

**MODELO NUMÉRICO DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LAS
FORMACIONES ACUÍFERAS DE BUCARAMANGA**

WALTER LEONARD ANTOLÍNEZ QUIJANO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

**MODELO NUMÉRICO DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LAS
FORMACIONES ACUÍFERAS DE BUCARAMANGA**

WALTER LEONARD ANTOLÍNEZ QUIJANO

**Trabajo de investigación para optar al título de
Magister en Ingeniería Civil**

Directora

SULLY GÓMEZ ISIDRO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

Agradecimientos

Este trabajo es dedicado a mi Señor, quien me ha dado esta y muchas otras más bendiciones. Él es quien me ha dado las capacidades de lograr objetivos académicos y espirituales, a Él sea la gloria y la honra.

Agradezco también a mi familia, el motor que me impulsa a hacer las más y mejores las cosas. A mi esposa por su paciencia y comprensión en el tiempo que dejé de dedicarle, a mi “corazón de melón” por sus destellos continuos de alegría y ternura, a mis padres por su apoyo desde el inicio de mis estudios, a mi abuelita que estuvo siempre pendiente en el cuidado de mi ser, a la profesora Sully por sus acertados comentarios en el desarrollo del trabajo, y en general, a los que de una u otra forma aportaron a la realización del proyecto de investigación.

Que el Señor Jesús les bendiga en abundancia!

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. GENERALIDADES	18
1.1 Zona de estudio	18
1.2 Problema y justificación	21
1.2.1 Problema.	21
1.2.2 Justificación.	24
1.2.3 Antecedentes	25
1.3 Objetivos de la investigación	28
1.4 Marco metodológico	30
1.5. Recopilación de información existente	30
1.5.1 Elaboración del modelo conceptual.	32
1.5.2 Desarrollo del modelo numérico	33
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE DE MODELOS CONCEPTUALES Y NUMÉRICOS	35
2.1 Modelo Hidrológico Conceptual (MHC)	35
2.2 Modelos numéricos de sistemas hidrológicos	38
2.2.1 Procesos de flujo y transporte	38
2.2.3 Ecuaciones de flujo en acuíferos.	38
2.2.4 Métodos numéricos para resolver las ecuaciones.	40
2.5 El MODFLOW y la interface Groundwater Vistas	41
2.5.1 Descripción conceptual de paquetes.	43
3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	44
3.1. Litología	45
3.1.1. Rocas Ígneas y Metamórficas	45
3.1.2. Rocas Sedimentarias	46
3.2. Hidrogeomorfología	49
3.2.1. Drenaje Superficial.	50
3.3. Marco Tectónico	52
3.4. Modelo Geométrico de los acuíferos	53
3.4.1. Mapas de plantas y espesores geológicos	54

3.4.2. Cortes Geológicos	59
4. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	61
4.1 Medio Físico Natural	61
4.1.1 Fisiografía	61
4.1.2 Inventario de aguas subterráneas	63
4.1.3 Niveles piezométricos	64
4.1.4 Clima.	66
4.1.5 Unidades hidrogeológicas.	67
4.1.5.1 Características hidráulicas de los acuíferos	71
4.1.6 Hidrodinámica	72
4.1.6.1 Modelos esquemáticos	72
4.1.7 Bloque-diagramas.	73
4.1.7.1 Sección transversal	75
5. MODELO NUMÉRICO	76
5.1 Diseño del Modelo	76
5.1.1 Grilla.	76
5.1.2 Condiciones iniciales y de frontera.	77
5.1.3 Parámetros semilla del modelo	78
5.2 Ejecución del modelo numérico	79
5.2.1 Resultados preliminares.	79
5.2.2 Análisis de sensibilidad	80
5.2.3 Ajuste del modelo	81
5.2.4 Calibración en estado permanente	84
5.2.4 Análisis de resultados en estado permanente	90
5.2.5 Isopiezas.	90
5.2.6 Líneas de flujo	92
5.2.7 Calibración en estado transitorio	94
5.2.8 Resultados en estado transitorio.	95
6. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
6.1 Discusión y conclusiones	107
6.2 Recomendaciones	109
BIBLIOGRAFIA	112
ANEXOS	121

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Zona de estudio	20
Figura .1.2 Unidades hidrogeológicas propuestas por Ingeniería de Suelos, 2002	26
Figura .1.3 Toma de niveles freáticos	32
Figura .1.4 Esquema metodológico para la construcción del modelo numérico. (Tomado de Montoya, 2010)	34
Figura 2.1 Balance global de los recursos hídricos en el mundo. (Oki, 2006)	36
Figura 2.2 Sistema acuífero y sus interrelaciones con el entorno (SIA España, 2008).	37
Figura 2.3 Sistema acuífero hipotético discretizado (Tomado de Harbaugh, 2005).	42
Figura 2.4 Ambiente grafico del GV (Rumbaugh y Rumbaugh, 2007).	43
Figura 3.1 Ubicación del marco fisiográfico de la zona de estudio. (Tomado y adaptado de INGEOMÍNAS, 2001)	44
Figura 3.2 Panorámica de los Miembros que conforman la Formación Bucaramanga	48
Figura 3.3 Geoformas dominantes en el área de estudio. (Tomado de Zambrano y Rey, 2003)	50
Figura 3.4 Drenaje superficial	51
Figura 3.5 Modelo Hipotético del área estudiada durante el Pleistoceno. (Tomado de INGEOMÍNAS, 2001)	52
Figura 3.6 Mapa de Isobasamentos de la Formación Girón	55
Figura 3.7 Mapa de espesores del Miembro Órganos y Gravoso, respectivamente	58
Figura 3.8 Sección transversal Este-Oeste por la coordenada 1'279.000 Norte (corte A-A)	59
Figura 3.9 Modelo geológico completo de la zona de estudio	60

Figura 4.1 Modelo Digital de Elevaciones (MDE). (Modificado de Joya y Deantonio, 2012.)	62
Figura 4.2 Isopiezas Julio de 1986 para el acuífero superficial	65
Figura 4.3 Variación del nivel freático para el piezómetro SRO-9 entre 1984 y 1987	66
Figura 4.4 Corte geológico del Área Metropolitana de Bucaramanga SW-NE (Tomado de INGEOMINAS, 2004).	68
Figura 4.5 Isopiezas Julio de 2011 para el Acuífero Superficial. (Modificado de Rodríguez y Torres, 2011).	69
Figura 4.6 Isopiezas Julio de 2011 para el Acuífero Profundo. (Modificado de Rodríguez y Torres, 2011).	70
Figura 4.7 Bloque-diagrama del área de estudio	73
Figura 4.8 Bloque-diagrama de las zonas de acuíferos	74
Figura 4.9 Sección transversal Este-Oeste	75
Figura 5.1 Condiciones de frontera Rio (líneas azules), NO Flujo (celdas en negro) y Cabeza Constante (celdas azules) para las capas 2 y 4 respectivamente	78
Figura 5.2 Resultados de la modelación exploratoria. Layer 2 y Layer 4	80
Figura 5.3 Resultados del análisis de sensibilidad preliminar para conductividades hidráulicas	81
Figura 5.4 Zonas de conductividad hidráulica horizontal para el acuífero superficial (layer 2).	82
Figura 5.5 Zonas de conductividad hidráulica horizontal para el Miembro Finos (layer 3).	83
Figura 5.6 Ubicación de targets para el acuífero superior	85
Figura 5.7 Valores de conductividades hidráulicas horizontales y verticales, respectivamente	86
Figura 5.8 Estadísticas de calibración	87
Figura 5.9 Grafica de valores observados vs valores del modelo.	88

Figura 5.10 Isopiezas del acuífero superficial – Jul/86.	90
Figura 5.11 Isopiezas del acuífero profundo – Jul/86	91
Figura 5.12 Líneas de flujo para el Acuífero Superficial	92
Figura 5.13 Líneas de flujo para el Acuífero Profundo	93
Figura 5.14 Isopiezas para Junio y Diciembre de 1987, respectivamente.	94
Figura 5.15 Líneas de flujo para los tres periodos de estrés	99
Figura 5.16 Valores de cabeza constante para simular recarga en los periodos de estrés.	100
Figura 5.17 Ubicación de los puntos de corte para comparar niveles piezométricos.	101
Figura 5.18 Diferencias piezométricas entre los periodos de estrés.	102
Figura 5.19 Precipitación estación UIS entre 1984 y 2011.	103
Figura 5.20 Variación de la cabeza piezométrica en el tiempo. Acuífero Superficial – escenario 1	103
Figura 5.21 Variación de la cabeza piezométrica en el tiempo. Acuífero Profundo – escenario 1	104
Figura 5.22 Variación de la cabeza piezométrica en el tiempo. Acuífero Superficial y Profundo – escenario 2	106

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Uso de pozos en el Área Metropolitana de Bucaramanga. (Rodríguez y Torres, 2011	23
Tabla 1.2 Datos requeridos para un modelo de flujo de agua subterránea. (Modificado de Anderson and Woessner, 1992)	30
Tabla 3.1 Unidades Litológicas del Área Metropolitana de Bucaramanga.	45
Tabla 3.2 Resumen de puntos con información geológica.	53
Tabla 4.1 Listado total de captaciones inventariadas. (Rodríguez y Torres, 2011)	63
Tabla 4.2 Resultados de pruebas de bombeo en el Área Metropolitana de Bucaramanga	71
Tabla 5.1 Resumen de las condiciones de frontera	77
Tabla 5.2 Resumen de parámetros iniciales	79
Tabla 5.3 Resumen de targets y valores residuales para el estado permanente	88
Tabla 5.4 Resumen de los periodos de estrés.	95
Tabla 5.5 Resumen de targets y valores residuales para estado transitorio de Jun y Dic 87.	96
Tabla 5.6 Resumen de targets y valores residuales para Jul-2011.	98
Tabla 5.7 Concesiones de pozos para el Acuífero Superficial y Profundo	104

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Puntos con información de Espesores Geológicos	122
ANEXO B. Mapa Geológico elaborado por INGEOMINAS, 2001	129
ANEXO C. Planta geológica del Miembro Órganos	130
ANEXO D. Planta geológica del Miembro Finos	131
ANEXO E. Planta geológica del Miembro Gravoso	132
ANEXO F. Planta geológica del Miembro Limos Rojos	133
ANEXO G. Mapa de espesores del Miembro Finos	134
ANEXO H. Mapa de espesores del Miembro Limos Rojos	135
ANEXO I. Niveles Piezométricos 1984-1987	136

RESUMEN

TÍTULO

Modelo numérico del flujo de agua subterránea en las formaciones acuíferas de Bucaramanga*

AUTOR

Walter Leonard Antolínez Quijano**

PALABRAS CLAVES

Modelo numérico, flujo de agua subterránea, acuíferos de Bucaramanga, modelo hidrogeológico conceptual.

CONTENIDO

El objetivo de esta investigación es implementar un modelo numérico del flujo de agua subterránea en las formaciones acuíferas de Bucaramanga a partir de información disponible y de la recolectada en campo. La importancia del estudio radica en el papel fundamental que juegan los recursos hídricos en el desarrollo de las actividades diarias que realiza el ser humano, y particularmente, la población del Área Metropolitana de Bucaramanga y sus alrededores. Para llevar a cabo los objetivos propuestos de la investigación, se realiza en primera instancia un recopilación de información pertinente y disponible en las diferentes entidades ambientales y privadas, luego se procede a hacer una interpretación de la información para proponer un modelo hidrogeológico conceptual y finalmente se realiza la implementación del modelo numérico basándose en el modelo conceptual propuesto y el modelo geológico tridimensional desarrollado para la zona de estudio. A partir de los resultados obtenidos del modelo se llegaron a varias conclusiones entre las cuales se destacan: las direcciones preferenciales de flujo para el acuífero superficial y el profundo, la interrelación que existe entre dichos acuíferos, la variación gradual de los valores de conductividad para el acuífero superior, la influencia del sistema de drenaje superficial, la variación de las cabezas piezométricas relacionadas con la precipitación y los valores de caudal de extracción para obtener isopiezas del año 2011.

* Trabajo de investigación para optar al título de Magister en Ingeniería Civil

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Sully Gómez Isidro

ABSTRACT

TITTLE

Numerical model of groundwater flow in the aquifer formations of Bucaramanga*

AUTHOR

Walter Leonard Antolínez Quijano**

KEYWORDS

Numerical model, groundwater flow, aquifers in Bucaramanga, conceptual hydrogeological model.

DESCRIPTION

The objective of this research is to implement a numerical model of groundwater flow in the aquifer formations of Bucaramanga from information available and collected in the field. The importance of the study lies in the critical role of water resources in the development of the daily activities of the human being, and particularly, the population of the Metropolitan Area of Bucaramanga and around. To carry out the objectives of the research is carried out primarily a collection of relevant and available in different environmental entities and private information, then proceed to make an interpretation of the information to propose a conceptual hydrogeological model and finally makes the implementation of the numerical model based on the proposed conceptual model and the three-dimensional geological model developed for the study area. From the results of the model have reached several conclusions among which are: preferential flow directions for the shallow aquifer and the deep, the interrelationship between these aquifers, the gradual variation of the conductivity values for upper aquifer, the influence of the surface drainage system, the variation of the piezometric heads related to precipitation and flow values for groundwater contours extraction 2011.

* Research work for the degree of Master in Civil Engineering

** Department of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Thesis advisor: Sully Gomez Isidro

INTRODUCCIÓN

La gestión del recurso hídrico subterráneo ha venido tomando una gran importancia en el ámbito local, nacional e internacional. El desarrollo de esta tesis de maestría denominada “Modelo numérico del Flujo de agua subterránea en la formaciones acuíferas de Bucaramanga” busca dar un aporte al conocimiento del agua subterránea en el Área Metropolitana de Bucaramanga y sus alrededores, ya que ha venido siendo usada principalmente por los lavaderos, el sector industrial y en menor proporción, por la comunidad.

Los modelos numéricos han tenido un gran avance en el desarrollo y uso de los mismos, debido al avance computacional que se ha tenido en las últimas décadas y, a la facilidad de uso y economía que representa tener una herramienta virtual que represente el mundo físico de una manera aceptable.

El área de estudio de este proyecto está enmarcada por el Rio Suratá al norte, el Rio Frio al sur, el sistema de Fallas Bucaramanga Santa-Marta al oriente y el Rio de Oro al occidente. Dentro de esta área se pueden distinguir dos acuíferos: el primero corresponde al Miembro Gravoso de la Formación Bucaramanga que se denomina Acuífero Superficial y suprayace al Miembro Finos que a su vez sirve como basamento para dicho acuífero. El segundo corresponde al Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga y se denomina Acuífero Profundo, éste se encuentra ubicado sobre la formación Girón, la cual actúa como basamento para dicho acuífero debido a sus características de baja permeabilidad.

La metodología para el desarrollo de este proyecto consistió primero en la recopilación de información existente que fuera pertinente para los objetivos trazados. En este sentido se necesitó informe geológicos, registros de perforaciones, bases de datos topográficos, informes técnicos y de investigación. En segunda instancia se planteó un modelo conceptual que permitiera la integración de la información disponible, así como el planteamiento de las características de la unidades hidrogeológicas: geometría, propiedades

hidráulicas, superficies piezométricas, identificación de las zonas de recarga y descarga, etc. Por último, se procedió a la implementación del modelo numérico a partir del modelo conceptual planteado, donde se definió el tamaño de la malla, las condiciones iniciales y de frontera, los parámetros semilla del modelo y posteriormente se inició el proceso de calibración del modelo.

El software que se usó para el desarrollo de este proyecto fue la plataforma Groundwater Vistas comercializada por Environmental Simulation Inc. Esta plataforma es un sistema de pre-procesamiento y pos-procesamiento de información para el código MODFLOW desarrollado por la U.S. Geological Survey, el cual resuelve la ecuación general de flujo subterráneo mediante el método de diferencias finitas.

En el capítulo uno del documento se describe la zona de estudio, se plantea el problema de investigación y se justifica su desarrollo. También se da una reseña de los antecedentes del tema en estudio, se listan los objetivos del proyecto y se describe la metodología usada durante la realización del proyecto.

En el capítulo dos se desarrolla un marco teórico tocante al tema de los modelos hidrogeológicos conceptuales, el desarrollo de los modelos numéricos de flujo y transporte de agua subterránea, y por último, se hace una descripción del código MODFLOW y la plataforma Groundwater Vistas usada en el desarrollo del proyecto.

En el capítulo tres se hace una descripción del marco geológico correspondiente a la zona de estudio teniendo en cuenta su litología, hidrogeomorfología y marco tectónico. A manera de conclusión se termina el capítulo con un modelo geométrico tridimensional de las capas geológicas usadas para el modelo numérico.

El capítulo cuatro es el planteamiento del modelo hidrogeológico conceptual, allí se hace una descripción del medio físico natural y de los principales procesos

hidrológicos, todo enfocado hacia la concepción de los sistemas acuíferos. El capítulo termina con modelos esquemáticos que a manera de resumen, explican el funcionamiento del sistema físico.

La implementación del modelo numérico se consigna en el capítulo cinco, allí se muestra el diseño del modelo, el proceso de ejecución, los primeros resultados obtenidos, el ajuste y la calibración en estado permanente y transitorio.

Por último, en el capítulo seis, se hace una discusión de los resultados obtenidos, las conclusiones a las cuales se llegaron y las recomendaciones que se hacen para futuros estudios.

1. GENERALIDADES

Introducción

En este capítulo se consigna, a manera de contexto general, los elementos planteados en la propuesta de investigación para la tesis de maestría denominada “Modelo numérico del flujo de agua subterránea en las formaciones acuíferas de Bucaramanga”.

En el numeral 1.1 se hace una descripción general de la zona de estudio, su ubicación geográfica, sus características geológicas, fisiográficas y climáticas. En el numeral 1.2 se hace referencia al problema y justificación del proyecto de investigación, basándose en las razones que impulsaron el desarrollo de la investigación. En el numeral 1.3 se hace una reseña a manera de antecedentes del estudio de las aguas subterráneas en la Meseta de Bucaramanga y se dan algunos datos generales de los logros alcanzados en el tiempo. En el numeral 1.4 se exponen los objetivos propuestos para desarrollar el proyecto y en el numeral 1.5 se hace una descripción general de la metodología usada para la realización de la investigación.

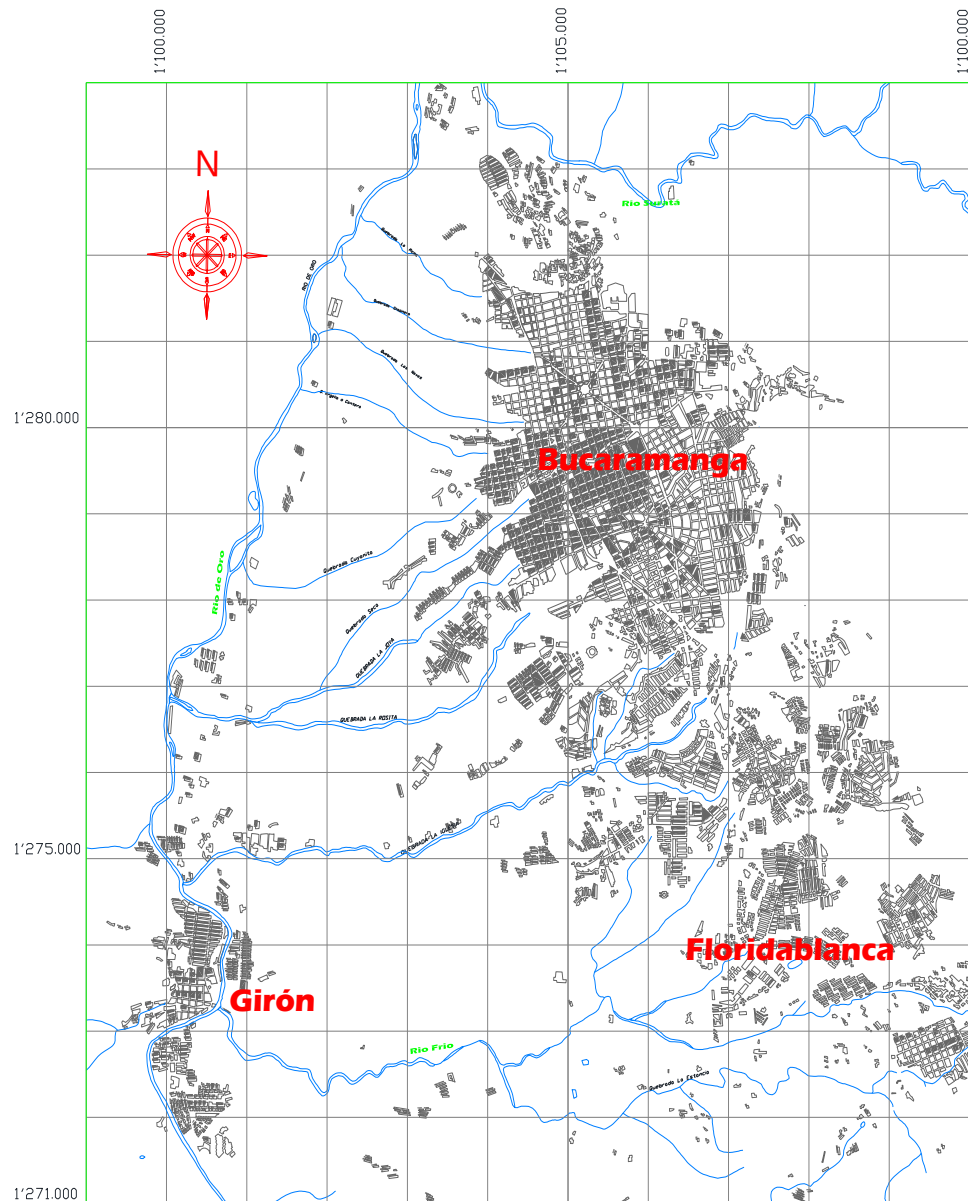
1.1 Zona de estudio

El área de estudio de este proyecto circunscribe parcialmente a los municipios de Girón, Bucaramanga y Floridablanca, contiene un área aproximada de 150 Km² y posee elevaciones desde los 600 msnm en el sector Café Madrid hasta los 1200 msnm en el Macizo de Santander. Se encuentra delimitada al Norte por el Río Suratá, al Oriente por la Falla Bucaramanga-Santa Marta, al Occidente y Sur por la línea del parte aguas de la Cuenca Superior del Río Lebrija (Figura 1.1). La zona se encuentra enmarcada entre las coordenadas 1.098.000 y 1.110.000 W y

1.271.000 y 1.285.000 N, según la cartografía básica a escala 1:25.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia – IGAC.

Las características geológicas de la zona son las siguientes: en el bloque montañoso ubicado al oriente del sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta conformando un gran volumen rocoso conocido con el nombre de Macizo de Santander, se encuentra el Neis de Bucaramanga de origen metamórfico-ígneo; rodeando el área metropolitana de Bucaramanga al noroccidente de Bucaramanga, norte de Floridablanca y alrededores de Piedecuesta se presentan extensiones de rocas sedimentarias conformando la formación Jordán; la formación Girón al occidente del área metropolitana, noroccidente de Piedecuesta y norte de Floridablanca; y la formación Bucaramanga que corresponde a más del 60% del área y sobre la cual se encuentra construida gran parte de la ciudad de Bucaramanga y las poblaciones de Girón, Floridablanca y Piedecuesta, esta formación es aluvial conformada por bloques, cantos, gravas, arenas, limos y arcillas provenientes de la acción denudatoria sobre las rocas del Macizo de Santander (INGEOMINAS, 2001) .

Figura 1.1 Zona de estudio.



En el Área Metropolitana de Bucaramanga se presentan diversos climas debido a la caracterización de su relieve, pero hay dos zonas climáticas predominantes, que son de acuerdo con la clasificación de pisos térmicos de Holdridge, el premontano y el basal tropical. En cercanías a Girón la temperatura promedio es de 24°C y en Bucaramanga y Floridablanca hay zonas con temperaturas que varían entre 17 y

24°C, con alturas variables. La precipitación promedio en el área es de 1279 mm/año (IDEAM, 2010) con un régimen bimodal.

1.2 Problema y justificación

El agua, dispuesta en todos sus entornos (mares, ríos, lagos, embalses, acuíferos, etc.) constituye un factor crucial para cualquier tipo de vida. Esta hace parte de cualquier sistema hidrológico que se desee o necesite analizar. El análisis de los recursos hídricos a cualquier escala conlleva a la necesidad del uso de herramientas que permitan la adecuada gestión de los mismos, entre estas herramientas se encuentran los modelos conceptuales y numéricos, los cuales permiten simplificar el problema de campo de manera que se pueda considerar el medio como un sistema.

1.2.1 Problema. Las Naciones Unidas en su 3er Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo, afirman que es necesario gestionar adecuadamente los recursos hídricos para lograr un crecimiento, desarrollo social y económico, reducción de la pobreza y la sostenibilidad del medio ambiente (UNESCO, 2009). La Constitución Política Colombiana recita “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano y el Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución” (CPC, 1991). Estas reflexiones mundiales y nacionales invitan a pensar en la realidad local, en las condiciones del recurso hídrico y su sostenibilidad. Y es en este sentido que el Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático muestra su interés y aporta de forma positiva a la sociedad mediante investigación con resultados visibles. No se puede hablar de administración de recursos si no se tiene un adecuado conocimiento del mismo, lo que lleva a concluir que es necesario comprender la ocurrencia, la dinámica y la disponibilidad del preciado líquido en nuestra región, y en este proyecto el agua subterránea.

En el área de estudio de este proyecto se pueden diferenciar principalmente dos importantes unidades hidrogeológicas -aunque lo más probable es que no sean las únicas- denominadas Acuífero Superior y Acuífero profundo. De ellas se obtiene el suministro de agua para algunos lavaderos de carros y algunas industrias ubicadas en la Meseta de Bucaramanga y en la margen derecha del Río de Oro, respectivamente.

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) provee agua para más de 1.000.000 de personas, toma las aguas de bocatomas localizadas en los ríos Suratá (abastece la planta de Bosconia), Tona (abastece las plantas de La Flora y Morrónico), y Frío (abastece la planta de Floridablanca), con una capacidad de tratamiento de 2000, 1400 y 600 litros por segundo respectivamente (AMB, 2010). Pero cuando en época de verano (por ejemplo los meses de diciembre de 2009, enero y febrero de 2010, épocas de fuertes sequías, los niveles de agua disminuyeron considerablemente) el acueducto siguió suministrando su servicio con la misma regularidad, lo que indica aportes del agua subterránea al flujo base. Además de esto, se debe pensar en el agua subterránea que no es detectada por el río y que hace parte de las formaciones acuíferas más profundas. Aunque actualmente Bucaramanga y su área metropolitana depende de los recursos hídricos superficiales, se está empezando a pensar en la explotación del recurso subterráneo a futuro por la escasez que se vislumbra (Colciencias-UIS, 2003). Esto conlleva a pensar en la importancia de tener un conocimiento de los sistemas acuíferos de la región. En la tabla 1.1 se resumen el número de pozos y el uso que se les da a estos en el Área Metropolitana de Bucaramanga según el inventario de aguas subterráneas realizado en el 2011 por Rodríguez y Torres.

Tabla 1.1 Uso de pozos en el Área Metropolitana de Bucaramanga. (Rodríguez y Torres, 2011)

Propósito o Uso	Número
Lavado de Autos	63
Doméstico y Riego	27
Industria	9

Se han realizado diferentes estudios en la zona metropolitana de Bucaramanga y sus alrededores, en temas como: niveles freáticos, geología, precipitación, prospección geoeléctrica, modelos digitales de elevación, isotopía, estabilidad de taludes, evapotranspiración y otros, los cuales se detallan mejor en los antecedentes. En el tema particular de los sistemas acuíferos, hay un buen acercamiento en cuanto a mediciones de niveles freáticos y su influencia (Gómez, 1990), estratigrafía (INGEOMINAS, 2001), recarga e identificación (Colciencias-UIS, 2003), Modelo Geológico-Geofísico (Vásquez y Bermúdez, 2004). Sin embargo falta un estudio que arroje como resultado una aproximación al conocimiento de la dinámica del flujo de agua subterránea, su estado, distribución y una mejor caracterización de los sistemas acuíferos.

Basados en la necesidad de conocer los sistemas acuíferos de la zona de estudio, se pretende dar respuesta a las siguientes preguntas: ¿Cuáles son y dónde se encuentran las principales formaciones acuíferas en la región de estudio? ¿Cuál es la dinámica de su flujo? ¿Cómo se ven afectados los acuíferos de la región por la intervención antrópica?

1.2.2 Justificación. Como es bien sabido, el agua es un recurso vital para toda la humanidad, en cualquier lugar del planeta donde haya escasez de recursos hídricos, hay problemas de tipo social, económico y ambiental (UNESCO, 2009). Colombia goza de una ubicación geográfica privilegiada que le permite ser el país con la mayor extensión de paramos y poseer el páramo más grande del mundo, el de Sumapaz (Santander, 2003).

El agua subterránea en el área metropolitana de Bucaramanga se constituye en un recurso muy importante para la región, porque entre otras razones, en estudios de separación de flujo base se ha encontrado que este es cerca del 70% del flujo total en el cierre de la Cuenca Superior del Rio Lebrija (Guzmán et. al, 2006) de la cual hace parte la zona de estudio, y aunque el abastecimiento de la población correspondiente al área de estudio proviene de fuentes superficiales, hay numerosas industrias y lavaderos de carros que se proveen de cisternas y pozos poco profundos (Gómez et. al, 2011) y algunos pocos con pozos profundos (más de 50m).

La identificación de formaciones acuíferas en Bucaramanga, principalmente en tres zonas: al oriente de la ciudad en el Neis por permeabilidad secundaria, cerca de la zona del sistema de Falla de Bucaramanga y en las formaciones aluviales donde el nivel de agua subterránea puede extenderse a lo largo de toda la meseta (Colciencias-UIS, 2003), abre una puerta para la explotación de un recurso de mejor calidad. El recurso subterráneo debe ser bien estudiado y entendido con el propósito de aportarle a la sociedad y las entidades encargadas del manejo y la preservación de los recursos naturales, una herramienta que permita la adecuada administración del recurso y la predicción de posibles escenarios de impacto negativo. En la actualidad no se cuenta con un mecanismo técnico y adecuado que apoye acertadas decisiones en lo referente a la preservación del preciado recurso y que aporte un conocimiento sólido al sistema acuífero.

En este orden de ideas, se hace indispensable la implementación de un modelo numérico, el cual requiere un arduo trabajo de campo (pruebas de bombeo y medición de niveles) y de oficina (recopilación de información existente, tratamiento de datos hidrogeológicos, integración de toda la información, generación del modelo, asignación de condiciones iniciales y de frontera, calibración del modelo y validación de resultados).

En la actualidad, el Área Metropolitana de Bucaramanga no cuenta con un modelo de simulación del flujo de agua subterránea, el cual permitiría recrear diferentes escenarios en donde se podría analizar la dinámica del flujo y el resultado de la intervención antrópica, así como respuesta de los acuíferos a diferentes agentes contaminantes.

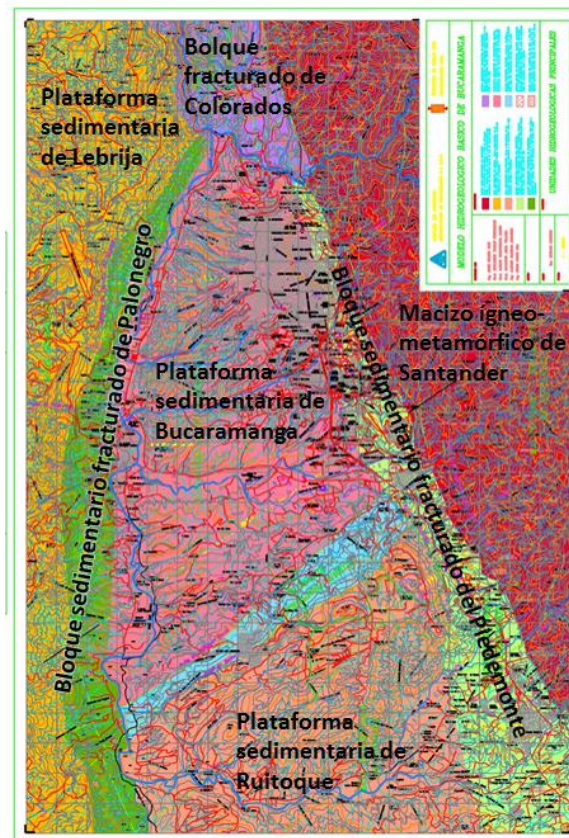
1.2.3 Antecedentes

El estudio de las aguas subterráneas en Bucaramanga y su área metropolitana se remonta hacia los años 70`s, cuando se empezaron a tomar medidas de niveles freáticos en la meseta de Bucaramanga y sus escarpas. Luego hacia 1984 la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB instaló una red de piezómetros neumáticos sobre la meseta de Bucaramanga y en forma densa sobre la escarpa occidental, con lecturas hechas cuasi-mensualmente durante los siguientes años. En 1990 se hizo una predicción de niveles freáticos a partir de la precipitación y su influencia en la estabilidad de taludes, el cual concluyó entre otras cosas, que los deslizamientos ocurren cerca de dos meses después de los fuertes inviernos producto del ascenso de los niveles freáticos (Gómez, 1990).

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga AMB desarrolló un proyecto hacia el año 2002 titulado “Modelo Hidrogeológico Básico de Bucaramanga” considerando

la alternativa del agua subterránea como fuente de abastecimiento para la zona metropolitana de Bucaramanga. Hidrogeocol Ltda. y el Geólogo Carlos Wandurraga ejecutaron la geoelectrica de dicho proyecto, cada uno de ellos realizó sondeos geoelectricos convencionales, líneas de prospección geoelectrica continua (tomografías) y calicatas, lo cual da una idea de la geometría de la geología y la zonas de mejor condiciones para la formación de acuíferos. Ingeniería de Suelos Ltda. realizó la asesoría geotécnica y planteó la existencia de varias unidades hidrogeológicas (Ingeniería de Suelos, 2002), las cuales se muestran en la figura 1.2.

Figura .1.2 Unidades hidrogeológicas propuestas por Ingeniería de Suelos, 2002



En el 2003 el GPH en un convenio con COLCIENCIAS (Colciencias-UIS, 2003), realizó un estudio del fenómeno de la recarga a los acuíferos de Bucaramanga mediante un muestreo isotópico en la Meseta de Bucaramanga y sus zonas aledañas, así como de identificación de presencia de aguas subterráneas en las rocas ígneas y metamórficas que componen gran parte del Macizo de Santander, debido a la permeabilidad secundaria causada por el sistema de fallas presente, hace que se convierta en un potencial acuífero (Gómez y Anaya, 2004). Otra contribución es que, la región de recarga ocurre principalmente en la parte alta del Macizo de Santander, donde se identificaron tres zonas a partir de muestreo isotópico entre cotas de 1400, 2000 y 2500 msnm, y ésta recarga atraviesa las zonas aluviales y puede ser detectada en niveles y/o corrientes superficiales, el resto puede estar alimentando las formaciones sedimentarias y/o constituir flujos profundos. Respecto a la Meseta de Bucaramanga y a la zona de rocas sedimentarias que se encuentran alrededor de ella, se concluyó que existe un acuífero superior y uno profundo. El acuífero superior se halla sobre el nivel superior correspondiente al miembro Gravoso de la formación Bucaramanga y puede extenderse a lo largo de toda la Meseta. El acuífero profundo se encuentra en los niveles más profundos de la formación Bucaramanga que corresponde a la formación Órganos y reporta valores de permeabilidad media (Bermúdez y Vásquez, 2004).

El grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático GPH firmó un convenio con la CDMB para evaluar el riesgo a la contaminación del recurso hídrico, este convenio celebrado en el 2009 es importante en cuanto al conocimiento del estado actual de los sistemas acuíferos de la región. Una entrega parcial de este convenio se consigna en el artículo llamado Vulnerabilidad, Amenaza y Peligro a la Contaminación de las Aguas Subterráneas en la Región de Bucaramanga (Gómez y Gutiérrez, 2010), del que se pueden destacar los siguientes tópicos:

- Respecto a la información de piezómetros, pozos profundos, cisternas y concesiones de agua subterránea, se hace un resumen de los puntos de medición de aguas subterráneas.
- Las conductividades hidráulicas se tomaron de algunas perforaciones profundas, resaltándose la existencia de pocas pruebas de bombeo.
- La mayor amenaza que se genera, es la zona rural, debido a la práctica de cultivos agrícolas, ya que éstos requieren la utilización o uso de fertilizantes y plaguicidas, los cuales son un peligro potencial para la calidad del agua subterránea.
- La clasificación del tipo de acuífero (libre, confinado o semiconfinado) se dedujo de la interpretación geológica, de mantos permeables y capas confinantes presentes en las formaciones geológicas, debido a la inexistencia de pruebas de bombeo en varios lugares.
- En cuanto a unidades hidrogeológicas, se distinguen tres principales formaciones geológicas; el abanico aluvial de Bucaramanga, las rocas sedimentarias (Formación Girón, Jordán, Tambor y Diamante) y rocas ígneas metamórficas conformadas por el Neis de Bucaramanga.

1.3 Objetivos de la investigación

Objetivo General

Desarrollar 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 naturales.

Objetivos Específicos

- Conocer y ajustar el modelo conceptual hidrogeológico que represente los sistemas acuíferos correspondientes a la zona de estudio y que servirá como base para la construcción del modelo numérico, mediante la recopilación, el análisis y la interpretación de la información hidrogeológica existente y un SIG como herramienta de manejo de información.
- Validar el modelo conceptual a partir de los resultados arrojados por el modelo de simulación y las observaciones hechas en campo.
- Identificar periodos e intervalos de tiempo a partir del análisis de la información hidrogeológica existente, para desarrollar la calibración y validación del modelo numérico.
- Calibrar el modelo numérico para la zona metropolitana de Bucaramanga a partir de los datos característicos de acuíferos y niveles de agua existentes en cierto intervalo de tiempo.
- Validar el modelo numérico de la zona de estudio mediante los resultados de niveles piezométricos dados por el modelo de simulación y los observados en campo a lo largo del tiempo del que se dispone de información.
- Obtener una herramienta de predicción de niveles piezométricos y afectación de acuíferos frente al impacto de acciones antrópicas y fenómenos hidrogeológicos naturales; mediante diferentes escenarios de simulación y que

sirva como instrumento de gestión de recursos subterráneos en el área metropolitana de Bucaramanga.

1.4 Marco metodológico

La metodología general para el desarrollo de la investigación se puede generalizar en tres grandes etapas: recopilación de información existente, elaboración del modelo conceptual y desarrollo del modelo numérico. Éstas a su vez están subdivididas en diferentes actividades.

1.5. Recopilación de información existente. En primera instancia se realizó una búsqueda exhaustiva de información pertinente a la investigación y que permitiera la realización de un modelo de flujo de agua subterránea (Tabla 1.2), información de tipo geológica (mapas, litología, hidrogeomorfología, etc.), información hidrogeológica (pruebas de bombeo, parámetros hidráulicos de acuíferos, geometría de acuíferos, fuentes de recarga, niveles piezométricos, etc.), información climática (precipitación, evaporación y temperatura) e información fisiográfica (curvas de nivel y MDE).

Tabla 1.2 Datos requeridos para un modelo de flujo de agua subterránea. (Modificado de Anderson and Woessner, 1992)

Marco Físico	
1.	Mapa geológico y secciones transversales que muestren el área, la extensión vertical y contornos del sistema.
2.	Mapa de la superficie topográfica, de superficies de agua y sus divisorias.
3.	Mapas de contorno que muestren la elevación de la base de los acuíferos y las capas confinantes.
4.	Mapas que muestren el espesor de los acuíferos y las capas confinantes.
5.	Mapas que muestren la extensión y espesor de sedimentos fluviales y lacustres

Marco Hidrogeológico	
1.	Niveles freáticos y mapas de isopiezas para todos los acuíferos.
2.	Hidrógrafas de niveles freáticos y de niveles de agua superficial y tasas de descarga.
3.	Mapas y secciones transversales que muestren la distribución de la conductividad hidráulica y/o la transmisividad.
4.	Mapas y secciones transversales que muestren las propiedades de almacenamiento de los acuíferos y capas confinantes.
5.	Valores de la conductividad hidráulica y su distribución para sedimentos fluviales y lacustres.
6.	Distribución espacial y temporal de tasas de evapotranspiración, recarga, interacción agua superficial-subterránea, bombeos y descarga natural.

Para procesar y analizar la información geológica se recurrió a informes realizados por INGEOMINAS, particularmente el informe denominado Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga (2001). Para obtener la información hidrogeológica se consultó los estudios realizados en la UIS, ya que gran parte del conocimiento de los acuíferos en la zona de estudio se ha llevado a cabo a través de proyectos de investigación realizados por el Grupo de Investigación GPH adscrito a la universidad. Adicional a esta información, se consultó informes de empresas privadas como Ingeniería de Suelos Ltda., Hidrogeocol Ltda. y Carlos Wandurraga. Otras fuentes de información fueron la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga - CDMB- y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM-.

La última información disponible de niveles freáticos (Figura 1.3) se obtuvo mediante medidas de campo realizadas durante el año 2010 por Torres y Rodríguez; de parámetros hidráulicos Barrera y Ruiz 2011, así como Caballero y Gómez en el mismo año; información obtenida de piezómetros Pardo y Monsalve 2009, Correa y Montaña 2011; de parámetros físicos químicos Jiménez y Colmenares 2009, Pulido y Nieto 2010.

Figura .1.3 Toma de niveles freáticos.



1.5.1 Elaboración del modelo conceptual. En general, un modelo hidrogeológico conceptual integra información de los sistemas superficial, atmosférico y subterráneo: evalúa las condiciones de precipitación, evapotranspiración y caudal; describe la geometría de los acuíferos (espesores y extensión) y sus propiedades hidráulicas (porosidad, conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento); las posiciones de las superficies freáticas y direcciones de flujo preferencial para los sistemas acuíferos; además de relacionar información de tipo fisiográfico, geológico y climatológico.

Para la construcción de un modelo conceptual es indispensable partir de recopilación, revisión, y evaluación de información existente y disponible. Luego hacer un reconocimiento en campo y hacerse una idea global del sistema hidrogeológico que se desea y se puede representar.

A partir del procesamiento y análisis de esta información, se pueden definir una escala espacial (referida a la geometría de unidades geológicas y acuíferos que son posibles de representar) y temporal del modelo (la cual depende de las mediciones en el tiempo para la cuales se tiene información de niveles freáticos, precipitación, caudales, etc.), se puede definir inferencias físicas (tales como

sistemas de drenaje, fallas geológicas, interacciones entre acuíferos, etc.) e hidrológicas (distribución de la precipitación, evapotranspiración, flujos superficiales, etc.).

Como resultado del análisis y a modo de síntesis, los modelos hidrogeológicos suelen representarse a través de bloques-diagramas y secciones transversales. En estos esquemas se puede visualizar la interacción de los tres componentes hidrológicos (atmosférico, superficial y subterráneo) y las dimensiones de los acuíferos junto con sus principales características.

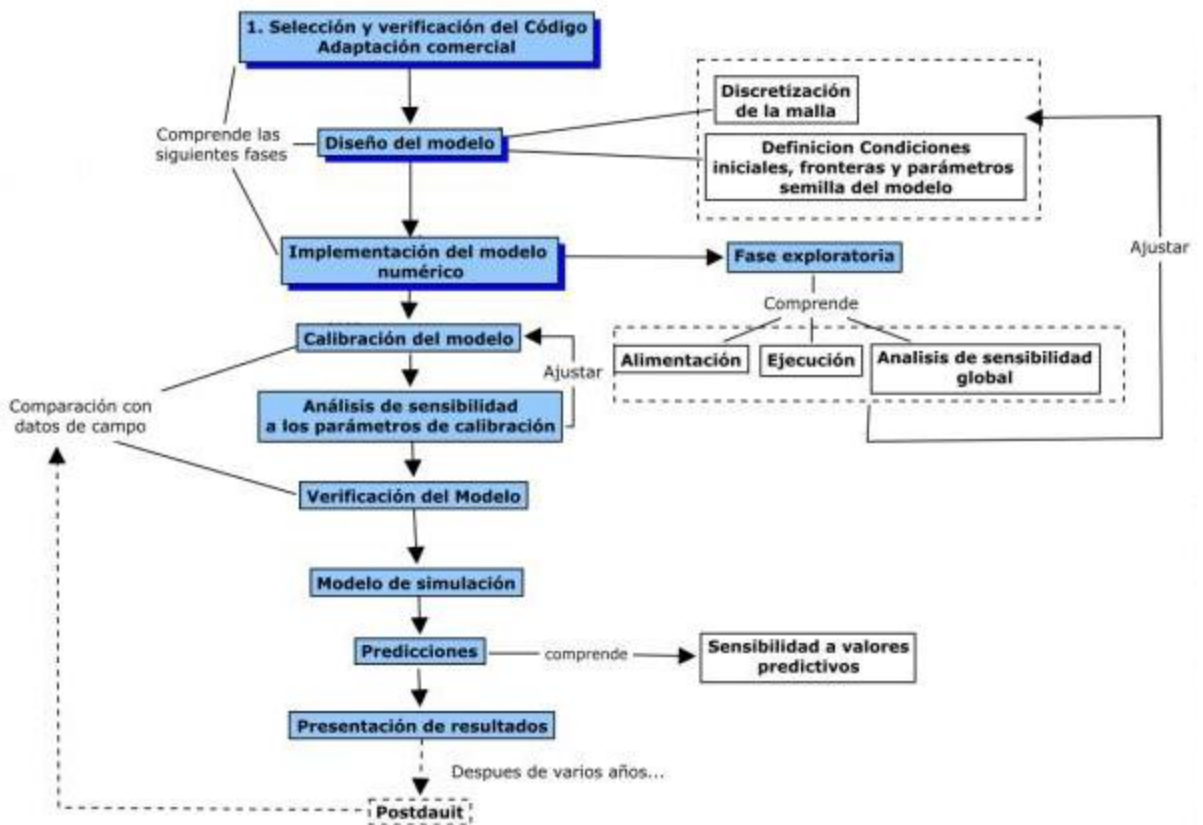
En la zona de estudio, teniendo en cuenta los conceptos anteriores, se realizaron dos bloque-diagramas y una sección transversal, los dos primeros muestran las principales características fisiográficas que intervienen en la dinámica del flujo de la región y en la sección transversal se muestra la geometría de los principales acuíferos del área, estos se pueden consultar en la sección 4.3.

1.5.2 Desarrollo del modelo numérico. La modelación numérica constituye un método de modelación que ha ampliado notablemente la panorámica del estudio de las interacciones entre los sistemas superficiales y subterráneos, puesto que además de proporcionar enfoques cuantitativos, permite con frecuencia ajustar y validar los modelos conceptuales y buscar, cuando hace falta, alternativas para nuevas interpretaciones y evaluaciones.

La formulación metodológica que se siguió para el desarrollo del modelo numérico es la propuesta por Anderson y Woessner (1992), en la cual se siguen una serie de etapas para lograr el objetivo soñado de todo modelo, el postdauit (Figura 1.4), el cual se realiza después de muchos años cuando ya se ha corrido y validado el modelo. Cabe aclarar que para la zona de estudio la modelación se llevó hasta la etapa de verificación, ya que es el primer modelo que se implementa de este tipo y debido a la relativa escasa información disponible.

En Anderson y Woessner, 1992, se detallan cada una de las etapas metodológicas que se deben llevar a cabo para desarrollar un modelo numérico de flujo según el esquema metodológico que se muestra en la figura 1.4.

Figura .1.4 Esquema metodológico para la construcción del modelo numérico.
(Tomado de Montoya, 2010)



2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE DE MODELOS CONCEPTUALES Y NUMÉRICOS

Introducción

En este capítulo se hace una descripción de los fundamentos conceptuales del propósito de la investigación y de algunas aplicaciones existentes en la literatura científica. En el numeral 2.1 se define el concepto de modelo hidrogeológico conceptual y sus principales características. En el numeral 2.2 se exponen los principios de la modelación numérica, y por último en el numeral 2.3 se definen las características del código de computador usado para la modelación y el respectivo paquete comercial donde se implementó el modelo numérico.

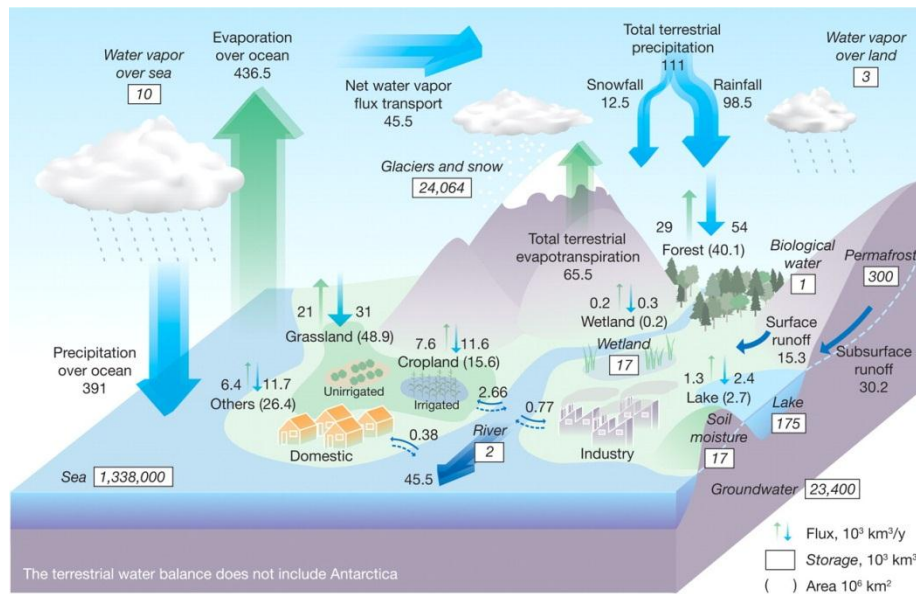
2.1 Modelo Hidrológico Conceptual (MHC)

Cualquier modelo es una simplificación de una situación real que se conoce sólo puntualmente a través de un número limitado de datos. Por otra parte, si se conociese exactamente la situación real, no sería operativo ni posible reproducirla exactamente en el modelo planteado. El modelo es una simplificación. La validez de la simplificación depende del objetivo que se pretende conseguir con el modelo. Cuando el objetivo se complica se tiene que complicar el modelo (Custodio y Llamas, 1996).

En hidrogeología, los modelos conceptuales son una herramienta necesaria para el análisis de los sistemas acuíferos, y son la idea básica o construida de cómo opera un sistema (Bredehoeft, 2005). Aunque la definición formal de Modelo Hidrológico Conceptual (MHC) se encuentra en construcción por parte de la comunidad científica internacional (Montoya, 2010), Anderson y Woessner (1992) proponen que un modelo conceptual es una representación pictórica del sistema de flujo de agua subterránea, frecuentemente en forma de bloque diagrama

(Figura 2.1) o secciones transversales (Figura 2.2), y su naturaleza determinará las dimensiones del modelo numérico y el diseño de la malla.

Figura 2.1 Balance global de los recursos hídricos en el mundo. (Oki, 2006)



El propósito de construir un modelo conceptual es simplificar el problema de campo y organizar todos los datos asociados a este para que el sistema pueda ser analizado más fácilmente. La simplificación es necesaria porque una completa reconstrucción de la realidad es imposible. Un MHC contiene numerosas interpretaciones cualitativas y subjetivas; la prueba de su validez se logra mediante la aplicación de técnicas de investigación específicas (modelación numérica, hidroquímica e isotopía) que permiten interpretar los procesos y luego comparar los resultados con las observaciones de campo (Betancur, 2008).

Figura 2.2 Sistema acuífero y sus interrelaciones con el entorno (SIA España, 2008).



Un MHC siempre estará sujeto a incertidumbre, la cual puede ser controlada con ejercicios sistemáticos de refinamiento soportados en la recolección periódica de nuevos datos, que lleven al mejoramiento, ajuste o incluso a la reformulación del modelo; pero aun así, este nunca representará fielmente al sistema en sus condiciones naturales. La conceptualización de un modelo hidrológico es función del estado del conocimiento, y por tanto cambia continuamente con los avances de la ciencia (Zheng y Bennett, 2002).

En un MHC el medio acuífero se concibe desde el punto de vista sistémico, es decir, se considera como un sistema abierto que intercambia materia y energía desde y hacia las fronteras (Figura 2.2).

2.2 Modelos numéricos de sistemas hidrológicos

La modelación numérica en hidrogeología es usada para avanzar en el conocimiento de los sistemas acuíferos y la relación que hay entre las aguas superficiales y subterráneas, provee una estructura para sintetizar toda la información en campo y responder preguntas acerca del funcionamiento del sistema para además saber en qué áreas se requiere más información (Anderson y Woessner, 1992). Los modelos numéricos también pueden tener un carácter exploratorio y de esta manera acompañar la construcción del modelo conceptual o su re-evaluación en el transcurso de su interpretación.

2.2.1 Procesos de flujo y transporte. En general, los modelos de agua subterránea se pueden dividir en dos categorías: los modelos de flujo de agua subterránea y los modelos de transporte de solutos. Los modelos de flujo de agua subterránea resuelven la distribución de las cabezas hidráulicas, mientras que los modelos de transporte de solutos resuelven la concentración del soluto afectado por advección (movimiento del soluto con el flujo de agua subterránea), dispersión (propagación y mezcla del soluto) y reacciones químicas (Anderson y Woessner, 1992).

El proceso del flujo subterráneo está regido por las relaciones expresadas mediante la ley de Darcy y la conservación de masa. La ley de Darcy posee límites a su rango de aplicación. Estos límites han de calcularse en cualquier aplicación (Konikow, 2002).

2.2.3 Ecuaciones de flujo en acuíferos. Combinando matemáticamente la ecuación de continuidad con la Ley de Darcy se tiene como resultado la ecuación general que gobierna el flujo de agua subterránea. Las características de esta ecuación son flujo no permanente y medio heterogéneo y anisotrópico (Ecuación 2.1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde x, y, y z son las coordenadas cartesianas alineadas a lo largo de los ejes principales de los valores de conductividad hidráulica K_x , K_y y K_z , h es la cabeza en el acuífero, W es el flujo por unidad de volumen que representa fuentes o sumideros de agua, S es el almacenamiento específico y t es el tiempo.

La simulación de flujo en estado transitorio supone una discretización temporal de cabezas en intervalos de tiempo (periodos de stress) durante los cuales las fronteras permanecen invariables. La ecuación 2.1 junto con una serie de condiciones de cabeza o flujo del acuífero y la especificación de cabeza inicial para las fronteras, constituyen una representación matemática del flujo de agua subterránea. La solución de la ecuación proporciona los valores de cabezas en función del espacio y el tiempo $h(x, y, z, t)$.

A partir del principio de conservación de masa se puede derivar una ecuación que describa el transporte y la dispersión de los compuestos químicos en el agua subterránea de igual forma que se hizo para la ecuación general de flujo (Domenico y Schwartz, 1998).

Una forma general para representar la ecuación de transporte de solutos es la de Grove (1976), en la que se incorporan los términos para representar las reacciones químicas y la concentración de los solutos en el fluido que hay en los poros y en la superficie del sólido (Ecuación 2.2):

$$\frac{\partial(mC)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(mD_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (mC V_i) - C'W^* + \text{QUIM} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde QUIM es igual a:

$-\rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t}$ para las reacciones de sorción o de intercambio iónicos en equilibrio lineal,

$\sum_{K=1}^S R_K$ para las reacciones químicas en las que se controla el caudal, y (o)

$-\lambda(mC + \rho_b \bar{C})$ para las desintegraciones,

y donde D_{ij} es el coeficiente de dispersión hidrodinámica, C' es la concentración del soluto en el fluido fuente o sumidero, $\bar{C}$ es la concentración de las especies adsorbidas en el sólido, ρ_b es la densidad aparente del sedimento, R_k es la tasa de producción del soluto en la reacción k y λ es la constante de desintegración.

El primer miembro de la derecha de la Ecuación 2.2 representa la variación de la concentración debido a la dispersión hidrodinámica. Esta expresión es análoga a la ley de Fick que describe el flujo difusivo. El segundo término del miembro representa el transporte advectivo y describe el movimiento de los solutos a la velocidad de filtración media del flujo de agua subterránea. El tercer término representa los efectos de la mezcla con un fluido fuente que posee una concentración diferente a la del agua subterránea que se encuentra en la zona de recarga o de inyección. El cuarto término representa todas las reacciones químicas, geoquímicas y biológicas que provocan la transferencia de masa entre las fases líquida y sólida, o la conversión de las especies químicas disueltas de una forma a otra (Grove, 1976).

2.2.4 Métodos numéricos para resolver las ecuaciones. Las ecuaciones en derivadas parciales que describen el flujo y el transporte subterráneo pueden resolverse matemáticamente utilizando soluciones analíticas o numéricas. Las ventajas de una solución analítica, siempre que sea posible, es que permite proporcionar una solución exacta de la ecuación rectora, y a menudo resulta relativamente sencillo y eficiente de obtener.

Una alternativa para los problemas en los que los modelos analíticos son inadecuados es la aproximación numérica de las ecuaciones en derivadas parciales. Para poder realizar este cambio las variables continuas se sustituyen por variables discretas que se definen en los bloques (celdas) de la malla (o en los

nodos). Así que la ecuación diferencial continua, que define el nivel piezométrico o la concentración del soluto en todos los puntos del sistema, se reemplaza por un número finito de ecuaciones algebraicas que definen el nivel piezométrico o la concentración del soluto en puntos específicos. Este sistema de ecuaciones algebraicas generalmente se resuelve utilizando técnicas matriciales. Esta aproximación constituye lo que se denomina un modelo numérico.

Se han considerado dos clases principales de métodos numéricos para resolver la ecuación de flujo subterráneo. Estos son los métodos de diferencias finitas y la de elementos finitos. Cada una de estas dos clases más importantes incluye una variedad de subclases y de alternativas de implementación. Remson et al. (1971), y Wang y Anderson (1982) han presentado discusiones sobre la aplicación de estos métodos numéricos para resolver los problemas de hidrología subterránea. Estas aproximaciones numéricas requieren una subdivisión del área de interés por medio de una malla que consta de celdas (elementos) asociadas a los nodos (en el centro de cada uno de los elementos).

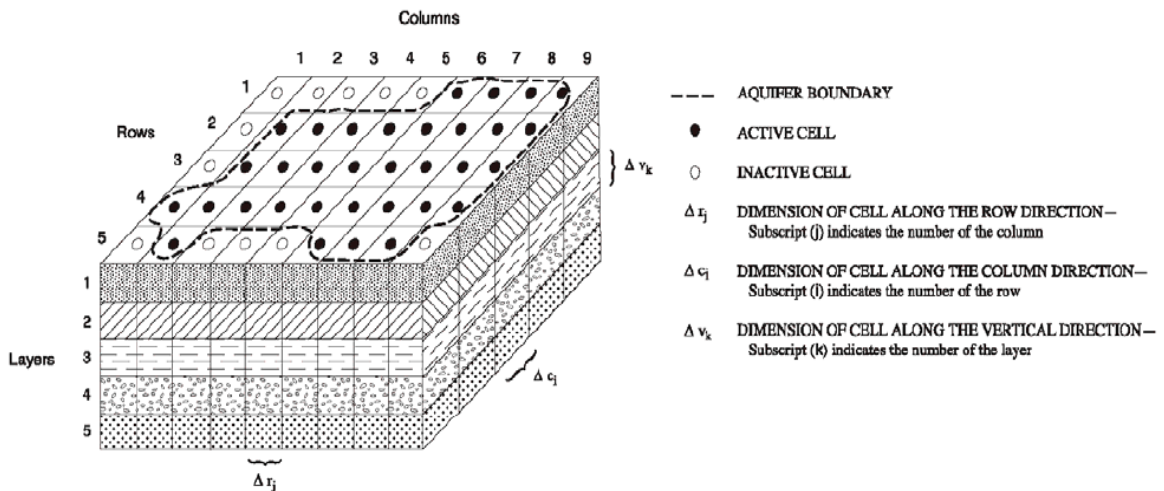
2.5 El MODFLOW y la interface Groundwater Vistas

El código de computadora MODFLOW es un modelo matemático escrito en Fortran, desarrollado por el U.S. Geological Survey que resuelve la ecuación general de flujo subterráneo mediante el método de diferencias finitas (Harbaugh, 2005).

Las condiciones de frontera que permite incluir MODFLOW incluye: cabezas específicas (specified-head), flujo específico (specified-flux) y cabezas dependientes de flujo (head-dependen flux). El modelo tiene una estructura modular que consiste de un programa principal y una serie de subrutinas en módulos o paquetes. Cada paquete representa alguna característica específica del

sistema hidrológico como recarga (RCH), evapotranspiración (ETV), ríos (RIVER), lagos (LAK), drenes (DRN), pozos (WELL) y corrientes (Stream).

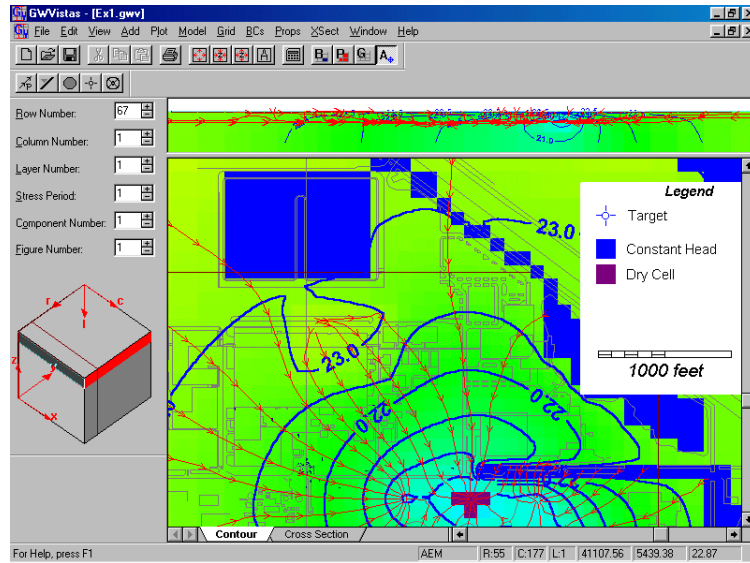
Figura 2.3 Sistema acuífero hipotético discretizado (Tomado de Harbaugh, 2005).



La discretización temporal está basada en pasos de tiempo, los cuales se agrupan en periodos de stress. Un periodo de stress es un periodo de tiempo en el cual una serie de parámetros específicos (condiciones de frontera, tasas de bombeo, etc.) permanecen constantes en el sistema. Cada periodo de stress puede ser discretizado en uno o más pasos de tiempo. La selección de paso de tiempo y construcción de la malla son pasos críticos en el diseño del modelo debido a que los valores de la discretización espacial y temporal tienen una influencia importante en los resultados numéricos (Anderson y Woessner, 1992).

La plataforma Groundwater Vistas (GV) es un sistema grafico para MODLOW y otros modelos similares como MODPATH y MT3D que permite el uso de herramientas para el pre y post procesamiento de la información requerida en el modelamiento de aguas subterráneas (Figura 2.4). Esta plataforma es comercializada por Environmental Simulation Inc. (Rumbaugh y Rumbaugh, 2007).

Figura 2.4 Ambiente grafico del GV (Rumbaugh y Rumbaugh, 2007).

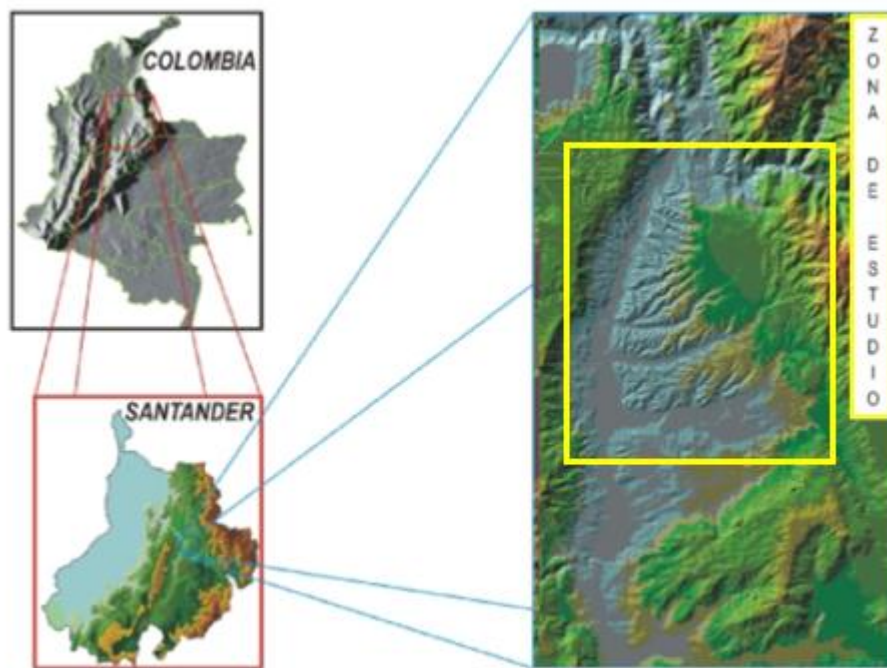


2.5.1 Descripción conceptual de paquetes. El código MODFLOW contiene una serie de paquetes para realizar la modelación de flujo subterráneo. Los paquetes hidrológicos calculan los coeficientes de la ecuación en diferencias finitas para cada celda. El flujo en bloque centrado (BCF) y el flujo en capa propia (LPF) son los dos paquetes de flujo interno que ofrecen enfoques alternativos para formular los términos de flujo interno. La barrera horizontal de flujo (HFB) es un paquete adicional de flujo interno que funciona con BCF y LPF para modificar las conductancias para simular una barrera entre nodos. Cada uno de los paquetes de estrés formula los coeficientes que describen un flujo particular externo o de borde, por ejemplo, el paquete Well calcula los coeficientes que describen el flujo entre una celda y un río superficial. Los paquetes Solver son aquellos que implementan algoritmos para la solución de los sistemas de ecuaciones en diferencias finitas.

3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La delimitación de la zona de estudio para el desarrollo del modelo numérico corresponde a la llamada Meseta de Bucaramanga y parte de sus alrededores; sin embargo, se debe tener claridad respecto a la geología que rodea el área para la definición de las unidades hidroestratigráficas del modelo conceptual y las condiciones de frontera del modelo numérico. En este orden de ideas, se estudia la geología delimitada por el Macizo de Santander al oriente, el Río de Oro al sur y occidente y el Río Suratá al norte (Figura 3.1).

Figura 3.1 Ubicación del marco fisiográfico de la zona de estudio. (Tomado y adaptado de INGEOMINAS, 2001)



3.1. Litología

A nivel litológico, se presentan en el área de estudio y sus alrededores Unidades Litológicas (definidas éstas como cada uno de los conjuntos de materiales geológicos – rocas y acumulaciones sedimentarias – formados en condiciones homogéneas, o relativamente homogéneas, cartografiables a escala de trabajo – 1:10.000 – y ordenados cronológicamente) compuestas por rocas metamórficas, rocas sedimentarias, rocas ígneas y depósitos de suelos, cuyos nombres se resumen en la Tabla 3.1 (INGEOMINAS, 2001).

3.1.1. Rocas Ígneas y Metamórficas

Al oriente de la ciudad afloran rocas ígneas y metamórficas de edad precámbrica y paleozoica que constituyen la parte occidental del Macizo de Santander. Predominan las rocas de composición diorítica, los esquistos, neises y migmatitas, intensamente fracturadas y cizalladas, cubiertas por un manto de regolito de espesor variable (Julivert, 1963).

Tabla 3.1 Unidades Litológicas del Área Metropolitana de Bucaramanga.
(Tomado y adaptado de INGEOMINAS, 2001)

TIPO	NOMBRE	CONVENCIÓN
ROCAS METAMORFICAS	Neis de Bucaramanga	PEb
	Formación Silgará	PDs
ROCAS IGNEAS	Diorita y Tonalita del Área del Rio Suratá	TRt
	Cuarzomonzonita de La Corcova	JRcl
	Cuarzomonzonita, Granito y Pórfido Cuarzoso	JRcg

ROCAS SEDIMENTARIAS	Formación Floresta	Df
	Formación Diamante	Pcd
	Formación Tiburón	TRPt
	Formación Bocas	TRb
	Formación Jordán	Jj
	Formación Girón	Jg
	Formación Tambor	Kita
	Formación Bucaramanga:	
	Miembro Órganos	Qbo
	Miembro Finos	Qbf
	Miembro Gravoso	Qbg
	Miembro Limos Rojos	Qblr
	Depósitos de Flujos de Escombros	Qfe
	Depósitos Aluviales:	
	Terrazas Medias	Qal ₂
	Terrazas Bajas	Qal ₁
	Llanura de Inundación	Qal
	Deposito Coluviales	Ql
	Depósitos de Deslizamiento:	Qd
	Deslizamiento Activo	Qda
	Deslizamiento Inactivo	Qdi
	Llenos Mecánicos	Qllm

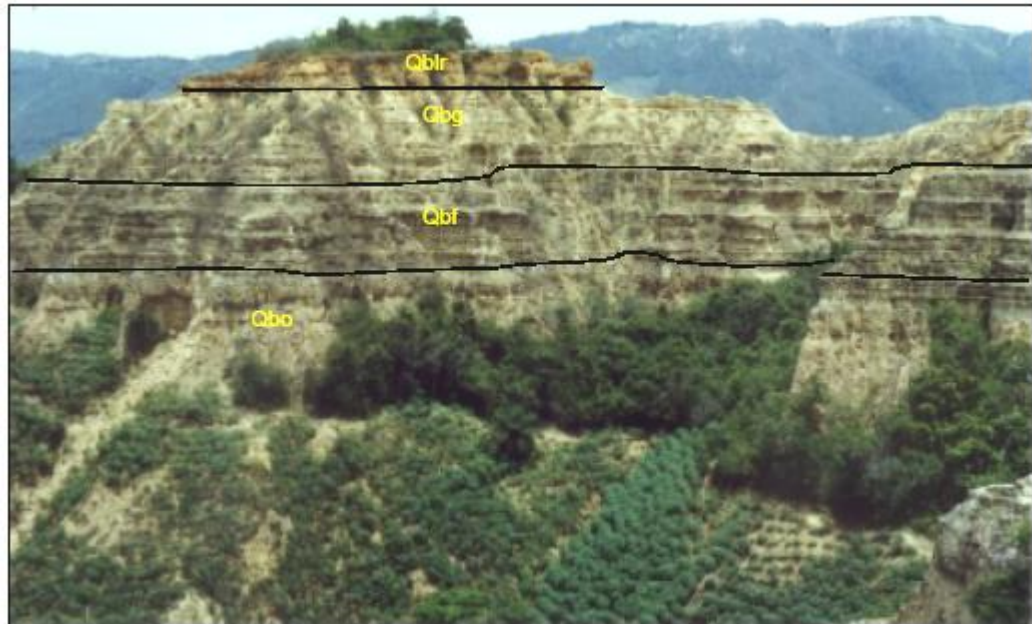
3.1.2. Rocas Sedimentarias

- a) Lutitas, limolitas y areniscas, de la Formación Girón de edad jurásica-triásica, se presentan en la parte occidental y sur de la zona de estudio, principalmente alrededor de la Mesa de Ruitoque y en la Plataforma de Lebrija. En algunas zonas presentan una cubierta delgada de flujos de lodo. Las rocas de esta

formación presentan fracturamiento, pero no muy intenso. El contacto de la Formación Girón y el Macizo de Santander es fallado, cubierto en la zona de estudio por los sedimentos de la Meseta de Bucaramanga (Ward, 1973).

