

**ACERCAMIENTO A UN MODELO NUMÉRICO DEL ACUÍFERO DE LA FLORA,
EN LA ZONA ORIENTE DE LA MESETA DE BUCARAMANGA**

**OLGA YURANI JAIME ROJAS
OSCAR FABIAN SANCHEZ ORTIZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

**ACERCAMIENTO A UN MODELO NUMÉRICO DEL ACUÍFERO DE LA FLORA,
EN LA ZONA ORIENTE DE LA MESETA DE BUCARAMANGA**

**OLGA YURANI JAIME ROJAS
OSCAR FABIAN SANCHEZ ORTIZ**

Trabajo de Grado en la modalidad de investigación para optar por el título de
Ingeniero Civil

DIRECTOR
SULLY GOMEZ ISIDRO
Ingeniera Civil, PhD.

CODIRECTOR
WALTER LEONARD ANTOLINEZ QUIJANO
Ingeniero Civil, MSc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A Dios por la vida y por todas las bendiciones que me ha dado.

A mi madre Olga Cecilia Rojas Sánchez que siempre me acompaña desde el cielo.

A mi abuela y a tía Irma, que me ayudaron en mi formación personal y siempre me han brindado el amor de madre.

A mi familia que siempre me apoyaron, guiaron y estuvieron pendientes de mí en especial a mis herman@s.

A Samael Sánchez por su incondicional apoyo y comprensión, por hacerme tan feliz y por la motivación constante que me ha brindado.

A mi hijo Julián Sánchez por ser quien me impulsa hacer cada día mejor y llenar de alegría mi vida.

OLGA YURANI JAIME ROJAS

DEDICATORIA

A Dios que me da cada día la oportunidad de realizarme como persona.

A mi padre Rigoberto Sánchez Sánchez que siempre me brindó su apoyo y confianza.

A mi madre Elsa Patricia Ortiz Arenas que siempre estuvo incentivándome a cumplir mis objetivos.

A mi hermana Stefani Sánchez Ortiz que siempre se preocupó por mí.

A mis amigos y profesores de los que siempre tuve algo que aprender.

OSCAR FABIAN SANCHEZ ORTIZ

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro sincero agradecimiento:

A nuestra directora de tesis la doctora Sully Gómez Isidro y a nuestro codirector el ingeniero Walter Antolínez, por su colaboración, apoyo y acertada orientación para la culminación exitosa del proyecto de investigación.

Al profesor Jaime Suárez por habernos asesorado y dado parte de su tiempo desinteresadamente.

A todas aquellas personas que con sus consejos acertados nos ayudaron en el desarrollo de este proyecto.

A los profesores que nos han capacitado como profesionales íntegros y nos han orientado de la mejor manera posible.

A la UIS por permitirnos el entrenamiento como profesionales que llevaremos siempre presente y en lo más alto los valores de este establecimiento educativo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO TEORICO	17
1.1. DESCRIPCIÓN ZONA DE ESTUDIO	17
1.2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO HIDROGEOLOGICO	19
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	22
1.4. MARCO GEOLÓGICO	23
2. METODOLOGÍA	26
2.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE.	26
2.2. FORMULACIÓN MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL	27
2.2.1. Modelo geométrico geológico	27
2.3. MODELO NUMÉRICO	27
2.3.1. Condiciones iniciales y de frontera	28
2.3.1.1. Condición de flujo constante	29
2.3.1.2. Condición de No flujo.	29
2.3.1.3. Condición de Cabeza Hidráulica Constante.	30
2.3.1.4. Dren.	30
2.3.2. Régimen de Flujo.	31
2.3.3. Ejecución del modelo tipo exploratoria	32
2.3.4. Calibración.	32
2.3.5. Aplicaciones del modelo numérico	33
3. MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL	34
3.1. FISIOGRAFÍA	34
3.2. NIVELES PIEZOMÉTRICOS	35
3.3. UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	35
3.3.1. Características hidráulicas del Acuífero superficial.	35
3.4. DIRECCIÓN DE FLUJO, RECARGA Y DRENAJE	36

4.	DESARROLLO DEL MODELO NÚMÉRICO	37
4.1.	DISEÑO DEL MODELO	37
4.2.	DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA	39
4.3.	DEFINICIÓN DE PROPIEDADES HIDRÁULICAS Y RECARGA	39
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.	42
5.1.	RESULTADOS PRELIMINARES	42
5.2.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	42
5.3.	CALIBRACIÓN EN ESTADO PERMANENTE	43
6.	CONCLUSIONES	52
7.	RECOMENDACIÓN	54
	ANEXOS	59

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Niveles freáticos proyectos anteriores	20
Tabla 2. Pruebas de bombeo.	21
Tabla 3. Unidades litológicas Zona oriental del AMB.	23
Tabla 4. Resultados pruebas de bombeo.	36
Tabla 5. Parámetros iniciales.	40
Tabla 6. Permeabilidades anisotrópicas y medio heterogéneo.	46
Tabla 7. Caudal modelo de medio heterogéneo y permeabilidades anisotrópicas.	49

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización del área de estudio	17
Figura 2. Ubicación piezómetro parque La Flora.	19
Figura 3. Condiciones de Frontera.	29
Figura 4. Esquema Condición de Frontera Drain.	31
Figura 5. Modelo Digital de Elevación (MDE) para la zona de estudio.	34
Figura 6. Esquema del MHC.	36
Figura 7. Discretización de la malla para la zona de estudio.	37
Figura 8. Columna estratigráfica.	38
Figura 9. Esquema geológico del Piezómetro del parque La Flora.	40
Figura 10. Resultados del análisis de sensibilidad preliminar para permeabilidad y recarga.	42
Figura 11. Distribución de permeabilidades anisotrópicas.	45
Figura 12. Topografía del abanico.	45
Figura 13. Isopiezas y vectores de velocidad en el Acuífero Superficial (Capa 2).	47
Figura 14. Isopiezas y vectores de velocidad en el Acuífero Superficial (Capa 3).	47
Figura 15. Ubicación de quebradas y puntos de bombeo.	48
Figura 16. Isopiezas y vectores de velocidad en el acuífero superficial con bombeo del piezómetro existente (Capa 3).	50
Figura 17. Isopiezas y vectores de velocidad en el acuífero superficial con bombeo del pozo propuesto (Capa 3).	51

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Valores de permeabilidades para los modelos calibrados.....	59
Anexo B. Isopiezas del acuífero superficial para todos los modelos calibrados. ...	61
Anexo C. Caudales extraídos en los modelos calibrados.	70
Anexo D. Balance de masas en los modelos calibrados.	71

RESUMEN

TÍTULO: ACERCAMIENTO A UN MODELO NUMÉRICO DEL ACUÍFERO DE LA FLORA, EN LA ZONA ORIENTE DE LA MESETA DE BUCARAMANGA*

AUTORES: OLGA YURANI JAIME ROJAS
OSCAR FABIAN SANCHEZ ORTIZ**

PALABRAS CLAVE: Modelo numérico, modelo hidrogeológico conceptual, flujo de agua subterránea, acuífero.

DESCRIPCIÓN

El recurso hídrico subterráneo constituye la mayor reserva de agua fresca disponible para el consumo humano y los modelos numéricos del agua subterránea constituyen un medio esencial para su entendimiento. Se realizó el modelado en estado permanente de la zona oriental del acuífero superficial de Bucaramanga que se encuentra en un abanico aluvial entre las quebradas La Flora y La Iglesia y el complejo ígneo-metamórfico del Macizo de Santander. Para desarrollar esta investigación se realizó primero una recopilación de la información existente y disponible, luego la formulación del modelo hidrogeológico conceptual y por último el desarrollo del modelo numérico. Los resultados indican que no existe una recarga local en el acuífero superficial en la zona de estudio por lo que se alimenta lateralmente del flujo proveniente del Macizo de Santander y éste se direcciona hacia las quebradas La Flora y La Iglesia donde sirven de drenaje al acuífero. Se realizaron calibraciones para escenarios de medios homogéneos y heterogéneos, para permeabilidades isotrópicas y anisotrópicas, para diferentes mediciones de niveles y se seleccionó el nivel de agua más bajo correspondiente a un medio heterogéneo y permeabilidad anisotrópica donde se evaluó la explotación del agua subterránea para el abastecimiento, encontrándose que los caudales extraíbles son muy bajos.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Sully Gómez.

ABSTRACT

TITLE: APPROACH TO A NUMERICAL MODEL FOR LA FLORA'S AQUIFER, IN THE ORIENTAL ZONE OF BUCARAMANGA'S PLATEAU*

AUTHORS: OLGA YURANI JAIME ROJAS
OSCAR FABIAN SANCHEZ ORTIZ**

KEYWORDS: Numerical model, conceptual hydrological model, groundwater Flow, aquifer.

DESCRIPTION:

The subterranean hydric resource consist in the mayor fresh water reservoir available for human consumption and the numeric models of the subterranean water constitute an essential tool for its comprehension. In this project a model in permanent state was accomplished for the oriental zone of Bucaramanga's aquifer which is located in an alluvial fan between La Flora and La Iglesia creeks and the igneo-metamorphic complex of Santander's Massif. To develop this investigation the first step was to collect existing and available information, then design the hydrological concept model and lastly create a numeric model. The results indicate that there isn't an existing local recharge in the superficial aquifer in the studied zone which shows that the aquifer recharges laterally from a flow that comes from the Santander's Massif and directs to La Flora and La Iglesia creeks which work as drainage for the aquifer. Calibrations where done for homogeneous and heterogeneous scenarios, for isotropic and anisotropic permeability, different level measurements and the lowest water level was selected which corresponds to a heterogeneous source and an anisotropic permeability in which underwater exploitation was evaluated to work as a supply, getting to the conclusion that the flow rates for extraction where too low.

* Graduation Project.

** Faculty of Engineering Physicomechanical, School of Civil Engineering. Director: Sully Gómez Isidro.

INTRODUCCIÓN

El Área Metropolitana de Bucaramanga se encuentra en una región donde el recurso hídrico debe ser utilizado de una manera adecuada, una de las razones se debe a que los últimos años se ha observado un crecimiento demográfico considerable, creando la necesidad de fomentar el uso de aguas subterráneas como alternativa para el consumo humano¹, ha venido siendo usada principalmente por los lavaderos, el sector industrial y en menor proporción, por la comunidad².

La modelación numérica se concibe como una herramienta para la gestión y conocimiento de los recursos hídricos en la medida que permite simular escenarios e identificar probables respuestas del sistema frente a estímulos externos como bombeos, recargas, drenajes. Un modelo calibrado permite revisar el modelo conceptual inicialmente propuesto y ofrecer alternativas para su retroalimentación.

Para este proyecto de investigación, se pretende modelar una parte de la zona oriental del acuífero superficial de Bucaramanga, que se enmarca entre el contacto del complejo ígneo-metamórfico del Macizo de Santander sobre la falla Bucaramanga y la zona aluvial del abanico de Bucaramanga, comprendida entre la quebrada La Iglesia y la quebrada La Flora (Figura 1). En esta zona se han presentado movimientos de remoción en masa generados posiblemente por la presencia de niveles de agua subterránea.

¹ PULIDO M.A. Y NIETO M.A. Obtención y análisis de perfiles de parámetros fisicoquímicos en piezómetros de la zona oriental de la ciudad de Bucaramanga, Proyecto de Grado, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2010, p. 20.

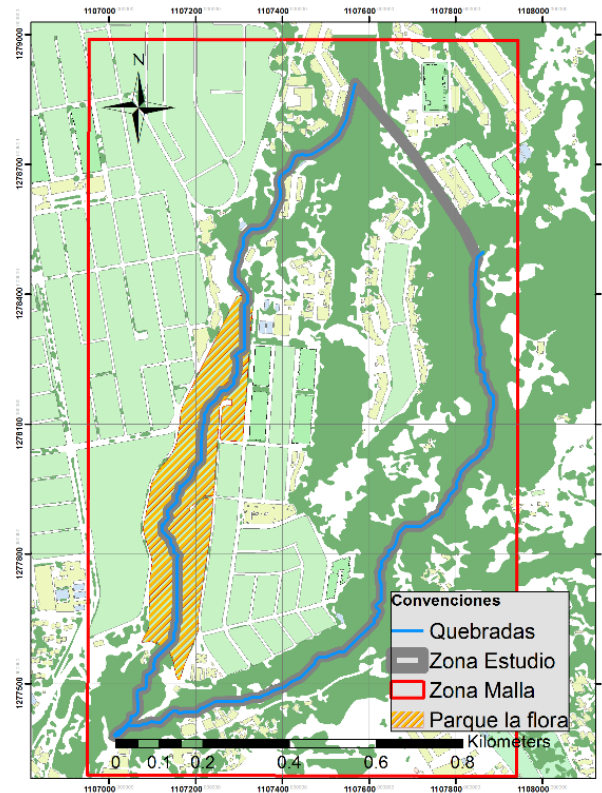
² ANTOLÍNEZ W.L. Modelo Numérico del Flujo de Agua Subterránea en las formaciones Acuíferas de Bucaramanga, Trabajo de Investigación de Maestría, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2014, p. 15.

1. MARCO TEORICO

1.1. DESCRIPCIÓN ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio de este proyecto está localizada en la zona oriental de la Meseta de Bucaramanga, con una extensión aproximada de 2.2 Km² y posee elevaciones desde los 892 msnm en el Viaducto La Flora hasta los 1080 msnm en el Macizo de Santander. Se encuentra delimitada al Sur y Oriente por la quebrada La Iglesia, al Occidente por la quebrada La Flora y al Norte por el Macizo de Santander. La zona se encuentra enmarcada entre las coordenadas 1106945 y 1107935 W y 1277307 y 1279007 N, en el sistema de coordenadas MAGNA COLOMBIA-BOGOTÁ.

