANDE	5	1.67
25	BARRIO VILLA MARÍA 1	10.32	2.58	80	BUENOS AIRES	5	1.67
26	BARRIO VILLA MARÍA 2	30	2.48	81	EL GARCERO	5	0.34
27	UNISANGIL	2.5	1.8	82	CLUD CAMPESTRE CASA VIEJA	5	0
28	CAMINOS DE SIRIVANA	1.7	0.83	83	LA CHINATA	5	0.2
29	HOTEL SIRIVANA	2.5	0.72	84	EL RETIRO Y CON ESTO TENGO	5	0.01
30	HOSPITAL REGIONAL	3.8	0.76	85	AMAZONA DE ORO	5	0.01
31	EJERCITO NACIONAL BR. 16	4.5	0.08	86	EL TAPARITO	5	0.14
32	HACIENDA EMMANUEL	5	0.56	87	TRANQUILANDIA	5	0.07
33	ESCUELA LA CALCETA	2.3	0.23	88	LOS LAURELES	5	0.23
34	COMANDO DE POLICIA DEPARTAMENTAL	5	4.89	89	FINCA CAMPO HERMOSO	5	0.54
35	SEDE POLICIA MUNICIPAL	5	1.05	90	SAN ALEJO	5	0
36	BARRIO RAUDAL AMERICAS	5	5.18	91	EL DIAMANTE	5	0.05
37	BASE AEREA (GRUPO AEREO DEL CASANARE)	5	7.29	92	BARSOBIA	5	0.02
38	URB. VILLA DOCENTE 2	5	8.51	93	EL WUISARAL	5	2.48
39	BARRIO LLANO LINDO	5	9.39	94	ESCUELA EL GARZON	5	2.74
40	BARRIO BERLIN	5	8.57	95	ESTACION VORD AERO CIVIL	5	5.5

No	SITIO	Q_ips	PROFUNDIDAD DE DESCENSO	No	SITIO	Q_ips	PROFUNDIDAD DE DESCENSO
41	HOTEL CAMORUCO	5	1.51	96	SABANAS DEL SIMARUA	5	4.59
42	EDS TERPEL LA LLANERA	5	8.89	97	MANATIALES	5	4.43
43	BASE EQUION (ANTES BP)	5	6.84	98	VILLA JULINA 2	5	3
44	HALLIBURTON	5	9.14	99	NAPOLES	5	2.82
45	BJ SERVICES	5	8.73	100	LOS COCHES	5	2.75
46	SEDE ADMINISTRATIVA MIKOS SAS	5	5.12	101	CONDOMINIO SAN RAFAEL	5	2.26
47	BALNEARIO PALO GRANDE	5	0.81	102	VILLA JULIANA 1LOTE #3	5	0.78
48	INPROARROZ	5	8.29	103	ISLANDA	5	0.31
49	PERENCO LTDA	5	4.53	104	ESCUELA EL MILAGRO	5	0.18
50	URBANIZACION BOND HABITAD	5	5.12	105	MIRALINDO	5	0.1
51	PURIFICADORA DE AGUA ALCARAVAN	5	5	106	EL MORICHE	5	0.94
52	SERVICENTRO LA 24	5	6.03	107	PARAISO	5	1.09
53	AGUA BRISAS DEL MORICHAL	5	9.29	108	LA CABAÑA	5	0.21
54	SUBASTA GANADERA	5	3.13	109	VILLA DEL SOL	5	0.45
55	CARCEL DE YOPAL 2	5	5.49				