- b) Calizas y Areniscas: Corresponden a la formación Suratá-Bocas y Tiburón de edad paleozoica; contienen conglomerados con guijarros de caliza gris, areniscas rojas y cuarcitas; afloran en la zona norte y hacen parte del sustrato sobre el cual se asientan los sedimentos de la Meseta (Ward, 1973).
- c) La formación Bucaramanga fue descrita inicialmente por De Porta (1958). Se trata de un importante depósito sedimentario de edad Cuaternaria 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 el cual se ubica el casco urbano de la ciudad de Bucaramanga. Este abanico limita al nororiente y oriente con el Macizo de Santander, al noroccidente y occidente con el cerro de Palonegro y el río de Oro, y al sur con la Mesa de Ruitoque. Se ha dividido la formación Bucaramanga, de base a techo, en los siguientes miembros: Miembro Órganos (Qbo), Miembro Finos (Qbf), miembro Gravoso (Qbg) y miembro Limos Rojos (Qblr) (Figura 3.2).

Figura 3.2 Panorámica de los Miembros que conforman la Formación Bucaramanga.



Miembro Órganos (Qbo): Definido por Hubach (1952), quien describe niveles lenticulares limoarenosos, con espesores de hasta 5 m. De acuerdo con Bueno y Solarte (1994), corresponde a una serie monótona de niveles polimícticos, de fragmentos gruesos, de aspecto conglomerático, en alternancia con capas y lentes limoarenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura. Con base en las columnas realizadas (Mancera y Salamanca, 1994), correlaciones estratigráficas y cortes topográficos, se estima que su espesor podría superar los 180 m., siendo el nivel más potente de la Formación Bucaramanga.

Miembro Finos (Qbf): Este nivel fue reconocido y definido por Hubach (1952). Se ubica estratigráficamente entre el miembro Órganos y miembro Gravoso, en contactos netos, planos, paralelos. Es una extensa capa lenticular horizontal que se puede extenderse hasta el contacto con el Neis de Bucaramanga, de

unos 15m de espesor promedio, donde alternan niveles arcillosos, limoarenosos y arenolimosos de color gris verdoso.

Miembro Gravoso (Qbg): Presenta niveles gravosos, gravoarenosos y gravolodosos. Los cantos son en su mayor parte tamaño grava de diámetro promedio 15 cm., y bloques de roca en menor cantidad, hasta de 0.8 m de diámetro, subangulares a subredondeados, en matriz areno-arcillosa-limosa, color pardo rojizo, rojizo y ocre pálido; en general el depósito es matriz soportado. El contacto inferior con el miembro Finos es neto, continuo y suavemente ondulado y el contacto superior con el miembro limos rojos es gradacional. Su espesor varía entre 8 y 30m. Se localiza hacia el Norte de la zona y se caracteriza por presentar bloques y cantos de tamaño muy variable (0.02-2 m), redondeados a subredondeados, de rocas sin meteorizar en una matriz arcilloarenosa, su morfología corresponde a colinas suaves, onduladas con drenaje dendrítico (Niño y Vargas, 1992).

Miembro Limos Rojos (Qblr): Definido por Julivert (1963). Está constituido por arenas arcillosas gravosas, y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Presenta bloques angulares esporádicos de arenisca asociados superficialmente a este miembro; estos cantos pueden estar embebidos dentro de limos rojos y se caracterizan por estar meteorizados. Suprayace el segmento Gravoso y su contacto con éste es gradacional. Corresponde al nivel sobre el cual se encuentra edificada la ciudad de Bucaramanga. Consta de limos de color amarillento a rojizo y cantos de areniscas en la parte inferior.

3.2. Hidrogeomorfología

Regionalmente las unidades morfológicas coinciden con las unidades litológicas y estructurales. El Macizo de Santander, El cerro de Palonegro, la cuenca tectónica

de Bucaramanga y la región de la Mesa de Ruitoque constituyen los elementos morfoestructurales regionalmente más destacados.

Figura 3.3 Geoformas dominantes en el área de estudio. (Tomado de Zambrano y Rey, 2003)

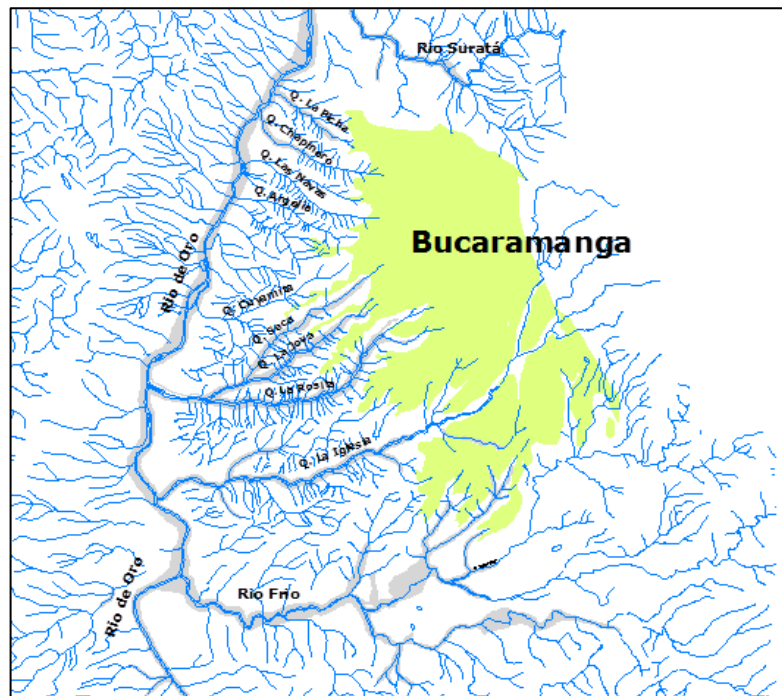


3.2.1. Drenaje Superficial. Los principales ríos que atraviesan la zona (Suratá, Frío, y Río de Oro) nacen en el macizo de Santander; su perfil longitudinal se modifica sustancialmente al llegar a la zona de estudio y ellos han contribuido en mayor o menor proporción a la depositación de los materiales aluviales que conforman la Meseta. Estos ríos marcan una pauta importante, en el comportamiento hidrogeológico, por ejemplo para definir balances hidrológicos.

Existe además, un sistema muy importante de drenaje superficial relacionado directamente con la Meseta de Bucaramanga y aferente al Río de Oro (Figura 3.4). Si subdividimos este sistema en dos, el primero, está conformado por las quebradas La Flora, El Dínamo, La Cascada, La Aurora y El Cacique, que confluyen en el extremo suroriental, conformando allí la quebrada La Iglesia. Este sistema junto con la quebrada Chitota, al norte, constituyen el sistema de drenaje del Macizo de Santander en la zona de la Meseta.

El segundo sistema es el localizado al occidente de la Meseta; en la zona de la escarpa conformado por siete quebradas (La Picha, Chapinero, Las Navas, Dos Aguas, Nariño, Argelia y Cuyamita) que nacen en la escarpa noroccidental y en la cabecera de los valles descritos anteriormente; y por cuatro quebradas (Seca, La Rosita, El Loro y la Guacamaya) que afloran sobre la Meseta; las tres primeras alrededor de la zona de Morrorrico a la altura de la cota 1.040 aproximadamente y la última en la cota 975, según plano del año 1957 de Instituto Geográfico Militar. Este último sistema drena más de la mitad de ciudad y sus quebradas han sido canalizadas o recubiertas sin las adecuadas especificaciones técnicas, como ocurrió con la quebrada Seca. Ellas, al salir de la Meseta y al entrar en la escarpa (zona suroccidental) han desarrollado perfiles menos pronunciados en los valles, debido a sus grandes áreas de drenaje; a diferencia de los valles formados por las otras quebradas (zona noroccidental), que tienen altas pendientes en sus zonas de nacimiento y se suavizan cerca de la desembocadura en el Río de Oro.

Figura 3.4 Drenaje superficial

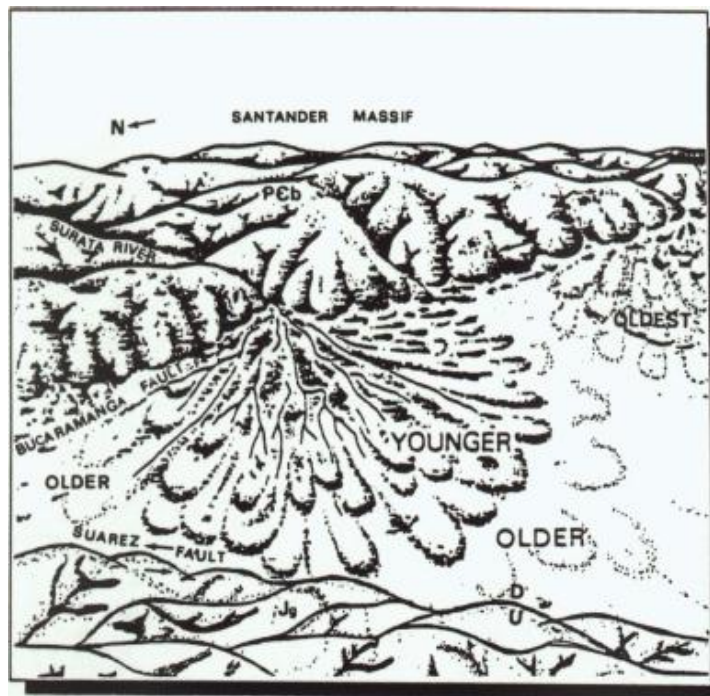


3.3. Marco Tectónico

La Meseta de Bucaramanga se encuentra ubicada sobre una cuenca tectónica, formada por dos fallas principales: la Falla Bucaramanga-Santa Marta y la Falla del Suárez-Río de oro (Figura 3.5), además asociadas a estas se presentan otras fallas menores y lineamientos (INGEOMINAS, 2001).

Este sistema juega un papel importante en el comportamiento hidrogeológico de la zona y marca además los límites geomorfológicos que coinciden parcialmente con los cambios litológicos y estructurales. Al Occidente, la Falla del Suárez-Río de Oro marca el contacto entre la Formación Girón y los depósitos aluviales que forman la Meseta de Bucaramanga. Asociada a la Falla Bucaramanga-Santa Marta existe un sistema de fracturas menores, fisuras y diaclasas que abarcan una zona de cizalla de dos kilómetros de ancho (INGEOMINAS, 2001).

Figura 3.5 Modelo Hipotético del área estudiada durante el Pleistoceno. (Tomado de INGEOMINAS, 2001)



3.4. Modelo Geométrico de los acuíferos

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 todas las capas geológicas.

Para la elaboración del modelo geométrico geológico se recurrió al informe de INGEOMINAS denominado Modelo Geológico-Geofísico para el Área Metropolitana de Bucaramanga elaborado por Vásquez y Bermoudez (2004). En este informe los autores hacen una valiosa recopilación e interpretación de información geológica conocida hasta esa fecha, la cual da como resultado espesores de capas geológicas para diferentes puntos a lo largo de toda el Área Metropolitana.

El resumen de la información geológica: los SEV reinterpretados, información de piezómetros y de pozos, se muestran en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2 Resumen de puntos con información geológica.

43 Piezómetros	11 Pozos	67 SEV's
SG1, SG2, SG4, SG5, SV1, SV2, SR01, SR02, SR03, SR04, SR05, SR06, SR07, SR08, SR09, SR011, SL2, SM1, SM3, SM7, SN4, SNA4, SD4, SN2, SNA2, SA9, SA8, SA5, SN1, SN3, SJ3, SJ4, SS2, SS3, SS5, SM4, SM5, SM6, SM8, SN5, SN7, SR2, SR3, SM2 y SI1	Zona Norte, Parque A. Nariño, Metrocentro, Parque de los Niños, San Pio, Aldea de los Niños, Ruitoque, Agropecuaria Rio Frio, Frescaleche, Estación el Carmen y Estación el Bosque	Desde D-1 hasta D-39, ING-57, ING-55, ING-53, ING-50, ING-51, ING-52, ING-1 hasta ING-8, ING-10, ING-13, ING-15, ING-40, ING-41, ING-44, ING-45, ING-17, ING-21 hasta ING-24, ING-38, ING-54, ING-80, ING-68, ING-72, ING-82

La interpretación geológica dada a cada uno de los puntos listados en la Tabla 3.2 se puede consultar en el Anexo 1, donde adicionalmente se encuentra la información de su ubicación (coordenadas X,Y) y cotas del terreno referenciadas al modelo digital MDE.

3.4.1. Mapas de plantas y espesores geológicos. Para hacer la distribución espacial de la información, se inició haciendo el cálculo de las cotas de techo de cada capa geológica, esto teniendo en cuenta el espesor y la cota del terreno en cada punto donde había información, usando el software Surfer ®.

En segunda instancia se definió el área de influencia de cada formación geológica, esto se hizo con base en el informe de INGEOMINAS denominado Zonificación Sismogeotécnica Indicativa (2001), donde se puede encontrar el plano geológico del área de estudio, éste se encuentra en el Anexo 2.

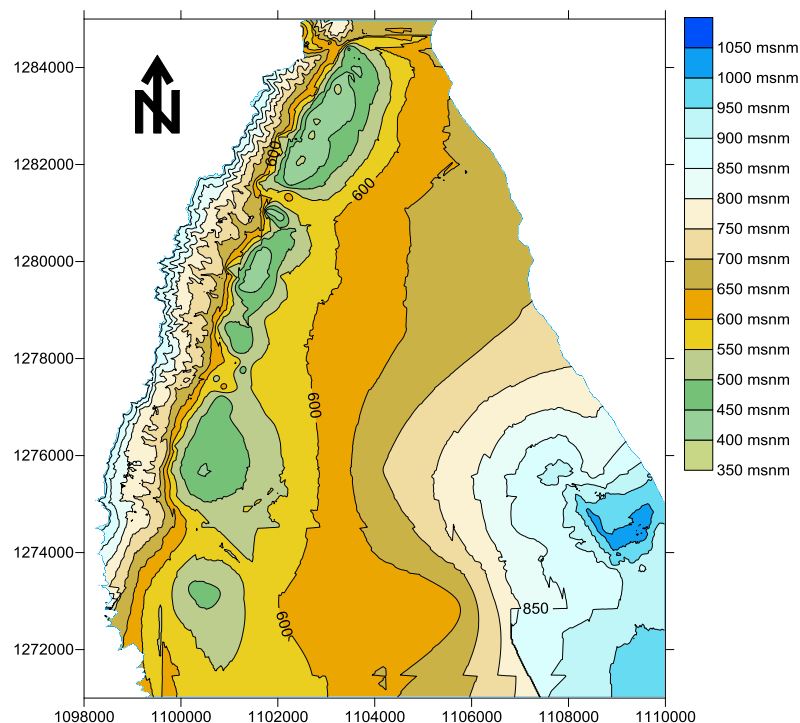
Para la definición de las cotas del terreno, se tomó la información suministrada por el Modelo Digital de Elevaciones que se describe en detalle en el numeral 4.1.1. Este modelo digital tiene una resolución de 10mx10m, es decir, está en escala 1:10.000. Sin embargo, el plano geológico donde se define el área de influencia de cada formación geológica está en escala 1:25.000, razón por la cual se debió bajar la resolución de las celdas del MDE a 25mx25m.

La presentación de las plantas geológicas se hace siguiendo un orden ascendente, es decir, desde la inferior (Formación Girón) hasta la superior (Miembro Limos Rojos). Para no saturar la presentación del documento, se optó por ubicar en los Anexos 3 al 8 algunos mapas de plantas geológicas y mapas de espesores geológicos. Para la implementación del modelo numérico, se debe tener en cuenta que las capas geológicas consideradas como impermeables son la Formación Girón y el Miembro Finos de la Formación Bucaramanga.

La Formación Girón se considera que es toda el área al occidente del Sistema de Fallas del Suarez y subyace el Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga hasta llegar al oriente de la zona de estudio y terminar finalmente en el Sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta, con afloramientos en la zona de La Cumbre. Esta formación es considerada el basamento del Acuífero Profundo, por lo cual la planta geológica corresponde a un mapa de isobasamentos (Figura 3.7).

Para realizar el mapa de isobasamentos de la Formación Girón se tomaron dos tipos de puntos como referencia: la nube de puntos resultante del afloramiento de dicha Formación en la margen izquierda del Rio de Oro, puntos que se obtuvieron del MDE delimitado por el mapa geológico de INGEOMINAS 2001. Los otros puntos fueron aquellos listados en el informe de Vasquez y Bermoudes, que tuvieron interpretación geológica como Formación Girón: P. San Pio, P. Aldea de los Niños, P. Ruitoque y P. Estación el Bosque.

Figura 3.6 Mapa de Isobasamentos de la Formación Girón



Suprayaciendo a la Formación Girón se encuentra el Miembro Órganos, el cual se extiende desde el valle del Rio de Oro hasta el Sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta. Este Miembro es considerado el contenedor del denominado Acuífero Profundo de Bucaramanga (Vásquez y Bermoudez, 2004). Ver Anexo 3.

En la zona de la Meseta de Bucaramanga se encuentra la Formación Bucaramanga. Allí el Miembro Finos de dicha Formación actúa como basamento para el Acuífero Superficial de la Meseta (Vásquez y Bermoudez, 2004). Se extiende a lo largo del borde de la Meseta al occidente, observándose afloramientos a lo largo de la escarpa, y llega hasta al oriente hasta el Sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta, esta suposición se hace por la presencia del Miembro Finos en la perforación realizada en el Parque San Pio, el cual queda ubicado en cercanías de la zona donde empieza el complejo Ígneo-Metamórfico. Ver anexo 4.

Suprayaciendo al Miembro Finos se encuentra el Miembro Gravoso. Este Miembro se considera como el contenedor del Acuífero Superficial de la Meseta de Bucaramanga (Vásquez y Bermoudez, 2004), geométricamente tiene una forma muy similar a la del Miembro Finos y se extiende de la misma manera, aunque sus espesores son superiores. Ver anexo 5.

El nivel sobre el cual se encuentra edificada la ciudad de Bucaramanga es el Miembro Limos Rojos, este suprayace el segmento Gravoso de la Formación Bucaramanga y es una delgada capa que en la superficie corresponde a la topografía de la Meseta. Por lo tanto, su geometría se visualiza siguiendo el contorno del Miembro Finos pero con los niveles de elevación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a escala 1:25.000. Ver Anexo 6.

Otra manera de visualizar las formaciones geológicas para apreciar de mejor manera su distribución espacial, es mediante mapas de espesores. Estos mapas

indican (aproximadamente) como varían en profundidad cada capa con relación al espacio.

Para realizar los mapas de espesores de las formaciones geológicas es necesario tener el valor de la diferencia entre cotas de base y techo de cada formación. Para esto se recurre a una herramienta que posee el software Surfer llamada Residuals, la cual consiste básicamente en encontrar diferencias de valores en elevación para una referencia dada (coordenadas X,Y).

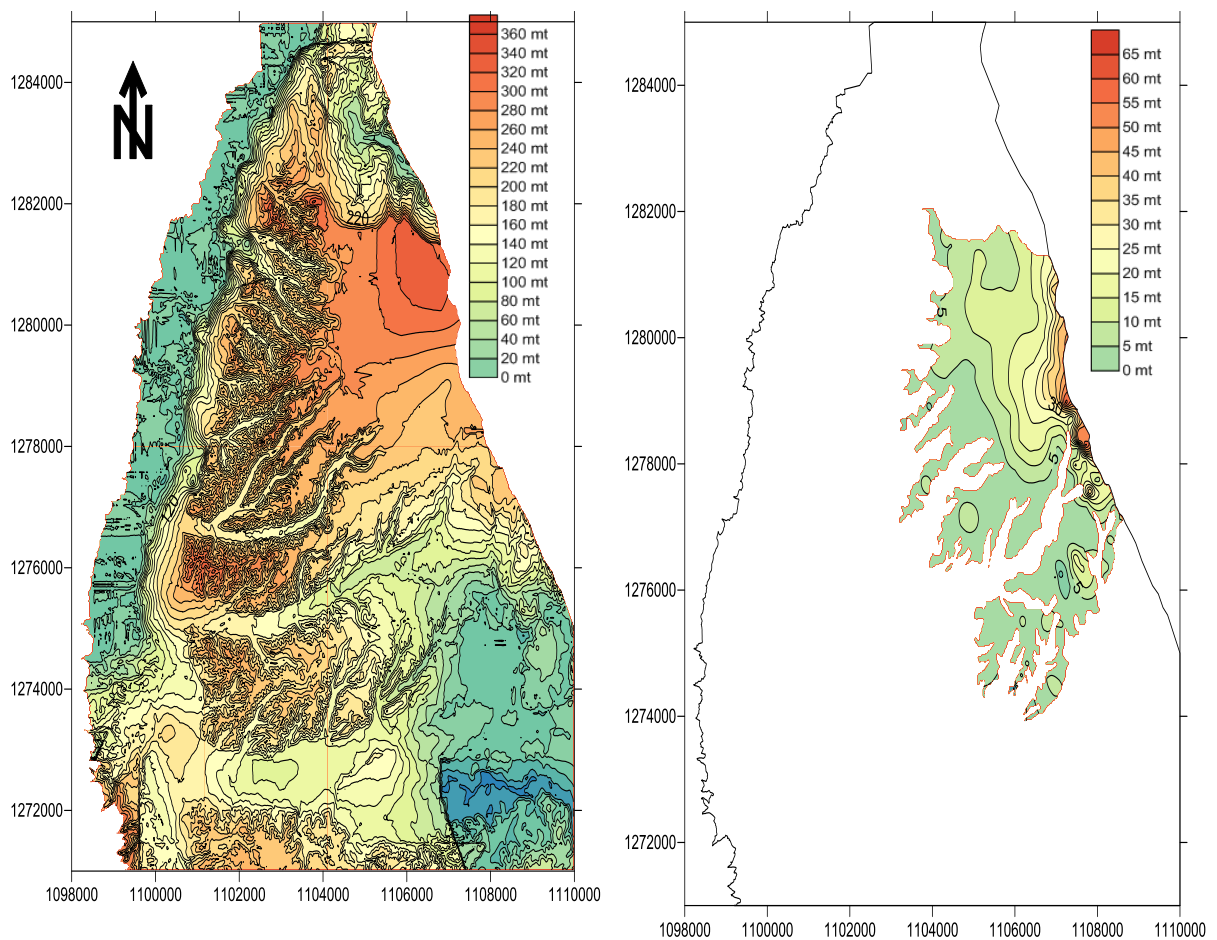
El Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga es el elemento geológico más potente de la zona de estudio ya que presenta los mayores espesores (INGEOMINAS, 2001). Se encuentra apoyado en la Formación Girón y en la zona de la Meseta subyace al Miembro Finos, presenta espesores variables que van desde los 20mt en el margen izquierdo del valle del Rio de Oro hasta más de 300mt en la zona de la Meseta de Bucaramanga (Figura 3.7).

Los espesores del Miembro Finos varían desde medio metro hasta aproximadamente 20mt, es un segmento relativamente delgado. En el Anexo 7 se puede apreciar como disminuye su espesor en dirección sur y como el mayor ancho se presenta en cercanías del sector de cabecera en dirección del complejo ígneo-metamórfico.

La variación de los espesores del Miembro Gravoso muestra un aumento gradual en sentido oeste-este, es decir, desde la zona de la escarpa donde terminan todos los miembros de la Formación Bucaramanga, hasta el contacto con el Sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta. Los espesores presentan una variación que va desde un poco menos de medio metro al occidente, hasta cerca de los 70mt al oriente en el contacto con el complejo ígneo-metamórfico (Figura 3.7).

El Miembro Limos Rojos es el techo de la Formación Bucaramanga, es un elemento con espesores relativamente pequeños, varían desde espesores de menos de un metro hasta alrededor de los 5mt a lo largo y ancho de la superficie de la Meseta de Bucaramanga. Pero se aprecian espesores de alrededor de 30mt en cercanías de Pan de Azúcar. Es posible que estos valores se deban a la falta de información en la zona montañosa de Pan de Azúcar y por lo tanto la espacialización de la información arroja dichos valores. Ver Anexo 8.

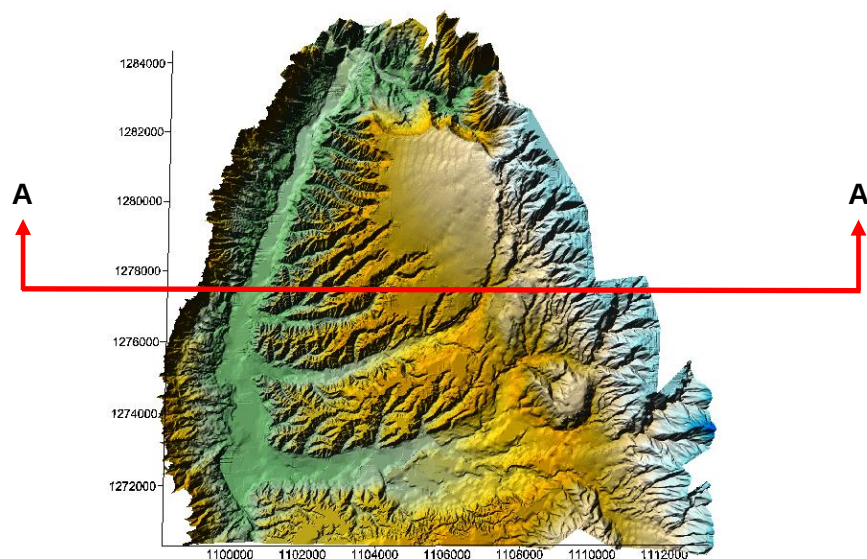
Figura 3.7 Mapa de espesores del Miembro Órganos y Gravoso, respectivamente



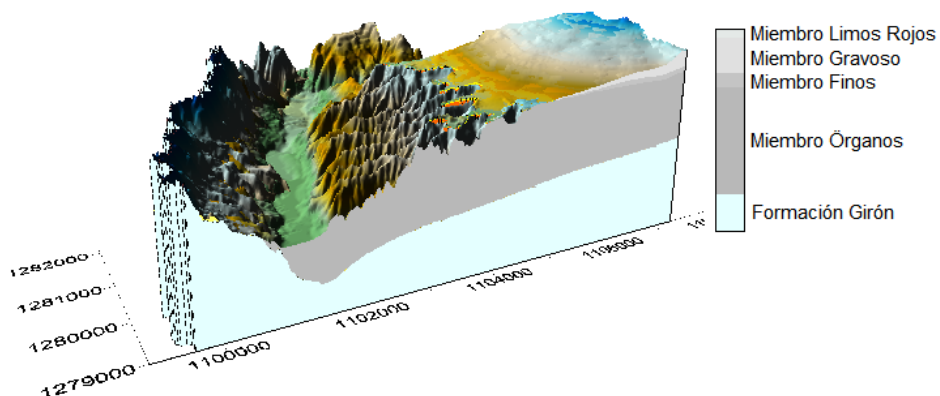
3.4.2. Cortes Geológicos

La mejor manera de visualizar en conjunto el modelo geométrico de las capas geológicas es mediante secciones transversales tridimensionales, estas permiten ver detalles que escapan de los mapas en planta. Al igual que dichos mapas, el proceso se siguió usando el software Surfer®, el cual permite hacer cortes en cualquier dirección de los puntos espacializados. En la figura 3.8 se muestra el corte transversal A-A a lo largo de la coordenada 1'279.000 Norte.

Figura 3.8 Sección transversal Este-Oeste por la coordenada 1'279.000 Norte (corte A-A)



Sección A-A

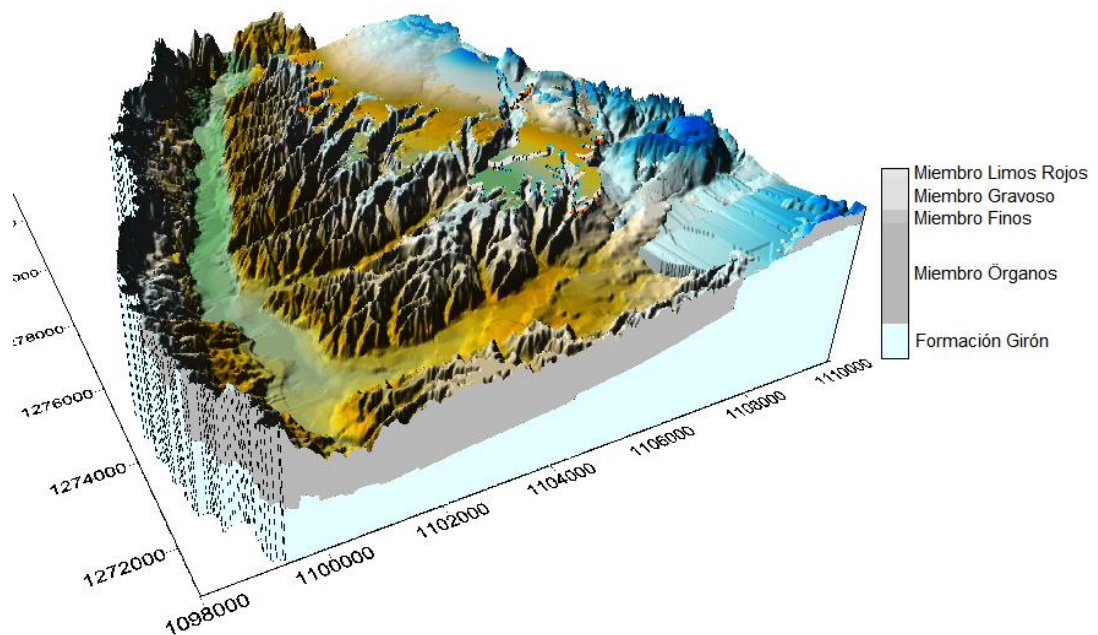


En los cortes transversales se puede visualizar que la Formación Bucaramanga desaparece hacia la zona norte del área de estudio. Además se puede apreciar la diferencia de espesores entre el Miembro Órganos y los demás elementos geológicos, de igual manera como dicho miembro trata de seguir la forma del valle del Rio de Oro.

En la figura 3.8 no se puede observar el Miembro Limos Rojos debido a que su espesor es relativamente pequeño para ser observado a la escala de los cortes transversales, sin embargo si se alcanza a visualizar el Miembro Finos, el cual aparece como una delgada capa que disminuye hacia el norte y sur de la Meseta, pero que encuentra su mayor espesor en el centro de la misma.

En la figura 3.9 aparece la geometría completa del modelo geológico, esto a manera de conclusión y mostrando todas las capas dentro del área de estudio.

Figura 3.9 Modelo geológico completo de la zona de estudio



4. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Introducción

En este capítulo se presenta el modelo hidrogeológico conceptual que describe las conexiones entre los componentes superficiales, atmosféricos y subterráneos. Este modelo está basado en información hidrogeológica existente tal como: informes geológicos, perforaciones, inventarios de aguas, ensayos de bombeo, información climática, niveles freáticos, etc.

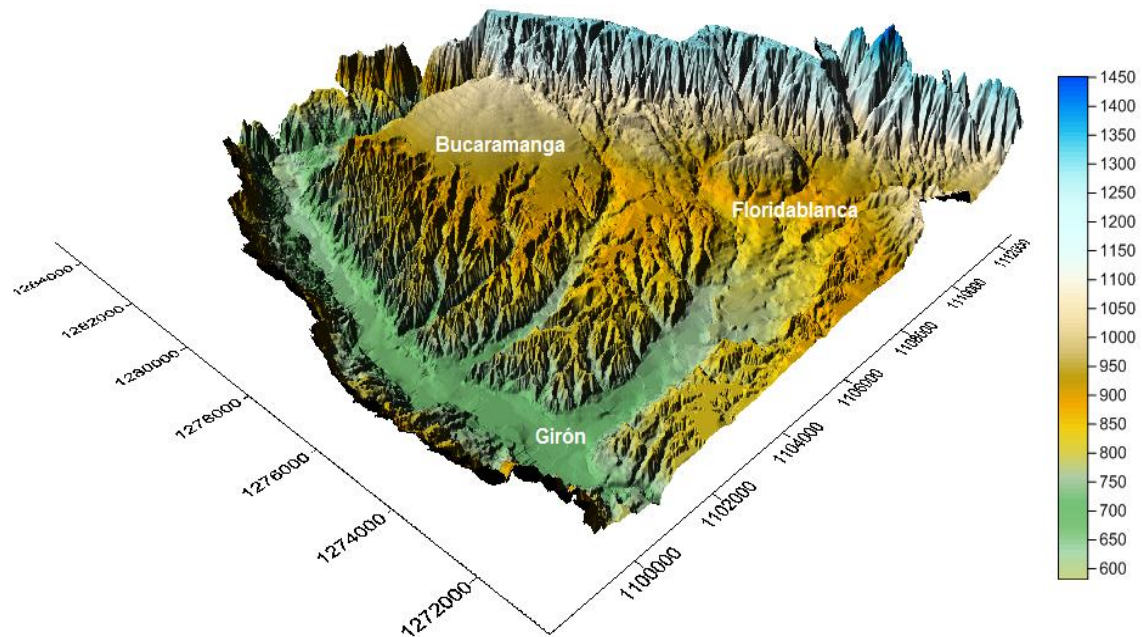
Los resultados se analizan desde una perspectiva sistémica para la zona de estudio, y se consideran los componentes involucrados directamente (acuíferos, corrientes de agua, niveles freáticos, etc.) y los componentes que influyen indirectamente (precipitación, evaporación, fisiografía, etc.).

4.1 Medio Físico Natural

En este apartado se hace una breve descripción de las características fisiográficas, hidrográficas, climáticas, geológicas e hidrogeológicas del área de estudio.

4.1.1 Fisiografía. Para dar una correcta descripción a los procesos de sistemas hidrogeológicos y a la interconexión entre sus componentes, es clave tener una clara caracterización del relieve, ya que constituye un factor determinante en la identificación de zonas de recarga, configuración de redes de drenaje, delimitación de cuencas hidrográficas, etc. En el área se presentan elevaciones desde los 600 msnm en el sector Café Madrid hasta los 1450 msnm en el Macizo de Santander, las pendientes varían considerablemente de muy bajas a muy altas en la misma ubicación. Esto se aprecia mejor en el modelo digital de elevaciones MDE (Figura 4.1).

Figura 4.1 Modelo Digital de Elevaciones (MDE). (Modificado de Joya y Deantonio, 2012.)



El área se puede dividir en dos zonas; una plana ondulosa que corresponde al centro del área y está caracterizada por los depósitos del Abanico de Bucaramanga, aluviones y algunos coluviones así como algunas formaciones como lo son la Formación Diamante, Jordán y Girón. La otra zona corresponde a una zona montañosa con pendientes que varían de suaves a fuertes, y está limitando al Este y Oeste la zona anterior; esta zona está constituida al Este por el Macizo de Santander y al Oeste por la Formación Girón.

Geomorfológicamente, se trata de una extensa Meseta formada por un espeso y amplio relleno aluvial que ocupa la cuenca tectónica (o cuenca de tracción), enmarcada por dos grandes fallas geológicas: la Falla de Bucaramanga, que separa ésta cuenca por el E y NE del relieve montañoso Paleozoico y Cretácico, que corresponde a las estribaciones del Macizo de Santander en la Cordillera

Oriental de los Andes Colombianos, y la Falla del Suárez – Río de Oro por el W y NW de la plataforma de Lebrija.

4.1.2 Inventario de aguas subterráneas

Los inventarios permiten tener acceso a la información disponible de un tema en particular, en este caso, sirve para tener conocimiento ordenado de la información perteneciente a los puntos de captaciones de agua subterránea.