Figura 1. Localización del área de estudio



El área de estudio se clasifica de acuerdo al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en Bosque Ecuatorial Húmedo y Bosque Subandino³, condiciones que se han visto afectada fuertemente por el cambio de uso del suelo.

La precipitación promedio en el área es de 1279 mm/año⁴ con un régimen bimodal, dos periodos secos y dos de lluvias durante el año. El primer período seco se inicia a mediados de diciembre y finaliza a comienzos de marzo. El segundo se inicia a finales de mayo y finaliza a mediados de septiembre.

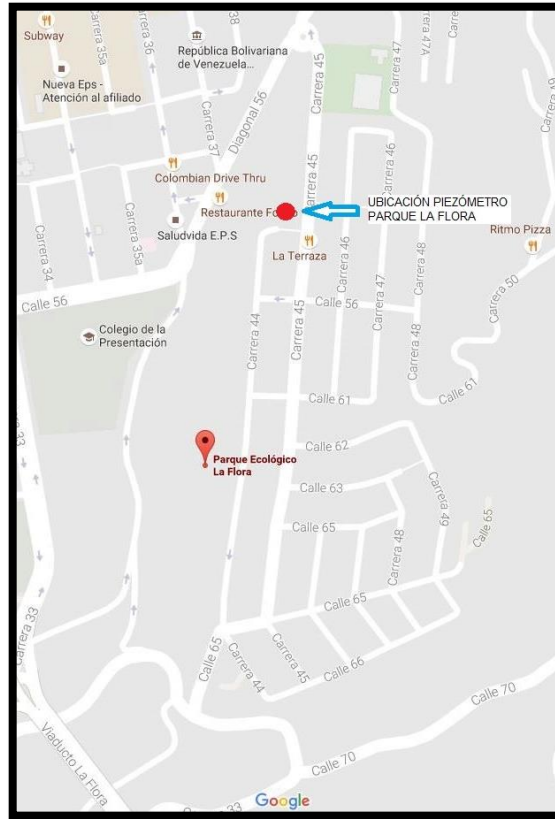
Para el estudio del acuífero superficial de la parte oriental de Bucaramanga, la Universidad Industrial de Santander en conjunto con la CDMB, han construido algunos piezómetros destinados a mediciones del agua subterránea.

Para realizar este trabajo se tomó el piezómetro localizado en el parque ecológico la Flora de la CDMB, que monitorea el acuífero superficial de Bucaramanga. En el mismo sitio existe otro piezómetro que monitorea el acuífero profundo.

³ VERGARA O. Prospección geológica para aguas subterráneas en rocas cristalinas fracturadas del Macizo de Santander, sector oriental de Bucaramanga. Proyecto de grado, facultad de Ingenierías Físico-químicas, Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2004, p.20.

⁴ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Atlas Climatológico Nacional, 2010.

Figura 2. Ubicación piezómetro parque La Flora.



Fuente: Tomada y modificada de Google Maps.

1.2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO

En el año 2003 el grupo de predicción y modelamiento hidroclimático GPH en un convenio con COLCIENCIAS, realizó un estudio de fenómeno de recarga en el macizo de Santander mediante un muestreo isotópico y la identificación de acuíferos con énfasis en las rocas ígneas y metamórficas como formadoras de potenciales acuíferos cuando se encuentran fracturadas y meteorizadas. La investigación concluyó es que la recarga ocurre principalmente en la parte alta del Macizo de Santander correspondiendo a alturas de 1400, 2000 y 2500 msnm. También se concluyó que existen un acuífero superior y otro profundo, estos sobre la meseta de Bucaramanga. El acuífero superior corresponde al miembro gravoso de la formación

Bucaramanga, donde existe un nivel de agua que puede extenderse a toda la meseta⁵.

En la zona de estudio se han realizado medidas continuas de niveles de agua correspondientes al piezómetro del acuífero superficial por Correa y Montaña en 2011⁶, Guarín y Roa en 2014⁷, y medidas puntuales por Jiménez y Colmenares en 2009⁸. En la Tabla 1 se resumen los registros de niveles tomados.

Tabla 1. Niveles freáticos proyectos anteriores

Fuente	Periodo de medición	Cota Piezométrica	Profundidad nivel de agua
JIMENEZ, COLMENARES 2009	Junio 2008	954,87 msnm	1 m
	Agosto 2008	954,87 msnm	
	Octubre 2008	954,9 msnm	
CORREA, MONTAÑO 2011	17 Mayo 2011-6 Septiembre 2011	955,13 msnm	0,7 m
GUARIN, ROA 2014	18 Febrero 2014-8 Mayo 2014	953,5 msnm	2,3 m

Durante los años 2010 y 2011, se realizaron muestreos de isotopos estables en los pozos del parque La Flora, primero con el fin de identificar el origen de la recarga de los acuíferos aluviales y posteriormente estudiar los caudales base de los ríos y determinar la hipótesis de flujo desde el Macizo de Santander⁹.

El estudio hidrodinámico, geoquímico e isotópico de las formaciones acuíferas de la región de Bucaramanga, permite observar el avance del flujo desde la zona de la

⁵ COLCIENCIAS-UIS. 2003, Interacción entre sistemas Hidrogeológicos para el Estudio del Fenómeno de Recarga en el Macizo de Santander e identificación de Acuíferos, 2003.

⁶ CORREA, J.G. y MONTAÑO, J.F. Instrumentación de piezómetro piloto ubicado en la zona Norte de Bucaramanga y revisión de datos obtenidos de piezómetros en la zona Oriente y Norte de la ciudad. Proyecto de grado, facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2011.

⁷ GUARIN, S.Y. y ROA, O.A. Medición continua y análisis de niveles de agua subterránea en los pozos del parque La Flora en la parte alta de la ciudad de Bucaramanga. Proyecto de grado, facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2014.

⁸ JIMÉNEZ, J.A. y COLMENARES, S.C. Medición de parámetros físico químicos y biológicos del agua subterránea en la zona de Bucaramanga. Proyecto de Grado, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2009.

⁹ GÓMEZ, S., TAUPIN, J. Y RUEDA, J. Estudio hidrodinámico, geoquímico e isotópico de las formaciones acuíferas de la región de Bucaramanga. Revista Peruana Geo-atmosférica, 2013.

montaña hacia los acuíferos aluviales a través de la falla de Bucaramanga, que son recargados parte o totalmente con aguas que provienen desde la zona del Macizo de Santander recorriendo largas o cortas distancias. Las anomalías en los análisis químicos del agua muestran que el acuífero superficial ubicado bajo la ciudad de Bucaramanga parece sufrir localmente de contaminación a partir de fuentes superficiales. Los resultados de isótopos estables muestran la influencia del efecto orográfico en los datos de aguas subterráneas, encontrándose que la principal recarga del acuífero superficial de la meseta proviene de la zona montañosa del macizo de Santander, desde 1500 msnm¹⁰.

Hidráulicamente se puede pensar que el acuífero superior de la formación Bucaramanga se comporta como un acuífero libre a semilibre, ya que no se observa litológicamente una capa confinante¹¹ y no se descarta una recarga local.

En el año 2011, se realizaron pruebas de bombeo en la zona del parque la Flora, mostrados en la Tabla 2, donde se obtuvieron los parámetros hidráulicos del acuífero superficial.

Tabla 2. Pruebas de bombeo.

Parámetro		Acuifero Superficial
Conductividad Hidráulica (m/d)	Kx	0,00212
	Kz	0,00212
Transmisividad (m ² /d)		0,0508
Coef. de almacenamiento		0,117

Fuente: BARREARA, M.A. y RUIZ, D.A. Pruebas de bombeo en pozos ubicados en zona Oriental de la ciudad de Bucaramanga y análisis con uso de software. Proyecto de Grado, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2012.

¹⁰ *Ibíd.*, p.44.

¹¹ ANTOLINEZ W.L., *Op. Cit.*, p.72.

Finalmente, en el 2014, se desarrolló un modelo numérico del flujo de agua subterránea en el área metropolitana de Bucaramanga, con el fin de tener una herramienta viable que permita conocer la dinámica del flujo, hacer manejo de acuíferos y poder predecir de esta manera los impactos causados por la intervención antrópica y los fenómenos hidrogeológicos naturales¹².

Los estudios realizados en el año 2011¹³ y 2014¹⁴, exponen como el piezómetro superficial del parque La Flora muestra un comportamiento aparentemente dependiente de las condiciones locales, es decir la precipitación afecta los niveles.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo General

Plantear un modelo geométrico y un modelo conceptual del acuífero superficial de la Flora para realizar el modelo hidráulico en estado permanente, que permita entender mejor su comportamiento.

Objetivos Específicos

- Definir el área de estudio, obtener el modelo digital del terreno y de las capas acuíferas, a partir de la cartografía y estudios existentes que permitirá la introducción de la geométrica correspondiente al modelo hidráulico, usando la herramienta Surfer.
- Formulación del modelo conceptual que represente el acuífero superficial de la Flora que servirá como base para la construcción del modelo numérico, mediante la recopilación, análisis e interpretación de la información hidrogeológica existente.

¹² Ibíd.

¹³ CORREA, J.G. y MONTAÑO, J.F., Op. Cit.

¹⁴ GUARIN, S.Y. y ROA, O.A., Op. Cit.

- Plantear y calibrar el modelo numérico del acuífero superficial de la Flora en condiciones de flujo permanente, a partir de los datos característicos del acuífero y niveles de agua existentes en cierto intervalo de tiempo.

1.4. MARCO GEOLÓGICO

A nivel litológico, se presentan en el área de estudio y sus alrededores, unidades litológicas compuesta por rocas metamórficas, rocas sedimentarias, rocas ígneas y depósitos de suelos, cuyos nombres se resumen en la Tabla 3¹⁵.

El Parque La Flora se localiza sobre la formación Bucaramanga, que es un importante depósito sedimentario del Cuaternario que morfológicamente corresponde a un abanico aluvial erosionado, posiblemente asociado en su mayor parte al río Suratá, acumulado sobre una depresión de origen tectónico, sobre la cual se ubica el casco urbano de la ciudad de Bucaramanga. La Formación Bucaramanga es dividida en los siguientes miembros: miembro Órganos (Qbo), miembro Finos (Qbf), miembro Gravoso (Qbg) y miembro Limos Rojos (Qblr)¹⁶.

Tabla 3. Unidades litológicas Zona oriental del AMB.

TIPO	NOMBRE	CONVENCION
ROCAS METAMORFICAS	Neis de Bucaramanga	PEb
ROCAS IGNEAS	Cuarzomonzonita de la Corcova Cuarzomonzonita, Granito y Pórfido Cuarzoso	JRcl JRcg
ROCAS SEDIMENTARIAS	Formacion Bucaramanga: Miembros Organos Miembros Finos Miembros Gravoso Miembros Limos Rojos Depositos Aluviales: Terrazas bajas Llanuras de Inundacion Depositos Coluviales	Qbo Qbf Qbg Qblr Qal1 Qal Ql

Fuente: Tomada y modificada de INGEOMINAS –CDMB. Zonificación sísmogeotécnica indicativa para el área metropolitana de Bucaramanga, 2001.

¹⁵ INGEOMINAS –CDMB. Zonificación sísmogeotécnica indicativa para el área metropolitana de Bucaramanga, 2001.

¹⁶ *Ibíd.*, p.19.

De acuerdo con el mapa geológico del 2001¹⁷, la zona de estudio se encuentra en su totalidad sobre la formación Bucaramanga y se encuentra disectada en los tramos de la quebrada La Iglesia y La Flora, generando afloramientos del Miembros Órganos y Miembro Gravoso sin aparente presencia del Miembro Finos; por otra parte, la perforación realizada en el parque San Pío del 2004 demuestran que el Miembro Finos se extiende hasta la zona del Macizo de Santander inclusive presentando afloramientos en la zona de estudio, por lo que este miembro es el basamento más probable del acuífero a estudiar, postulando al Miembro Gravoso como la principal unidad hidrogeológica a tener en cuenta, con otras posibles unidades hidrogeológicas como lo son el Miembro Limos Rojos y las Terrazas aluviales de las quebradas La Iglesia y La Flora.

Los depósitos que se localizan en la zona de estudio son, primero los depósitos aluviales de terrazas bajas, son aquellos que corresponden a los niveles máximos de inundación alcanzados por las crecientes actuales, se observan cantos subredondeados a redondeados de areniscas cuarzosas blancas, entre otras, segundo es el depósito aluvial de cauce y llanura de inundación compuestos por fragmentos de composición y granulometría muy variable¹⁸.

Finalmente, en el área de estudio se reconoce el trazo de la falla la Flora, la cual tiene un rumbo N 40-50 E. Esta falla se trazó en la zona en el 2004 principalmente por criterios geomorfológicos, como la deflexión de drenajes, las corrientes de aguas que tienen dirección N-S y NE-SW, son desplazadas hacia el S-W a lo largo del trazo de la falla. También se observan ganchos de fallas, los cerros que tienen dirección N-S y NW-SE, son desviados hacia el SW, en la zona de influencia de la falla. La dirección del cerro donde se ubica el barrio Altos de pan de azúcar está dominada por el trazo de esta falla. Las características de valle lineal, típico de una falla de rumbo, pueden observarse al Oeste del cerro Altos de Pan de Azúcar, a la

¹⁷ *Ibíd.*

¹⁸ INGEOMINAS – CDMB - AMB. Zonificación de Amenaza por Movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón Y Piedecuesta, 2007.

altura del parque la Flora. Todas las anteriores características evidencian el comportamiento dextral de esta falla, el cual afecta las fallas paralelas, cortándolas y desplazando su trazo a lo largo de la falla la Flora hacia el S-W¹⁹.

¹⁹ VERGARA, O., Op. Cit., p.43.