Fuente: Autor

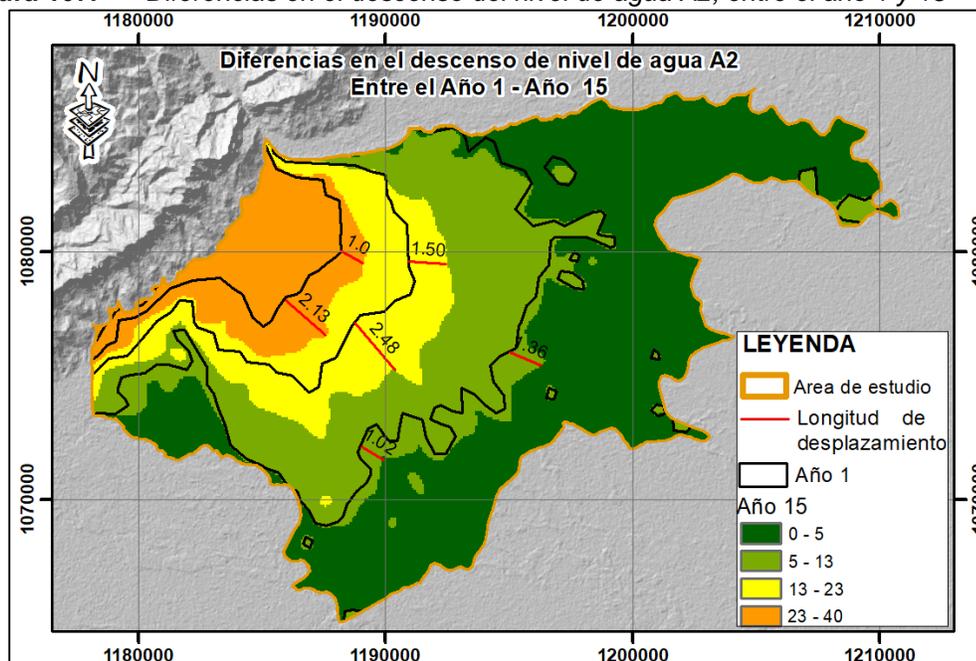
Figura 106. *Diferencias en el descenso del nivel de agua A1, entre el año 1 y 15*



Fuente: Autor

Una vez comparados los valores de descenso del nivel de agua en el acuífero semiconfinado A2, entre el año 1 y el año 15 se aprecia descenso de 3 metros en el pozo profundo Villa Maria 2, el cual es el único pozo que se localiza sobre este acuífero en este escenario, de igual forma se observa que los rangos de nivel se van profundizando al sur, y sur este entre el periodo 1 al 15 en una longitud entre 0.2 a 2.48 kilómetros de distancia (ver **Figura 100**).

Figura 107. Diferencias en el descenso del nivel de agua A2, entre el año 1 y 15



Fuente: Autor

8.4 CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Los valores de tabla de agua y niveles piezométricos de la simulación en régimen estacionario/permanente muestran un ajuste adecuado con los valores medidos en los aljibes (ver **Tabla 6**) y pozos profundos (ver **Tabla 3**), reflejados por el RMS de 6.28%.

En el análisis de sensibilidad se pudo observar que el modelo de flujo de agua subterránea es más sensible a cambios en la evapotranspiración y la recarga de 53 -23 mm, que a cambios en cualquier otro parámetro del acuífero (ver **Tabla 10**). De igual forma se puede apreciar que los parámetros drenajes sencillos, río Charte y conductividad A2, son los menos sensible a cambios.

9 DISCUSIÓN

9.1 SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO O PERMANENTE

Se realizó una comparación entre el modelo conceptual realizado por el SGC en el año 2018 y los resultados obtenidos a través del modelo numérico lo cual permitió verificar que existe una relación entre los valores de carga hidráulica del modelo conceptual y el modelo numérico observándose una similitud tanto en el comportamiento de las cargas hidráulicas, dirección del flujo hídrico y valores del nivel piezométrico.

Es importante destacar que los modelos matemáticos son modelos con predicciones numéricas a partir de datos de entradas y salidas al sistema, el cual requiere de análisis y verificación ya que los resultados dependen de la información suministrada al modelo, es decir entre mayor precisión se tenga en la captura y suministro de información mayor es la precisión de los resultados, es por esto que se hace necesario incluir datos actualizados al modelo los cuales a su vez sean corroborados a través de pruebas de bombeo recientes comparadas con pruebas de bombeo anteriores que permita conocer más acerca de los cambios en el descenso del nivel del abanico aluvial modelado.