Rodríguez y Torres (2011) identificaron 126 puntos de agua subterránea localizados en el Acuífero Superficial y Acuífero Profundo de Bucaramanga, Formación Girón y el acuífero Ígneo- Metamórfico (Neis). Estos puntos se dividen en pozos profundos, cisternas, manantiales, piezómetros e indefinidos (Tabla 4.1). De estos se estableció que 39 son lavaderos de vehículos, 4 captaciones las utilizan para uso industrial y 28 son de uso doméstico y riego.

Tabla 4.1 Listado total de captaciones inventariadas. (Rodríguez y Torres, 2011)

Tipo de Captación	Número
Pozos profundos	33
Cisternas	24
Manantiales	8
Piezómetros	48
Indefinido	13
Total	126

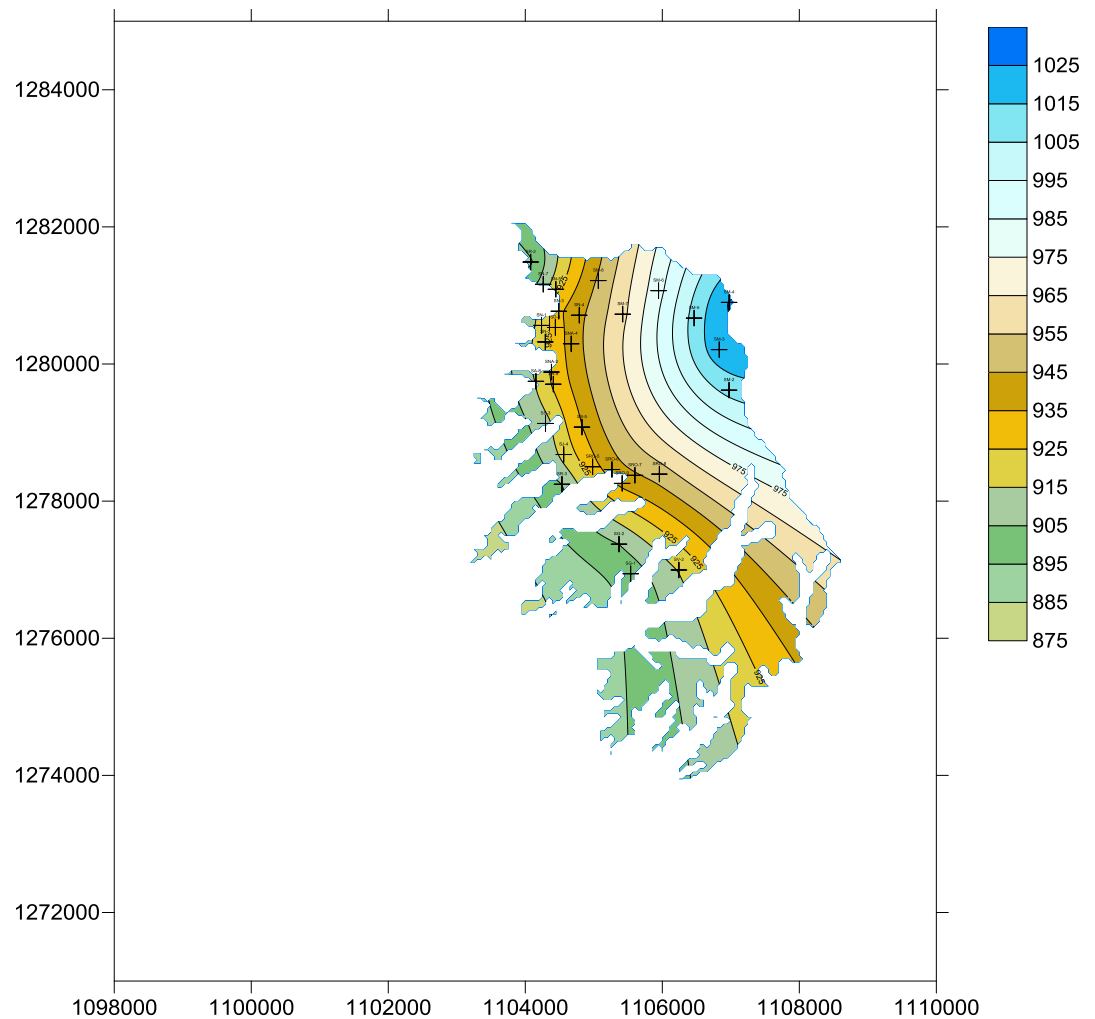
ara el total de los 126 puntos de agua subterránea, se encontró que 62 puntos poseen información de niveles freáticos, 88 de cota del terreno, 16 de litología, 29 datos sobre caudales (para las captaciones). En 24 se realizaron pruebas de bombeo y en 23 de estas se conoce la duración de la misma.

4.1.3 Niveles piezométricos

La Corporación Autónoma Regional para Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB ejecutó un proyecto de medición de niveles piezométricos en toda la escarpa de Bucaramanga con el objetivo de estudiar la relación entre las aguas subterráneas y los problemas de erosión presentados durante la década de los 80 (Ingeniería de Suelos, Sep. 1991). La lista de los piezómetros utilizados en este proyecto se muestra en el Anexo 9. La época de medición fue desde Enero de 1984 hasta diciembre de 1987.

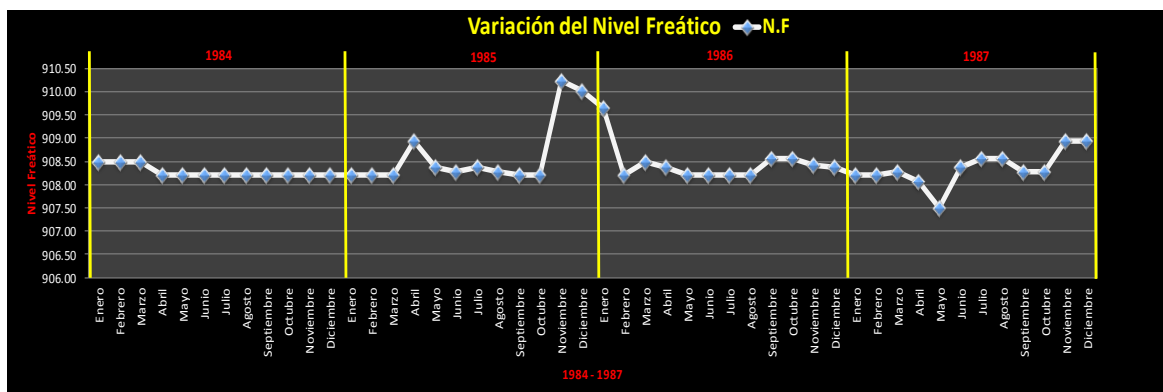
En la figura 4.2 se observa la espacialización de la piezometría para el mes de Julio de 1986. Los valores de niveles freáticos de estos puntos fueron tomados como valores de calibración para el modelo numérico en estado permanente debido a que estos valores representan aproximadamente el estado permanente para los niveles mínimos.

Figura 4.2 Isopiezas Julio de 1986 para el acuífero superficial



Se realizó también un análisis de la variación del nivel freático para cada piezómetro instalado, como se muestra en la figura 4.3, encontrándose una variación máxima entre valores de un rango de 2 a 3m.

Figura 4.3 Variación del nivel freático para el piezómetro SRO-9 entre 1984 y 1987



Existen además otras mediciones continuas de niveles freáticos mediante el uso de CTD Divers en algunos pozos como La Flora y Pan de Azúcar. Estos datos corresponden para algunos meses entre los años 2009 y 2011.

Durante el mes de julio de 2011 se midieron niveles piezométricos para el acuífero superficial y el acuífero profundo (Rodríguez y Torres, 2011) de donde se obtuvieron gráficos de isopiezas y gradientes hidráulicos aproximados. Estos datos son los usados en el capítulo 5 para la calibración de uno de los periodos de estrés.

4.1.4 Clima. El Área Metropolitana de Bucaramanga está afectada fuertemente por la Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT) y presenta un ritmo anual en la temperatura que influye en las precipitaciones con un ritmo bimodal con picos altos en los meses de marzo - abril, y en los meses octubre – noviembre de acuerdo con el clima tropical (Lazar, 2001).

El clima de la zona está definido por dos factores: la orografía y los vientos alisios. De las regiones adyacentes vienen los persistentes vientos alisios, las corrientes del océano atlántico circulan por algunos valles, llegando finalmente a afectar en

cierta medida la región andina, con algunas lluvias de tipo orográfico, las cuales no son tan fuertes pues los vientos chocan con la barrera natural de los andes y no llegan con el mismo ímpetu (Lazar, 2001). Por otro lado, las corrientes provenientes en dirección, de la selva amazónica, provocan altas precipitaciones pues traen consigo aire húmedo que alcanza una altura apta por el piedemonte llanero, para que se produzcan las lluvias también de tipo orográfico (Castro y Leal, 1998).

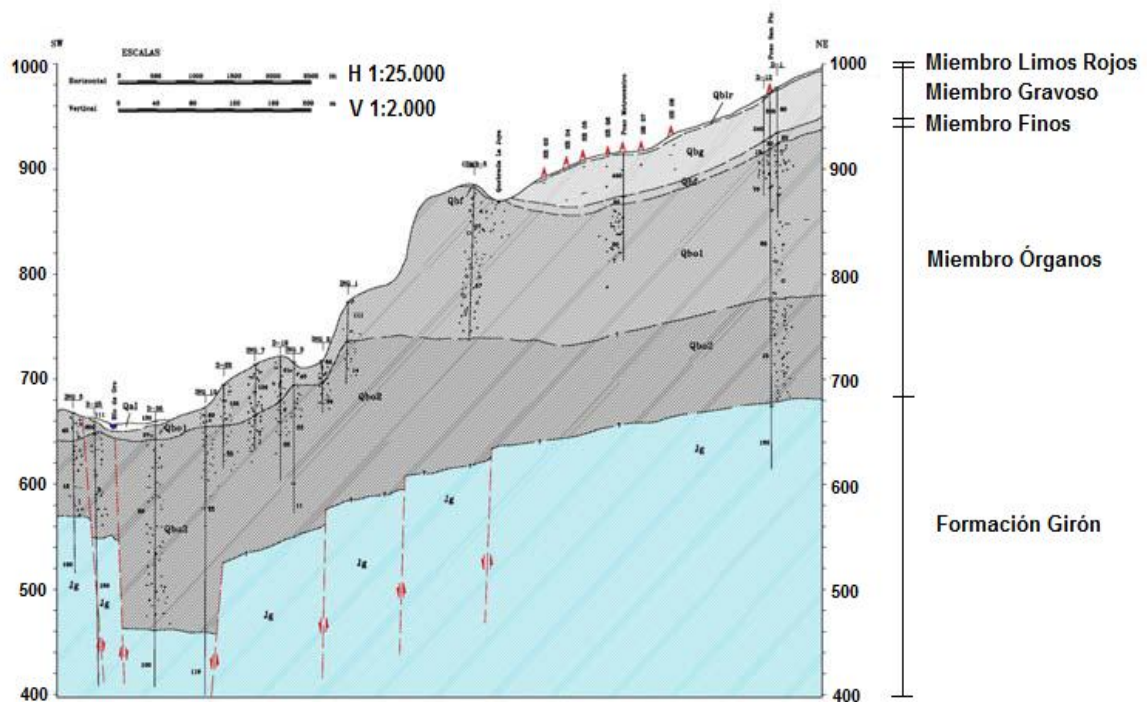
Dentro del Área Metropolitana de Bucaramanga se presentan fenómenos tales como las inversiones térmicas (Lazar, 2001) lo cual puede generar congestiones ambientales debidas a las emisiones de gases industriales a la atmósfera, puesto que los movimientos tanto horizontales como verticales del aire dentro de las inversiones térmicas son muy débiles, casi hasta nulos, evitando la adecuada dispersión de la contaminación industrial, cabe decir que partículas en el aire se convierten en núcleos de condensación y facilitan la precipitación.

4.1.5 Unidades hidrogeológicas. En el área de estudio se pueden distinguir principalmente dos grandes unidades hidrogeológicas: el Acuífero Superficial, el cual se nombrará en adelante **U_s** (conformado por el Miembro Gravoso de la Formación Bucaramanga), y el Acuífero Profundo, cuyo símbolo será **U_p** (caracterizado por el Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga). Por otra parte, se habla de unidades hidrogeológicas con posibilidades de acuíferos debidas a la porosidad secundaria en las zonas asociadas a rocas fracturadas y meteorizadas del Jurásico y Precámbrico (Formaciones Girón, Jordán Cuarzomonzoníta y Neis de Bucaramanga) (INGEOMINAS, 2004).

Las unidades geológicas Miembro Finos **U_f** de la Formación Bucaramanga y la Formación Girón **U_G**, son las que actúan como unidades hidrogeológicas aproximadamente impermeables, es decir, sirven de basamento para el Acuífero Superficial y Profundo respectivamente (Figura 4.4). Aunque no se puede

descartar la posibilidad de que el Miembro Finos de la Formación Bucaramanga actúe como un acuitardo.

Figura 4.4 Corte geológico del Área Metropolitana de Bucaramanga SW-NE (Tomado de INGEOMINAS, 2004).

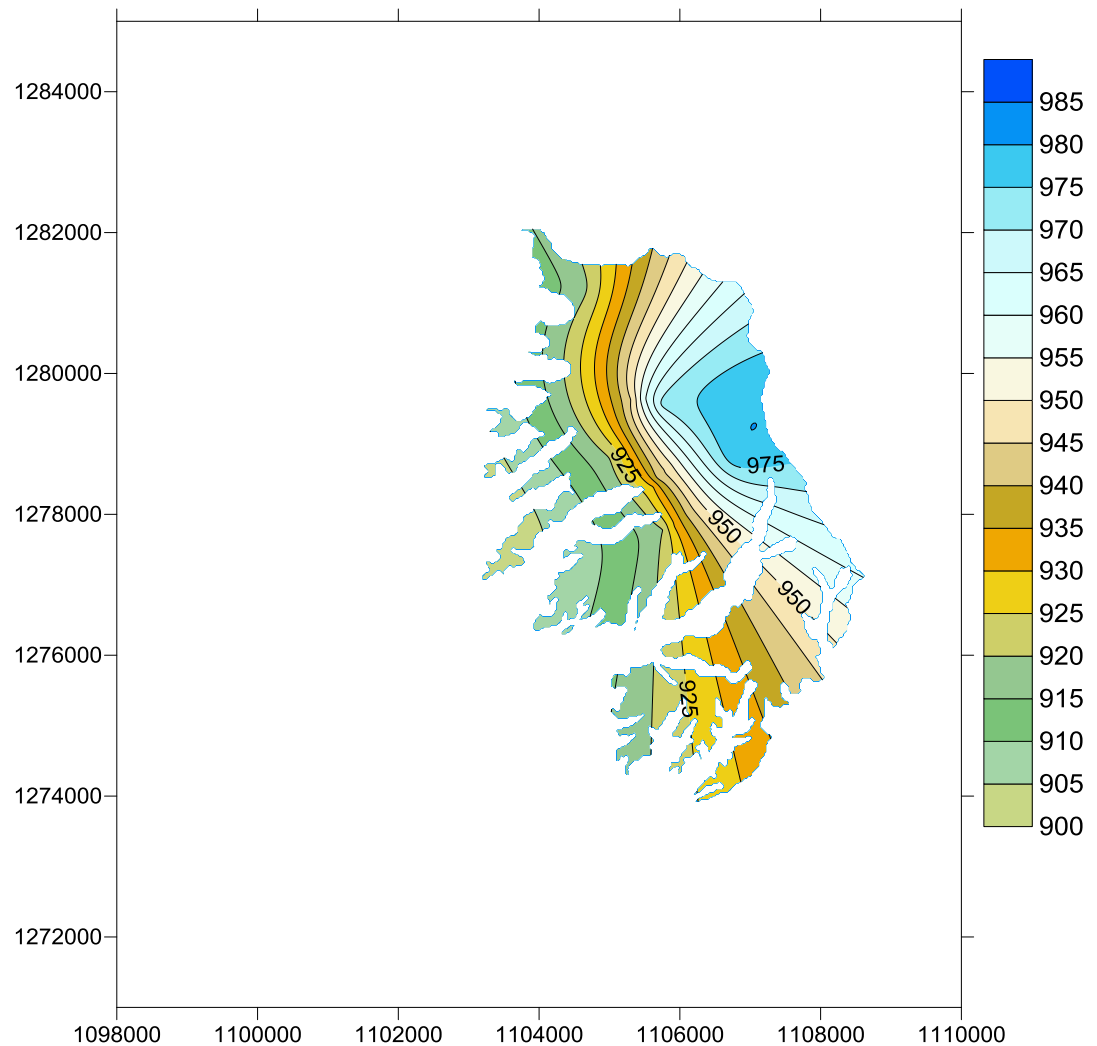


El Acuífero Superficial es una formación geológica de tipo aluvial que tiene un espesor variable entre 8 y 30m, presenta niveles gravosos, gravoarenosos y gravolodosos. Los cantos son en promedio de 15cm de diámetro en matriz areno-arcilla-limosa, estos cantos están compuestos en su mayor parte por rocas metamórficas-ígneas del Macizo de Santander, areniscas cuarzosas, areniscas limosas y limolitas de las Formaciones Girón y Jordán (INGEOMINAS, 2001).

Para el acuífero superficial, que está definido por el Miembro Gravoso de la Formación Bucaramanga, se realizó un mapa de isopiezas (Figura 4.5) a partir de los puntos verificados en el 2011, los cuales se listan en la tabla 5.6.

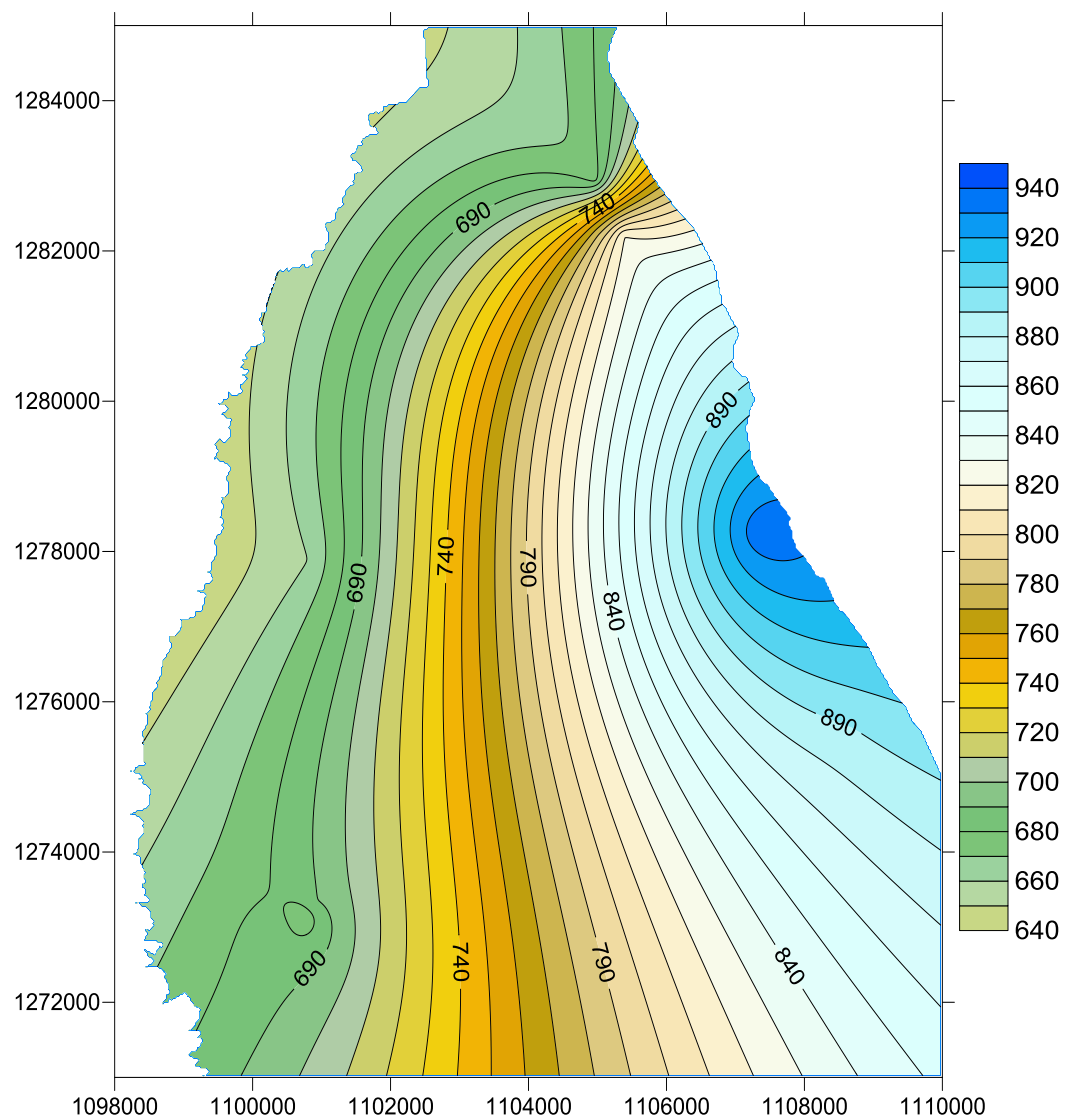
En el mapa de isopiezas para el acuífero superficial, se puede observar que el gradiente hidráulico tiene un sentido oriente-occidente con un valor aproximado del 2%.

Figura 4.5 Isopiezas Julio de 2011 para el Acuífero Superficial. (Modificado de Rodríguez y Torres, 2011).



De igual manera, se hizo un mapa de isopiezas (Figura 4.6) para el acuífero profundo (definido por el Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga) a partir de los puntos verificados en campo en el 2011. Estos valores se muestran en la tabla 5.6.

Figura 4.6 Isopiezas Julio de 2011 para el Acuífero Profundo. (Modificado de Rodríguez y Torres, 2011).



De la misma forma que para el Acuífero Superficial, los datos para la interpolación de las isopiezas en el Acuífero Profundo se ajustaron mejor al método de interpolación lineal. Este mapa muestra un gradiente hidráulico oriente-noroccidente, como buscando el sentido del drenaje superficial para el Río de Oro y Suratá, donde éstos dos confluyen. El valor aproximado de este gradiente es del 4%.

4.1.5.1 Características hidráulicas de los acuíferos

En el área de estudio se han realizado diferentes pruebas de bombeo, las cuales dan información de las características hidráulicas de los acuíferos como la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento. Los pozos donde se han realizado dichas pruebas de bombeo son: La Flora, Somascos, Pan de Azúcar y Metrocentro en la década de los 70's. El resumen de los parámetros obtenidos en dichas pruebas se consigna en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Resultados de pruebas de bombeo en el Área Metropolitana de Bucaramanga

Ubicación	Acuífero	Parámetros Obtenidos		Autor
Parque La Flora	Colgado	Pozo 1	T = 0,051 m ² /d S = 0,117	Mario Barrera y Diego Ruiz, 2011
	Superficial	Pozo 2	T = 0,070 m ² /d S = 0,202	
Pan de Azúcar	Ígneo-Metamórfico	Pozo 1 (Prof.)	T = 10,2 m ² /d S = 0,000225	
		Pozo 2 (Sup.)	T = 7,9 - 12,5 m ² /d S = 0,0001	
		Pozo 1	T = 21,69 m ² /d	Informe de PyP, 1991.
Zona Norte	Profundo	Pozo 1	T = 0,6588 m ² /d S = 0,1601	
		Piezómetro	T = 8,17 m ² /d S = 0,007011	
Metrocentro (Éxito centro)	Profundo	Pozo 1	T = 26,1 m ² /d S = 0,00611	Informe de perforación ETA, 1979

4.1.6 Hidrodinámica. Estudios recientes a partir de geoquímica e isotopía (Gómez, S, Taupin, J y Rueda, J, 2013), sugieren que hay flujo subterráneo desde el Macizo de Santander hacia los acuíferos aluviales de la Formación Bucaramanga, facilitado este por la zona de falla Bucaramanga-Santa Marta. Además que el acuífero freático (o acuífero superior) parece sufrir localmente una contaminación posiblemente por el sistema de acueducto, ya que presenta anomalías de conductividad eléctrica en los iones Cl y SO₄.

Por otra parte, los resultados de estudios isotópicos con Tritio y Carbono 14 sugieren que las aguas del acuífero superficial son más nuevas que las del acuífero profundo, lo cual infiere pensar en la necesidad de protección del acuífero superficial y en un manejo razonable del acuífero profundo.

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 confinante. En cuanto al acuífero profundo, se podría sugerir que es un acuífero semi-confinado a confinado, ya que el Miembro Órganos donde se ubica dicho acuífero, suprayace al Miembro Finos, catalogado éste último con una conductividad hidráulica muy baja. Las pocas pruebas de bombeo realizadas en la región son de 24 a 36 horas. Y no utilizaron pozo de observación, por lo tanto los valores del coeficiente de almacenamiento son valores aproximados.

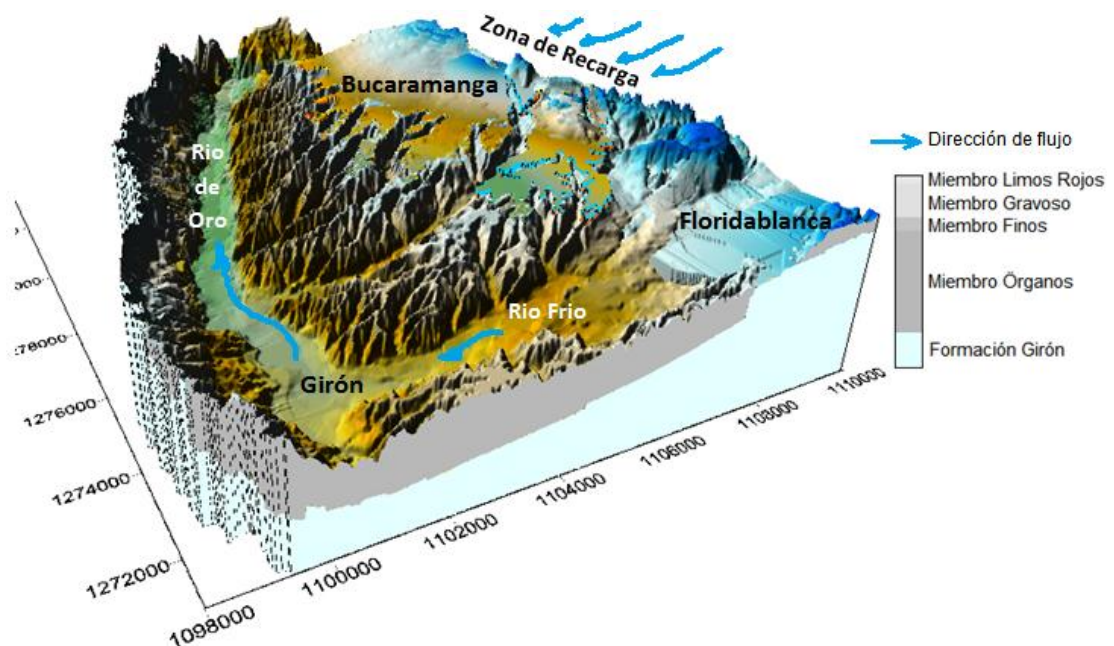
4.1.6.1 Modelos esquemáticos

Para sintetizar toda la información hidrogeológica que se tiene acerca de los acuíferos, es conveniente expresarla por medio de modelos esquemáticos que representen la idea básica de cómo opera dicho sistema acuífero. Para este propósito se usan los cortes o secciones transversales y los bloque-diagramas. A

continuación se muestran los modelos esquemáticos descriptivos del modelo hidrogeológico conceptual.

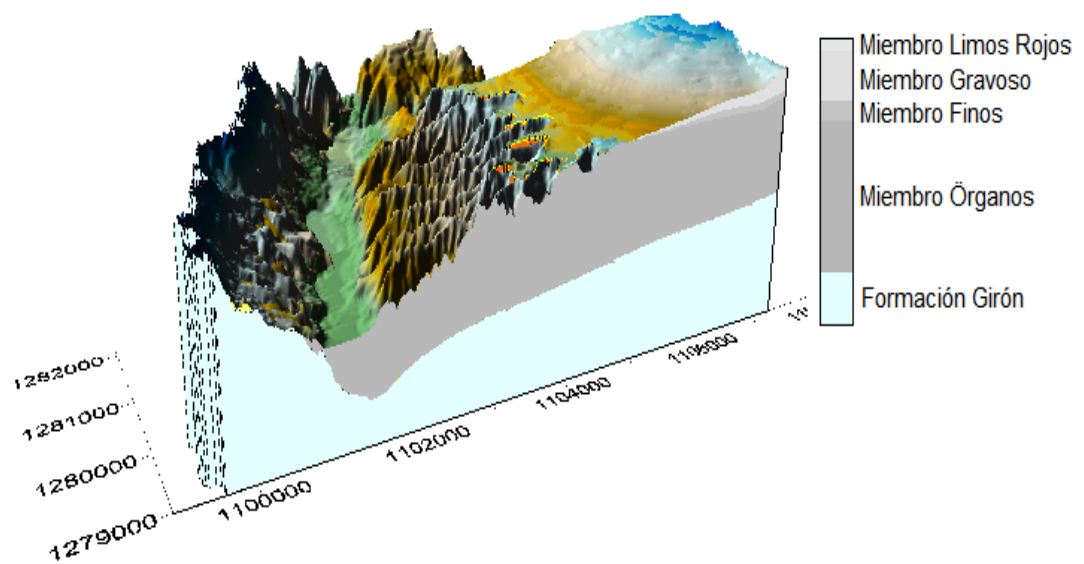
4.1.7 Bloque-diagramas. El comportamiento de los acuíferos del área de estudio está fuertemente influenciado por la geología y tectónica de la zona así como por la fisiografía del lugar (Figura 4.7). En la parte oriental se encuentra el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta conformado por rocas ígneas y metamórficas fracturadas, las cuales debido a su porosidad secundaria conforman una zona de acuíferos, que permite la circulación del agua desde el Macizo de Santander. Hacia la zona occidental se encuentra la Falla del Suarez que corresponde a la conformación del valle del Rio de Oro. Debido a la fisiografía del lugar, se forman canales naturales que favorecen el flujo superficial de los ríos y quebradas que bordean la zona en sentido oriente a occidente.

Figura 4.7 Bloque-diagrama del área de estudio



Las zonas de acuíferos son principalmente de dos tipos: uno, el que corresponde a la zona de contacto entre el abanico aluvial de Bucaramanga y el sistema de cadenas montañosas conocidas como el Macizo de Santander y conforman los acuíferos de porosidad secundaria debido al fracturamiento de la rocas ígneas-metamórficas. Dos, el abanico aluvial de Bucaramanga que contiene al acuífero superficial y profundo conformados estos por el Miembro Gravoso y Órganos respectivamente, llamados acuíferos aluviales caracterizados por tener porosidad primaria. (Figura 4.8).

Figura 4.8 Bloque-diagrama de las zonas de acuíferos

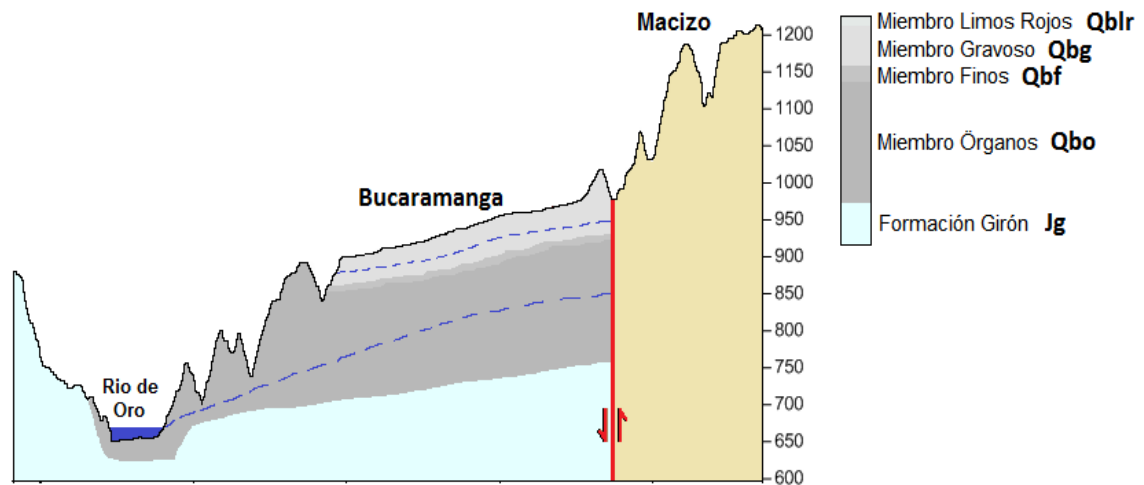


La recarga de estos acuíferos proviene principalmente de la zona del Macizo de Santander entre las elevaciones 1800 y 2200 msnm. El proceso se da por la infiltración de las aguas precipitadas en las alturas anteriormente nombradas y el flujo de agua subterránea se facilita por el fracturamiento del macizo hasta llegar a los acuíferos (Gómez y Anaya, 2004).

4.1.7.1 Sección transversal

Las cabezas hidráulicas que se pretenden modelar en este trabajo corresponden a las generadas por el acuífero superficial y el acuífero profundo (Figura 4.9). El nivel freático del acuífero superficial, según mediciones de los piezómetros usados en la década de los 80's, puede encontrarse entre 6 y 20 metros dependiendo del lugar donde se mida. Los niveles piezométricos del acuífero profundo varían considerablemente de acuerdo al sitio de medición, encontrándose en cercanías de la superficie hacia el valle del Rio de Oro y a mayor profundidad en la zona de la Meseta.

Figura 4.9 Sección transversal Este-Oeste



Es importante aclarar que el Miembro Finos actúa como basamento para el acuífero superficial sin embargo no se puede descartar la posibilidad de que este pueda ser una capa semipermeable que tenga características de un acuitardo. Análogamente la Formación Girón actúa como basamento para el acuífero profundo pero en sectores hacia el sur de la zona de estudio, como es Cañaveral (donde aflora) se puede apreciar el contenido de agua entre sus fracturas.

5. MODELO NUMÉRICO

Introducción

En este capítulo se muestra el procedimiento de formulación del modelo numérico del flujo de agua subterránea en las formaciones acuíferas de Bucaramanga a partir de la información disponible consignada en el Modelo Conceptual, de igual manera se muestran los resultados obtenidos. La modelación se siguió usando el código MODFLOW en la plataforma Groundwater Vistas v.5 suministrado por Environmental Simulations Incorporated – ESI.

5.1 Diseño del Modelo

5.1.1 Grilla. El área de interés está enmarcada en las coordenadas 1.098.000 y 1.110.000 W y 1.271.000 y 1.285.000 N, según la cartografía básica a escala 1:25.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia – IGAC. Inicialmente se planteó una malla de 25mx25m pero el modelo quedaba muy denso, finalmente se definieron celdas de 50mx50m que corresponden a 240 columnas y 280 filas, lo que da un total de 67200 celdas.

La discretización vertical se hizo con base en el modelo tridimensional de capas geológicas. Se definieron 4 capas de techo a base: la capa 1 corresponde al Miembro Limos Rojos de la formación Bucaramanga, el techo de dicha capa se define con la topografía del terreno y la base con el nivel superior del Miembro Gravoso. La capa 2 está definida por el Miembro Gravoso correspondiente al acuífero superficial y la geometría de su base coincide con el nivel superior del Miembro Finos. En la capa 3 se encuentra el Miembro Finos quien actúa como basamento del acuífero colgado del Miembro Gravoso. Para las tres capas nombradas anteriormente se definió una geometría en planta correspondiente al límite del Miembro Finos. Finalmente, la capa 4 corresponde al Miembro Órganos de la formación Bucaramanga donde se encuentra el acuífero profundo, su techo está definido por el nivel inferior del Miembro Finos y su base por el nivel superior

de la Formación Girón, donde ésta última actúa como basamento para la capa suprayacente. Ver tabla 5.1.