2. METODOLOGÍA

Para desarrollar este trabajo y con el fin de cumplir con los objetivos propuestos se llevó a cabo la siguiente metodología:

2.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE

Inicialmente se recopiló información existente sobre el acuífero superficial de La Flora, información de tipo geológica tal como mapas geológicos realizados por INGEOMINAS-CDMB en el 2001²⁰ y 2007²¹, Vergara en 2004²², y para la definición geométrica de las capas geológicas se usó el trabajo desarrollado por Vasquez y Bermoudes en 2004 que permitió establecer la extensión lateral y el espesor de las formaciones por medio de reinterpretación de los SEV's y análisis de registros litológicos de los piezómetros y pozos²³; usando como topografía para la capa superior curvas de nivel del IGAC a escala 1:2000.

La información hidrogeológica, tal como parámetros hidráulicos de acuíferos, se obtuvieron por medio de pruebas de bombeo realizadas en 2012²⁴ y por calibración de un modelo numérico²⁵; la información sobre fuentes de recargas se adquirió con análisis de niveles²⁶ y estudios hidrogeoquímicos²⁷.

²⁰ INGEOMINAS – CDMB, 2001., Op. Cit.

²¹ INGEOMINAS – CDMB, 2007., Op. Cit.

²² VERGARA, O., Op. Cit.

²³ INGEOMINAS. Modelo Geológico-Geofísico para el Área Metropolitana de Bucaramanga. Buemoudes y Vásquez, 2004.

²⁴ BARRERA, M.A. y RUIZ, D.A. Pruebas de bombeo en pozos ubicados en zona Oriental de la ciudad de Bucaramanga y análisis con uso de software. Proyecto de Grado, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2012.

²⁵ ANTOLINEZ W.L., Op. Cit.

²⁶ GUARIN, S.Y. y ROA, O.A., Op. Cit.

²⁷ GÓMEZ, S., TAUPIN, J. Y RUEDA, J., Op. Cit.

2.2. FORMULACIÓN MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Se definió el área del acuífero superficial de la Flora que hace parte del acuífero superficial de Bucaramanga delimitándose por condiciones hidrológicas (ríos, quebradas, etc.) para obtener el modelo digital del terreno y las capas acuíferas correspondientes. Se realizó la estructuración de la información correspondiente de las unidades hidrogeológicas: geometría, propiedades hidráulicas, superficies piezométricas, identificación de las zonas de recarga y descarga, entre otras, a través del modelo hidrogeológico conceptual (MHC) propuesto.

2.2.1. Modelo geométrico geológico. Un insumo necesario para la elaboración del modelo numérico de flujo, son las capas de basamento hidrogeológico y techos de acuíferos. En este sentido, se debe realizar un modelo geométrico geológico, el cual debe representar de la mejor manera la distribución espacial de las cotas de techo y base de cada una de las capas geológicas²⁸.

Para la elaboración del modelo geométrico geológico, se realizó de acuerdo al informe de INGEOMINAS denominado Modelo Geológico-Geofísico para el Área Metropolitana de Bucaramanga²⁹, donde recopilaron e interpretaron información geológica que llevó a obtener espesores de capas geológicas para diferentes puntos del Área Metropolitana. Se tomaron los puntos más cercanos a la zona de estudio y puntos adicionales a partir de mapas geológicos del 2001³⁰ y 2007³¹, con el fin de adaptar la superficie a las condiciones escarpadas de la zona, donde los estratos pueden variar de manera considerable.

2.3. MODELO NUMÉRICO

Con base al MHC se realizó la construcción del modelo numérico del acuífero superficial de la Flora en el software GroundWater Vistas (GV) que es un sistema

²⁸ ANTOLINEZ W.L., Op. Cit., p.53.

²⁹ INGEOMINAS, 2004., Op. Cit.

³⁰ INGEOMINAS – CDMB, 2001., Op. Cit.

³¹ INGEOMINAS – CDMB, 2007., Op. Cit.

grafico para MODFLOW y otros modelos similares como MODPATH y MT3D que permite el uso de herramientas para el pre y post procesamiento de información requerida en el modelamiento de aguas subterráneas³².

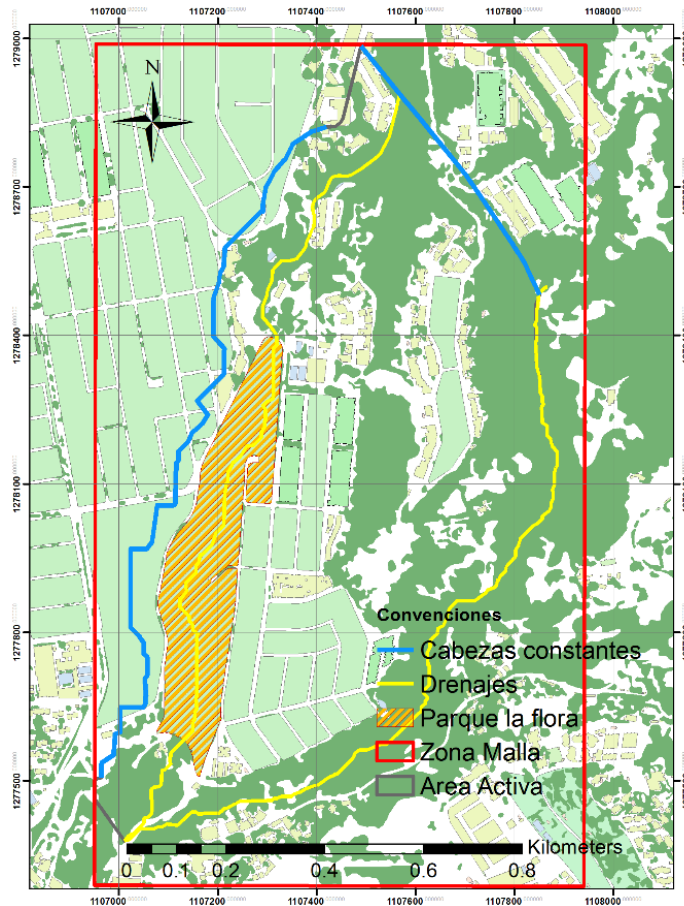
Se definió el tamaño de la malla a utilizar para el método de diferencias finitas (discretización espacial del área de estudio), el número de capas (discretización vertical), las propiedades hidráulicas, las condiciones iniciales y de frontera para la modelación en estado permanente y se introdujo el modelo digital de elevaciones a partir del software Surfer.

2.3.1. Condiciones iniciales y de frontera. Para la simulación en estado permanente se tomó como condición inicial de las cabezas la superficie topográfica del modelo.

Las condiciones de frontera para la ecuación diferencial del movimiento de agua subterránea definen el flujo, la cabeza hidráulica o ambas para el modelo numérico; comprenden barreras impermeables-No flow- , de cabeza hidráulica constante - Constant Head-, drenes - Drain – (Figura 3). Su ingreso al modelo se realizó usando el software ArcGIS.

³² ANTOLINEZ W.L., Op. Cit., p.42.

Figura 3. Condiciones de Frontera.



2.3.1.1. Condición de flujo constante. La condición de flujo constante se denomina pozos en GV. Se especificará un flujo constante en una celda introduciendo el caudal que el modelo extraerá o inyectará en esa celda³³.

2.3.1.2. Condición de No flujo. Un límite de no flujo es un tipo especial de condición de flujo constante donde el flujo es igual a cero. Esto significa que la celda no es parte del sistema de flujo, ya que dichas celdas se encuentran fuera del dominio computacional del modelo. MODFLOW llama a estas celdas inactivas³⁴.

³³ RUMBAUGH, J.O y RUMBAUGH, B.D. GroundWater Vistas Manual. Versión 6 [On line]. Leesport PA. 2007 [Citado 30 Sep 2015]. Disponible en internet: <URL: http://www.groundwatermodels.com/Groundwater_Vistas.php>

³⁴ Ibíd.

2.3.1.3. Condición de Cabeza Hidráulica Constante. Una condición de cabeza constante es por definición donde la cabeza hidráulica no cambia durante la simulación³⁵. Esta condición se usó para representar el contacto entre la zona aluvial y el Macizo de Santander.

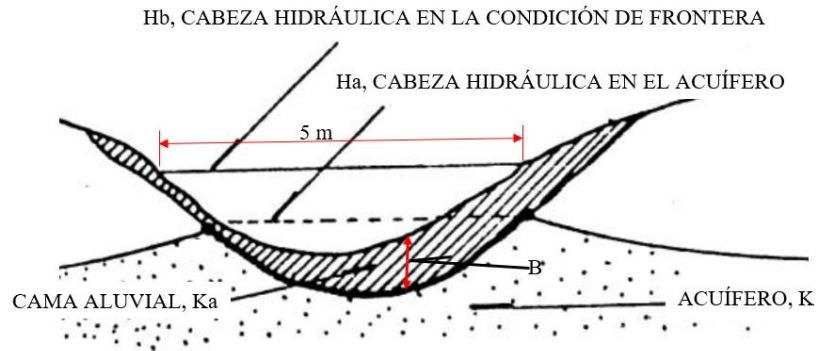
2.3.1.4. Dren. Los drenes es una condición mixta, que dependiendo del nivel de agua en la celda drena el acuífero o se desactiva si el nivel se encuentra por debajo del dren.

En los cauces de las quebradas se utilizó la condición de frontera –Drain- típica de cauces intermitentes, ya que las quebradas La Flora y La Iglesia se encuentran canalizadas y no aportan agua al acuífero, solo drenan, por esto se descartó usar condiciones de frontera river.

Para el software GV los drenes poseen una cama aluvial cuya conductancia es un parámetro utilizado para la estimación del flujo extraído. MODFLOW calcula la conductancia usando la conductividad hidráulica de la cama aluvial (K_a del material de fondo del río), el área de fondo del río dentro de la celda (Ancho del río) y el espesor del Material de fondo (Figura 4).

³⁵ Ibíd.

Figura 4. Esquema Condición de Frontera Drain.



Fuente: VELEZ, M.V. Hidráulica de aguas subterráneas. Segunda edición. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Medellín, 1999.

Con un ancho promedio del cauce de 5 m (para el cálculo del área de fondo en cada celda, A) y un espesor B de la cama aluvial de 0.5 m [12] y una permeabilidad de la cama aluvial similar a la del Miembro Gravoso, todo esto con el fin de que la interface gráfica con Groundwater Vistas calcule la conductancia vertical (C) de la condición de frontera mencionada ($C = K_a * A / B$) que es lo que determina que tanta agua drena para una diferencia de cabezas (entre la cabeza (H_a) y la condición (H_b)) dadas en la celda. ($Q = C(H_a - H_b)$)³⁶.

2.3.2. Régimen de Flujo. El proceso de modelación se hará en estado permanente teniendo en cuenta que en la ecuación de flujo $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$ (Variación de cabezas en el tiempo), los parámetros hidrológicos, cabezas y flujos calculados son considerados constantes en el tiempo. Una solución en estado permanente es a menudo suficiente para alcanzar objetivos de modelamiento, como son el análisis promedio de patrones de flujo y de caudales en el acuífero; estimación promedio anual de infiltración de una corriente influente (que aporta agua al acuífero); cálculo de gradientes regionales del nivel freático, simulación de direcciones de flujo influenciadas por el bombeo a largo plazo. Los modelos en estado permanente

³⁶ Ibíd.

también pueden ser usados para pronosticar los efectos de “stress” promediados en el tiempo como los de una sequía o un bombeo prolongado³⁷.

Uno de los criterios para juzgar si un periodo de tiempo representa condiciones en estado permanente es evaluar si las mediciones de cabezas en campo al comienzo y final del periodo son similares, de ser así, sugiere que el cambio en el almacenamiento durante el periodo es despreciable y las cabezas promedio pueden ser utilizados, por ejemplo, entre un verano y otro verano o cuando los cambios de las cabezas en el tiempo son pequeños³⁸.

2.3.3. Ejecución del modelo tipo exploratoria. La ejecución del modelo numérico tipo exploratoria busca mediante las primeras corridas y análisis de sensibilidad de los resultados, detectar la necesidad de refinar condiciones iniciales, de frontera y propiedades hidráulicas, o incluso el modelo conceptual del sistema hidrológico para observar el efecto en la calibración³⁹.

2.3.4. Calibración. La calibración tiene el propósito de lograr que el modelo pueda reproducir las cabezas piezométricas medidas en campo para el acuífero superficial en un rango de error aceptable⁴⁰, que para el estado permanente busca reproducir las condiciones promedio representativas del área de estudio.

El proceso de calibración consiste en variar los parámetros hidráulicos del acuífero superficial y capas confinantes para obtener de manera satisfactoria los valores de cabezas observados (targets)⁴¹.

³⁷ ANDERSON, M.P., WOESSNER, W.W y HUNT, R.J. Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport. 2 ed. ISBN: 978-0-12-058103-0, 2015.

³⁸ *Ibíd.*

³⁹ MONTOYA, D. Modelo Conceptual y Numérico del Sistema Hidrológico Ciénaga Colombia. Trabajo de Investigación de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, 2010, p.47.

⁴⁰ *Ibíd.*, p.47

⁴¹ ANTOLINEZ W.L., Op. Cit., p.85.

A partir de los dos periodos de mediciones continuas de niveles de agua en el piezómetro de la Flora, se calibró para los niveles de 0.7 m (nivel piezométrico 955.1msnm) y 2.3 m (nivel piezométrico 953.5 msnm) y para otro escenario más, que corresponde al promedio de las mediciones puntuales realizadas en el 2008 de 1m (nivel piezométrico 954.8 msnm), niveles medidos desde la superficie del pozo.

2.3.5. Aplicaciones del modelo numérico. Una de las aplicaciones del modelamiento para la zona de estudio es la simulación de pruebas de bombeo con el fin de un posible aprovechamiento del recurso hídrico y/o para estimar el impacto de la explotación del acuífero, entre otros propósitos.