Para el caso del modelo numérico realizado se suministraron datos tanto del SGC, 2018, como del POMCA de la cuenca del río Cravo sur, obteniendo como resultado en el balance hídrico (ver **Figura 92**) en donde se muestra que el mayor ingreso de agua al modelo es a través de la recarga por precipitación, y posteriormente por los ríos, lo cual se relaciona con lo descrito en el estudio realizado (Aquaminas A Y G SAS, 2012), en él se describe que la recarga en el abanico aluvial de Yopal se efectúa a partir de aguas lluvias infiltradas

directamente en toda el área cubierta por estos depósitos. En época de sequía el río Cravo Sur en alrededores de su cauce se convierte en la fuente principal de recarga hacia estos dos acuíferos, pues el nivel freático en ellos baja considerablemente.

La mayor salida de agua en el abanico aluvial es por la evapotranspiración, donde al ser una zona de piedemonte la menor evapotranspiración se representa en la parte más plana, y la mayor en topografía más elevadas de igual forma dada las condiciones temperatura en estas zonas la cual tiene efectos directos en la evapotranspiración del suelo, pues al incrementar la temperatura, las tasas de evapotranspiración también se aumentan, ocasionando desequilibrio en el balance hídrico (Lopez, 2021).

La representación del nivel freático en el modelo en las zonas con menor cota es una réplica tenue de la topografía, similar a los resultados de los modelos de agua subterránea en entornos similares (Sathish y Elango, 2015), no obstante en zonas con mayor elevación del terreno se observa niveles más bajos o más profundo de la tabla de agua.

9.2 SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO

Las simulaciones en estado transitorio (no permanente), en el abanico aluvial de Yopal permiten simular las variables inmersas en el modelo a lo largo del tiempo con el fin de predecir los cambios de carga hidráulica y abatimiento en el acuífero.

Las simulaciones realizadas en un periodo de 15 años, en el abanico aluvial de Yopal en el acuífero libre A1 y acuífero semiconfinado A2, con una tasa de bombeo de 0.1638 m³/seg en 33 pozos profundos para el escenario 1 y una tasa de bombeo de 0.51 m³/seg, en 109

pozos profundo en el escenario 2, nos muestra que la posición del nivel freático o tabla de agua desciende entre valores de 1 m a 6 m de profundidad, (ver **Figura 41** y **Figura 69**).

De igual forma las simulaciones para predecir el decaimiento de cargas hidráulicas fueron de alguna manera predicciones puras ya que afortunadamente el acuífero mantiene su balance natural de recarga – descarga. Observándose que los mayores descensos del nivel piezométrico se localizan en los pozos 67, 66 y 39 con descensos de 13.7 metros y 9 metros y en menor descenso, (ver **Tabla 11** y **Tabla 12**). esto debido a que la explotación de las aguas subterráneas por cualquiera de los sistemas posibles que incluyan bombeos produce inexorablemente descenso del nivel piezométrico, sea en un entorno inmediato de los pozos o en una amplia área. (Carignano & Bettiol, 2012)

En el área de estudio se observa que a partir del año 5 tanto los valores de carga hidráulica, como el descenso del nivel en el bombeo tanto en el escenario 1 como en el escenario 2, se estabiliza, es decir el acuífero se comienza a comportar como régimen cuasipermanente disminuyendo el ingreso y salida del agua por almacenamiento, para lo cual según (Carignano & Bettiol, 2012) señala que si los acuíferos tienen capacidad de recarga, después de un período de descenso vendrá un período de recuperación de los niveles estáticos. Por lo general se considera que: si el nivel medio del estático en período largo (5 o más años) es constante o tiende a crecer, es el signo más seguro de que no existe sobreexplotación (Bosch, 2001).