5.1.2 Condiciones iniciales y de frontera. La condición inicial del modelo corresponde a la superficie topográfica del modelo y a las diferentes capas en escala 1:25.000 con una resolución de 50m.

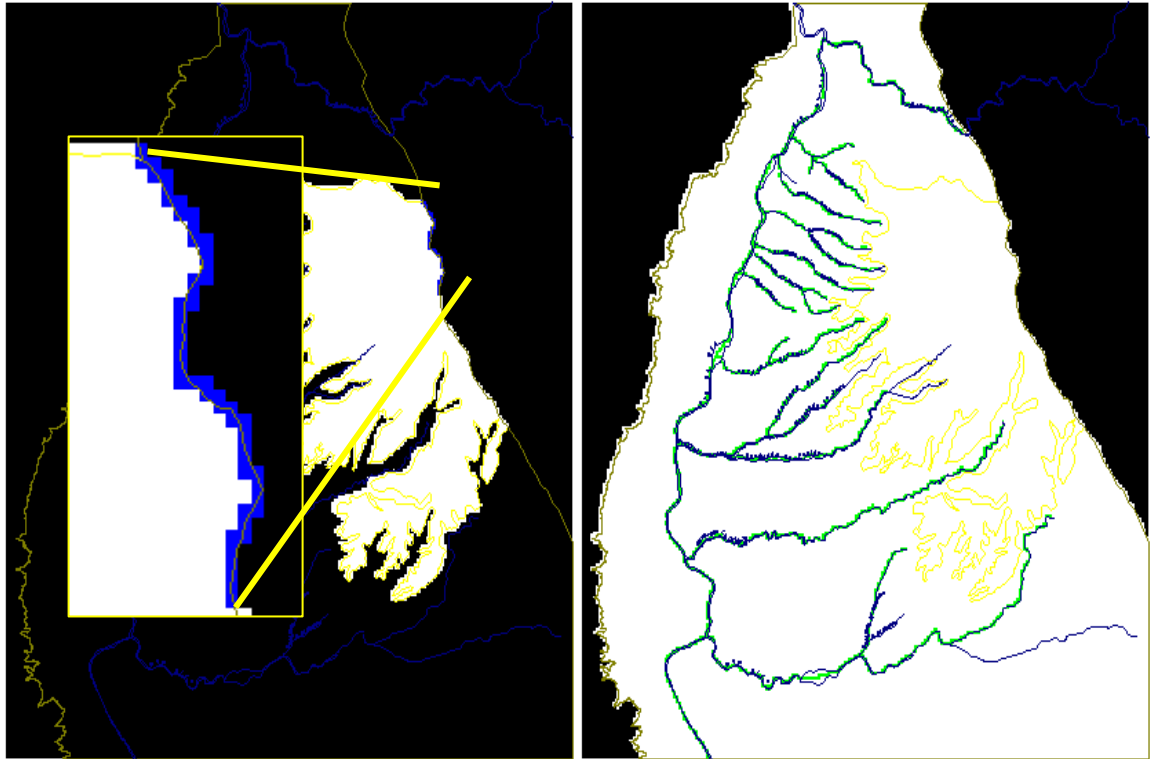
Las condiciones de frontera que se usan en el modelo son: – No Flow – lugares donde no existe flujo o barreras consideradas impermeables, – Constant Head – flujos donde está definida la altura de agua o la equivalencia en cabeza y – River – para simular las corrientes de agua. El ingreso de algunas de éstas se realizó usando el software Surfer y las otras de forma manual. El resumen del uso de las condiciones de frontera se lista en la Tabla 5.1 y la visualización de las mismas en la Figura 5.1.

Tabla 5.1 Resumen de las condiciones de frontera

Unidad	Condiciones de Frontera		
	No Flujo	Río	Cabeza Constante
Capa 1	Se define el área por fuera de la geometría en planta del Miembro Finos.	*NA	*NA
Capa 2	Se define el área por fuera de la geometría en planta del Miembro Finos.	*NA	En la franja derecha, en la zona de Falla, para simular la recarga de los acuíferos. Tiene valor constante en el tiempo pero variable en el espacio.
Capa 3	Se define el área por fuera de la geometría en planta del Miembro Finos.	*NA	*NA
Capa 4	Corresponde al sector comprendido por la margen izquierda del Río de Oro y por la franja derecha de la Falla Bucaramanga-Santa Marta	Se tomó la superficie del terreno más 1m para las cabezas de los ríos y quebradas importantes.	*NA

*NA: No Aplica+

Figura 5.1 Condiciones de frontera Rio (líneas azules), NO Flujo (celdas en negro) y Cabeza Constante (celdas azules) para las capas 2 y 4 respectivamente



5.1.3 Parámetros semilla del modelo. Inicialmente las propiedades hidráulicas de los acuíferos se tomaron de las pruebas de bombeo realizadas en la zona. La primera fue la del pozo Metrocentro, ubicado éste en donde actualmente se encuentra el Éxito central, y las otras realizadas por estudiantes de la Universidad Industrial de Santander en los sectores Norte (Padres Somascos) y Oriente (La Flora) de la zona de estudio. Los valores de conductividades hidráulicas se calcularon a partir de las transmisividades obtenidas y los espesores saturados calculados a partir del modelo geológico tridimensional. El resumen de los valores iniciales de conductividades y coeficientes de almacenamiento se consigna en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Resumen de parámetros iniciales.

Parámetro		Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4
Conductividad Hidráulica	Kx	0,9 m/d	1,3 m/d	0,001 m/d	2,3 m/d
	Kz	0,1	0,1	0,01	0,1
Coeficiente de Almacenamiento		0,202	0,202	0,0001	0,007011

5.2 Ejecución del modelo numérico

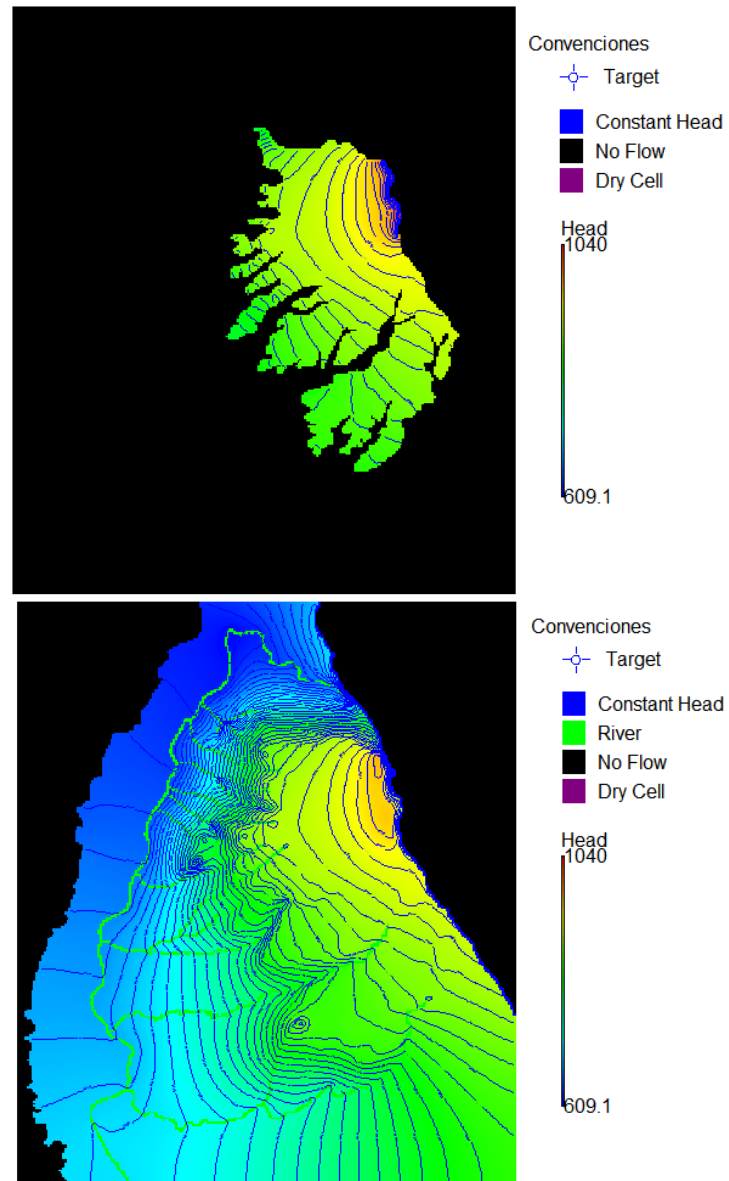
5.2.1 Resultados preliminares. Las primeras corridas del modelo, llamada modelación tipo exploratoria, busca identificar la sensibilidad del modelo al cambio de diferentes parámetros, así como la necesidad de refinar o editar la malla, editar o cambiar la condiciones de frontera, redefinir los parámetros semilla e incluso modificar el modelo conceptual.

Se redefinieron celdas de 50mx50m, seguidamente se incorporaron condiciones de borde de cabeza constante para el acuífero superficial y el profundo, así como fronteras tipo River solo para los principales ríos de la zona de estudio (Rio Frio, Rio de Oro y Suratá). Esto mostró la necesidad de incorporar también las principales quebradas de la zona que sirven como drenes naturales. Los resultados preliminares se muestran en la figura 5.2.

Allí se observa como en el acuífero superficial las isopiezas se encuentran muy cercanas unas a otras en la zona de recarga y muy separadas hacia el occidente donde termina la escarpa. Esto indica la necesidad de incluir nuevas zonas con conductividades hidráulicas diferentes y en forma decreciente de oriente a occidente. En el acuífero profundo se observó la interactividad del acuífero con el

sistema de drenaje natural, ya que las isopiezas se unían con las cabezas hidráulicas de las quebradas.

Figura 5.2 Resultados de la modelación exploratoria. Layer 2 y Layer 4

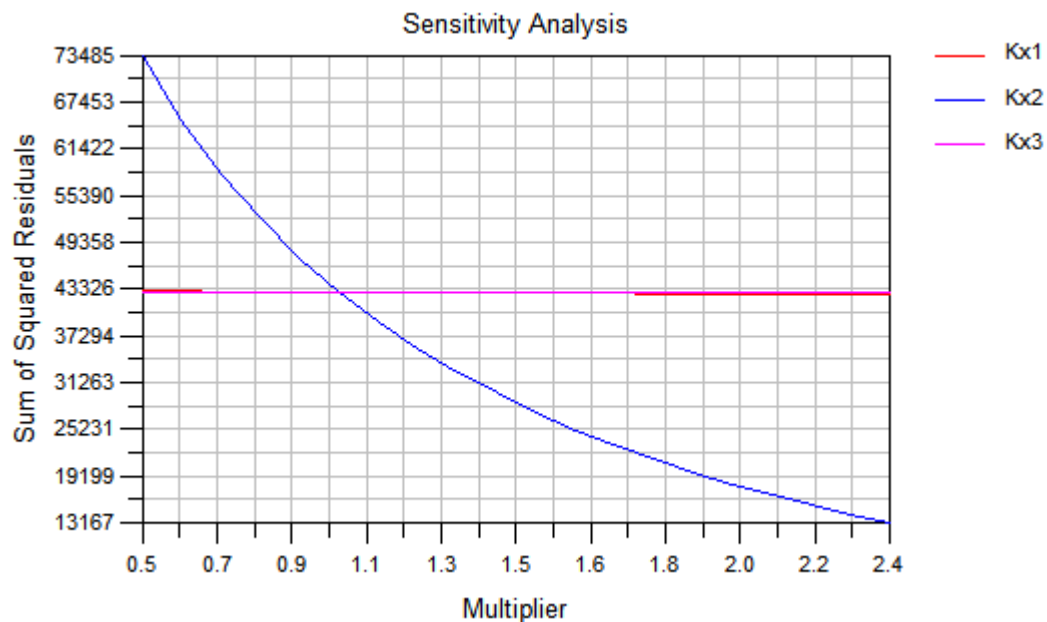


5.2.2 Análisis de sensibilidad

La plataforma Groundwater Vistas contiene una herramienta muy útil llamada “Auto Sensitivity”, la cual toma un valor cualquiera, ya sea de las características

del acuífero o de las condiciones de frontera, y los multiplica por factores editables a disposición del modelador para comparar los resultados con los Targets cargados. Se tomaron 20 factores multiplicativos empezando desde 0,5 y llegando hasta 2,5 aumentando cada 0,1. Este análisis también mostró como los valores de conductividad hidráulica debían ser redefinidos para las diferentes capas del modelo (Figura 5.4)

Figura 5.3 Resultados del análisis de sensibilidad preliminar para conductividades hidráulicas



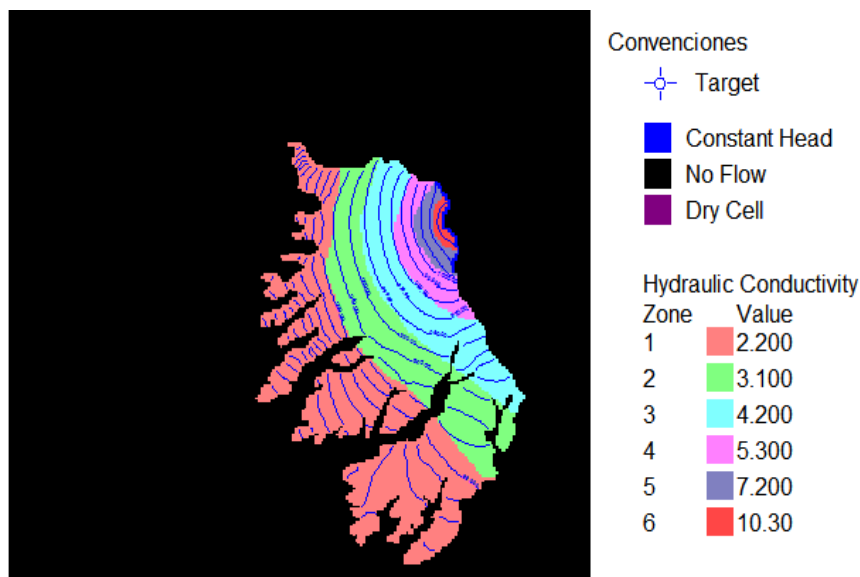
La forma de interpretar la gráfica de la figura 5.3 es que, si las curvas de la suma de residuales cuadrados se aproxima a cero empezando desde el origen de coordenadas, el valor de las conductividades es el que hace que el modelo converja de la mejor manera. De lo contrario, como se observa en la figura 5.3, se debe redefinir los valores de conductividad que es el proceso de calibración.

5.2.3 Ajuste del modelo. De acuerdo a los resultados observados en la etapa exploratoria, se identificó la necesidad de redefinir zonas de conductividades

hidráulicas, principalmente para el Miembro Gravoso y el Miembro Finos, que son los layers 2 y 3 respectivamente. Para realizar este proceso con sentido físico, se tuvo en cuenta que la Meseta de Bucaramanga es un abanico aluvial, lo cual quiere decir que las depositaciones con mayor tamaño granulométrico se encuentran en la zona de entrada del flujo y las menores en la zona del borde de la depositación. Esto en términos hidrogeológicos quiere decir que se espera que haya mayores conductividades hacia el oriente de la meseta y e menores hacia el occidente donde termina la escarpa.

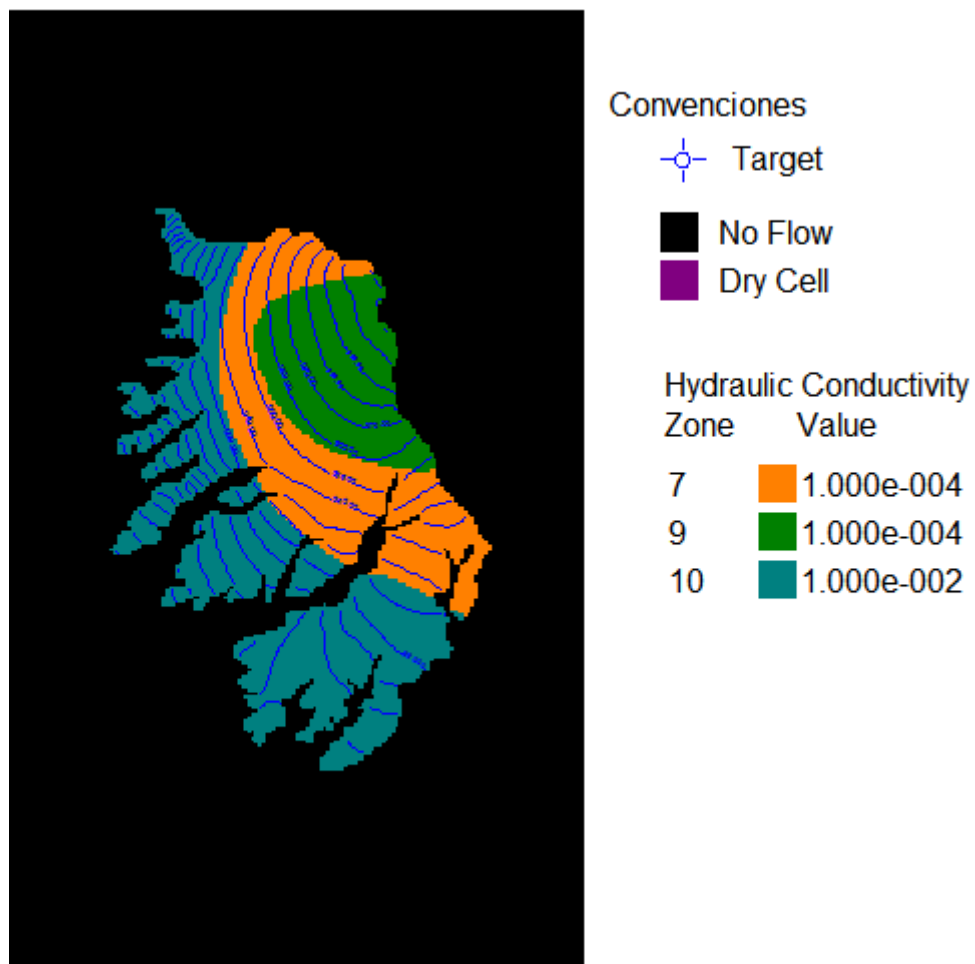
En la figura 5.4 y 5.5 se observa la definición de las nuevas zonas de conductividades para el acuífero superficial y para el Miembro Finos, respectivamente. Para la definición inicial de estos valores se tuvo en cuenta los resultados de las pruebas de bombeo expuestas en el capítulo 4 y las consignadas en la literatura científica, también se tuvo en cuenta los valores expuestos en el informe de la CDMB de 1991 que era el estado del conocimiento de las aguas subterráneas para ese entonces.

Figura 5.4 Zonas de conductividad hidráulica horizontal para el acuífero superficial (layer 2).



Para el Miembro Finos, el análisis de los resultados preliminares arrojó una sensibilidad alta en cuanto a los valores de conductividad hidráulica vertical, con lo que se debió redefinir nuevas zonas para el layer 3. Los valores de conductividad para este layer se iniciaron teniendo en cuenta que es un Miembro arcilloso y por lo tanto tiene características de permeabilidad relativamente bajas. En la figura 5.5 se muestra la variación de las zonas de conductividad.

Figura 5.5 Zonas de conductividad hidráulica horizontal para el Miembro Finos (layer 3).



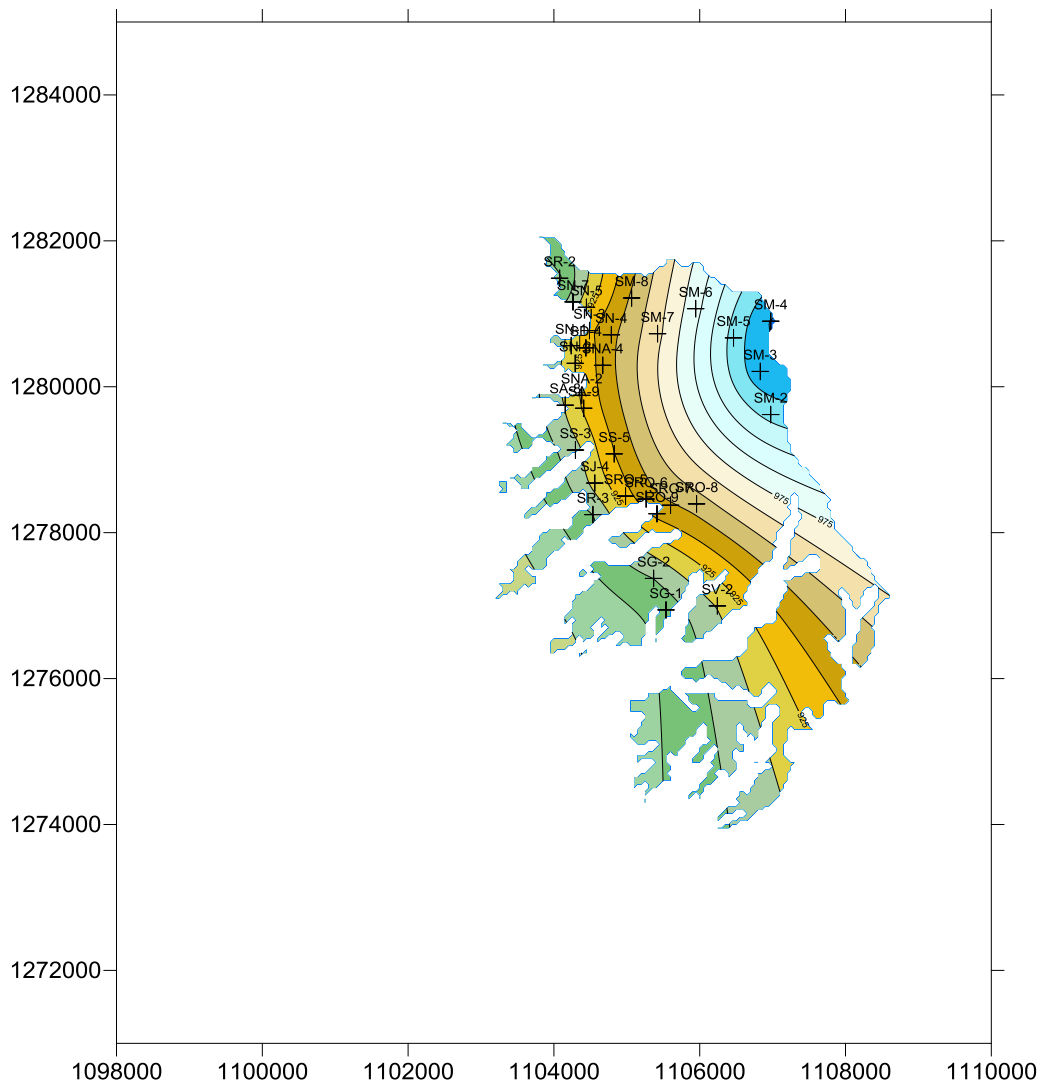
Para las fronteras tipo River se adoptó el lecho de las corrientes como la superficie topográfica, se tomó una conductancia de 10m/d (para representar que es muy permeable) y la cabeza como 1m arriba del lecho de cada corriente.

La cabeza constante, que representa la recarga de los acuíferos, se ubicó en la zona alta oriental con un valor constante en el tiempo pero variable en el espacio. Los valores se obtuvieron de la espacialización de los niveles freáticos en Surfer y digitalizados allí mismo.

5.2.4 Calibración en estado permanente

El proceso de calibración se siguió usando los valores de los niveles piezométricos de julio de 1986, ya que en este periodo de tiempo el acuífero se encontraba menos afectado y se tenía mejor continuidad en los datos. Se usaron en total 33 puntos, donde 31 pertenecen al acuífero superior y 2 al profundo. En la figura 5.6 se observa la ubicación de los targets.

Figura 5.6 Ubicación de targets para el acuífero superior.

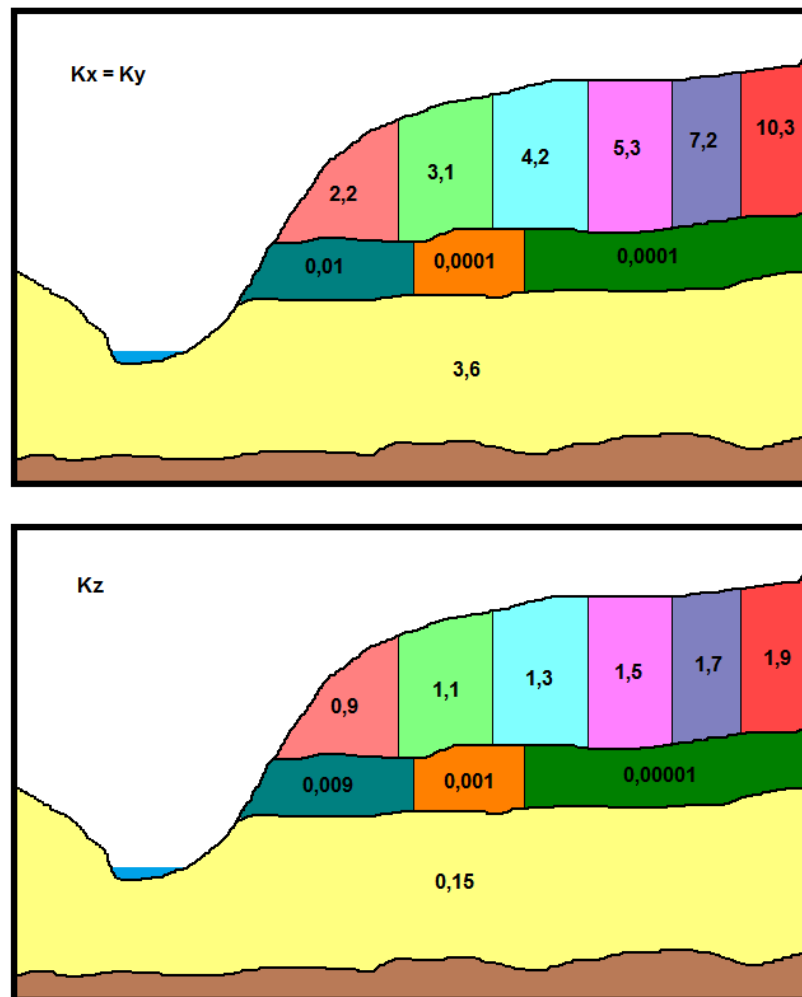


El proceso de calibración consistió en variar los parámetros hidráulicos de los acuíferos y capas confinantes para obtener de manera satisfactoria los valores de cabezas observados (targets). Se consideró que para una diferencia de cabeza de menos de un metro, la variación del parámetro está calibrada.

Los parámetros que se variaron fueron las conductividades hidráulicas de las diferentes capas del modelo, se mantuvieron constantes los valores de los

coeficientes de almacenamiento considerándolos como uniformes en cada layer. En la figura 5.7 se muestra el esquema definitivo de los valores de conductividad hidráulica horizontal y vertical para cada capa.

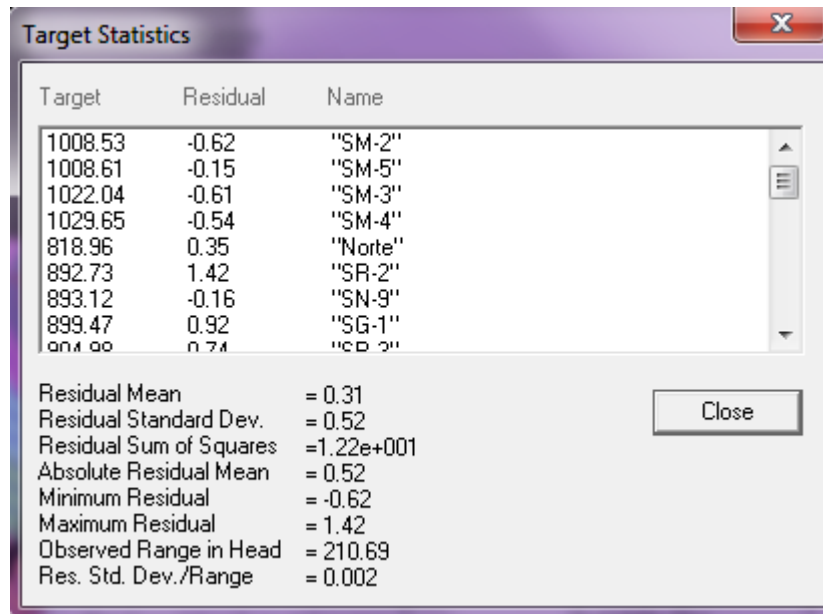
Figura 5.7 Valores de conductividades hidráulicas horizontales y verticales, respectivamente



El GV contiene una herramienta para verificar estadísticamente la variación entre los valores observados y los valores arrojados por el modelo. Los resultados de los residuals (diferencia entre el valor observado y el valor del modelo), su desviación estándar, la suma de sus cuadrados, la media absoluta, el mínimo residual y el máximo residual se observan en la figura 5.8. La forma de interpretar

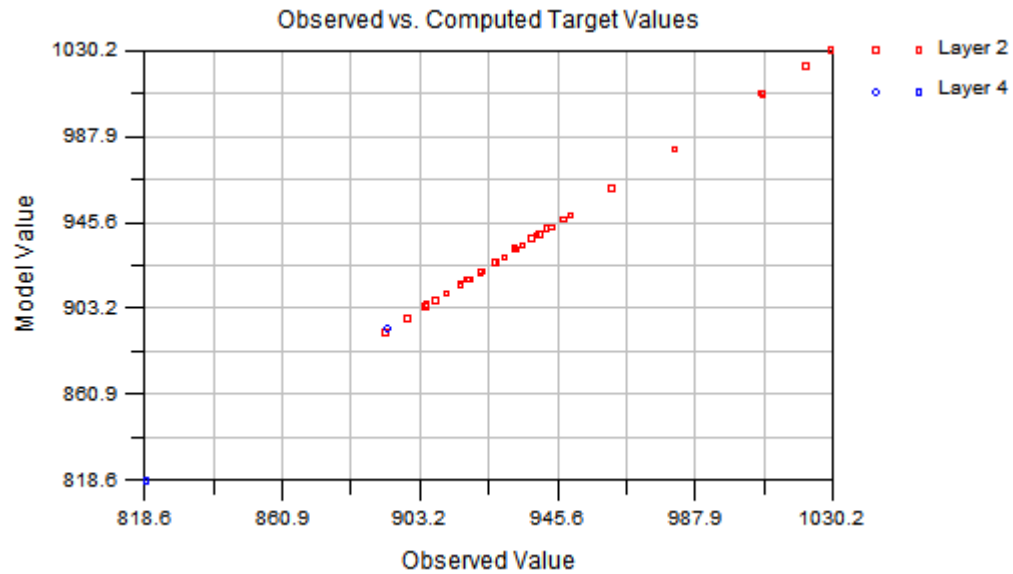
estos resultados es que cuando la media residual se acerca a cero, la correlación es mejor. En este caso fue de 0.31.

Figura 5.8 Estadísticas de calibración



Otra manera de ver los resultados de la calibración es graficar los valores observados vs los valores arrojados por el modelo. Para interpretar esta grafica (Figura 5.9), se debe tener en cuenta que cuanto los puntos se comporten de forma más lineal, los resultados del modelo representan de la mejor manera los observados.

Figura 5.9 Grafica de valores observados vs valores del modelo.



En la tabla 5.3 se listan de manera detallada los targets usados para el modelo y los valores residuales, considerados éstos últimos como óptimos para valores menores de 1m. Es necesario anotar que los valores debieron ser ajustados para que quedaran referenciados al Modelo Digital de Elevaciones en escala 1:25.000.

Tabla 5.3 Resumen de targets y valores residuales para el estado permanente.

Punto	Este	Norte	Target	Modelo	Residual
SM-2	1106974	1279619	1008.53	1009.15	-0.62
SM-3	1106831	1280210	1022.04	1022.65	-0.61
SM-5	1106464	1280670	1008.61	1008.76	-0.15
SRO-8	1105957	1278394	949.52	949.12	0.40
SM-7	1105422	1280727	962.34	962.56	-0.22
SM-6	1105945	1281070	981.49	981.56	-0.07
SM-8	1105066	1281217	947.57	947.2	0.37
SR-3	1104535	1278247	904.98	904.24	0.74

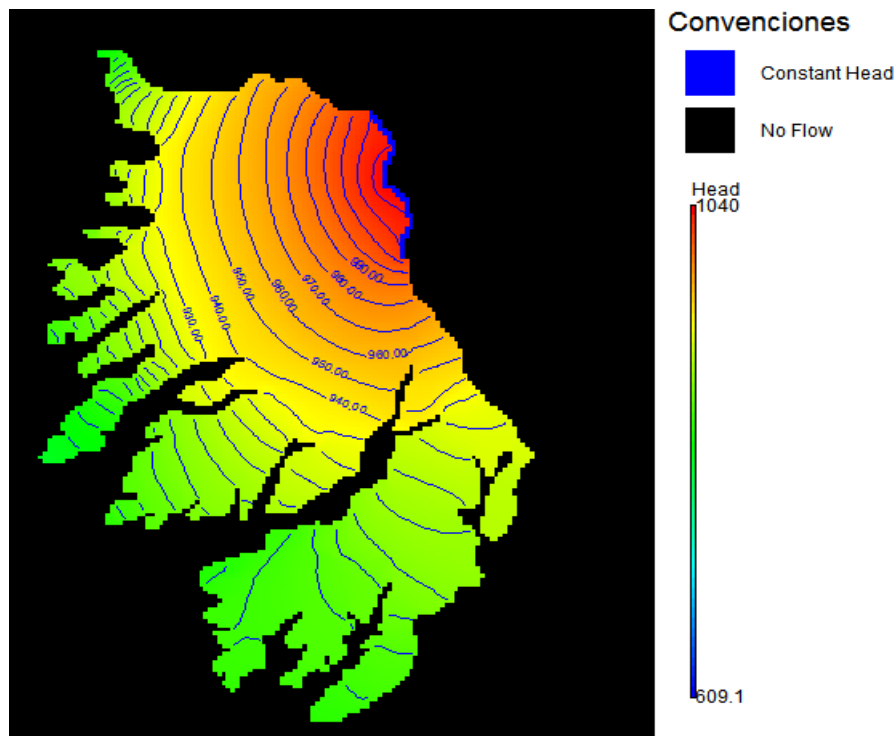
Punto	Este	Norte	Target	Modelo	Residual
SN-7	1104262	1281163	908.12	907.21	0.91
SN-3	1104488	1280770	932.91	932.28	0.63
SN-4	1104788	1280712	942.28	941.88	0.40
SNA-4	1104670	1280295	938.97	938.98	-0.01
SD-4	1104439	1280533	929.16	928.24	0.92
SN-1	1104237	1280563	917.82	917.61	0.21
SN-2	1104292	1280322	921.75	921.22	0.53
SNA-2	1104382	1279883	926.12	925.66	0.46
SA-9	1104409	1279706	926.39	925.92	0.47
SA-8	1104155	1279748	915.61	914.84	0.77
SS-3	1104295	1279133	911.36	910.6	0.76
SJ-4	1104561	1278680	918.37	917.41	0.96
SS-5	1104827	1279080	934.78	934.25	0.53
SRO-5	1104983	1278502	932.23	932.49	-0.26
SRO-6	1105265	1278461	939.85	939.74	0.11
SRO-7	1105600	1278377	943.69	943.31	0.38
SRO-9	1105414	1278259	937.63	937.97	-0.34
SG-2	1105368	1277373	905.09	904.92	0.17
SG-1	1105538	1276941	899.47	898.55	0.92
SV-2	1106242	1276996	915.64	914.73	0.91
SN-5	1104446	1281090	922.29	921.49	0.80
SR-2	1104079	1281488	892.73	891.31	1.42
SM-4	1106975	1280899	1029.65	1030.19	-0.54
Norte	1105381	1282203	818.96	818.61	0.35
SN-9	1104174	1281069	893.12	893.28	-0.16

5.2.4 Análisis de resultados en estado permanente

A partir de los resultados del modelo, se pueden visualizar diferentes tipos de gráficos. Entre ellos está: isopiezas, líneas de flujo, relación río-acuífero, etc. El análisis de estas graficas permite entender un poco más la dinámica del flujo basándose en el modelo.