Se estimará en cada modelo el caudal que abate el piezómetro existente para saber que flujo se puede extraer y se propondrá un pozo nuevo para evaluar la posibilidad de abastecimiento con agua subterránea.

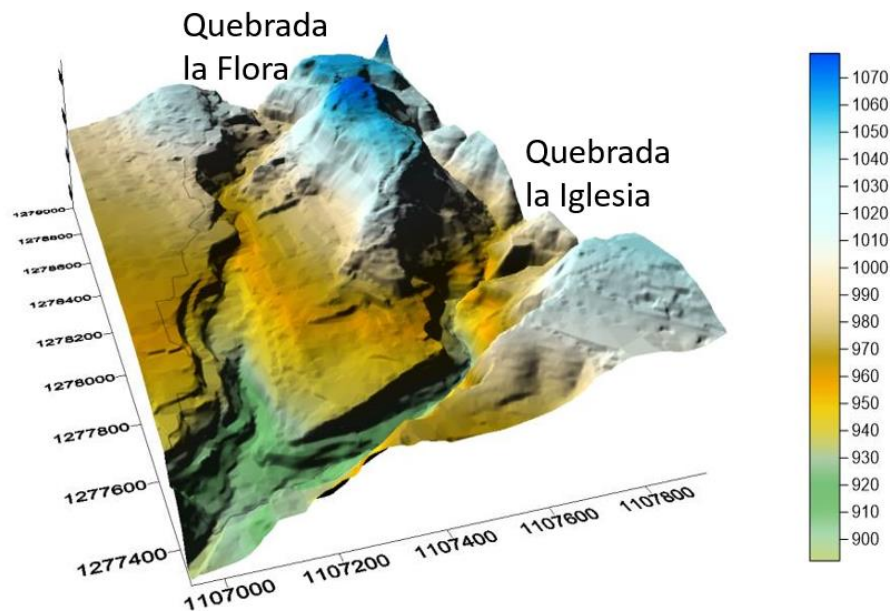
3. MODELO HIDROGEOLOGÍCO CONCEPTUAL

3.1. FISIOGRAFÍA

Para el entendimiento de los sistemas hidrogeológicos y la descripción de los procesos de flujo que se dan entre sus componentes, es fundamental tener una clara caracterización del relieve, ya que constituye un factor clave en la identificación de zonas de recarga, configuración de redes de drenaje, delimitación de cuencas hidrográficas⁴² (Figura 5).

El modelo digital de elevaciones del terreno y de las capas acuíferos es indispensable para el modelamiento, puesto que el código de diferencias finitas del software GV usa la elevación superior e inferior de cada capa para el cálculo de los espesores de las capas.

Figura 5. Modelo Digital de Elevación (MDE) para la zona de estudio.



⁴² *Ibíd.*, p.61.

3.2. NIVELES PIEZOMÉTRICOS

Se realizó un análisis de los niveles piezométricos disponibles mostrados en la Tabla 1, con el fin de verificar que no existiesen cambios considerables en el almacenamiento, revisando la variación de los niveles de agua al comienzo y al final de cada periodo de tiempo.

Los niveles de agua mostraron variaciones de 3 cm, 14 cm y 16 cm para los periodos de 2008, 2011 y 2014 respectivamente. Lo que se consideró admisible para el presente estudio.

3.3. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

En el área de estudio se distinguen dos unidades hidrogeológicas para tener en cuenta en el modelamiento: la primera es el acuífero superficial semilibre correspondiente al Miembro Gravoso y la segunda es el acuicludo correspondiente al Miembro Finos que es la que actúa como unidad hidrogeológica aproximadamente impermeable, es decir, sirve de basamento para el acuífero superficial. Aunque no se puede descartar la posibilidad de que el Miembro Finos actué como un acuitardo⁴³.

3.3.1. Características hidráulicas del Acuífero superficial. En el área de estudio, en el 2011 se realizaron pruebas de bombeo de algunas horas de duración, las cuales dieron información de las características hidráulicas del acuífero superficial del parque La Flora como la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento (Tabla 4).

⁴³ *Ibíd.*, p.75.

Tabla 4. Resultados pruebas de bombeo.

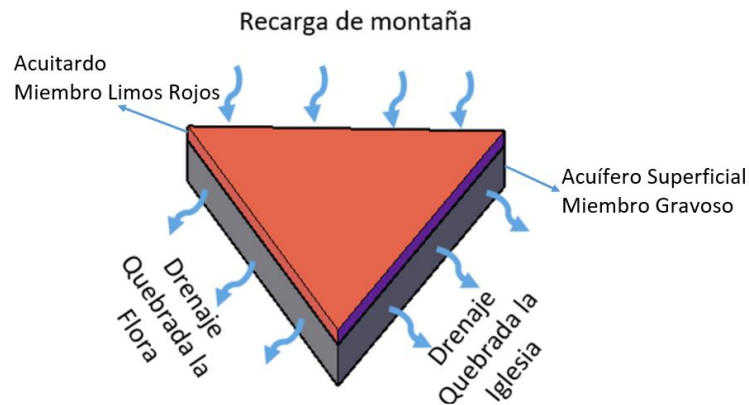
Ubicación	Acuífero	Parámetros	Autor
Parque La Flora	Superficial	T= 0,0508 - 0,025 [m ² /d]	Barrera y Ruiz, 2011
		S=0,117	

Fuente: BARRERA, M.A. y RUIZ, D.A. Pruebas de bombeo en pozos ubicados en zona Oriental de la ciudad de Bucaramanga y análisis con uso de software. Proyecto de Grado, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2012.

3.4. DIRECCIÓN DE FLUJO, RECARGA Y DRENAJE

La principal fuente de la recarga proviene del Macizo de Santander, donde el flujo se direcciona hacia las quebradas La Flora y La Iglesia que son quebradas permanentes, pero han sido canalizadas por la CDMB, por lo tanto, actualmente no aportan flujo al acuífero superficial, solo drenan como se observa en la Figura 6.

Figura 6. Esquema del MHC.

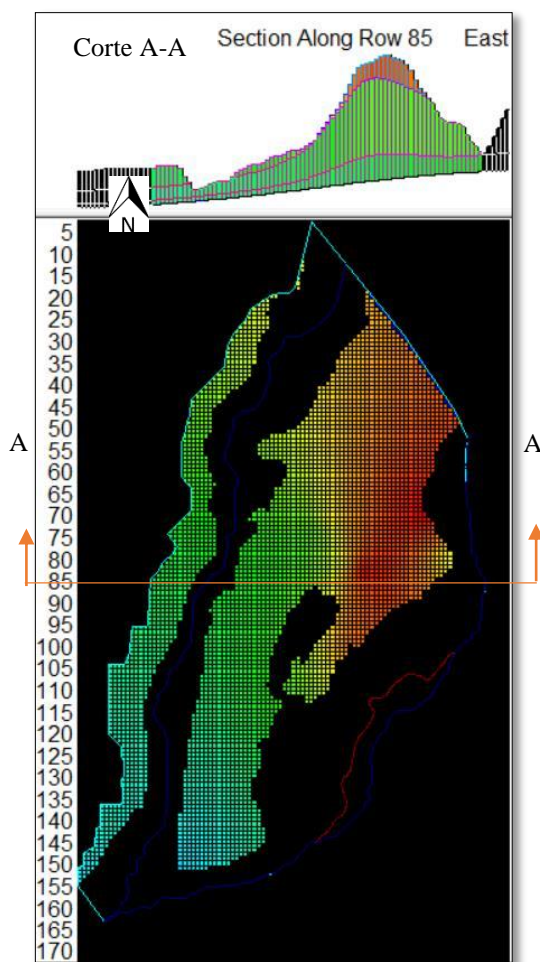


4. DESARROLLO DEL MODELO NÚMÉRICO

4.1. DISEÑO DEL MODELO

De acuerdo con la extensión del área a modelar, 2.2 Km², se definieron 170 filas y 99 columnas con celdas cuadradas de 10 m. Para la discretización vertical (información en profundidad de las capas) se hizo con base en el modelo tridimensional de capas geológicas⁴⁴ (Figura 7).

Figura 7. Discretización de la malla para la zona de estudio.

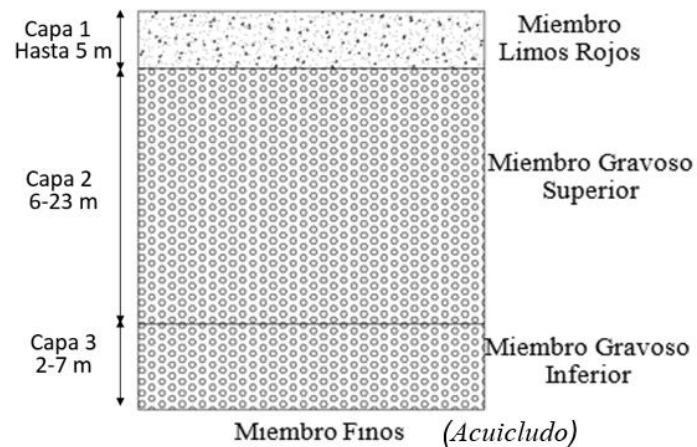


⁴⁴ INGEOMINAS, 2004., Op. Cit.

Para el modelo numérico se plantearon tres capas, de techo a base: la capa 1 corresponde al Miembros Limos Rojas de la formación Bucaramanga, el techo de este miembro es definido con la topografía del terreno y la base con el nivel superior del Miembro Gravoso, en la capa 2 se encuentra la parte superior del Miembro Gravoso y en la capa 3 se encuentra la parte inferior del Miembro Gravoso (Figura 8).

La separación del Miembro Gravoso se propuso para tener en cuenta la heterogeneidad vertical de las formaciones geológicas (variación de sus propiedades en el espacio), lo que permite un rango más amplio de posibilidades para la calibración. La base del modelo está definida por el nivel superior del Miembro Finos, donde este último actúa como basamento para la capa suprayacente; en las capas 2 y 3 se encuentra el acuífero superficial.

Figura 8. Columna estratigráfica.



Para realizar la modelación se tomó como condición inicial de los niveles del modelo la superficie topográfica, por lo tanto, el software empezara a iterar desde estos niveles buscando una solución hasta que converja con un error aceptable.

4.2. DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA

Para representar el contacto entre la zona aluvial y el Macizo de Santander en el modelo, se ubicó una condición de cabeza constante relativamente superficial (entre 1m y 5m aproximadamente), esto permitió simular el embalsamiento del agua subterránea que se producirá debido al cambio brusco de las conductividades hidráulicas producido en la interfaz.

De igual manera, a 100 m hacia el occidente de la quebrada La Flora se ubicó otra condición de cabeza constante con valores tomados de las isopiezas (curvas de nivel de la superficie freática) del inventario de puntos de agua subterránea⁴⁵ y las isopiezas de 1986 para el acuífero superficial⁴⁶.

Estos valores se consideraron, porque debido a la cercanía de la quebrada La Flora y el piezómetro de referencia, el modelo no estaba considerando el flujo proveniente fuera del área de estudio, lo que impedía su adecuada calibración, ya que el único “target” disponible (punto de referencia en campo) se encontraría únicamente influenciado por la condición de frontera dada por la quebrada.

4.3. DEFINICIÓN DE PROPIEDADES HIDRÁULICAS Y RECARGA

Inicialmente las propiedades hidráulicas a usar en la modelación exploratoria del acuífero superficial se tomaron y se ajustaron de las pruebas de bombeo realizadas en la zona del parque La Flora mostrados en la Tabla 5.

⁴⁵ RODRÍGUEZ, J.C. y TORRES D.C. Inventario de Puntos de aguas subterráneas y distribución espacial de niveles de acuíferos en la parte aluvial y sedimentaria de la región de Bucaramanga. Proyecto de Grado, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2011.

⁴⁶ ANTOLINEZ W.L., Op. Cit.

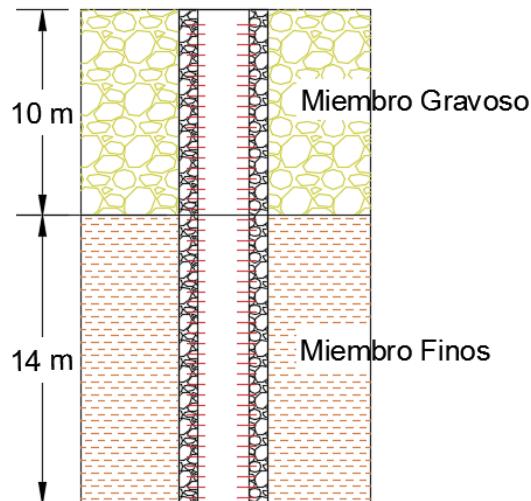
Tabla 5. Parámetros iniciales.

Parámetro		Capa 1	Capa 2	Capa 3
Conductividad Hidráulica (m/d)	Kx	0,000508	0,00508	0,00508
	Kz	0,000508	0,00508	0,00508
Coeficiente de almacenamiento		0,117	0,117	0,117

Fuente: Tomada y modificada de BARRERA, M.A. y RUIZ, D.A. Pruebas de bombeo en pozos ubicados en zona Oriental de la ciudad de Bucaramanga y análisis con uso de software. Proyecto de Grado, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2012.

De acuerdo con el modelo geométrico geológico realizado del Miembro Finos identificado como el basamento, se infiere que el piezómetro del parque La Flora se introduce dentro de dicho basamento cerca de 14 m, dejando aproximadamente 10 m de espesor saturado para el Miembro Gravoso (Figura 9), lo que conlleva a una permeabilidad inicial de 0.00508 m/d.

Figura 9. Esquema geológico del Piezómetro del parque La Flora.