No obstante según (Pulido, 2011) en el caso en que el volumen extraído en un período de un año sea mayor que el volumen repuesto al acuífero, se producirá un descenso de año en año del nivel piezométrico, esta es una señal clara de que puede estarse en una situación de sobreexplotación, y debe procederse a un monitoreo sistemático de los niveles.

Por ello, para comprobar el impacto real de la explotación es necesario determinar exactamente la magnitud y comportamiento de las fluctuaciones en los niveles a través de mediciones piezométricas y pruebas de bombeo a lo largo del tiempo.

9.3 CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En el área de estudio se logró calibrar el modelo a través del ajuste manual de ensayo y error obteniendo un rango de los valores observados y los valores simulados de 6.28, RMS, el cual es un error bajo, Sin embargo la prueba-y error de calibración no cuantifica la incertidumbre estadística o la fiabilidad y los resultados y debe seguido de un análisis de sensibilidad detallado (Anderson y Woessner, 1992).

Para determinar si el modelo es sensible a cambios en los parámetros se realizaron cambios en un -50% y un +50% observándose que el modelo de flujo de agua subterránea en el abanico aluvial de Yopal es más sensible a cambios en la evapotranspiración y recarga que a cambios en cualquier otro parámetro del acuífero, probablemente debido al papel dominante de la evapotranspiración simulada. Sin embargo, el modelo bajo la sensibilidad a los cambios de conductividad hidráulica podría indicar un movimiento lento del agua subterránea dentro la cuenca (Reilly y Harbaugh, 2004).

10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo numérico en estado permanente valida la información del modelo conceptual contribuyendo en la cuantificación de la incertidumbre inherente a la conceptualización, observándose valores de carga hidráulica entre 200 a 350 m y desplazamiento del flujo hídrico de noroccidente al sur oriente y hacia el oriente donde encontramos el área de estudio con topografía más baja y los valores con menor carga hidráulica, lo que indica que las aguas subterráneas en el abanico aluvial de Yopal se recargan en las áreas con mayor elevación topográfica y descargan en la planicie.

Los resultados del análisis de información secundaria usada, permitieron el ingreso de los parámetros al modelo, obteniendo como resultado en la calibración un valor de RMS 6.28 % entre los valores simulados y los valores observados lo cual, el cual es considerado un valor bajo para este tipo de modelos.

El balance hídrico en el área de estudio, pudo determinar que la recarga representa el mayor ingreso de agua al modelo con valores de 1.30 m³/seg, seguido por los ríos con valores de 0.91 m³/seg, y la evapotranspiración representa la mayor salida de agua tanto en estado permanente como en los dos escenarios de estado transitorio con valores de 1.058 m³/seg, así mismo en la comparación de escenario transitorio 1 y 2 se observa que en el escenario 2 “mayor caudal de bombeo” los ríos comienzan a ingresar más agua al modelo para mantener el balance hídrico.

Las simulaciones en estado transitorio en el abanico aluvial de Yopal permitieron simular las variables inmersas en el modelo a lo largo del tiempo en un periodo de quince (15)

años y predecir los cambios de carga hidráulica y abatimiento en el acuífero, observándose descensos de hasta trece (13) metros de profundidad los cuales a partir del quinto año se estabilizan comportándose el acuífero a partir de este periodo de tiempo como un régimen cuasipermanente.

Se pudo apreciar que el aumento en el caudal de extracción incrementa los abatimientos el cual a su vez ocasiona descensos de forma agrupada hacia el sur – este entre aproximadamente 0.5 kilómetros a 2.35 kilómetros, lo que indica que la afectación al acuífero por descenso del nivel freático podría llegar a afectar en mayor proporción el occidente del abanico aluvial y en menor proporción el oriente y las áreas aledañas a los ríos.