5.2.5 Isopiezas. Las isopiezas son líneas de igual altura piezométrica, de ellas se puede observar la dirección que lleva el flujo, las zonas de recarga, las zonas de descarga y posibles relaciones agua superficial-agua subterránea. En la figura 5.10 se observa las isopiezas para el acuífero superficial. Se puede distinguir que en la zona nororiental, donde se simula la recarga con una cabeza constante, las isopiezas se encuentran menos espaciadas. Esto se debe a que los niveles piezométricos tratan de seguir la forma topográfica del basamento del acuífero.

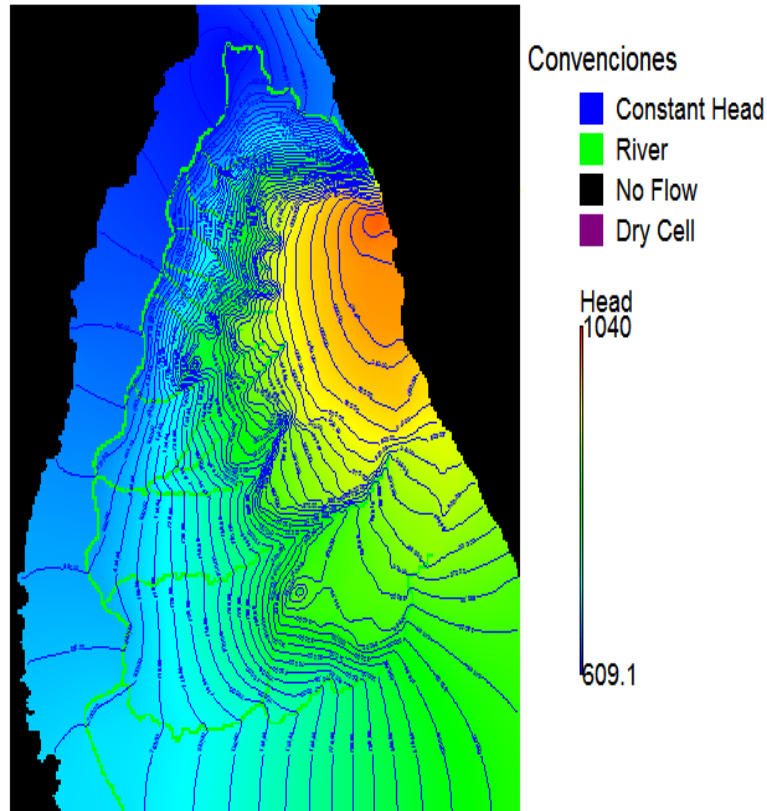
Figura 5.10 Isopiezas del acuífero superficial – Jul/86.



En la figura 5.11 se muestran las isopiezas para el acuífero profundo. Se puede observar cómo los principales ríos de la zona (Frio, Oro y Suratá) sirven como sistema de drenaje tanto para agua superficial como la subterránea. En las zonas donde termina la escarpa de Bucaramanga se visualiza la relación agua superficial-agua subterránea, encontrándose que, por las formas de las isopiezas cóncavas hacia abajo, las corrientes superficiales reciben aportes del agua subterránea.

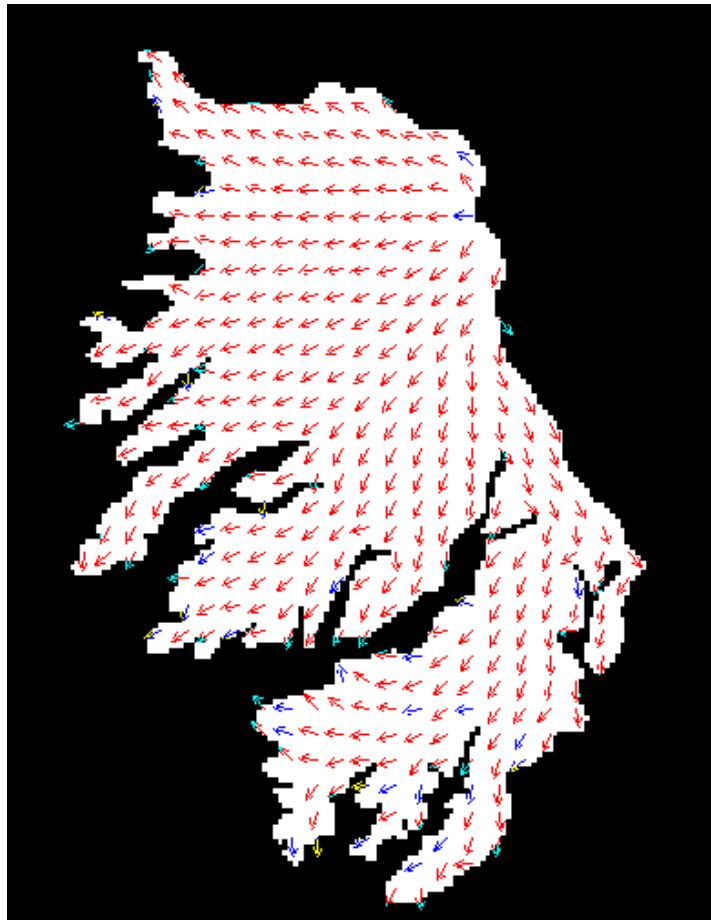
En la zona norte del área de estudio las isopiezas se encuentran muy pegadas, disminuyendo su nivel en 10m por cada 50m longitudinales. Esto se debe a que en esta zona la topografía es abrupta y los niveles piezométricos tienden a seguir ese patrón.

Figura 5.11 Isopiezas del acuífero profundo – Jul/86



5.2.6 Líneas de flujo. Las líneas de flujo se construyen a partir de las isopiezas, son líneas perpendiculares que indican cual es la dirección de flujo, de la misma manera en que las líneas perpendiculares a las curvas de nivel indican la dirección de mayor o menor pendiente, dependiendo del sentido en que se tomen.

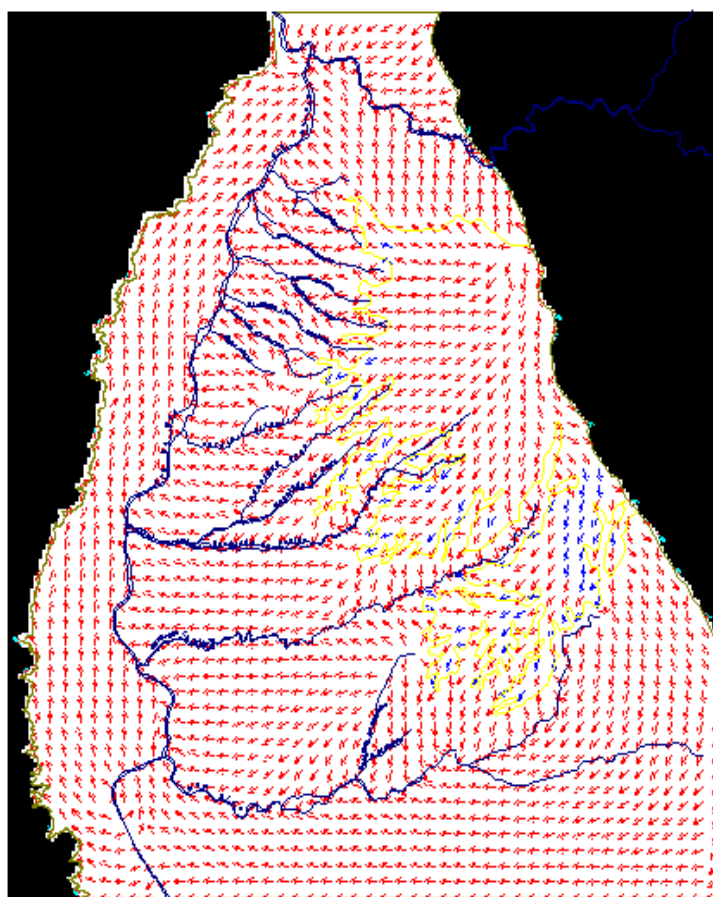
Figura 5.12 Líneas de flujo para el Acuífero Superficial



En la figura 5.12 se muestran las líneas de flujo para el acuífero superficial, allí se puede apreciar cómo en la parte norte de la escarpa la dirección del flujo es Este-Oeste y en la zona céntrica toma un sentido Noreste-Suroeste. En la zona sur las líneas de flujo tratan de seguir la superficie topográfica del basamento del acuífero.

Las líneas de flujo para el acuífero profundo (Figura 5.13) muestran un comportamiento similar en la zona de la escarpa. En la zona fuera de la escarpa, las líneas de flujo se direccionan buscando el Rio de Oro, mostrando así que este es el principal dren de la zona de estudio. En la zona norte se distingue un notable alineamiento de las líneas de flujo hacia el Rio Suratá por fuera de la escarpa, mostrando así la fuerte influencia de la topografía en el direccionamiento del flujo subterráneo.

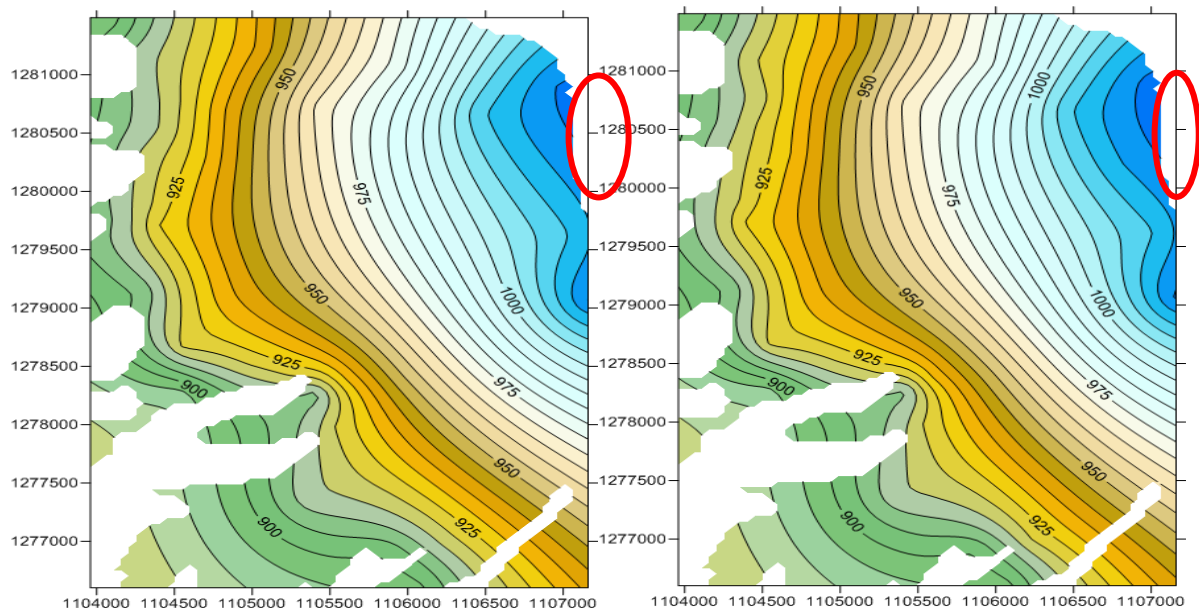
Figura 5.13 Líneas de flujo para el Acuífero Profundo



5.2.7 Calibración en estado transitorio. Para convertir un modelo numérico de flujo de estado permanente a estado transitorio se debe decidir cuantos van a ser los periodos de estrés (periodo de tiempo durante el cual todas las condiciones de frontera permanecen constantes) y los pasos de tiempo. Para el desarrollo del modelo se definieron tres periodos de estrés, los cuales corresponden al estado inicial (Jul-86), un notable cambio en las isopiezas en la zona de recarga (Jun-87), la normalidad del comportamiento de las isopiezas (Dic-87) y los valores medidos en la época actual (Jul-2011).

La razón por la cual se tomaron estos periodos de estrés obedece a que se buscó los periodos de tiempo en los cuales el acuífero mostró la mayor variabilidad en las isopiezas. Al observar el periodo comprendido desde Enero de 1984 hasta Diciembre de 1987, se pueden notar muy poca variación en la forma de las isopiezas, con excepción de los meses tomados para la definición de los periodos de estrés. El mes de Junio de 1987 y Diciembre de 1987 (Figura 5.14) muestran una variabilidad en la zona oriental de la escarpa donde se simula la recarga.

Figura 5.14 Isopiezas para Junio y Diciembre de 1987, respectivamente.



Los otros periodos de estrés corresponden al estado inicial (Jul-86) y al estado actual (Jul-2011). Hay que aclarar que no fue posible tomar todos los valores de los piezómetros usados en la década de los 80's para hacer mediciones en la actualidad, ya que muchos de ellos no funcionan, otros solo pueden ser manipulados por la CDMB y otros no existen por la urbanización de la ciudad. Sin embargo, se tomaron mediciones en los lavaderos o estaciones de servicio que usan actualmente el agua subterránea como fuente de suministro. En la tabla 5.4 se resumen los periodos de estrés.

Tabla 5.4 Resumen de los periodos de estrés.

Periodo de estrés	Duración (meses)	Duración (días)	Intervalo Temporal	Descripción
1	12	365	Julio 1986 – Junio 1987	Mínima recarga
2	6	184	Julio 1987 – Diciembre 1987	Máxima recarga
3	535	8248	Enero 1988 – Julio 2011	Estado actual

Para la calibración en estado transitorio se consideró la variación de la condición de frontera Cabeza Constante que representa la recarga, éste será el parámetro a modificar considerando que las características de los acuíferos permanecen constantes en el tiempo. Las características hidráulicas de los acuíferos (conductividades hidráulicas horizontales y verticales) son los resultados obtenidos en el proceso de calibración en estado permanente.

5.2.8 Resultados en estado transitorio. En la tabla 5.5 se resumen los valores obtenidos del modelo para las primeras dos ventanas de calibración: Junio y Diciembre de 1987, además se incluyen los valores residuales.

Tabla 5.5 Resumen de targets y valores residuales para estado transitorio de Jun y Dic 87.

Punto	Este	Norte	Junio 1987			Diciembre 1987		
			Target	Modelo	Residual	Target	Modelo	Residual
SM-2	110697 4	127961 9	1009.25	1008.61	0.64	1009.9 7	1010.2 0	-0.23
SM-3	110683 1	128021 0	1018.01	1018.80	-0.79	1020.3 8	1022.2 7	-1.89
SM-5	110646 4	128067 0	1006.67	1006.62	0.05	1006.8 1	1008.6 1	-1.80
SRO-8	110595 7	127839 4	946.64	948.56	-1.92	945.92	949.56	-3.64
SM-7	110542 2	128072 7	959.96	961.66	-1.70	959.96	962.69	-2.73
SM-6	110594 5	128107 0	981.27	980.69	0.58	981.13	981.66	-0.53
SM-8	110506 6	128121 7	945.48	946.49	-1.01	946.85	947.32	-0.47
SR-3	110453 5	127824 7	905.19	903.91	1.28	905.55	904.42	1.13
SN-7	110426 2	128116 3	907.98	906.80	1.18	907.11	907.28	-0.17
SN-3	110448 8	128077 0	932.55	931.70	0.85	932.76	932.39	0.37
SN-4	110478 8	128071 2	941.34	941.99	-0.65	941.70	942.80	-1.10
SNA-4	110467 0	128029 5	938.46	938.35	0.11	939.40	939.11	0.29
SD-4	110443 9	128053 3	930.17	927.71	2.46	933.26	928.35	4.91
SN-1	110423 7	128056 3	917.46	917.18	0.28	917.67	917.70	-0.03

SN-2	110429 2	128032 2	921.75	920.77	0.98	921.75	921.32	0.43
SNA-2	110438 2	127988 3	925.9	925.25	0.65	925.90	925.78	0.12
SA-9	110440 9	127970 6	927.11	925.52	1.59	927.83	926.04	1.79
SA-8	110415 5	127974 8	916.33	914.61	1.72	918.13	914.91	3.22
SS-3	110429 5	127913 3	911.51	910.41	1.10	911.51	910.67	0.84
SJ-4	110456 1	127868 0	918.51	917.05	1.46	918.94	917.59	1.35
SS-5	110482 7	127908 0	934.92	933.74	1.18	935.14	934.47	0.67
SRO-5	110498 3	127850 2	932.09	931.99	0.10	931.87	932.76	-0.89
SRO-6	110526 5	127846 1	939.78	939.19	0.59	939.78	940.05	-0.27
SRO-7	110560 0	127837 7	943.69	942.75	0.94	944.55	943.69	0.86
SRO-9	110541 4	127825 9	937.78	937.45	0.33	938.35	938.34	0.01
SG-2	110536 8	127737 3	904.52	904.58	-0.06	905.09	905.21	-0.12
SG-1	110553 8	127694 1	899.47	898.24	1.23	899.98	898.82	1.16
SV-2	110624 2	127699 6	912.25	914.43	-2.18	916.00	915.04	0.96
SN-5	110444 6	128109 0	922.44	920.97	1.47	925.24	921.58	3.66
SR-2	110407 9	128148 8	892.73	890.99	1.74	893.09	891.37	1.72
SM-4	110697 5	128089 9	1030.87	1029.12	1.75	1031.9 5	1031.1 4	0.81

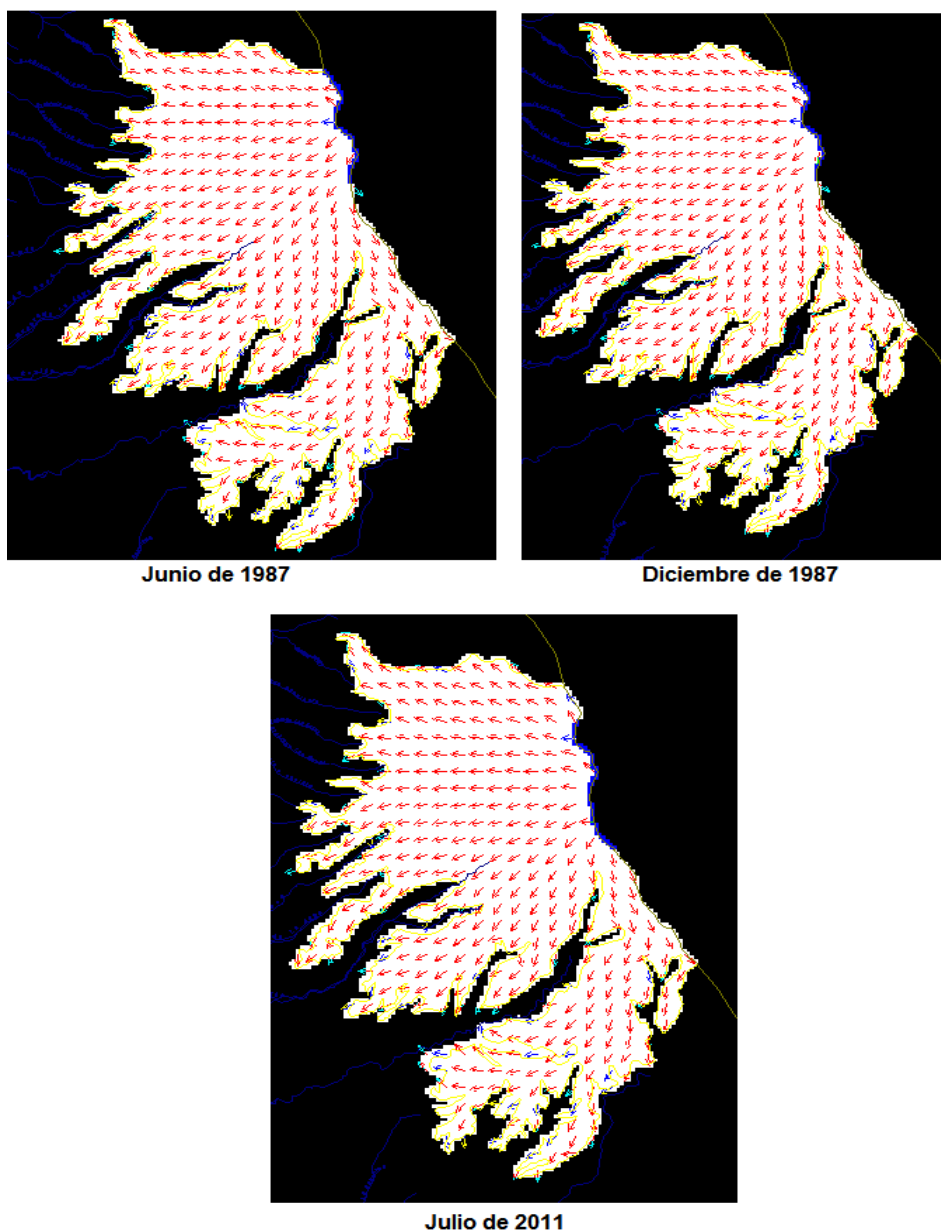
En la tabla 5.6 se muestran los valores obtenidos en el modelo para la ventana de calibración de Julio de 2011. Para este periodo de estrés se cuenta con valores en el acuífero superficial y el acuífero profundo.

Tabla 5.6 Resumen de targets y valores residuales para Jul-2011.

Punto	Acuífero	Este	Norte	Julio 2011		
				Target	Modelo	Residual
José A. Garcés (El Palenque o Asometalfa)	Profundo	1100167	1274908	680.97	683.18	0.64
Freskaleche S.A.		1100756	1277892	660.88	662.36	-0.79
Carolina Martínez (Lavadero Seis Esquinas)		1100325	1272954	698.36	700.12	0.05
Luis Hernando Ulloa (EDS Los Caneyes)		1100884	1273316	697.66	699.09	-1.92
EDS El Carmen Girón		1100757	1273132	698.70	700.39	-1.70
Estación Oriental de Transportes		1108632	1275578	880.11	879.65	0.58
Pozo Norte Padres Somascos		1105381	1282203	807.14	805.43	-1.01
Esperanza 2		1105003	1282231	798.56	799.76	1.28
Lizcano 1		1104961	1282957	675.57	674.46	1.18
Aquiles Moreno (EDS EL Rápido o Súper Éxito)	Superficial	1104488	1280770	932.55	939.46	0.85
Miguel Badillo Roa (Lavadero La Esmeralda)		1104788	1280712	941.34	909.36	-0.65
Franklin Gustavo González (La Casa del Bocel)		1104670	1280295	938.46	939.67	0.11
Ramiro Rojas (Auto Cabecera)		1104439	1280533	930.17	969.91	2.46
Castro e Hijos y Cía. Ltda. (EDS La Concordia)		1104237	1280563	917.46	931.08	0.28
EDS Colombia		1104292	1280322	921.75	950.06	0.98
EDS Dagar o Multiservicios la Playa		1104382	1279883	925.9	943.52	0.65
Servi Autos la 55		1104409	1279706	927.11	928.82	1.59
Servi Centro Acrópolis		1104155	1279748	916.33	922.80	1.72
Servi Autos la 17		1104295	1279133	911.51	919.05	1.10
Lavadero Bahía Cars		1104561	1278680	918.51	936.03	1.46
Servi Roger		1104827	1279080	934.92	928.81	1.18
EDS La Rosita		1104983	1278502	932.09	942.73	0.10
Lavadero Rupilisto calle 56		1105265	1278461	939.78	926.89	0.59
Servicentro El Mejor		1105600	1278377	943.69	928.14	0.94
Piezómetro La Flora		1105414	1278259	937.78	956.39	0.33
Aquiles Moreno (EDS EL Rápido o Súper Éxito)		1105368	1277373	904.52	683.18	-0.06

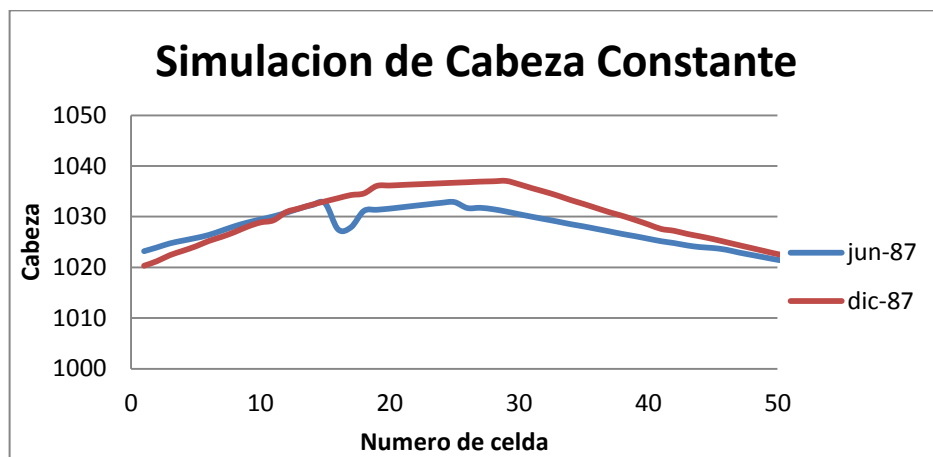
La figura 5.15 muestra las direcciones de flujo para las tres ventanas de calibración. En esta grafica se puede apreciar diferencia entre las líneas de flujo de 1987 y las de 2011, mostrando estas últimas una dirección notoria en sentido este-oeste.

Figura 5.15 Líneas de flujo para los tres periodos de estrés



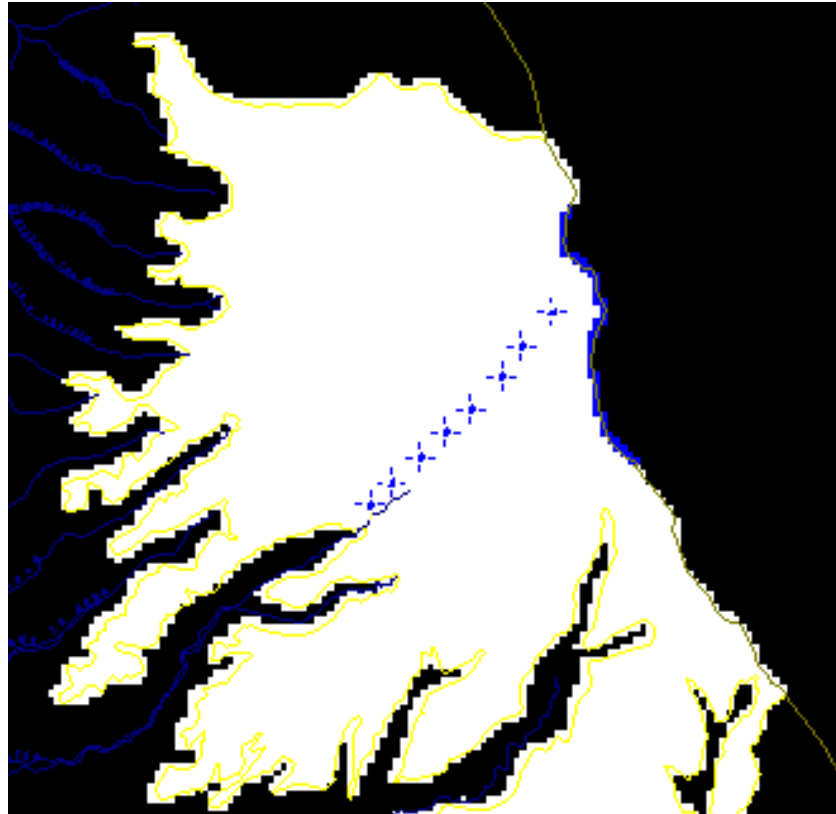
Los resultados de la variación de las cabezas constantes para cada periodo de estrés se muestran en la figura 5.16. Se puede observar las diferencias de cabezas entre los meses de Junio de 1987 y Diciembre de 1987, dando como resultado una disminución promedio de 2,32m para simular la recarga de los acuíferos.

Figura 5.16 Valores de cabeza constante para simular recarga en los periodos de estrés.



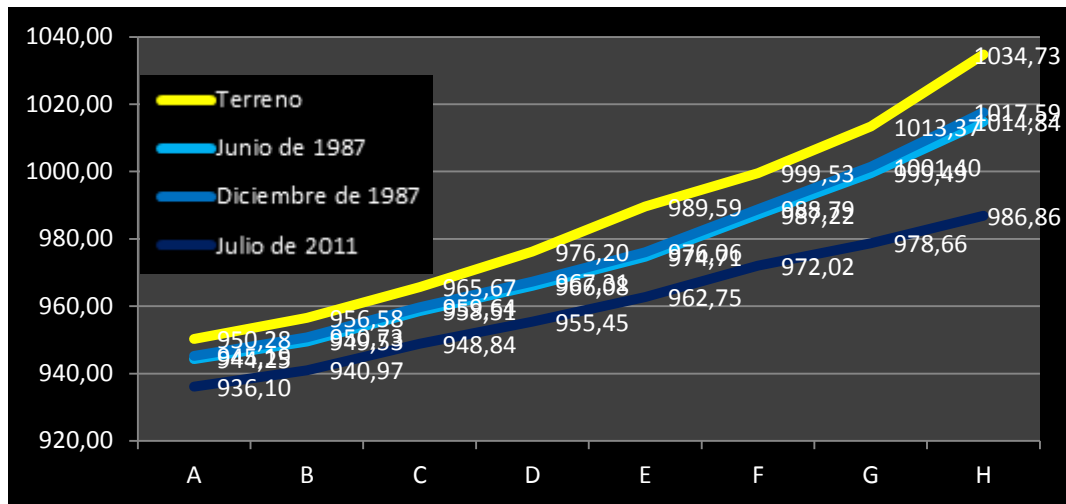
Es preciso aclarar que el valor de la cabeza constante para simular la recarga no es igual que los valores de las isopiezas dados por el modelo. A continuación, en la figura 5.17, se muestra la ubicación de un corte tipo en dirección suroeste-noreste para apreciar las diferencias en las alturas piezométricas en los tres periodos de simulación.

Figura .5.17 Ubicación de los puntos de corte para comparar niveles piezométricos.



En la figura 5.18 se presentan los resultados del corte mencionado anteriormente. Allí se puede apreciar las diferencias piezométricas para los tres periodos de simulación, encontrándose una notable disminución de niveles para el 2011 en comparación a los registrados en la década de los 80's. Haciendo un promedio de diferencias se obtiene un promedio de 14.88m en la disminución de los niveles freáticos, encontrándose valores del orden de 8m y 29m al occidente y oriente de la escarpa respectivamente.

Figura 5.18 Diferencias piezométricas entre los periodos de estrés.



Escenario de Simulación 1 – Precipitaciones

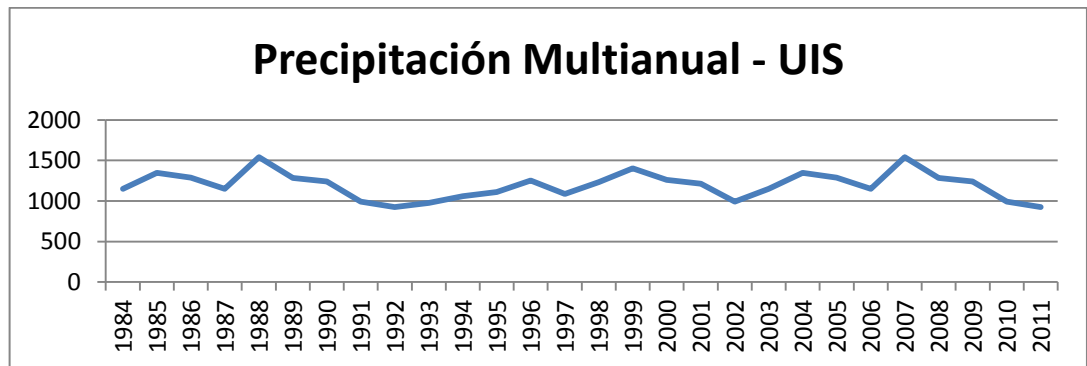
Para realizar el modelamiento teniendo en cuenta la variación de la recarga entre los años 1984 y 2011, se optó por hacer una relación entre la variación de la precipitación (tomando como referencia la estación de la UIS por estar muy cerca del área de recarga) y la variación de la recarga, estando esta última simulada por una cabeza constante. El procedimiento consiste en analizar el porcentaje de variación de un año a otro de la precipitación media anual y aplicarlo a la cabeza constante que simula la recarga, esto se hace para cada año.

En la figura 5.19 se muestra la precipitación anual para la estación ubicada en la UIS, se puede observar que los mayores valores (años húmedos) se registraron en 1988, 1999 y 2007, y los valores menores (años secos) se registraron en 1992, 2002 y 2011.

Los resultados de las cabezas piezométricas para el Acuífero Superficial dadas por el modelo se muestran en la figura 5.20. Allí se puede observar que hay dos periodos para los cuales los niveles piezométricos son máximos, estos

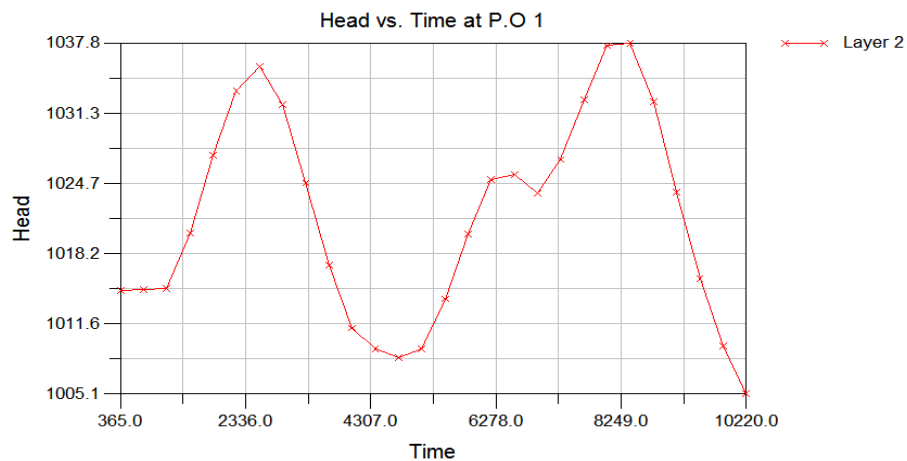
corresponden a los años 1990 y 2006. Y los valores mínimos a los años 1996 y 2001.

Figura 5.19 Precipitación estación UIS entre 1984 y 2011.



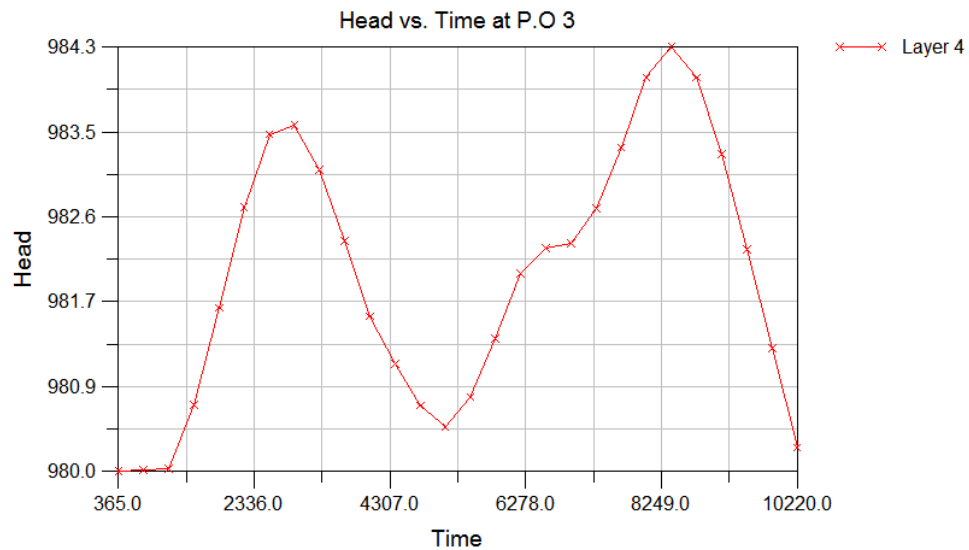
Analizando con detenimiento se puede observar que hay una relación retardada de respuesta entre los máximos de precipitaciones y los máximos de los niveles piezométricos. Es preciso aclarar que estos niveles piezométricos varían de acuerdo al lugar donde se calcule. Para el modelo numérico se usan los llamados “pozos de monitoreo”.