La capa 1 que corresponde al Miembro Limos que presenta una estructura limo-arcillosa que tiene condiciones menos permeables y debido que no se cuenta con información de permeabilidad por lo tanto se tomó un valor de 0.000508 m/d que es

diez veces menor a la proporcionada por las pruebas de bombeo realizadas en el Miembro Gravoso.

El valor de la recarga local inicial se estimó para el modelo durante la fase exploratoria con un valor de 0.0014 m/d, que es el 40% de la precipitación promedio anual, tomando como referencia el balance hídrico de la Cuenca del Río Lebrija⁴⁷, aplicada como recarga directa sobre toda el área de estudio.

⁴⁷ GOMEZ S. y COLEGIAL J.D. Interacción entre sistemas hidrogeológicos en el Macizo de Santander para el estudio de la recarga e identificación de acuíferos, informe de investigación, Proyecto Colciencias, Bucaramanga, 72 p, 2003.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

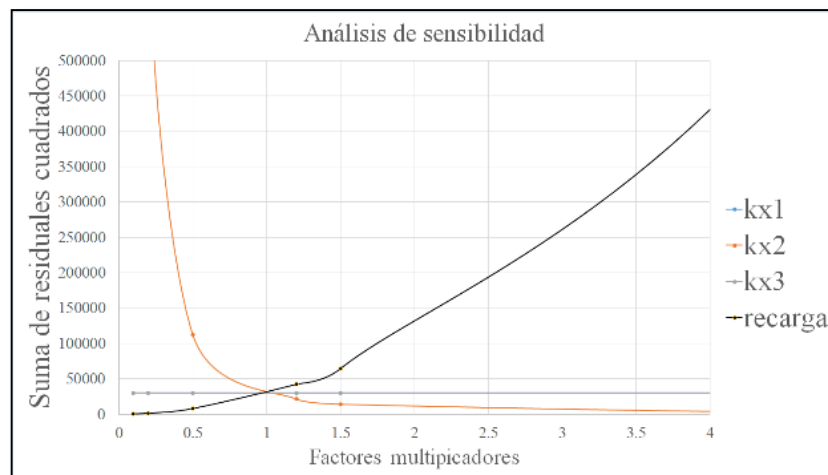
5.1. RESULTADOS PRELIMINARES

En la modelación exploratoria que corresponde a las primeras corridas del modelo, se evidenció que el miembro Limos Rojos se encontraba completamente saturado, esto debido a la gran cantidad de infiltración hacia el acuífero, combinado con la baja permeabilidad de las unidades hidrogeológicas que era incapaz de evacuar tal cantidad de agua proveniente de la precipitación.

5.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad del modelo en la fase exploratoria (Figura 10), se realizó aplicando factores multiplicadores a los valores de conductividad hidráulica, recarga local y conductancia de los drenes. Los resultados de este análisis evidenciaron que el modelo no es sensible a cambios en los valores de conductancia de los drenes, pero si lo es, a variaciones en la conductividad hidráulica del acuífero superficial y a la recarga local.

Figura 10. Resultados del análisis de sensibilidad preliminar para permeabilidad y recarga.



En la Figura 9, $kx1$, $kx2$ y $kx3$ corresponden a las permeabilidades hidráulicas de la capa 1, 2 y 3 respectivamente, en el cual la forma de interpretar esta grafica es que, si las curvas de la suma de residuales cuadrados se aproximan a cero empezando desde el origen de coordenadas, el valor de las conductividades y de la recarga por infiltración es el que hace que el modelo converja de la mejor manera. De lo contrario, como se observa en la Figura 9, se debe redefinir los valores de las conductividades y de la recarga local que es el proceso de calibración⁴⁸ [2].

Después de varios análisis de sensibilidad se concluyó que debía retirarse la recarga local para poder calibrar el modelo, dejando únicamente la recarga del macizo. Para que la calibración fuera realizada teniendo en cuenta la recarga local se necesita que la infiltración sea menos del 0.4% del valor de la precipitación de 0.0014 m/d, lo cual se consideró despreciable.

La recarga local es nula debido a que el Miembro Limos Rojos es una capa relativamente impermeable, la zona es escarpada y las zonas planas se encuentran urbanizadas, por lo cual se eliminó la infiltración del modelo

5.3. CALIBRACIÓN EN ESTADO PERMANENTE

En el proceso de calibración no fue necesario asignar diferentes conductividades hidráulicas para las capas 2 y 3, debido a la homogeneidad del Miembro Gravoso, que a pesar de tener algunos niveles o lentes finos, se presentan de manera discontinua. La separación de las capas 2 y 3 se conservó en el modelo numérico debido a que la mayor discretización vertical genera resultados más detallados.

Para realizar la calibración fue necesario el ajuste de las condiciones de frontera de cabeza constante en la parte nor-occidental del área de estudio. El valor de la condición de cabeza constante se aumentó en la zona nor-occidental con una altura

⁴⁸ ANTOLINEZ W.L., Op. Cit., p.81.

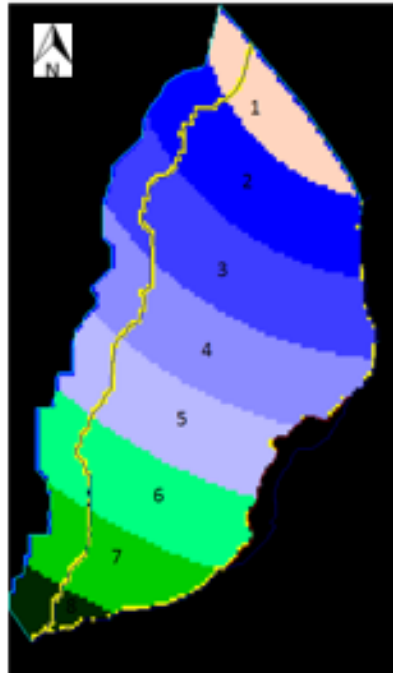
de 995 msnm debido a que se presentaban celdas secas. En la zona sur-occidental con un valor de 910 msnm la condición de cabeza constante se disminuyó debido a la presencia de celdas saturadas. De igual forma, en el contacto del abanico aluvial y el Macizo de Santander, la condición de frontera de cabeza constante se cambió alrededor de 10m de profundidad (anteriormente de 1m a 5m).

La Calibración de los 3 escenarios de niveles de agua de 0.7 m (nivel piezométrico 955.1msnm), 2.3 m (nivel piezométrico 953.5 msnm) y de 1m (nivel piezométrico 954.8 msnm), dio como resultado 9 posibles configuraciones de permeabilidades. Para estos modelos se tuvieron en cuenta las siguientes características:

- Condiciones del medio homogéneo y permeabilidades isotrópicas.
- Condiciones del medio homogéneo y permeabilidades anisotrópicas.
- Condiciones del medio heterogéneo y permeabilidades anisotrópicas.

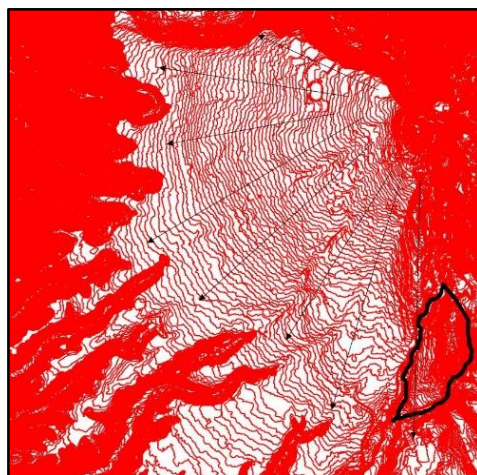
Se tuvo en cuentas las permeabilidades horizontales anisotrópicas debido a la imbricación típica de depósitos fluvio-torrenciales que se evidencia frecuentemente en abanicos aluviales y se combinó con la heterogeneidad de propiedades hidráulicas en planta donde se realizó una distribución de permeabilidades (Figura 11).

Figura 11. Distribución de permeabilidades anisotrópicas.



Se conservó una relación (k_y/k_x) desde 1/3 a 1/10 para permeabilidades anisotrópicas y la distribución de permeabilidades del medio heterogéneo posee la mayor permeabilidad al norte, disminuyendo en dirección norte sur, de acuerdo a la dirección de depositación del abanico (Figura 12).

Figura 12. Topografía del abanico.



Para el análisis de los resultados, se escogió el nivel de agua de 2.3 m perteneciente a los valores obtenidos en las calibraciones del medio heterogéneo de permeabilidades anisotrópicas (Tabla 6). Se escogió este caso debido a que las propiedades hidráulicas de este modelo son similares a las estimadas en las pruebas de bombeo de valor de 0.00508 m/d [10], considerando que el piezómetro se encuentra en la zona de permeabilidad 4, lo que es muy bueno debido a que no se espera un comportamiento homogéneo isotrópico, por lo cual son las calibraciones más confiables. En el anexo A se muestran las permeabilidades obtenidas para todos los modelos calibrados.

Tabla 6. Permeabilidades anisotrópicas y medio heterogéneo.

Niveles	Zona	kx [m/d]	ky [m/d]	kz [m/d]	Error
2,3	1	0,008	0,08	0,01	0,01
	2	0,005	0,05	0,01	
	3	0,003	0,03	0,01	
	4	0,003	0,03	0,01	
	5	0,002	0,02	0,01	
	6	0,002	0,02	0,01	
	7	0,001	0,01	0,01	
	8	0,001	0,01	0,01	

El error de calibración aceptado fue de 3 cm para todos los escenarios del medio heterogéneo de permeabilidades anisotrópicas, que fueron aproximadamente los niveles registrado entre junio del 2008 y mayo del 2014.

Figura 13. Isopiezas y vectores de velocidad en el Acuífero Superficial (Capa 2).

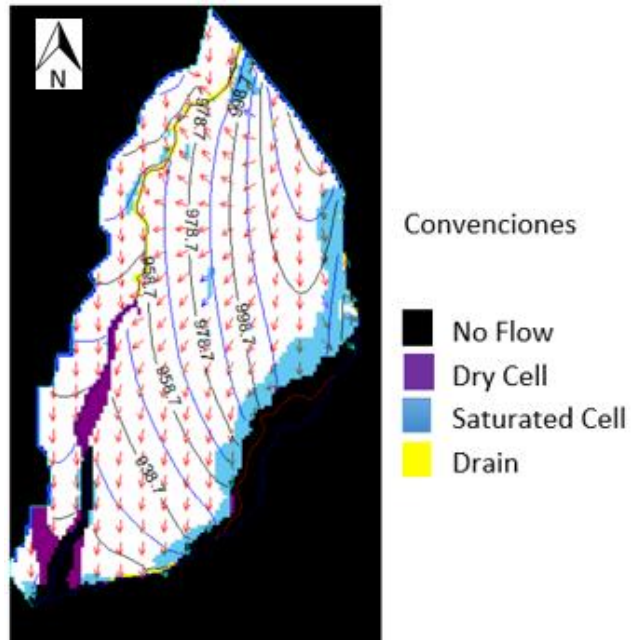
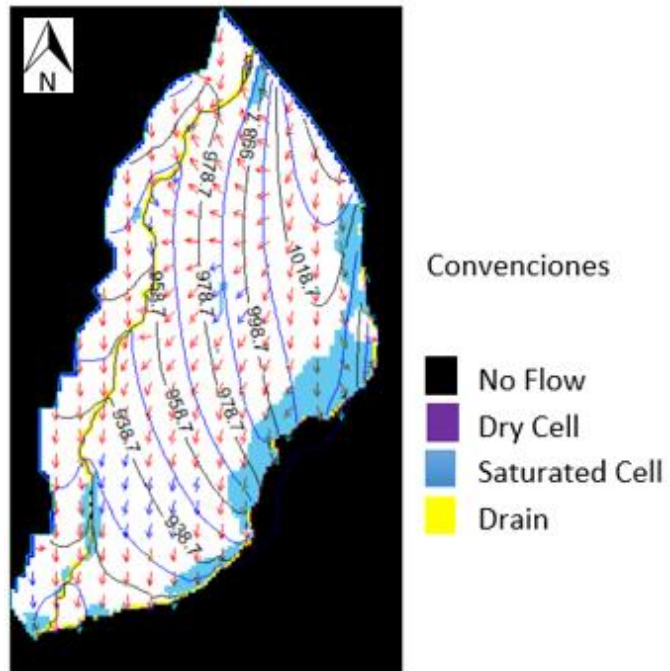


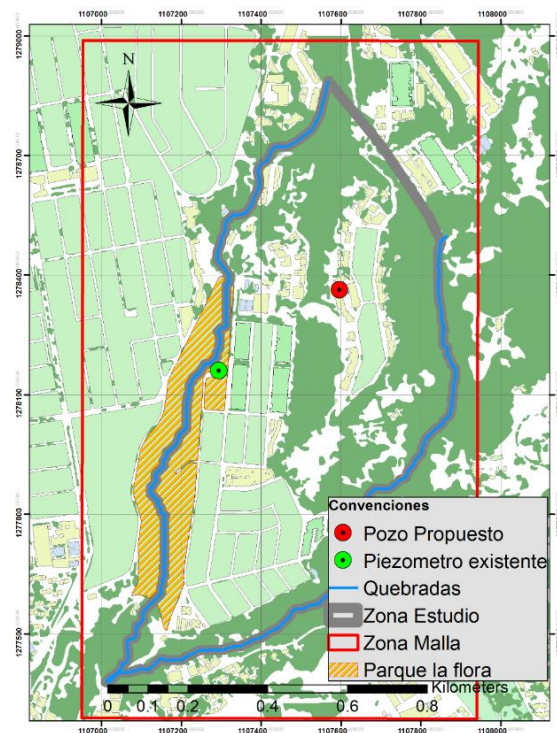
Figura 14. Isopiezas y vectores de velocidad en el Acuífero Superficial (Capa 3).