Este modelo numérico predictivo es el primer intento de modelar matemáticamente el flujo de agua subterráneo en el abanico aluvial del municipio de Yopal contribuyendo en la generación de nuevos aportes al conocimiento del estado del recurso hídrico subterráneo, y condiciones hidrogeológicas existentes las cuales servirán como aporte en futuras investigaciones que permitan conocer con mayor certeza el comportamiento de estos acuíferos.

Las simulaciones permitieron verificar en el área de estudio que el acuífero mantiene su balance natural de recarga – descarga tanto en estado estacionario como en las dos simulaciones en estado transiente. Sin embargo, al simular algunos de los bombeos actuales en el municipio de Yopal, se observa decaimiento a futuro de la carga hidráulica lo cual deberá ser validado a través de mediciones piezométricas y pruebas de bombeo a los pozos profundo, pues el conocimiento de estas resulta importante tanto para mejorar el entendimiento del acuífero como para validar y utilizar el modelo como herramienta predictiva.

Simular escenarios con información actualizada y evaluar las probables respuestas del sistema, deberá hacer parte de una actividad futura a realizar una vez se completen las tareas de verificación y análisis de resultados de nivel piezométrico en diferentes años con información histórica que proporcionen un mejor conocimiento tanto del acuífero libre como el acuífero semiconfinado del área de estudio y permita reducir la incertidumbre.

La modelación numérica en hidrogeología ayuda en la gestión sostenible del recurso hídrico y elaboración de escenarios futuros de forma realista. No obstante en este campo hay muchos retos por afrontar y limitaciones por vencer: ya que la cantidad y calidad de la información a partir de la cual se obtienen los modelos conceptuales o con la que se busca la validación nunca es suficiente; ya que entre mayor información se proporcione al modelo este puede proporcionar mejores resultados no obstante la validación de los datos y la confianza en la calibración y los márgenes de incertidumbre siempre estarán presentes en un nuevo requerimiento.

Se recomienda a las entidades territoriales (Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia, alcaldía municipal de Yopal y gobernación del departamento de Casanare) contar un instrumento de planificación y administración del agua subterránea como lo es el Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos con el fin de garantizar la sostenibilidad del acuífero libre A1, y acuífero confinado A2, localizado al interior del abanico aluvial de Yopal (Qab).

11 BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, M., & Woessner, W. . (1992). Applied Groundwater Modelling Simulation of Flow and Advective Transport. *University Press*, 296 Pp.
- Aquaminas A Y G SAS. (2012). Estudio Geoelectrico Complementario Para La Prospección De Agua Subterránea En El Acueducto Del Municipio De Yopal - Casanare. *Aquaminas a Y G Sas*, 42. http://www1.eaaay.gov.co/contradmin/archivos/Estudio_goelectrico_municipio_de_Yopal.pdf
- Arenas, M. C., Pescador, J. P., David, L., Garzón, D., Saavedra, E. Y., Felipe, P., & Obando, A. (2020). *Modelado hidrogeológico en regiones tropicales a través de FeFlow*. 24(3), 285–295.
- Betancur, T., & Palacio, C. (2009). La modelacion numerica como herramienta para la exploracion hidrogeológica y construccion de modelos conceptuales (caso de aplicación: Bajo cauca antioqueño). *DYNA (Colombia)*, 76(160), 39–49.
- Carignano, C., & Bettiol, S. (2012). *Evaluación y Seguimiento de la Influencia del Riego en los Acuíferos Correspondientes al Consorcio de Usuarios de Aguas Subterráneas ZONA I*.
- Custodio, E., & LLamas, M. R. (1996). *Hidrología Subterranea*.
- Dávila, R. A., & Gómez, H. de L. (2011). Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 63(3), 463–477. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222011000300008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Enric Vázquez-Suñé, V. V. y Rotman C. (2017). *Un marco de modelado hidrogeológico y GIS débilmente acoplado*.
- FAO. (2011). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. In *Mundi-Prensa Madrid*.
- Felipe, P., & Vargas, B. (2021). *El suministro continuo de agua potable en el municipio de*

Yopal.