Figura 5.20 Variación de la cabeza piezométrica en el tiempo. Acuífero Superficial – escenario 1



De igual manera en la figura 5.21 se muestra la variación piezométrica en el tiempo para el Acuífero Profundo. La respuesta de este acuífero varía un poco ya que las respuestas máximas y mínimas se dan en los años 1991, 2006 y 1997, 2011 respectivamente.

Figura 5.21 Variación de la cabeza piezométrica en el tiempo. Acuífero Profundo – escenario 1



Escenario de Simulación 2 – Pozos de explotación

El segundo escenario es en el cual se tienen en cuenta los pozos de explotación para el Acuífero Superficial y Profundo. Los pozos introducidos al modelo fueron los registrados en la CDMB como concesiones y se listan en la tabla 5.7.

Tabla 5.7 Concesiones de pozos para el Acuífero Superficial y Profundo

#	NOMBRE	ESTE	NORTE	Q (LPS)	Q (m3/d)	Acuífero	Fecha Concesión
1	Estación de Servicio la Unión	1105410	1278700	0,06941	6,00	Superior	ago-09
3	José A. Garcés (El Palenque o Asometalfa)	1100167	1274907	0,0637	5,50	Profundo	mar-02
4	Aquiles Moreno (EDS EL Rápido o Súper Éxito)	1105706	1278545	0,3	25,92	Superior	jun-01

#	NOMBRE	ESTE	NORTE	Q (LPS)	Q (m ³ /d)	Acuífero	Fecha Concesión
5	Rafael Ortiz (EDS La Pedregosa)	1107258	1276489	0,1	8,64	Superior	may-96
6	Freskaleche S.A.	1100756	1277892	0,6	51,84	Profundo	jun-01
7	Miguel Badillo Roa (Lavadero La Esmeralda)	1104562	1281215	0,023	1,99	Superior	ene-03
10	Rocío Castillo Ortiz (Servicentro Poblado Car's)	1100348	1273948	0,0121	1,05	Profundo	oct-06
11	Luis Hernando Ulloa (EDS La Hormiga)	1104570	1280881	0,0076	0,66	Superior	mar-06
12	Holcim Colombia S.A.	1109818	1272440	0,5551	47,96	Profundo	jul-06
14	INSERCOL S.A.	1100923	1275383	0,0379	3,27	Profundo	feb-07
15	Luis Emilio Niño Castellanos (Residencias la Manción)	1105164	1280906	0,24	20,74	Superior	mar-03
16	Luis Efrén Saavedra Fonseca (Las Vegas)	1104772	1275818	0,0711	6,14	Profundo	jul-04
17	Franklin Gustavo González (La Casa del Bocel)	1105326	1279630	0,0555	4,80	Superior	jun-06
18	Carolina Martínez (Lavadero Seis Esquinas)	1100325	1272953	0,0379	3,27	Profundo	nov-05
19	Luis Hernando Ulloa (EDS Los Caneyes)	1100884	1273315	0,1389	12,00	Profundo	dic-04
22	Centro de Lubricación (Lubritaxis Ltda.)	1106035	1279390	0,0116	1,00	Superior	feb-06
24	Castro e Hijos y Cía. Ltda. (EDS La Concordia)	1105626	1278396	0,0463	4,00	Superior	mar-05

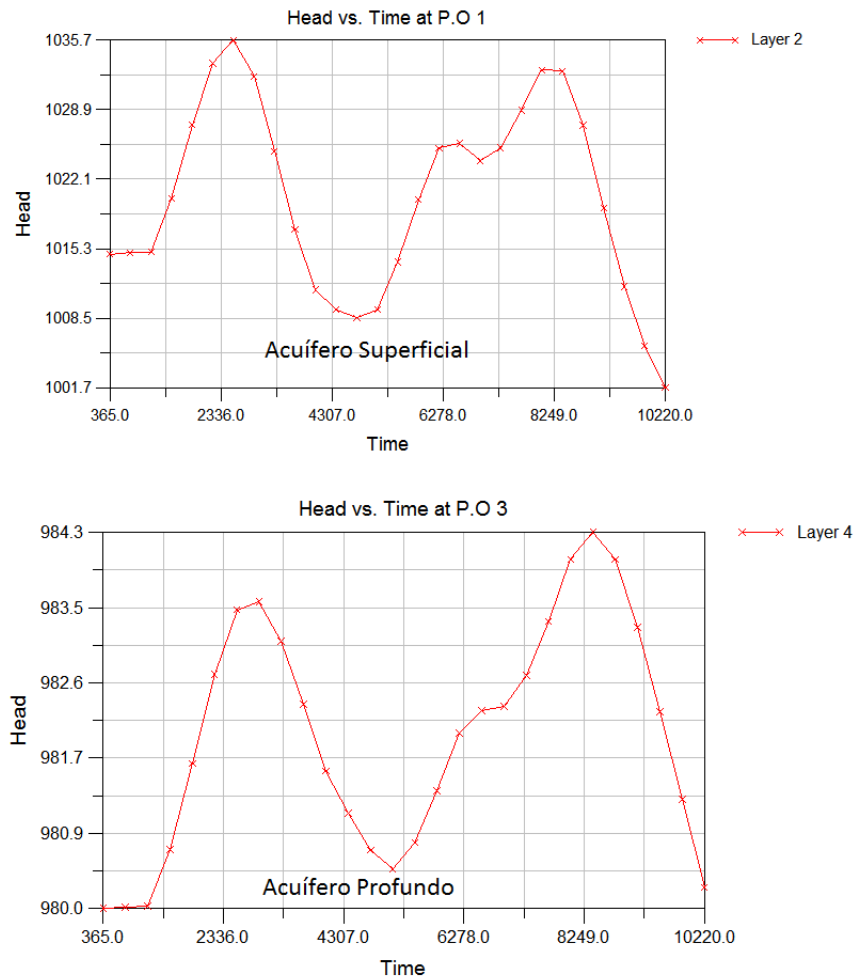
El caudal de explotación total para el Acuífero Superficial según los datos registrados en las concesiones de la CDMB es de 73,73 m³/d y el del Acuífero Profundo es de 131.04 m³/d, ambos suman un total de 204,78 m³/d.

Los resultados de este escenario de simulación se muestran en la figura 5.22. De la gráfica obtenida por el GV se puede observar la influencia de los pozos en el valor de los niveles piezométricos, mostrando una disminución de 4,87m para el Acuífero Superficial y 2,29m para el Acuífero Profundo.

Escenario de Simulación 3 – Pozos + ΔQ

Aun con los pozos de extracción en el modelo, los niveles piezométricos obtenidos siguen siendo más altos que los medidos, razón por la cual se optó por introducir un nuevo pozo y variar su caudal de extracción hasta conseguir los niveles piezométricos medidos en el 2011. El caudal de bombeo para el Acuífero Superior fue de 400,3 m³/d y el del Profundo fue de 46,6 m³/d.

Figura 5.22 Variación de la cabeza piezométrica en el tiempo. Acuífero Superficial y Profundo – escenario 2



6. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Discusión y conclusiones

Los resultados del modelo numérico, permiten visualizar las direcciones preferenciales de flujo y cómo interactúa el agua superficial con los niveles freáticos del Acuífero Profundo, mostrando así que hay corrientes que sirven como drenaje del acuífero. Las corrientes a saber son: Quebrada La Iglesia, Quebrada Las Navas y por supuesto, los Ríos Frio, de Oro y Suratá. Las quebradas que no se nombraron muestran isopiezas perpendiculares al cauce del río, lo cual indica que hay zonas donde no hay interacción río-acuífero como: terminación de la Quebrada La Iglesia, Quebrada Seca, terminación de la Quebrada Cuyamita y Quebrada Argelia.

Las formaciones acuíferas de Bucaramanga constituyen un sistema hidrogeológico interrelacionado entre sí, ya que durante el proceso de calibración se observó la sensibilidad de las cabezas hidráulicas del acuífero superior ante variaciones de conductividad hidráulica mínimas en el acuífero profundo. Para una variación de 0.1m/d en el acuífero profundo, las cabezas hidráulicas del acuífero superior variaban entre 40 y 80cm.

En el proceso de calibración mostró que no hay un valor de conductividad hidráulica constante para todo el Acuífero Superficial, ya que los valores mayores se muestran hacia el oriente de la zona de estudio y los menores hacia el occidente, en donde termina la escarpa de Bucaramanga, siguiendo la disposición lógica de permeabilidades en abanicos aluviales. El proceso de calibración también mostró que hay una gran sensibilidad en los valores de conductividad hidráulica vertical, particularmente hacia la zona oriental de la escarpa.

Los resultados de la modelación arrojaron valores de conductividad hidráulica horizontal entre 2,2m/d y 10,3m/d para el acuífero superior; 0,0001m/d y 0,01m/d para el Miembro Finos que actúa como capa semi-impermeable y 3,6m/d para el acuífero profundo. Los valores de conductividad hidráulica vertical fueron entre 0,9m/d y 1,9m/d para el acuífero superficial; 0,00001m/d y 0,001m/d para el Miembro Finos y 0,15m/d para el acuífero profundo.

El proceso de modelación exploratoria permitió identificar que se necesitaba más de una zona de conductividad hidráulica horizontal para el Acuífero Superficial. De la misma manera, permitió identificar que el Miembro Finos de la Formación Bucaramanga presenta conductividades hidráulicas horizontales relativamente bajas pero con un factor de goteo.

A partir de los resultados obtenidos del modelo en estado transitorio, se observa una disminución notable en los niveles freáticos del acuífero superficial. Haciendo esta comparación entre los valores simulados durante la década de los 80's y los valores medidos en julio de 2011. El modelo arroja valores de más de 8m en la disminución de niveles y se presume que la principal razón obedece al aumento de la explotación de dicho acuífero.

Mediante la modelación se logró avanzar en el conocimiento del acuífero profundo, ya que se obtuvieron direcciones de flujo en la zona de la Meseta y en las zonas de drenaje natural, se observó sensibilidad de respuesta del acuífero superficial a modificaciones del acuífero profundo, y además se visualizó la estrecha influencia de la topografía en las formas de las isopiezas.

El modelo numérico permitió visualizar que el sistema de drenaje natural (ríos y quebradas) tienen influencia en el valor de las cabezas simuladas, ya que en la zona occidental, donde termina la escarpa, cualquier inclusión o eliminación de

celdas de frontera tipo River, producía una variación en las cabezas del orden de 2m.

Una herramienta fundamental para la modelación numérica es contar con un Modelo Digital de Elevaciones con una buena resolución, ya que permite representar de forma adecuada la topografía del terreno (condición inicial del modelo numérico) y ubicar, con relativa aproximación, la información georeferenciada. En este trabajo se usó un modelo a escala 1:50.000 con celdas de 50mx50m y se observó la sensibilidad de los datos de altura al ser referenciados al sistema de coordenadas de dicho modelo.

De acuerdo a los valores obtenidos por el modelo numérico, los acuíferos de Bucaramanga están siendo explotados más de lo que registran los archivos de concesiones o pueden existir varios pozos que no se encuentran con permisos dados por la autoridad ambiental.

6.2 Recomendaciones

Para obtener mejores resultados de un modelo numérico, se debe contar un modelo conceptual que esté alimentado con información de buena calidad, y en lo posible, cantidad. En este sentido, se debe evaluar siempre la información recolectada, compararla con otras fuentes de información, retroalimentar el modelo conceptual, y tener en cuenta que siempre se contará con dos factores influyentes en los resultados obtenidos: incertidumbre y sorpresa.

Se debe tener especial cuidado con la información referenciada, ya que muchas veces la ubicación de puntos (coordenadas X, Y) no concuerda en diferentes informes. De igual manera, se debe revisar en detalle el valor de las cotas para los puntos de los cuales se tiene información, ya que al hacer una referenciación respecto a un MDE los valores pueden cambiar drásticamente.

Se recomienda plantear un proyecto de monitoreo para las puntos disponibles que haya en los diferentes acuíferos. En primera instancia se debe hacer un reconocimiento en campo con ayuda de las autoridades locales ambientales (CDMB) para tener acceso a los diferentes puntos, así como la posibilidad de instrumentación de los piezómetros para la medición continua.

Se recomienda mejorar el modelo numérico mediante la implementación de nueva información, sea de tipo topográfica (verificación de puntos), geológica (interpretación de nuevas columnas litológicas), hidráulica (medición de niveles de ríos y quebradas) o hidrogeológica (valores de ensayos de pruebas de bombeo).

Se debe revisar los valores de las características hidráulicas de los acuíferos mediante la realización de nuevas pruebas de bombeo en donde sea posible para verificar la calidad de los datos. De esta manera el modelo numérico es más representativo de los sistemas acuíferos en estudio.

Los datos de extracción (caudales de explotación) tomados de las concesiones dadas por la CDMB deben manejarse con cautela en la escala de trabajo, ya que el modelo numérico puede ser considerado como un modelo de escala regional por el área de cobertura.

Es necesario realizar estudios de permeabilidad en la falla de Bucaramanga, no solo para conocer sus características acuíferas, sino para evaluar la influencia que podría tener en los acuíferos de la formación Bucaramanga. Los resultados pueden variar considerablemente las conclusiones obtenidas en esta investigación.

Se debe evaluar el aporte que hacen las cuencas vecinas a los sistemas acuíferos para considerar posibles escenarios adicionales de recarga, de igual manera, se

debe hacer alguna estimación del área de influencia de la recarga para alertar a las autoridades ambientales de las zonas que deben ser protegidas.

BIBLIOGRAFIA

AB. Alcaldía de Bucaramanga. Datos Geográficos de Bucaramanga. 2010.

AMB. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. 2010.

ANDERSON, M. P. y WOESSNER, W. W. Applied Groundwater Modeling. Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, San Diego. 381 p. 1992.

ARROYAVE, J y VASQUEZ, J. Separación del Flujo Base utilizando Isotopos Estables del Agua en la Cuenca Superior del Rio Lebrija. Proyecto de Grado UIS. 2009.

BEAR, J. Dynamics of Fluids in Porous Media. Am. Elsevier Publishing Co., New York: 764 pp. 1972.

BEAR, J. Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill, New York: 569 pp.1979.

BETANCUR, T. Una Aproximación al Conocimiento de un Sistema Acuífero Tropical. Caso de Estudio: El Bajo Cauca Antioqueño. Tesis Doctoral. Universidad de Antioquia. Medellín. 2008.

BETANCUR, T y PALACIO, C. La Modelación Numérica como Herramienta para la Exploración Hidrogeológica y Construcción de Modelos Conceptuales. Caso de Aplicación: Bajo Cauca Antioqueño. Dyna, Vol. 76, Núm. 160, diciembre, 2009.

BGS. The British Geological Survey. Groundwater and its Susceptibility to Degradation: A Global Assessment of the Problem and Options for Management. 2003.

BREDEHOEFT, J. The conceptualization model problem – surprise. Hydrogeology journal, 13:37-46. 2005.

CASTRO, H. y LEAL, F. Marco Climático Global, el Niño en Santander. Proyecto de Grado, UIS. 1998.

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

CPC. Constitución Política Colombiana. Capítulo III. De los Derechos Colectivos del Ambiente. 1991.

CUSTODIO, E y LLAMAS, M. Hidrología Subterránea. Volumen I y II. Ediciones Omega. 2da Edición. 1996.

DAVIS, S y WIEST, R. Hidrogeologia. Editorial Ariel. 1ra Edición. 1971.

DE PORTA, J. La Terraza de Bucaramanga. Boletín de Geología. Universidad Industrial de Santander. No 3. P3-13. 1958.

DOMENICO, P y SCHWARTZ, F. Physical and Chemical Hydrogeology. 2nd Edition. John Wiley & Sons. 1998.

DONADO, L. Aplicación de Visual MODFLOW para el Modelamiento Numérico del Flujo de Agua Subterránea en el Acuífero Morroa. XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. 2002.

DUTTON, J Y MACE, R. Evolución de los Modelos Numéricos de Flujo de Agua Subterránea en el Acuífero de Ogallala en Texas. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Volumen 19. 2002.

FELER, M. Determinación del Balance Hidrológico en una Cuenca Endorreica del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Aplicación el Modelo SIMGRO. Taller Manejo Sustentable del Agua en Argentina. 2008.

GOMEZ, S. Predicción de Niveles Freáticos a partir de la Precipitación y su Influencia en la Estabilidad de Taludes. Caso de Aplicación: Meseta de Bucaramanga. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 1990.

GOMEZ, S y ANAYA, A. Acercamiento a un modelo conceptual de recarga de los acuíferos de la región de Bucaramanga. Avances En Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional. Medellín, v. 1, n. 1, p. 37-50, 2004. ISSN/ISBN: 01215701.

GOMEZ, S y COLEGIAL, J. Cartografía geológica y caracterización estructural de la subcuenca de la quebrada Rio Sucio, Santander. Boletín de Geología. Vol.28 No.2. P 49-61. 2006. ISSN 0120-0283.

GOMEZ, S y COLEGIAL, J. Un Modelo Conceptual de Recarga en Acuíferos de Bucaramanga a partir de Rasgos Hidrogeológicos y uso de Isotopos Estables del Agua. 2003

GOMEZ, S y GUZMAN, J. Separación de flujo base en la Cuenca Superior del Rio Lebrija. Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. No.61. ISSN 0120-6230. 2011

GOMEZ, S., GUTIERREZ, F. y TORRES, C. Vulnerabilidad, Amenaza y Peligro a la Contaminación de las Aguas Subterráneas en la Región de Bucaramanga. Revista UIS Ingenierías. Volumen 10. No 1. 2011.

GONZALEZ, J y CAMARGO, L. Vulnerabilidad a la Contaminación del Agua Subterránea en la Zona Aluvial de Bucaramanga. Proyecto de Grado UIS. 2010.

GROVE, D. Ion Exchange Reactions Important in Groundwater Quality Models. In: Advances in Groundwater Hydrology. Am. Water Res. Assoc.: 409-436. 1976.

GUTIÉRREZ, F y GUALDRÓN, J. Amenaza y Peligro a la Contaminación de las Aguas Subterráneas en la Zona Aluvial de Bucaramanga. Proyecto de Grado UIS. 2010.

HARBAUGH, A. “MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model”. The Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p. 2005.

IDEAM. Atlas climatológico de Colombia. 2010.

INGENIERIA DE SUELOS LTDA. Modelo Hidrogeológico Básico de Bucaramanga. 2002.

INGEOMINAS. Modelo Geológico – Geofísico para el Área Metropolitana de Bucaramanga. Bermúdez y Vásquez. 2004.

INGEOMINAS. Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga. 2001.

JAVANDEL, I., DOUGHTY, D. y TSANG, C. Groundwater Transport. Handbook of Mathematical Models, Am. Geophysical Union, Water Res. Monograph 10: 228 pp. 1984.

JOYA, G. y DEANTONIO, W. Modelo Digital de Elevaciones de la Zona Metropolitana de Bucaramanga para Basamentos y Capas de Acuíferos. Proyecto de Grado UIS. 2012.

JULIVERT, M. Nuevas observaciones sobre Estratigrafía y Tectónica del Cuaternario de los alrededores de Bucaramanga. Boletín de Geología. UIS. No. 18. p41-59. 1963.

KONIKOW, L. Uso de los Modelos Numéricos para Simular el Flujo y el Transporte Subterráneo. Isotopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico IGME. 2002.

LAZAR, REINHOLD. Estudio sobre el Clima Urbano en Bucaramanga. 2001.

LEON, A y CEDEÑO, E. Mapa Geológico y Geotécnico del Área Metropolitana de Bucaramanga. 1988.

LOHMAN, S. Ground-Water Hydraulics. U.S. Geological Survey Prof. Paper 708. 70 pp. 1972.

MARTINEZ, A. P., MARTINEZ, S. P. y CASTAÑO, S. Fundamentos de Hidrogeología. Editorial Aedos. España. 2006.

McDONALD, M. y HARBAUGH, A. "A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Model". U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6. Chapter A1, 586 p. 1988.

MENDOZA, C. y SANDOVAL, R. Estudio de oferta hídrica en la Cuenca Superior del Río Lebrija. Proyecto de Grado, UIS. 2002.

MONTOYA, D. Modelo Conceptual y Numérico del Sistema Hidrológico Ciénaga Colombia. Universidad de Antioquia. Medellín. 2010.

NAVARRO, I. Explotación y Renovabilidad del Agua Subterránea en una Cuenca Semiárida del Altiplano Mexicano. Ciencia UANL, octubre-diciembre, año/vol. IX, número 004, pp. 375-382. 2006.

NIÑO, A. y VARGAS, G. Geología y Geotecnia de la Escarpa Noroccidental de la Meseta de Bucaramanga. Proyecto de Grado UIS. 1992.

NUÑEZ, J. Aplicación de los Modelos Matemáticos de Flujo y Transporte de Contaminantes para el Diseño de Sistemas de Remediación. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. 2002.

OKI, TAIKAN. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. Science. Vol. 313. No5790. pp. 1068-1072. 2006.

PEREA, C. y LAMUS, J. Estudio de la precipitación en el Área Metropolitana de Bucaramanga. Proyecto de Grado, UIS. 2005.

PERNIA, J. y FORNEWS, A. Cambio Climático y Agua Subterránea: Visión para los Próximos Decenios. Instituto Geológico y Minero de España. 2008.

RAHMAN, A. A GIS Based Drastic Model for Assessing Groundwater Vulnerability in Shallow Aquifer in Aligarh, India. Elsevier, Applied Geography 28. 2008.

RAMIREZ, P. Caracterización de la Dinámica de Flujo mediante la Aplicación de un Modelo Numérico Hidrogeológico. Caso de la Cuenca del Río Birrís, Cartago, Costa Rica. Revista Geológica de América. 2007.

REED, J. Type Curves for Selected Problems of Flow to Wells in Confined Aquifers. Techniques of Water-Res. Invests. of the U.S. Geol. Survey, Book 3, Ch. B3: 106 pp. 1980.

REMENEIRAS, G. Tratado de Hidrología Aplicada. Editores técnicos asociados SA. Segunda Edición, España. 1974.

REMSON, I., HORNBERGER, G. y MOLZ, F. Numerical Methods in Subsurface Hydrology. Wiley, New York: 389 pp. 1971.

RODRIGUEZ, J. y TORRES, D. 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 UIS. 2011.

RUMBAUGH, J. y RUMBAUGH, D. Groundwater Vistas Manual. Version 5. Environmental Simulations, Inc. 2007.

SANTANDER, N. Los Páramos en el Filo de la Navaja. Periódico SXXI - Bogotá. Febrero de 2003.

SIA. Sistema Integrado de Información del Agua. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España. 2008.

UNESCO. Managing Water under Uncertainty and Risk. The United Nations World Water Development, Report 4. 2012.

UNESCO. Water in a Changing World. The United Nations World Water Development, Report 3. 2009.

UNESCO. Water, a Shared Responsibility. The United Nations World Water Development, Report 2. 2006.

UNESCO. Water for People, Water for Life. The United Nations World Water Development, Report 1. 2003.

VAN GENUCHTEN, M. y ALVES, W. Analytical Solutions of the One-Dimensional Convective- Dispersive Solute-Transport Equation. U.S. Dept. of Agric. Tech. Bulletin 1661: 151 pp. 1982.

VARGAS, G. y NIÑO, A. Geología y Geotecnia de la Escarpa Noroccidental de la Meseta de Bucaramanga. 1992.

WALTON, W. Selected Analytical Methods for Well y Aquifer Evaluation, Illinois State Water Survey Bull. 49: 81 pp. 1962.

WANDURRAGA, C. Estudio Geoeléctrico Realizado en el Área Metropolitana de Bucaramanga en el Proyecto “Modelo Hidrogeológico Básico de Bucaramanga”. 2003.

WARD, D. et al. Geología de los Cuadrángulos H-12 y H-13, Bucaramanga y Pamplona. Vol. XXI, No. 1-3. 1973.

WEXLER, E. Analytical Solutions for One-, Two-, y Three-Dimensional Solute Transport in Ground-Water Systems with Uniform Flow. Techniques of Water-Res. Invests. of the U.S. Geol. Survey, Book 3, Ch. B7: 190 pp. 1992.

YANG, Z, LU, W, LONG, Y y LI, P. Application and Comparison of two Prediction Models for Groundwater Levels: A Case Study in Western Jilin Province, China. Elsevier, Journal of Arid Environments 73. 2009.

ZAMBRANO, J y REY, A. Asesoría Geológica en el Área Metropolitana de Bucaramanga, para la Exploración de Aguas Subterráneas. 2003.

ZHENG, C. y BENNETT, G. Applied Contaminant Transport Modeling. Wiley, New York. Segunda Edición. 621 p. 2002

ANEXOS

Anexo A. Puntos con información de Espesores Geológicos

PUNTO DE INFORMACIÓN	NORTE	ESTE	COTA	ESPESORES DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS										
				Q _{al} , Q _{te}	Q _{da}	Q _{blr}	Q _{bg}			Q _{br}	Q _{bo}		J _g	
							Grueso	Fino	Grueso		Grueso	Fino	Meteori	Sana
Piezómetro SG-1	1276941	1105538	911.79	0	0	7	31+							
Piezómetro SG-2	1277373	1105368	922.37	0	0	6	7	24	30+					
Piezómetro SG-4	1277443	1105901	926.11	0	0	10.5	20.5	30+						
Piezómetro SG-5	1276913	1105862	910.16	0	0	5	13	30+						
Piezómetro SV1	1276602	1106081	914.54	0	0	10	12	19	24	30+				
Piezómetro SV2	1276996	1106242	926.45	0	0	10.5	16	19	31+					
P. Zona Norte	1282203	1105381	840.0	0	55.5	0	0	0	0	0	0	>55,5		
P. Parque A.Nariño	1278344	1106651	967.93	0	0	6.5	8.0	8.8	21.7	34.2	47.7	53,6+		
SEV D-2	1278335	1106649	980.0	0	0	5	0	20	0	33	>33			
SEV ING-57	1276261	1105560	850.0	0	0	0	0	0	0	0	50+			
SEV ING-55	1275712	1104233	795.0	5.4	0	0	0	0	0	0	53.4	90.4		>90,4
SEV ING-53	1277583	1107368	955.0	0	0	0	38	0	0	>38				
SEV CDMB-1	1277090	1104875	910.47	0	0	8.2	17.7	34	0	64	>64			
SEV CDMB-4	1278260	1107340	967.85	0	0	1.8	7.3	20	0	50	>50			
SEV CDMB-6	1277200	1106850	911.10	0	0	1	2.3	31	0	>31				
Piezómetro SR03	1278247	1104535	917.10	0	0	5	0	25	0	30+				
Piezómetro SR04	1278411	1104809	928.31	0	0	19.5	21	31+						

PUNTO DE INFORMACIÓN	NORTE	ESTE	COTA	ESPESORES DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS										
				Q _{al} , Q _{fe}	Q _{da}	Q _{blr}	Q _{bg}			Q _{bf}	Q _{bo}		J _g	
							Grues o	Fino	Grueso		Grueso	Fino	Met e o	Sana
Piezómetro SR05	1278502	1104983	931.29	0	0	6	13	21	30+					
Piezómetro SR06	1278461	1105265	931.76	0	0	10	13	23	27+					
Piezómetro SR07	1278377	1105600	939.89	0	0	13	15	17	30,5+					
Piezómetro SR08	1278394	1105957	953.89	0	0	19	30+							
Piezómetro SR09	1278259	1105414	933.2	0	0	0	29.6	40,6+						
Piezómetro SR011	1277926	1104784	917.19	0	0	14	26	30+						
Piezómetro SL2	1277983	1105544	930.2	0	0	0	8	12	24+					
Piezómetro SM1	1279067	1107160	1020.56	0	0	2	0	14	30+					
P.Metrocentro	1278650	1105410	939.99	0	0	1	16	19.8	41.2	48	100+			
SEV D-1	1279231	1107082	1000.0	0	0	1	41.1	0	0	54.1	>54			
SEV D-12	1279020	1106885	990.0	0	0	0.4	41.5	0	0	54	>54			
SEV CDMB-5	1278180	1103650	910.0	0	0	4.7	57	0	0	81	>81			
P.Parque de los Niños	1279847	1105871	996.03	0	0	3.1	5.5	8.4	22.5	25	100+			
P. San Pio	1279052	1106974	993.71	0	0	6	44	0	0	59	197.5	295		>295
Piezómetro SM3	1280210	1106831	1038.34	0	0	4	5	13.8	17.5	25.5	>25,5			
Piezómetro SM7	1280727	1105422	984.52	0	0	3.5	0	21.5	30+					
Piezómetro SN4	1280712	1104788	955.70	0	0	12	12.5	23	30,5+					

PUNTO DE INFORMACIÓN	NORTE	ESTE	COTA	ESPESORES DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS										
				Q_{al} Q_{fe}	Q_{da}	Q_{blr}	Q_{bg}			Q_{bf}	Q_{bo}		J_g	
							Grueso	Fino	Grueso		Grueso	Fino	Meteo	Sana
SEV D-37	1280657	1104904	965.0	0	0	0	32.2	0	0	39	93	>93		
SEV D-38	1280575	1105065	970.0	0	0	0.1	1.6	2.1	30.6	46.6	147,6+			
SEV D-39	1280448	1105209	985.0	0	0	0	29	0	0	34	55+			
Piezómetro SD4	1280533	1104439	939.18	0	0	5	0	17	31+					
Piezómetro SN2	1280322	1104292	932.90	0	0	5	0	23	27	32+				
Piezómetro SNA2	1279883	1104382	939.32	0	0	10	0	20	30+					
Piezómetro SA9	1279706	1104409	938.46	0	0	5	10	17	30+					
Piezómetro SA8	1279748	1104155	929.04	0	0	0	0	13.5	18.6	25.4	31+			
Piezómetro SA5	1279551	1103960	919.24	0	0	0	0	18.5	21.8	30+				
Piezómetro SN1	1280563	1104237	930.23	0	0	3	0	20	28+					
Piezómetro SN3	1280770	1104488	937.93	0	0	5	0	21	31+					
Piezómetro SJ3	1278541	1104384	913.16	0	0	0	0	8.4	24	31+				
Piezómetro SJ4	1278680	1104561	924.59	0	0	0	0	23.8	0	30+				
Piezómetro SS2	1278984	1104476	928.20	0	0	9	0	17	31+					
Piezómetro SS3	1279133	1104295	928.2	0	0	0	0	19	34+					
Piezómetro SS5	1279080	1104827	939.59	0	0	11	13	25.5	31,2+					
SEV CDMB-2	1280935	1104775	960.0	0	0	0	6.5	17	23	47	>47			

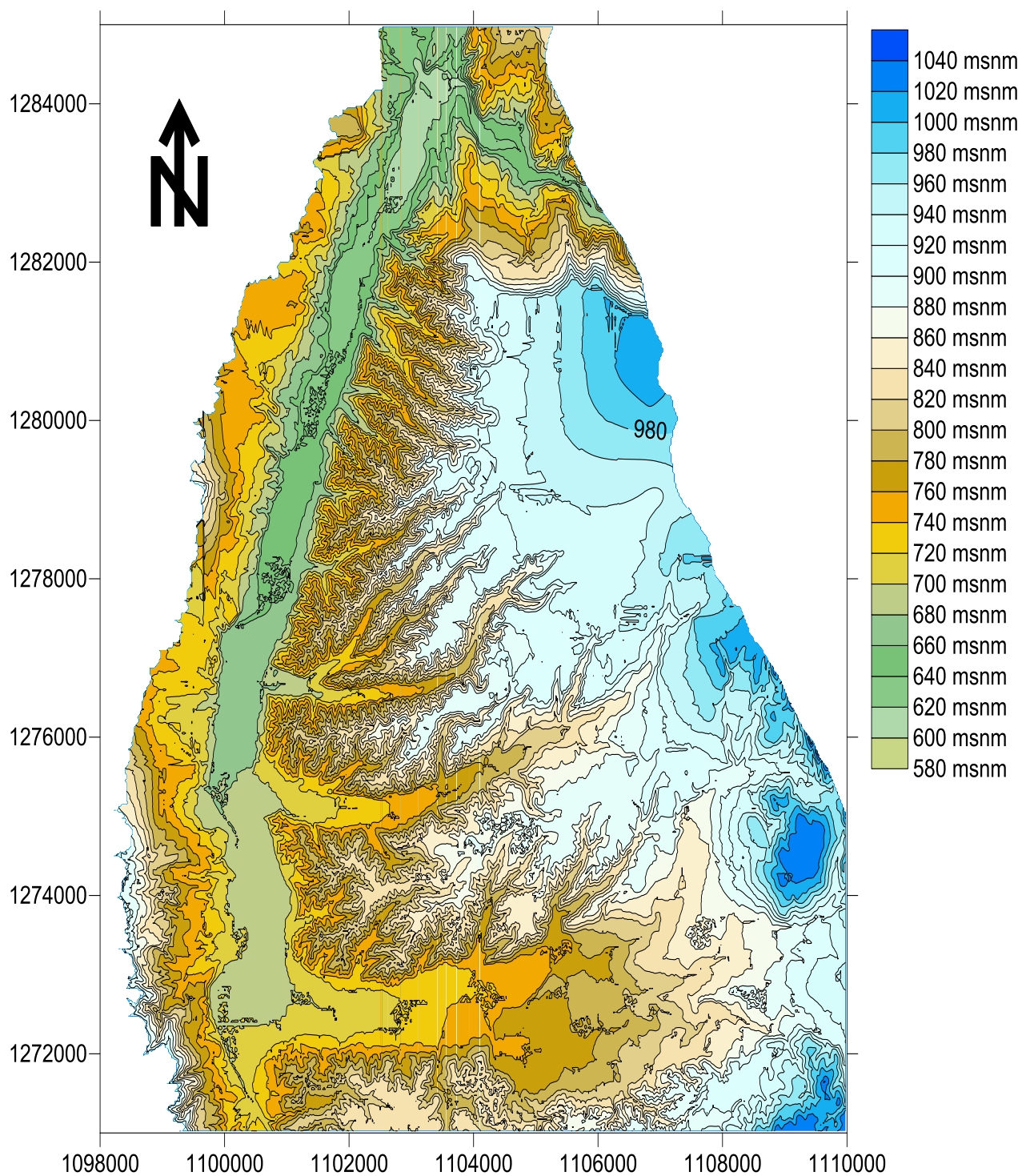
PUNTO DE INFORMACIÓN	NORTE	ESTE	COTA	ESPEORES DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS										
				Q _{al} , Q _{fe}	Q _{da}	Q _{blr}	Q _{bg}			Q _{bf}	Q _{bo}		J _g	
							Grueso	Fino	Grueso		Grueso	Fino	Met eo	Sana
Piezómetro SM4	1280899	1106975	1052.0	4	0	0	0	30+						
Piezómetro SM5	1280670	1106464	1032.59	0	0	3.1	9	13	19	27	30+			
Piezómetro SM6	1281070	1105945	1005.7	0	0	0	0	30+						
Piezómetro SM8	1281217	1105066	965.03	0	0	3.2	0	21.5	30,3+					
Piezómetro SN5	1281090	1104446	934.47	0	0	5.8	7	16	18	24	30,2+			
Piezómetro SN7	1281163	1104262	929.89	0	0	7	10	17.5	30	32,5+				
Piezómetro SR2	1281488	1104079	920.89	0	0	5	10	0	0	16	30+			
Piezómetro SR3	1281693	1104198	914.24	0	0	0	0	6	13.5	18	31+			
SEV ING 50	1281038	1106122	1025.0	0	0	2.2	5+							
SEV ING 51	1281643	1104632	920.0	0	0	0	13	16	46	>46				
SEV ING 52	1281550	1106095	1000.0	0	0	0	9.6	15.2	36	>36				
SEV D-17	1281068	1104079	900.0	0	0	0	0	0	0	0	52+			
SEV D-18	1280974	1103781	795.0	0	0	0	0	0	0	0	82	148	0	>148
SEV D-33	1277910	1101141	695.0	3.7	0	0	0	0	0	0	87	0	0	147+
SEV D-34	1277412	1100875	685.0	3.2	0	0	0	0	0	0		55	0	172+
SEV D-35	1276266	1100488	685.0	3.2	0	0	0	0	0	0	17.2	195	0	>195
SEV D-36	1275619	1100324	690.0	11.7	0	0	0	0	0	0	0	239	0	>239