En las Figuras 13 y 14 se muestran las isopiezas y vectores de velocidad para el acuífero superficial capa 2 y capa 3 para el escenario de 2.3 m de profundidad de agua (nivel piezométrico 953.5 msnm) del medio heterogéneo de permeabilidades anisotrópicas, obtenidas a partir de la calibración del modelo en estado permanente. Se puede evidenciar la dirección que lleva el flujo por medio de los vectores de velocidad, donde las quebradas La Flora y La Iglesia drenan el acuífero. En el anexo B se muestran las isopiezas del acuífero superficial de todos los modelos calibrados.

En la Figura 13 se puede observar que en los alrededores de la quebrada La Iglesia existen celdas saturadas por lo que es factible la presencia de afloramientos de agua (celdas azules). Se observan también celdas saturadas hacia el norte de la quebrada La Flora, donde se han construido gaviones, y se evidenciaron disecciones perpendiculares al cauce de la quebrada generadas por drenajes intermitentes, lo que apoya la hipótesis de la presencia de agua en la zona escarpada del norte de la quebrada La Flora.

Figura 15. Ubicación de quebradas y puntos de bombeo.



Para evaluar el posible abastecimiento, se estimó en cada modelo el caudal que abatía el piezómetro existente para saber que flujo se puede extraer y se propuso un pozo nuevo en la fila 63 y la columna 65 ubicado en la zona de permeabilidad número 3 (Figura 15). De acuerdo al modelo geométrico geológico posee aproximadamente una profundidad de 100 m.

La transmisividad es más alta cerca a la condición de frontera de cabeza constante en el contacto ígneo-metamórfico y el abanico aluvial, pero no se debe ubicar un pozo cerca a ésta, puesto que arrojará resultados erróneos debido a que no permite desarrollar el cono de abatimiento del bombeo. Los resultados obtenidos para los modelos de medios heterogéneos y permeabilidades anisotrópicas son mostrados en la Tabla 7, considerando que 90 m/d equivalen a 1 l/s. En el anexo C se muestran los caudales extraídos en los modelos calibrados.

Se observa que el caudal que puede ser extraído con un valor de 0.47 m³/d es inferior a las pruebas de bombeo realizadas en el piezómetro superficial de la Flora en el 2012 con un caudal de 3.67 m³/d con menos de 2 horas de duración [13]. Para este modelo el pozo propuesto extrae alrededor de 10 m³/d que equivale a 0.12 l/s, siendo este valor bajo para fines de abastecimiento y de riego.

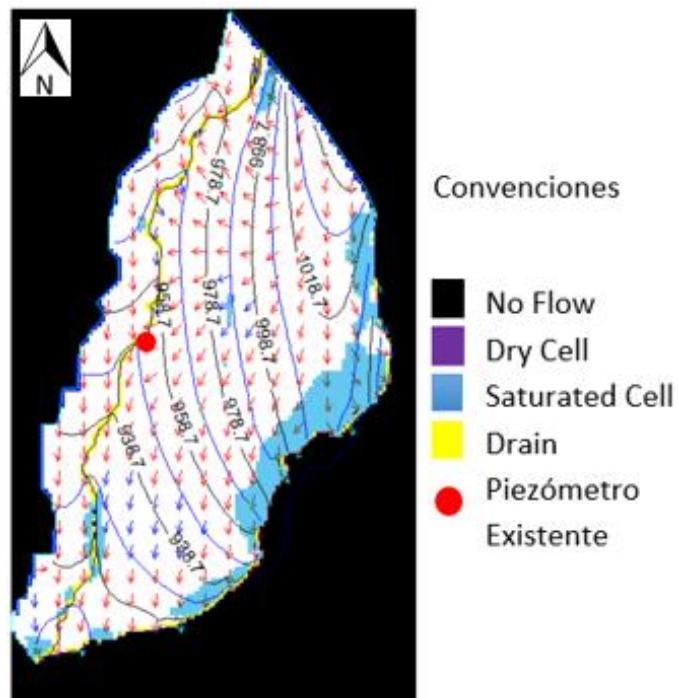
Tabla 7. Caudal modelo de medio heterogéneo y permeabilidades anisotrópicas.

Niveles	Zona	Caudal Piezómetro Existente [m³/d]	Caudal Pozo Supuesto [m³/d]
2,3	3		10,8
	4	0,47	

El balance de masas indica que las cabezas constantes ingresan al modelo 146.09 m³/d y sacan 27.49 m³/d, mientras que los drenes evacúan del sistema 118.59 m³/d como se pueden observar en las líneas flujo que se dirigen hacia las quebradas.

En las Figuras 14 y 16 se puede observar el patrón de flujo del acuífero antes y después de abatido el piezómetro existente. El balance de masas del modelo con bombeo en el piezómetro indica que las cabezas constantes ingresan al sistema $146.09 \text{ m}^3/\text{d}$ y sacan $26.49 \text{ m}^3/\text{d}$ mientras que los drenes evacúan del sistema 118.13 y el pozo $0.47 \text{ m}^3/\text{d}$ lo que muestra que entradas y salidas son iguales. Esto indica que el bombeo del piezómetro afecta en mayor manera el caudal extraído por los drenes que al caudal suministrado por la cabeza constante. En el anexo D se muestran los balances de masas de todos los modelos calibrados.

Figura 16. Isopiezas y vectores de velocidad en el acuífero superficial con bombeo del piezómetro existente (Capa 3).



Las Figuras 16 y 17 muestran la respuesta del acuífero (isopiezas y líneas de flujo) ante el bombeo del piezómetro existente y del pozo propuesto, que al parecer no posee un radio de influencia significativo debido a la baja permeabilidad de éste. Por lo que intentar solucionar problemas geotécnicos bombeando un pozo parece no ser viable.

6. CONCLUSIONES

El oriente de la meseta de Bucaramanga posee un acuífero semilibre que hace parte del acuífero superficial de Bucaramanga cuyo basamento es el Miembro Finos, recargado por el flujo proveniente del Macizo de Santander tal como indican estudios isotópicos y el proceso de calibración del presente estudio. Este Acuífero se drena por las quebradas permanentes La Flora y La Iglesia que se encuentran canalizadas y por tanto no aportan flujo al acuífero.

Los resultados de la calibración arrojaron valores de conductividad hidráulica este-oeste entre 0.001m/d y 0.008 m/d y permeabilidades norte-sur diez veces más grande, entre 0.01 m/d y 0.08 m/d, que es similar a la permeabilidad de 0.00508 m/d de las pruebas de bombeo realizada en estudios anteriores. Por otra parte, los valores de los resultados de la calibración comparados con los propuestos en el modelo numérico de aguas subterráneas de Bucaramanga son muy diferentes para la zona de estudio encontrándose éstos en un rango de 3.1 m/d a 4.2 m/d.

El modelo mostró no requerir recarga local, por lo que la recarga del acuífero superficial es lateral, proveniente del Macizo de Santander representando en el modelo por una cabeza hidráulica constante, esto sustentado en el balance de masas que indicó que las cabezas constantes ingresaban al modelo $146.1 \text{ m}^3/\text{d}$.

El proceso de calibración llevó a valores de conductividad hidráulica de 9 modelos diferentes, de los cuales se seleccionó el de medio heterogéneo anisotrópico de 2.3 m de profundidad (953.5 msnm) como el más idóneo de todos por ser el correspondiente al nivel más bajo registrado.

El consumo del parque La Flora es aproximadamente $34 \text{ m}^3/\text{d}$ mientras que el caudal explotable en el piezómetro es de $0.45 \text{ m}^3/\text{d}$ lo cual indica que el piezómetro existente no puede suplir las necesidades del parque.

Las pruebas de bombeo simuladas muestran que un pozo ubicado en una zona más alta (Pan de Azúcar), lejos de las quebradas (la Flora y la Iglesia) sería mucho más provechoso para el abastecimiento de agua que el piezómetro existente, sin embargo, los caudales obtenidos en el pozo propuesto son insuficientes para la viabilidad de una perforación con estos fines ya que el pozo propuesto posee más de 100 m de profundidad

7. RECOMENDACIÓN

Para obtener mejores resultados de un modelo numérico, se debe contar con un modelo conceptual que este sostenido con información de buena calidad y en lo posible cantidad, siempre evaluando la información recolectada, compararla con otras fuentes de información, retroalimentar el modelo conceptual y tener en cuenta que siempre se contará con incertidumbre como factor influyente en los resultados.

La calibración de todos los escenarios de permeabilidad, obedece a la falta de información necesaria relacionada con perforaciones, mediciones de niveles y pruebas de bombeo, indispensables para el conocimiento integral del marco geológico e hidrogeológico de la zona, que puedan restringir el número de soluciones posibles en la calibración por lo que se recomienda realizar perforaciones, tomografías sísmicas, tomografías eléctricas, mediciones de niveles etc, que permitan identificar con mayor detalle la estratigrafía y demás información de interés hidrogeológico.

Se aconseja la construcción de un piezómetro adicional en la zona para el acuífero superficial con su respectiva columna litológica, debido a que el piezómetro actual cuenta con una alta incertidumbre en la ubicación del basamento y se ve influenciado por el drenaje de la canalización de la quebrada la Flora, ocasionando desconfianza en los parámetros hidráulicos estimados.

Es importante profundizar en el conocimiento estructural de la zona especialmente en el comportamiento de las fallas geológicas presentes y su influencia en las formaciones acuíferas.

Para futuros modelamientos de la zona de estudio, se recomienda tener en cuenta la variación en el tiempo (estado transitorio), por lo cual se deben realizar nuevas

tomas de niveles teniendo en cuentas aspectos como la permeabilidad del basamento que conecta el acuífero superficial con el profundo.

BIBLIOGRAFÍA

ANDERSON, M.P., WOESSNER, W.W y HUNT, R.J. Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport. 2 ed. ISBN: 978-0-12-058103-0, 2015.

ANTOLÍNEZ W.L. Modelo Numérico del Flujo de Agua Subterránea en las formaciones Acuíferas de Bucaramanga, Trabajo de Investigación de Maestría, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2014.

BARRERA, M.A. y RUIZ, D.A. Pruebas de bombeo en pozos ubicados en zona Oriental de la ciudad de Bucaramanga y análisis con uso de software. Proyecto de Grado, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2012.

COLCIENCIAS-UIS. 2003, Interacción entre sistemas Hidrogeológicos para el Estudio del Fenómeno de Recarga en el Macizo de Santander e identificación de Acuíferos, 2003.

CORREA, J.G. y MONTAÑO, J.F. Instrumentación de piezómetro piloto ubicado en la zona Norte de Bucaramanga y revisión de datos obtenidos de piezómetros en la zona Oriente y Norte de la ciudad. Proyecto de grado, facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2011.

GOMEZ S. y COLEGIAL J.D. Interacción entre sistemas hidrogeológicos en el Macizo de Santander para el estudio de la recarga e identificación de acuíferos, informe de investigación, Proyecto Colciencias, Bucaramanga, 72 p, 2003.

GÓMEZ, S., TAUPIN, J. Y RUEDA, J. Estudio hidrodinámico, geoquímico e isotópico de las formaciones acuíferas de la región de Bucaramanga. Revista Peruana Geo-atmosférica, 2013.

GUARIN, S.Y. y ROA, O.A. Medición continua y análisis de niveles de agua subterránea en los pozos del parque La Flora en la parte alta de la ciudad de Bucaramanga. Proyecto de grado, facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2014.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Atlas Climatológico Nacional, 2010.

INGEOMINAS – CDMB. Zonificación sísmogeotécnica indicativa para el área metropolitana de Bucaramanga, 2001.

INGEOMINAS. Modelo Geológico-Geofísico para el Área Metropolitana de Bucaramanga. Buemoudes y Vásquez, 2004.

INGEOMINAS – CDMB - AMB. Zonificación de Amenaza por Movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón Y Piedecuesta, 2007

JIMÉNEZ, J.A. y COLMENARES, S.C. Medición de parámetros físico químicos y biológicos del agua subterránea en la zona de Bucaramanga. Proyecto de Grado, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2009.

MONTOYA, D. Modelo Conceptual y Numérico del Sistema Hidrológico Ciénaga Colombia. Trabajo de Investigación de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, 2010.

PULIDO M.A. Y NIETO M.A. Obtención y análisis de perfiles de parámetros fisicoquímicos en piezómetros de la zona oriental de la ciudad de Bucaramanga,

Proyecto de Grado, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2010.

RODRÍGUEZ, J.C. y TORRES D.C. Inventario de Puntos de aguas subterráneas y distribución espacial de niveles de acuíferos en la parte aluvial y sedimentaria de la región de Bucaramanga. Proyecto de Grado, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2011.

RUMBAUGH, J.O y RUMBAUGH, B.D. GroundWater Vistas Manual. Versión 6 [Online]. Leesport PA. 2007 [Citado 30 Sep 2015]. Disponible en internet: <URL: http://www.groundwatermodels.com/Groundwater_Vistas.php>

VELEZ, M.V. Hidráulica de aguas subterráneas. Segunda edición. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Medellín, 1999.

VERGARA O. Prospección geológica para aguas subterráneas en rocas cristalinas fracturadas del Macizo de Santander, sector oriental de Bucaramanga. Proyecto de grado, facultad de Ingenierías Físico-químicas, Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2004.

ANEXOS

Anexo A. Valores de permeabilidades para los modelos calibrados.

- Permeabilidades anisotrópicas y medio heterogéneo.