Gidahatari. (2012). Manual de Modelamiento Numérico con MODFLOW. *Gidahatari*, 144.

https://static1.squarespace.com/static/521e95f4e4b01c5870ce81cf/t/57cf70f7c534a5b2c35ce4e7/1473212682390/Manual_de_Modflow_Esp.pdf

Gimena, E., & Cabrera, C. (2013). Métodos de estudio hidrogeológicos e hidrogeoquímicos.

Hidrología y Recursos Hídricos En Las Islas y Terrenos Volcánicos Métodos, Técnicas y Experiencias En Las Islas Canarias, 93–134.

Gomez, E. D. (2020). *A Groundwater Flow Model To Aid in Water Resource Management for the Carraipia Basin in the Coastal Semi-Arid Region of La Guajira State (Colombia)*. 97.

<https://digitalcommons.library.umaine.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4246&context=etd>

Lopez, O. (2021). *EFECTO DEL CALENTAMIENTO GLOBAL EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LOS CULTIVOS OSCAR*.

Martín, A., & Whiteman, J. (1990). Calibration and sensitivity analysis of a ground-water flow model of the Coastal lowlands aquifer system in parts of Louisiana, Mississippi, Alabama, and Florida. *Raven: A Journal of Vexillology*, 9, 33–35.

<https://doi.org/10.5840/raven2002/20039/1015>

McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1988). Techniques of water-resources investigations of the U.S. Geological Survey. *U.S. Government Printing Office*, 65.

Mejías D., J. E., Jégat N., H. J., Mora M., L. E., & Linares S., M. A. (2011). Modelo hidrogeológico conceptual para la evaluación del acuífero de la planicie aluvial del río Motatán (Venezuela). *Revista Geografica Venezolana*, 52(1), 31–44.

<http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/33945/articulo2.pdf;sequence=1>

Palacio, L. (2012). *Actualización del Modelo Conceptual y Modelo Numérico de flujo de agua subterránea en el acuífero libre de General Pico Dorila, provincia de La Pampa, Argentina*. *Maestría en Recursos Hídricos*, 1–103.

http://www.biblioteca.unlpam.edu.ar/rdata/tespo/r_palact000.pdf

- Pulido, A. (2011). *Sobreexplotación de acuíferos y desarrollo sostenible 1*. 115–132.
- Ramos Monroy, D. E. (2021). *Caracterización Hidrogeológica Para el Análisis de Viabilidad Sobre el Aprovechamiento del Agua Subterránea en la Vereda La Cumbre, Municipio de Villavicencio, Meta, Colombia*.
- Rodríguez, M. (2010). *Modelación del comportamiento hidrodinámico del agua subterránea de la zona comprendida entre Carbó, Pesqueira y Zamora, Sonora*.
- Sanchez, J. (2009). Conceptos fundamentales de Hidrogeología. *Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, España, 1*, 1–11.
http://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf
- SGC. (2018). *Modelo hidrogeológico conceptual del municipio de Yopal departamento de Casanare*.
- Vélez, M., Ortiz, C., & Vargas, C. (2011). Las aguas subterráneas un enfoque práctico. *Universidad Nacional de Colombia, Ingeominas, 1(69)*, 5–24.

12 APÉNDICE A. ESCENARIOS DE ESTADO ESTACIONARIO Y DE BOMBEO

12.1 DATOS COMPLEMENTARIOS

Las carpetas adjuntas contienen los archivos de modelado MODFLOW para el proyecto “Modelo numérico de agua Subterránea en el Abanico Aluvial de Yopal como herramienta para realizar una correcta gestión del recurso hídrico” para el modelo en estado estacionario, estado transitorio, escenario 1, estado transitorio, escenario 2.

Nombres de las Carpetas:

1. Datos de ingreso
2. Modelo en estado estacionario o permanente
3. Modelo en estado transitorio, escenario 1
4. Modelo en estado transitorio, escenario 2