Niveles	Zona	kx [m/d]	ky [m/d]	kz [m/d]	Error
0,7	1	0,0066	0,033	0,001	0
	2	0,006	0,03	0,001	
	3	0,006	0,03	0,001	
	4	0,0054	0,027	0,001	
	5	0,004	0,02	0,001	
	6	0,004	0,02	0,001	
	7	0,002	0,01	0,001	
	8	0,002	0,01	0,001	
1	1	0,0066	0,033	0,001	-0,03
	2	0,006	0,03	0,001	
	3	0,006	0,03	0,001	
	4	0,006	0,03	0,001	
	5	0,0048	0,024	0,001	
	6	0,004	0,02	0,001	
	7	0,002	0,01	0,001	
	8	0,002	0,01	0,001	
2,3	1	0,008	0,08	0,01	0,01
	2	0,005	0,05	0,01	
	3	0,003	0,03	0,01	
	4	0,003	0,03	0,01	
	5	0,002	0,02	0,01	
	6	0,002	0,02	0,01	
	7	0,001	0,01	0,01	
	8	0,001	0,01	0,01	

- Permeabilidades isotrópicas y medio homogéneo.

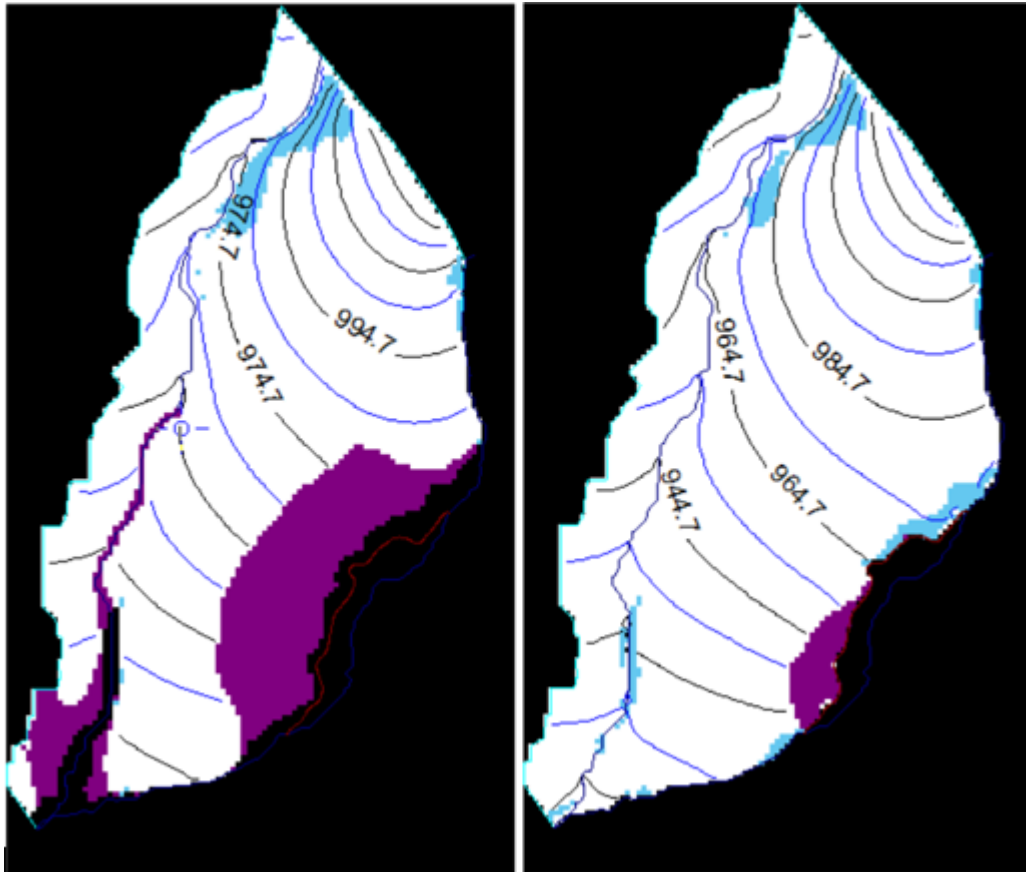
Niveles a calibrar	kx=ky [m/d]	kz [m/d]	Error
0,7	0,08	0,01	-0,01
1	0,2	0,07	0
1	3,5	1	0,01

- Permeabilidades anisotrópicas y medio homogéneo.

Niveles a calibrar	kx [m/d]	ky [m/d]	kz [m/d]	Error
0,7	0,133	0,4	0,01	0,02
1	0,0833	0,25	0,01	0
2,3	0,006	0,03	0,001	-0,02

Anexo B. Isopiezas del acuífero superficial para todos los modelos calibrados.

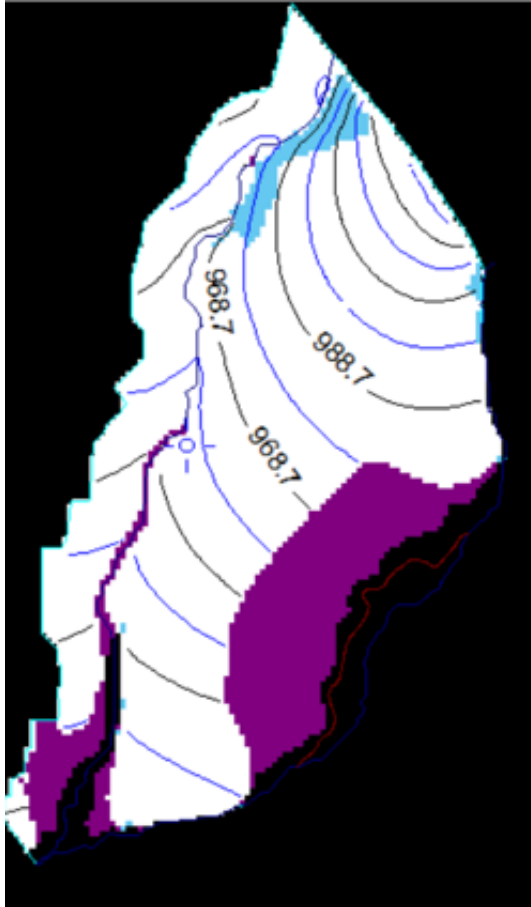
- Isopiezas en el acuífero superficial, nivel de agua de 0.7m de profundidad de medio homogéneo y permeabilidad isotrópica.



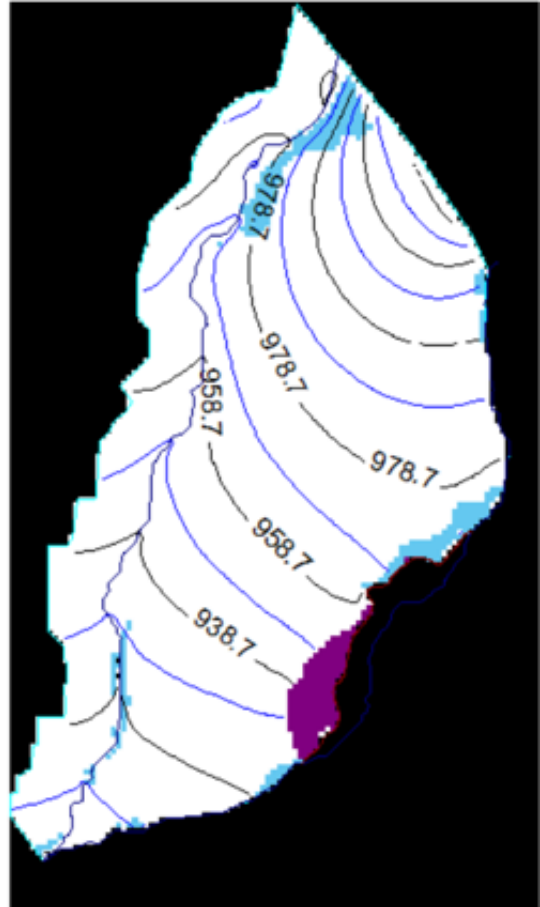
Capa 2

Capa 3

- Isopiezas en el acuífero superficial, nivel de agua de 1m de profundidad de medio homogéneo y permeabilidad isotrópica.

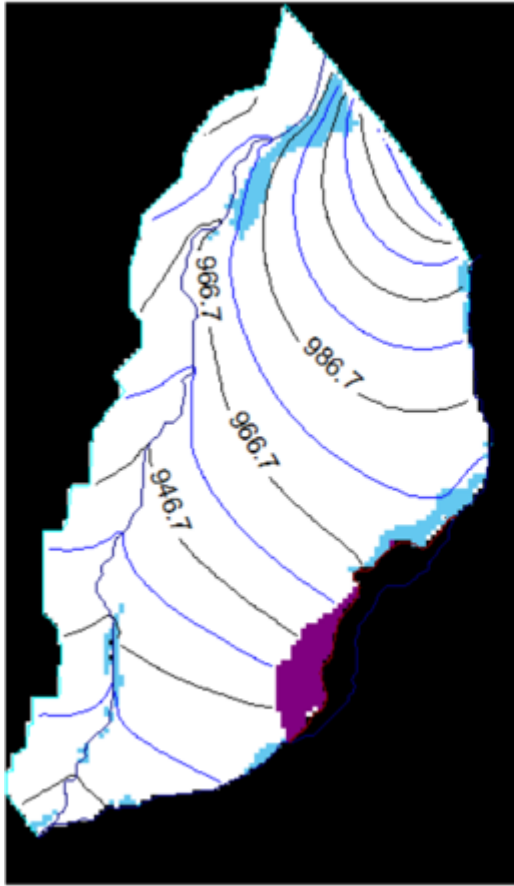


Capa 2

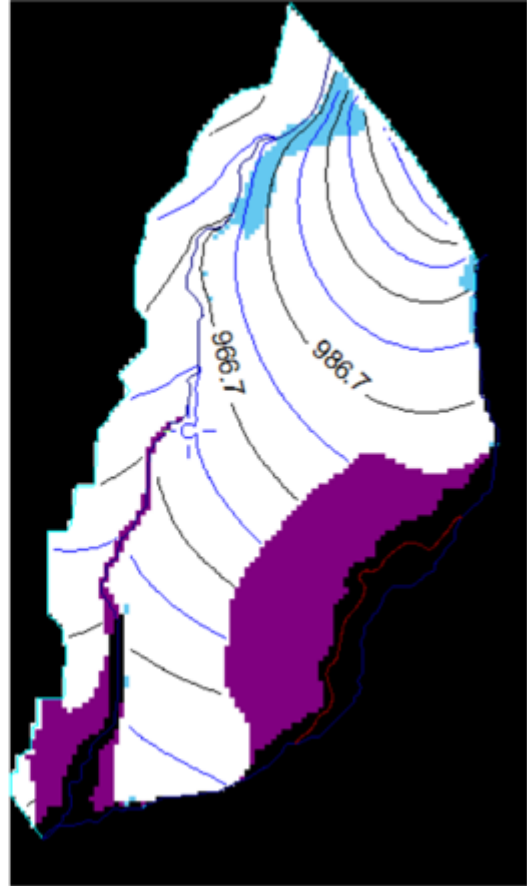


Capa 3

- Isopiezas en el acuífero superficial, nivel de agua de 1m de profundidad de medio homogéneo y permeabilidad isotrópica.

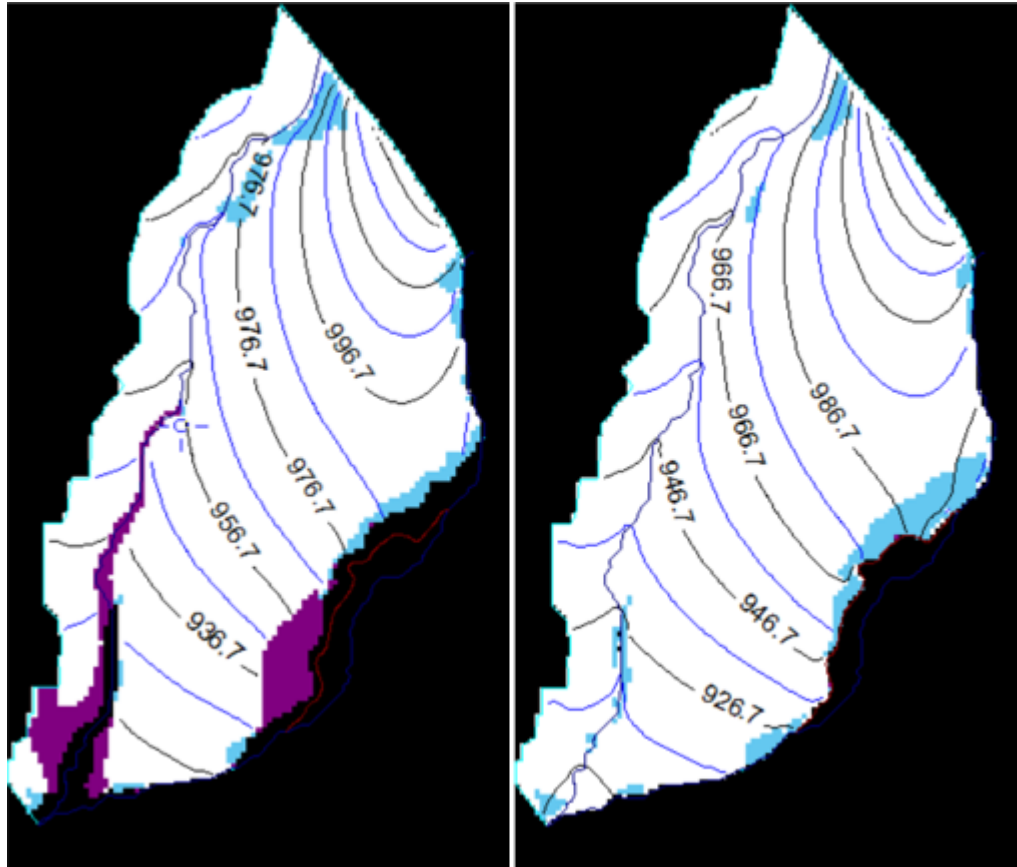


Capa 2



Capa 3

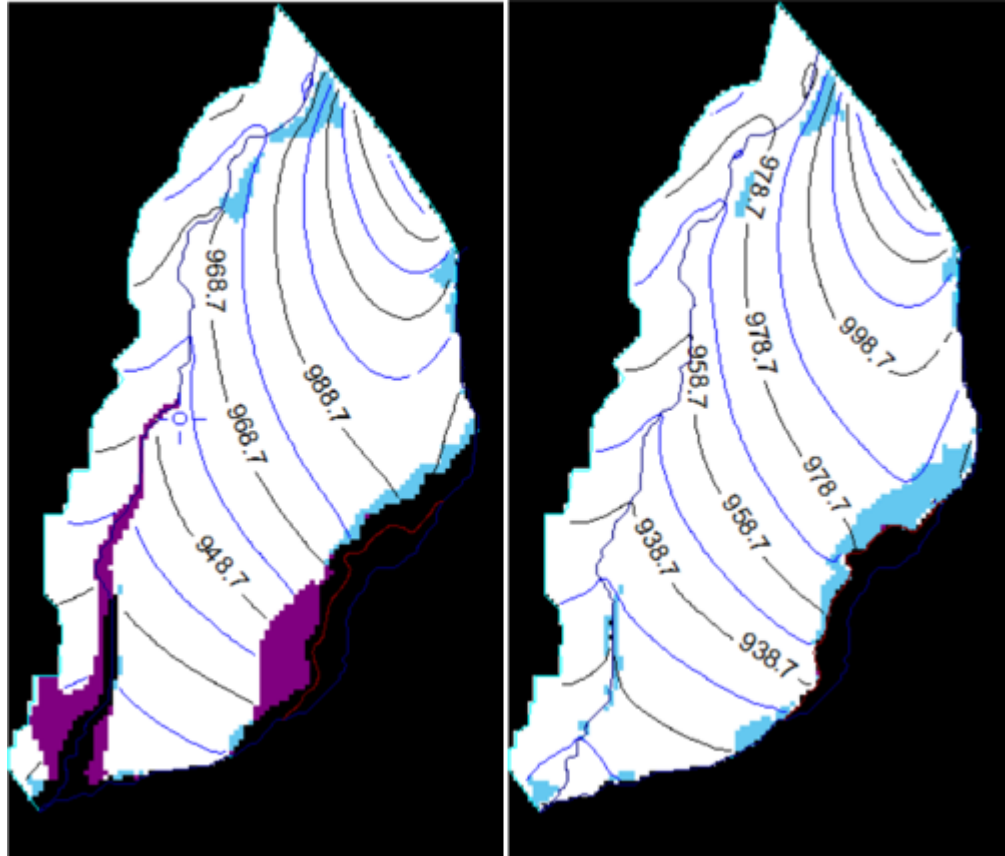
- Isopiezas en el acuífero superficial, nivel de agua de 0.7 m de profundidad de medio homogéneo y permeabilidad anisotrópica.



Capa 2

Capa 3

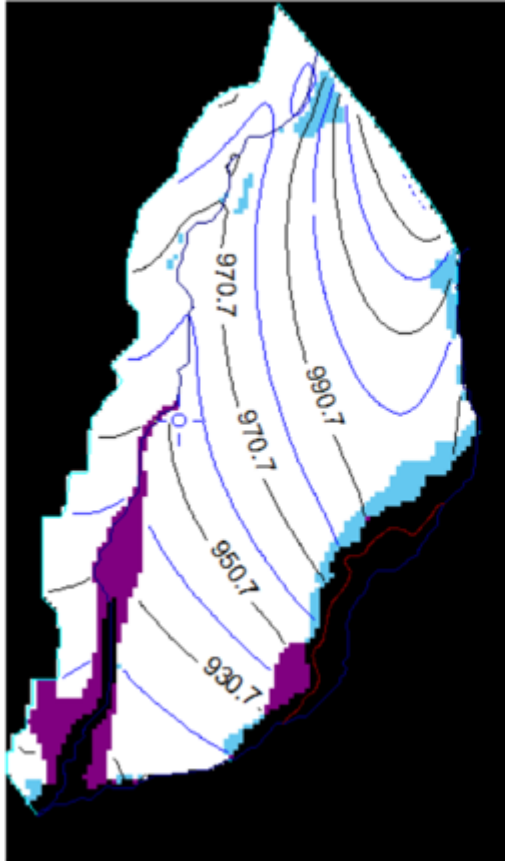
- Isopiezas en el acuífero superficial, nivel de agua de 1 m de profundidad de medio homogéneo y permeabilidad anisotrópica.



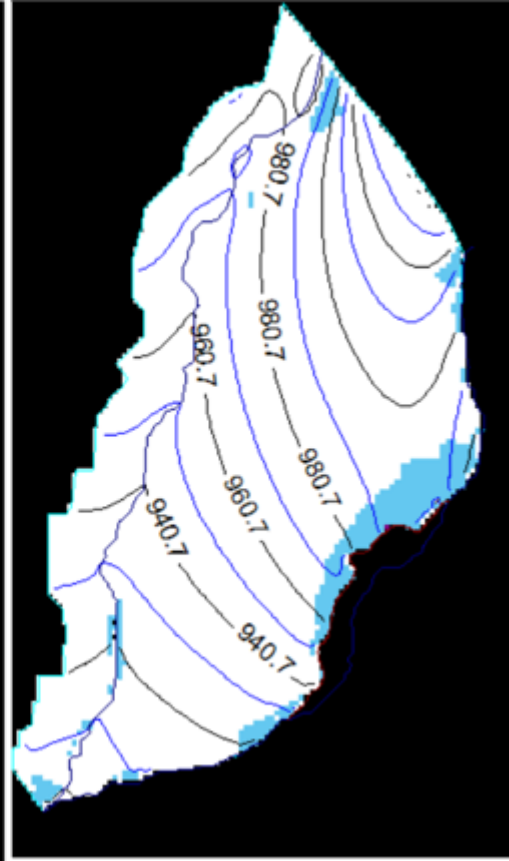
Capa 2

Capa 3

- Isopiezas en el acuífero superficial, nivel de agua de 2.3 m de profundidad de medio homogéneo y permeabilidad anisotrópica

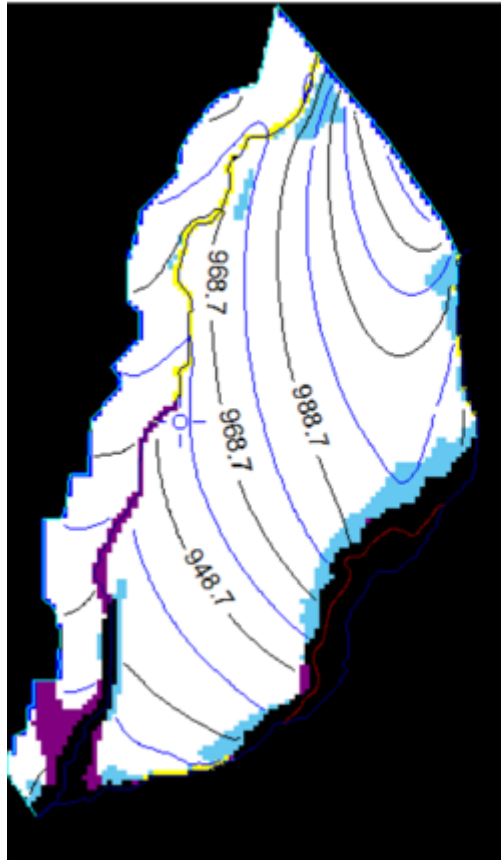


Capa 2

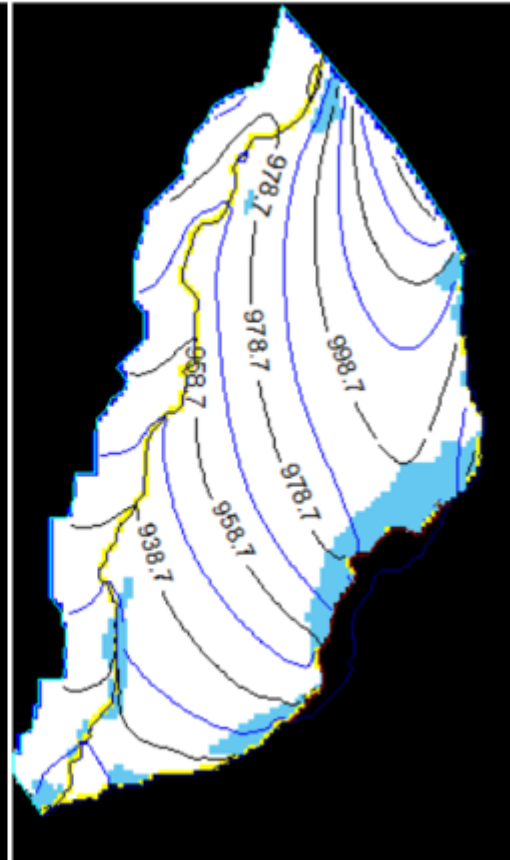


Capa 3

- Isopiezas en el acuífero superficial, nivel de agua de 0.7 m de profundidad de medio heterogéneo y permeabilidad anisotrópica.

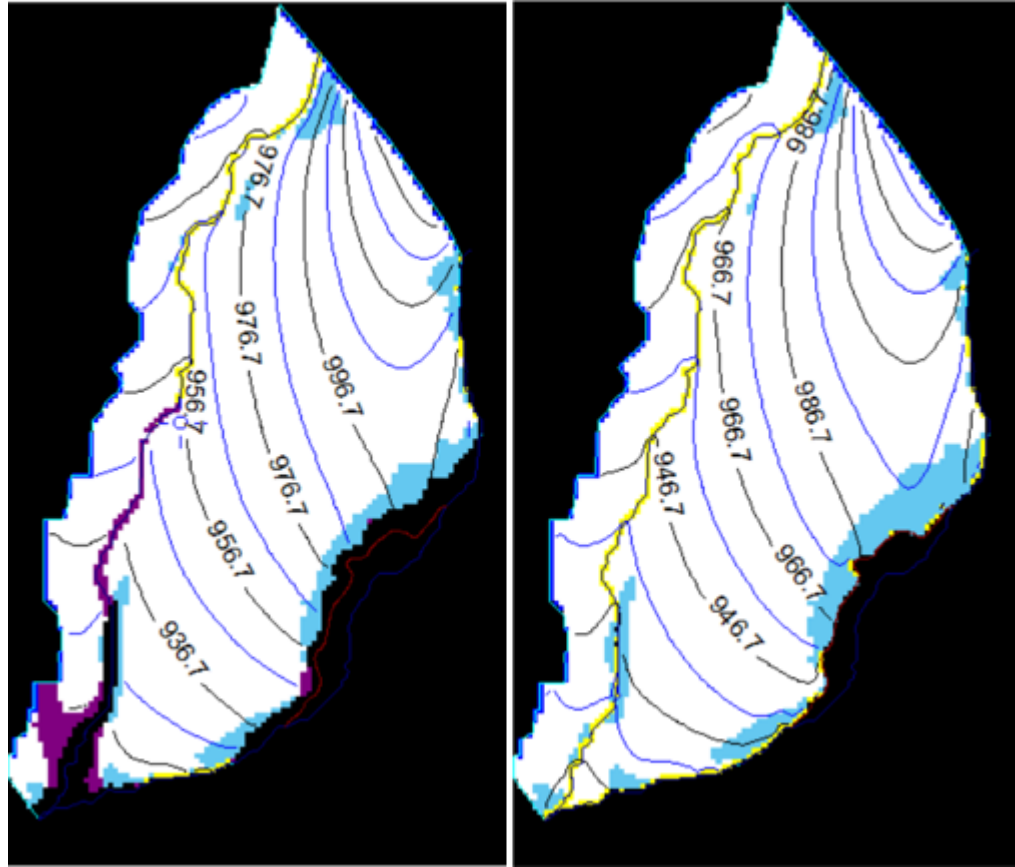


Capa 2



Capa 3

- Isopiezas en el acuífero superficial, nivel de agua de 1 m de profundidad de medio heterogéneo y permeabilidad anisotrópica.



Capa 2

Capa 3

Anexo C. Caudales extraídos en los modelos calibrados.

- Caudales extraídos en modelo de medio homogéneo y permeabilidades isotrópicas.

Niveles	Caudal Piezómetro Existente [m ³ /d]	Caudal Pozo Supuesto [m ³ /d]
0,7	4,2	47,2
1	10,3	129
1	187	2247

- Caudales extraídos en modelo de medio homogéneo y permeabilidades anisotrópicas.

Niveles	Caudal Piezómetro Existente [m ³ /d]	Caudal Pozo Supuesto [m ³ /d]
0,7	11,4	147
1	7,5	95
2,3	0,56	9,7

- Caudales extraídos en modelo de medio heterogéneo y permeabilidades anisotrópicas.

Niveles	Zona	Caudal Piezómetro Existente [m ³ /d]	Caudal Pozo Supuesto [m ³ /d]
0,7	3		10,2
	4	0,74	
1	3		10,1
	4	0,79	
2,3	3		10,8
	4	0,47	

Anexo D. Balance de masas en los modelos calibrados.

	Cabezas Constantes		Drenes	
	Entra [m ³ /d]	Salen [m ³ /d]	Entra [m ³ /d]	Salen [m ³ /d]
Medio homogéneo y permeabilidad isotrópica				
0,7	672,35	54,211	-	618,137
1	1680,602235	132,13		1548,472042
1	28906,63907	2567,8	-	26338,81547
Medio homogéneo y permeabilidad anisotrópica				
0,7	1847,020638	216,57	-	1630,455284
1	1156,033	133,83	-	1022,2
2,3	110,6919278	13,685	-	97,09229428
Medio heterogéneo y permeabilidad anisotrópica				
0,7	112,64	15,034	-	109,6059468
1	113,41	15,14	-	98,28
2,3	146,085899	27,49	-	118,5918674