PUNTO DE INFORMACIÓN	NORTE	ESTE	COTA	ESPESORES DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS										
				Q _{al} , Q _{fe}	Q _{da}	Q _{blr}	Q _{bg}			Q _{bf}	Q _{bo}		J _g	
							Grueso	Fino	Grueso		Grueso	Fino	Meteo	Sana
SEV D-25	1275163	1099842	690.0	1.8	0	0	0	0	0	0	13.8	128	0	>128
SEV D-24	1275843	1099839	700.0	7	0	0	0	0	0	0	0	160	0	>160
SEV D-32	1279222	1101464	680.0	11	0	0	0	0	0	0	28+			
SEV D-31	1281105	1102125	660.0	7.9	0	0	0	0	0	0	0	118	0	>118
SEV ING-1	1277009	1102541	800.0	0	0	0	0	0	0	0	35	>35		
SEV ING-2	1276965	1102230	740.0	0	0	0	0	0	0	0	19	>19		
SEV ING-3	1277007	1101900	740.0	0	0	0	0	0	0	0	20	>20		
SEV ING-5	1275688	1099802	695.0	0	0	0	0	0	0	0	26	110	0	>110
SEV ING-6	1276200	1099869	680.0	0	0	0	0	0	0	0	29	132	0	>132
SEV ING-7	1276855	1101554	740.0	0	0	0	0	0	0	0	49	49+		
SEV ING-8	1273286	1100238	720.0	0	0	0	0	0	0	0	3.5	97+		
SEV ING-10	1276845	1100908	700.0	0	0	0	0	0	0	0	18.8	217	0	>217
SEV ING-13	1272862	1102381	740.0	3	0	0	0	0	0	0	0	115	0	>115
SEV ING-15	1273142	1104400	755.0	0	0	0	0	0	0	0	15	>15		
SEV ING-40	1283114	1104836	670.0	2.5	0	0	0	0	0	0	14.5	24.5	0	0
SEV ING-41	1283589	1104812	670.0	5	0	0	0	0	0	0	73	0	0	0
SEV ING-44	1282793	1104758	700.0	0	4.1	0	0	0	0	0	19.1	80	0	>80

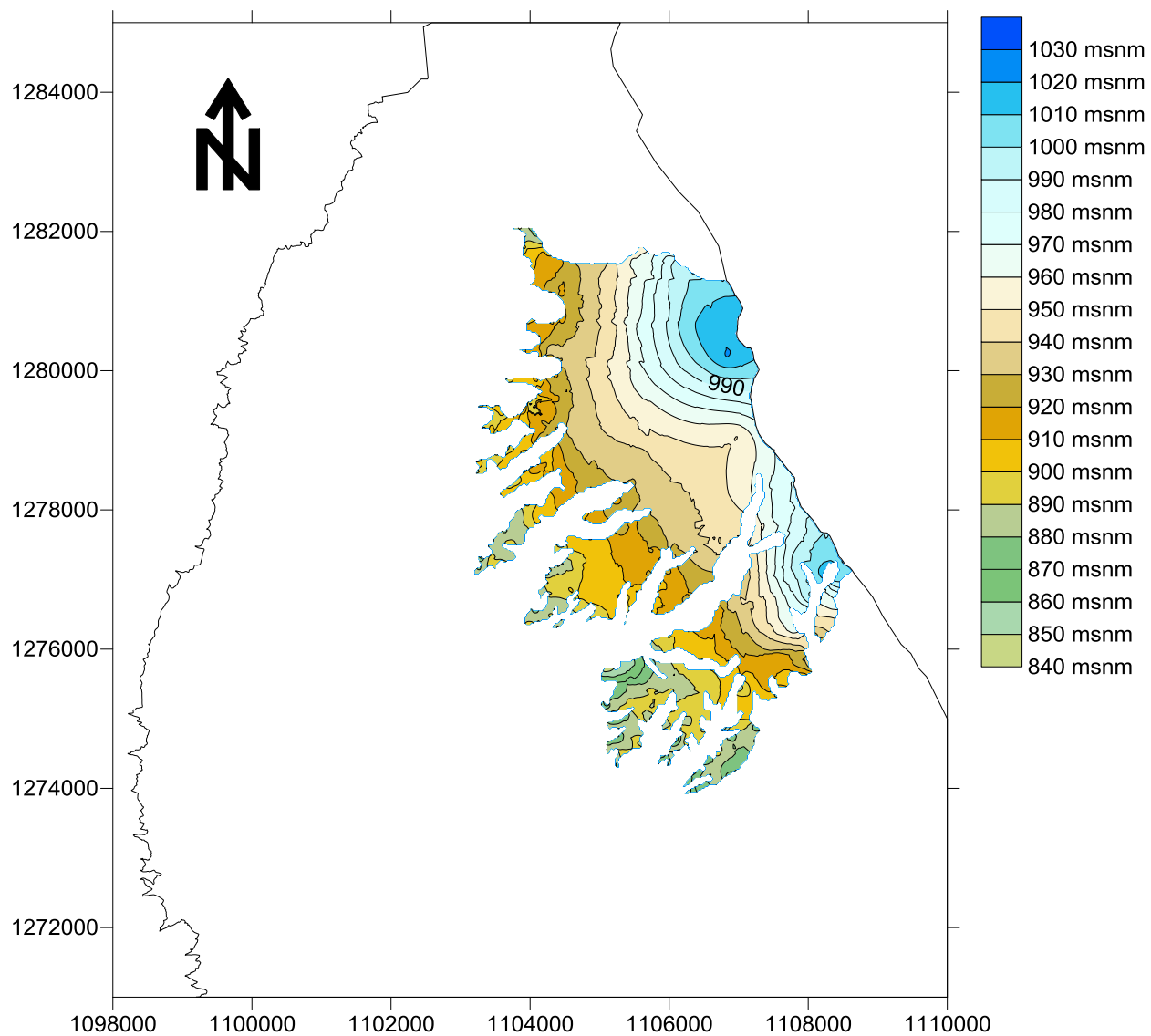
PUNTO DE INFORMACIÓN	NORTE	ESTE	COTA	ESPESORES DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS										
				Q _{al} , Q _{fe}	Q _{da}	Q _{blr}	Q _{bg}			Q _{bf}	Q _{bo}		J _g	
							Grue so	Fino	Grue so		Grue so	Fino	M et e o	Sana
SEV ING-45	1283013	1104576	705.0	0	3	0	0	0	0	0	0	90	0	>90
SEV ING-17	1272580	1109045	870.0	>17										
SEV ING-21	1271470	1110102	1000.0	6.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119+
SEV ING-22	1270130	1110953	950.0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	>66
SEV ING-23	1268841	1111787	995.0	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	>33
SEV ING-24	1267386	1112832	1060.0	>41										
SEV ING-38	1276585	1107532	970.0	0	0	0	17	0	0	>17				
SEV ING-54	1275466	1108446	880.0	0	0	0	0	0	0	0	10	53	0	>53
SEV D-3	1275798	1109123	950.0	0	0	0	0	0	0	0	11.5	27.5	0	0
SEV D-4	1275917	1109301	950.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SEV D-5	1275843	1109348	1000.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SEV D-6	1273550	1109200	850.0	>26										
SEV D-7	1275719	1109266	950.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SEV D-10	1275290	1106299	910.0	0	0	0.4	45	0	0	>45				
SEV D-14	1273963	1109826	935.0	17.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SEV D-15	1274203	1109819	945.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SEV D-16	1277330	1108368	1030.0	0	0	0.4	2.8	13.9	>13,9					

PUNTO DE INFORMACIÓN	NORTE	ESTE	COTA	ESPESORES DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS										
				Q _{al} , Q _{fe}	Q _{da}	Q _{blr}	Q _{bg}			Q _{bf}	Q _{bo}		J _g	
							Grueso	Fino	Grueso		Grueso	Fino	Meteo	Sana
SEV D-21	1271516	1107966	910.0	0	0	0	0	0	0	0	43+			
SEV D-22	1270854	1106798	910.0	0	0	0	0	0	0	0	216	>216		
SEV D-26	1273048	1101294	740.0	0	0	0	0	0	0	0	17	190	0	>190
P. Aldea de los Niños	1271473	1110686	950.0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62+
P. Ruitoque	1269945	1110982	960.0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	>50
SEV ING - 80	1281365	1102220	670.0	11	0	0	0	0	0	0	0	36	0	>36
SEV D-19	1276861	1101780	745.0	0	0	0	0	0	0	0	43	62+		
SEV D-20	1276813	1101040	720.0	0	0	0	0	0	0	0	42	42+		
SEV ING-68	1272850	1105600	760.0	5.4	0	0	0	0	0	0	28	134	0	>134
SEV ING-72	1274710	1107100	875.0	2.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	130+
SEV ING-82	1275310	1108200	896.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.9	39+
SEV D-8	1275574	1108501	890.0	3.5	0	0	0	0	0	0	16.5	52	0	>52
Piezómetro SM2	1279619	1106974	1028.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Piezómetro SI1	1278977	1107227	1030.7	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
P. Agropecuaria R.Frío	1272155	1102787	745.0	7.5	0	0	0	0	0	0	45+			
P. Frescaleche	1277901	1100756	690.0	0	0	0	0	0	0	0	34	65+		
P. Estación El Carmen	1273170	1100737	695.0	5	0	0	0	0	0	0	18	45+		
P. Estación El Bosque	1274230	1106963	867.21	0	0	0	0	0		0	20	27	0	>27

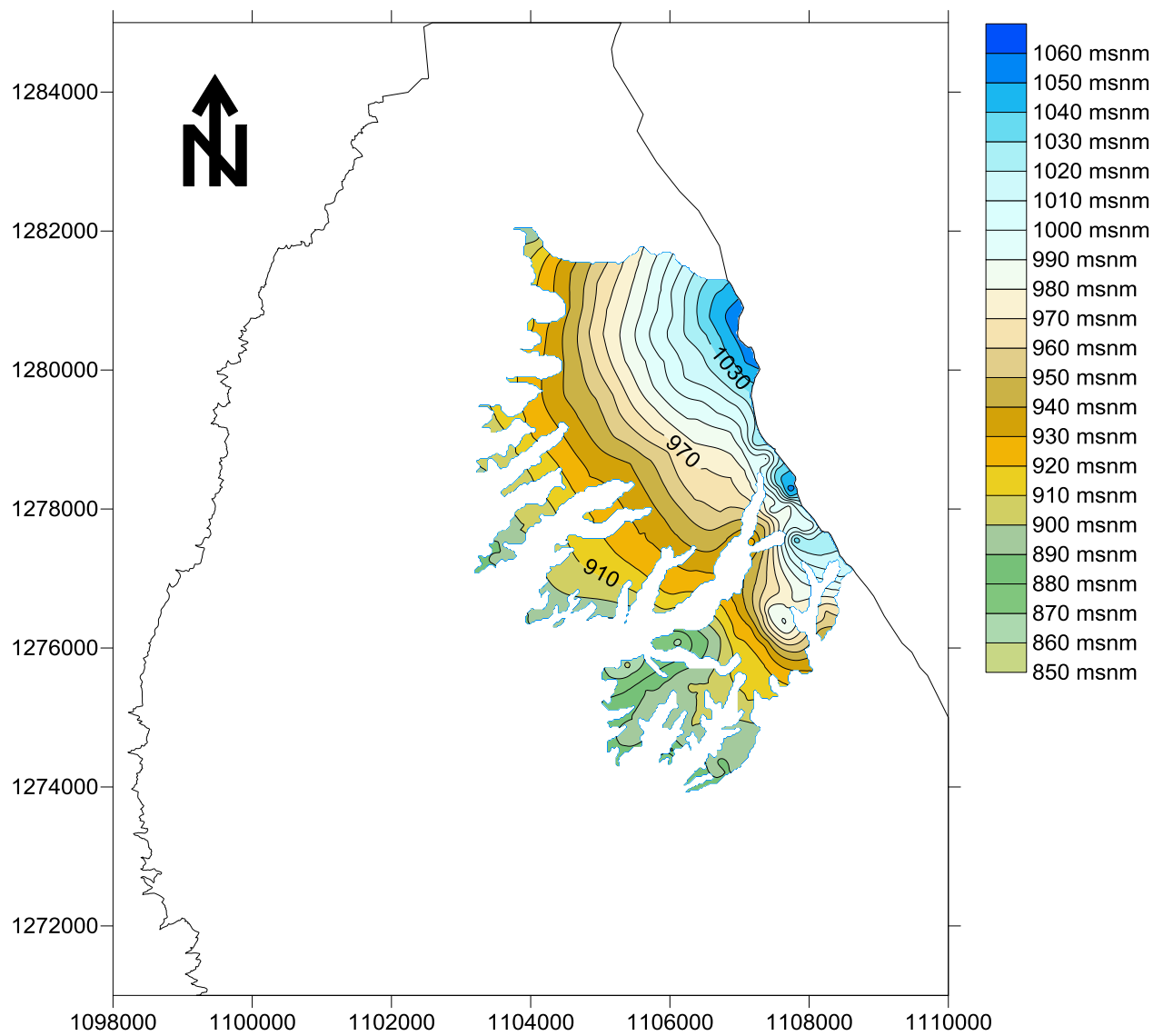
ANEXO C. Planta geológica del Miembro Órganos



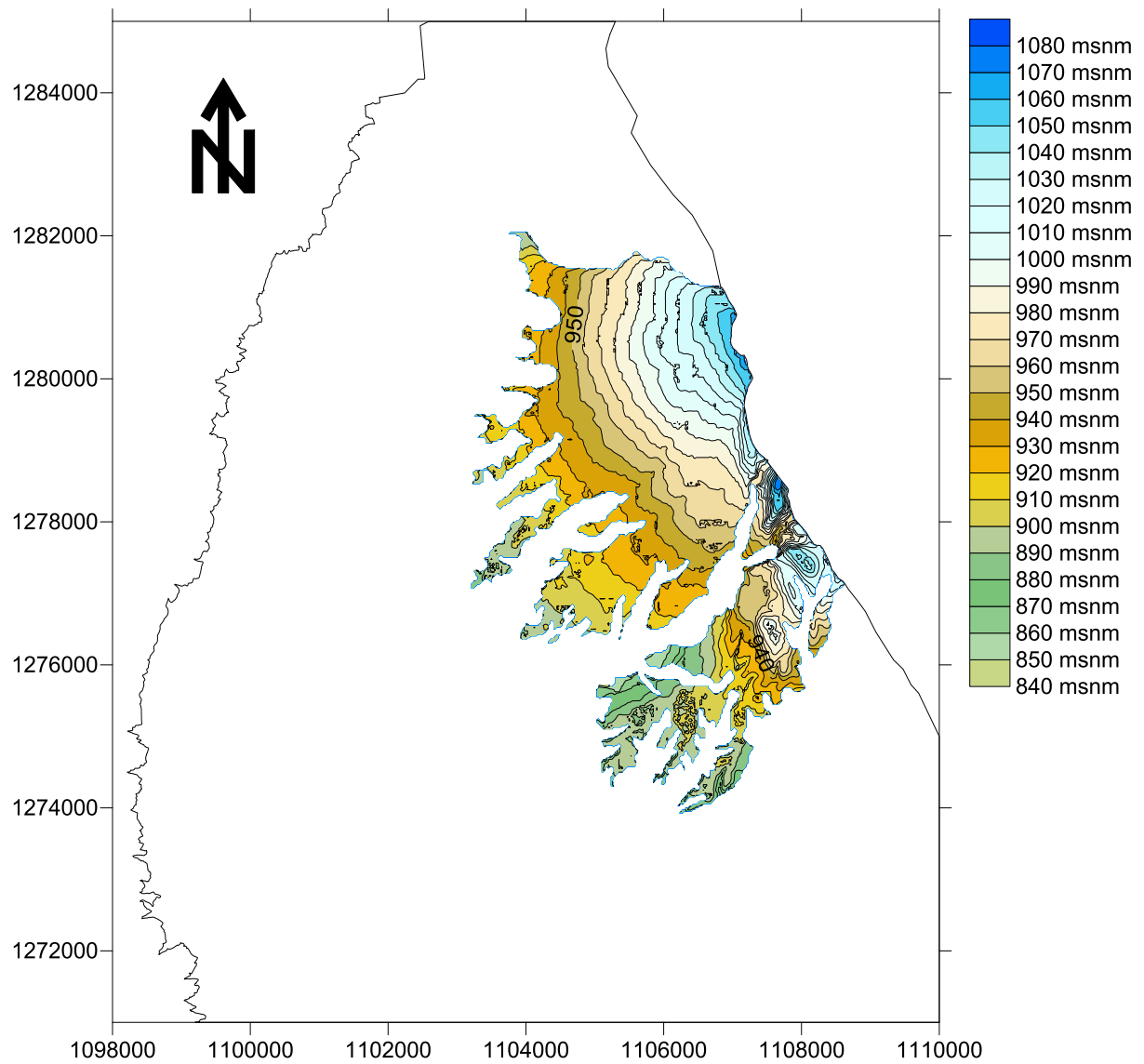
ANEXO D. Planta geológica del Miembro Finos



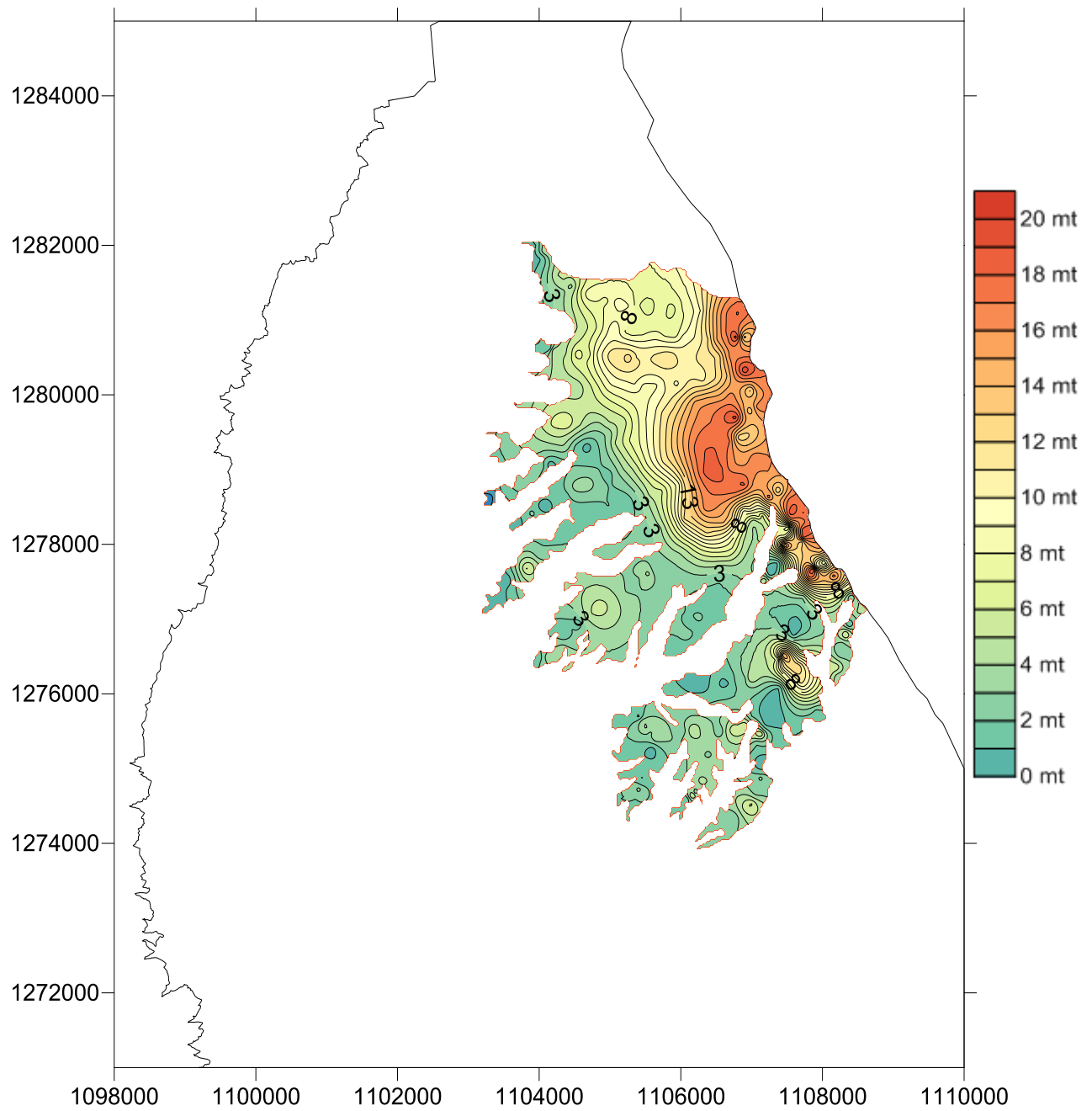
ANEXO E. Planta geológica del Miembro Gravoso



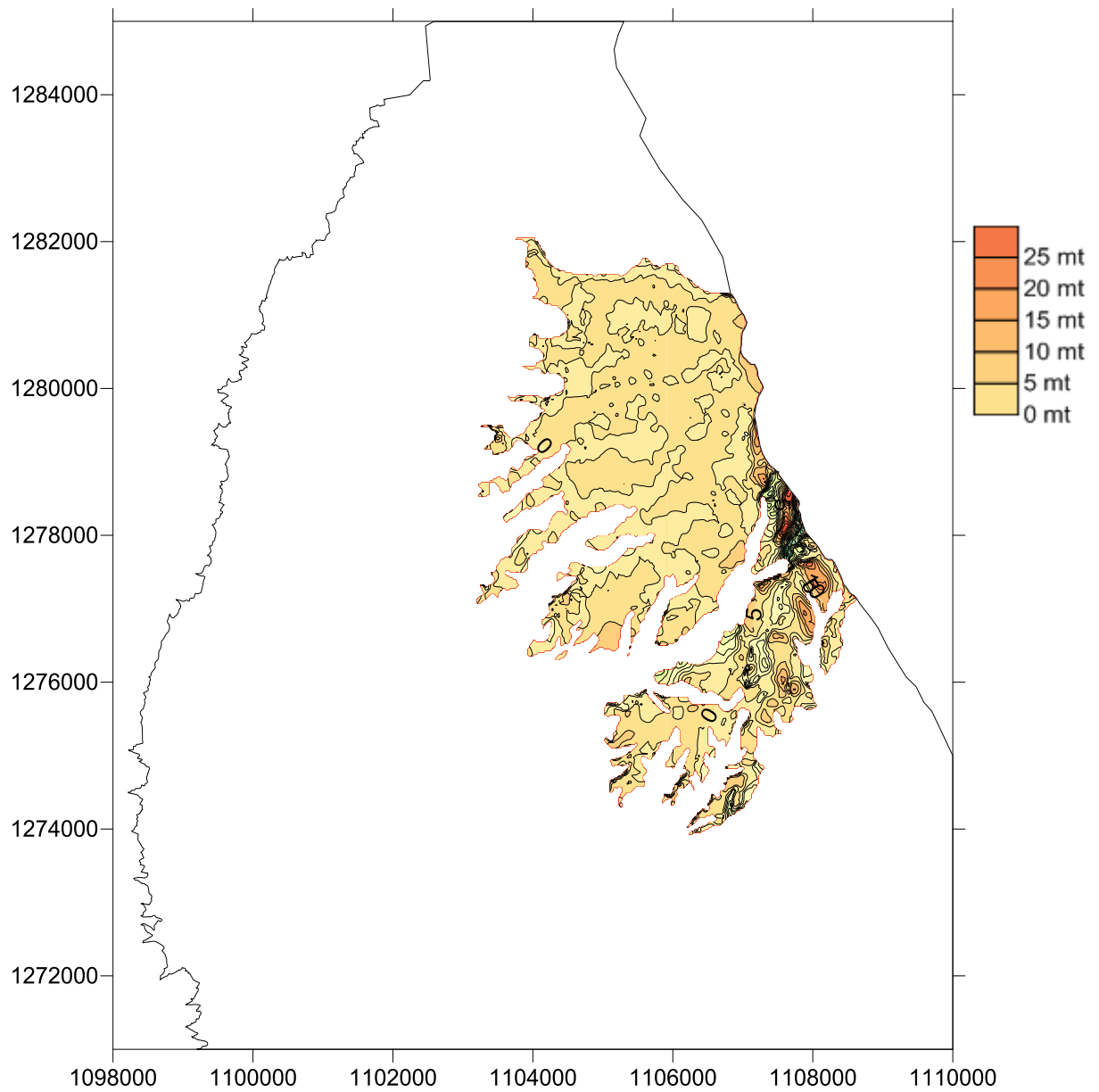
ANEXO F. Planta geológica del Miembro Limos Rojos



ANEXO G. Mapa de espesores del Miembro Finos



ANEXO H. Mapa de espesores del Miembro Limos Rojos



ANEXO I. Niveles Piezométricos 1984-1987

Piezómetro	Coordenada X	Coordenada Y	Cota Terreno	NIVEL PIEZOMÉTRICO 1984											
				Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
SM-1	1107160	1279067	1020.56	1026.04	1026.04	1025.97	1025.75	1025.89	1025.89	1025.17	1025.17	1025.17	1025.17	1025.89	1025.17
SM-2	1106974	1279619	1018.16	1016.64	1016.64	1016.64	1016.36	1015.92	1015.92	1015.92	1015.92	1013.76	1013.76	1013.76	1013.76
SM-3	1106831	1280210	1038.34	1022.20	1022.20	1022.18	1022.18	1022.18	1022.90	1022.18	1022.90	1024.34	1024.34	1023.62	1022.90
SM-4	1106975	1280899	1060.01	1024.56	1024.56	1024.49	1023.77	1023.77	1023.77	1023.05	1023.77	1023.05	1023.05	1023.05	1023.05
SM-5	1106464	1280670	1032.59	1016.72	1016.72	1016.72	1015.64	1015.64	1015.64	1014.92	1014.92	1014.92	1015.64	1015.64	1014.92
SRO-8	1105957	1278394	953.89	946.57	946.57	946.79	946.43	947.15	946.43	946.43	946.43	947.15	947.15	947.15	947.15
SM-7	1105422	1280727	984.52	970.24	970.24	969.81	969.66	968.94	969.66	968.94	968.94	968.22	968.94	968.94	968.22
SM-6	1105945	1281070	1005.98	980.09	980.09	980.09	979.95	979.30	979.30	978.58	978.58	978.58	978.58	977.14	977.14
SM-8	1105066	1281217	965.03	939.11	939.11	939.11	939.11	939.11	939.11	939.11	938.39	938.39	939.11	939.11	939.11
SR-3	1104535	1278247	914.24	891.60	891.60	891.60	891.43	891.43	891.43	891.43	891.43	891.43	891.43	891.43	892.15
SN-7	1104262	1281163	929.89	913.50	913.36	913.50	912.86	912.78	912.78	912.78	912.78	912.78	912.78	912.78	912.78
SN-3	1104488	1280770	937.93	920.38	919.53	919.38	919.02	919.02	919.02	918.30	918.30	918.30	918.30	918.30	918.30
SN-4	1104788	1280712	955.70	935.85	935.63	935.70	934.98	934.91	934.91	934.91	934.19	934.19	934.19	934.91	934.91
SNA-4	1104670	1280295	949.03	932.74	932.81	933.03	932.45	932.45	932.45	931.73	931.73	931.01	931.73	931.73	931.01
SD-4	1104439	1280533	939.18	921.14	921.14	920.78	920.42	920.42	920.42	919.70	919.70	919.70	920.42	920.42	920.42
SN-1	1104237	1280563	930.23	913.32	912.47	912.32	911.96	911.96	911.96	911.24	911.24	911.24	911.24	911.24	911.24
SN-2	1104292	1280322	932.90	917.18	917.11	917.18	916.61	916.46	917.18	916.46	916.46	916.46	916.46	917.18	916.46
SNA-2	1104382	1279883	939.32	922.17	922.17	921.45	921.45	921.45	922.17	922.17	921.45	921.45	921.45	921.45	921.45
SA-9	1104409	1279706	938.46	926.76	926.69	926.76	926.61	926.61	927.33	926.61	926.61	926.61	926.61	926.61	926.61
SA-8	1104155	1279748	929.04	912.32	912.17	912.32	912.03	912.17	912.17	912.17	912.32	912.03	912.17	912.17	912.32
SA-5	1103960	1279551	919.24	906.99	906.99	906.63	906.63	906.99	906.99	907.71	906.99	906.99	906.99	906.99	906.27
SS-3	1104295	1279133	929.20	906.91	906.91	906.19	906.19	906.19	906.91	906.19	906.19	906.19	906.19	906.91	906.91
SJ-4	1104561	1278680	924.59	921.90	921.90	921.23	921.23	921.23	921.95	921.23	921.23	921.23	921.95	921.95	921.95
SS-5	1104827	1279080	939.59	933.00	933.00	933.00	932.57	932.57	933.29	932.57	933.29	933.29	934.01	934.01	933.29
SRO-5	1104983	1278502	931.29	919.54	919.32	919.32	918.96	919.68	919.68	918.96	918.96	919.68	919.68	919.68	919.68
SRO-6	1105265	1278461	931.76	923.00	923.00	922.96	922.96	922.96	922.96	922.96	922.96	922.96	922.96	923.68	922.96
SRO-7	1105600	1278377	939.89	929.82	929.82	929.82	929.60	930.18	930.18	929.46	929.46	929.46	930.18	930.18	930.18
SRO-9	1105414	1278259	933.83	908.50	908.50	908.50	908.21	908.21	908.21	908.21	908.21	908.21	908.21	908.21	908.21
SL-2	1105544	1277983	932.08	920.10	920.10	919.77	919.77	919.77	919.77	919.77	919.77	919.77	919.80	919.80	919.77
SG-2	1105368	1277373	922.37	913.20	913.20	912.68	912.68	912.68	912.68	912.68	912.68	913.40	913.40	913.40	913.45
SG-1	1105538	1276941	911.79	902.11	902.11	901.39	902.11	901.39	902.11	901.39	901.39	901.39	901.39	901.39	901.39
SG-4	1105901	1277443	926.11	923.38	923.38	923.02	923.38	923.38	923.38	923.38	923.38	923.38	923.38	923.38	923.38
SG-5	1105862	1276913	910.16	901.56	901.78	901.78	901.27	901.20	901.20	901.20	901.20	901.20	901.20	901.20	901.20
SV-1	1106081	1276602	914.54	901.47	900.75	900.75	900.75	900.75	900.75	900.75	901.47	900.75	901.47	900.03	900.03
SV-2	1106242	1276996	926.45	920.91	920.55	920.91	920.55	920.55	920.55	920.55	920.55	920.55	921.27	921.27	921.27
SN-5	1104446	1281090	934.47	918.50	918.50	918.37	918.37	918.51	917.79	917.79	917.79	917.07	917.79	917.79	917.79
SR-2	1104079	1281488	920.89	897.35	897.32	897.32	897.32	897.32	897.32	896.60	896.60	896.60	896.60	896.60	896.60

Piezómetro	Coordenada X	Coordenada Y	Cota Terreno	NIVEL PIEZOMÉTRICO 1985											
				Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
SM-1	1107160	1279067	1020.56	1025.89	1025.89	1025.89	1025.89	1025.89	1026.11	1025.89	1026.54	1026.54	1026.54	1024.53	1024.45
SM-2	1106974	1279619	1018.16	1013.80	1013.76	1015.20	1015.20	1012.40	1011.68	1011.24	1013.40	1013.40	1013.04	1013.04	1013.04
SM-3	1106831	1280210	1038.34	1023.60	1022.90	1022.90	1022.90	1022.33	1022.18	1022.33	1022.18	1022.18	1022.18	1025.06	1025.78
SM-4	1106975	1280899	1060.01	1023.19	1023.05	1023.05	1023.05	1023.19	1023.19	1023.19	1023.19	1023.19	1025.86	1026.65	1026.65
SN-5	1106464	1280670	1032.59	1015.64	1015.64	1015.64	1016.36	1015.79	1015.64	1015.79	1015.57	1015.57	1015.57	1017.80	1018.88
SRO-8	1105957	1278394	953.89	947.80	947.15	947.15	947.15	947.15	947.15	947.15	947.00	947.00	948.23	949.67	949.31
SM-7	1105422	1280727	984.52	968.90	968.22	968.22	968.22	968.22	968.22	968.22	968.22	968.22	969.30	971.82	971.82
SM-6	1105945	1281070	1005.98	977.86	977.86	978.58	977.86	977.72	977.86	977.86	977.86	978.58	978.58	979.88	980.02
SM-8	1105066	1281217	965.03	939.00	938.39	938.39	938.39	939.04	938.32	938.32	936.23	936.23	936.23	937.67	938.39
SR-3	1104535	1278247	914.24	891.43	892.15	892.15	891.43	891.50	890.78	891.43	891.58	891.43	891.43	891.29	891.58
SN-7	1104262	1281163	929.89	912.78	912.86	912.78	912.78	912.71	912.78	912.78	912.78	912.71	912.71	911.92	914.22
SN-3	1104488	1280770	937.93	918.30	918.30	918.30	918.30	915.42	915.42	914.85	918.30	918.30	918.45	915.28	920.10
SN-4	1104788	1280712	955.70	934.70	934.91	934.91	934.19	934.34	934.26	934.77	934.19	934.19	934.19	934.19	936.21
SNA-4	1104670	1280295	949.03	930.29	931.73	931.73	930.29	931.52	931.59	931.81	930.65	930.22	930.22	930.15	931.01
SD-4	1104439	1280533	939.18	920.00	920.42	920.42	917.54	919.70	918.41	919.77	919.70	917.54	917.54	916.32	921.29
SN-1	1104237	1280563	930.23	911.24	911.24	911.24	911.24	908.36	908.36	908.00	911.24	911.24	911.39	908.22	913.04
SN-2	1104292	1280322	932.90	916.46	916.46	916.46	916.46	916.32	916.39	916.46	916.46	916.10	916.10	915.60	917.54
SNA-2	1104382	1279883	939.32	922.17	922.89	922.89	922.17	921.60	922.17	922.39	922.17	922.17	922.39	920.95	923.61
SA-9	1104409	1279706	938.46	926.61	927.33	927.33	926.61	926.76	926.61	926.97	926.61	926.50	926.54	925.17	927.91
SA-8	1104155	1279748	929.04	912.17	912.89	912.89	912.17	912.32	912.32	912.89	912.89	912.75	912.75	912.25	914.91
SA-5	1103960	1279551	919.24	906.27	906.27	906.27	906.99	906.78	906.78	906.99	906.78	906.35	906.35	906.35	908.58
SS-3	1104295	1279133	929.20	906.91	906.91	906.91	906.91	906.77	906.55	907.06	906.91	906.55	906.55	906.26	908.21
SJ-4	1104561	1278680	924.59	921.95	921.95	921.95	921.95	921.95	921.95	922.31	921.95	921.95	921.95	923.39	923.18
SS-5	1104827	1279080	939.59	933.29	933.29	933.29	933.29	933.29	933.29	933.65	933.29	933.29	932.71	932.71	932.57
SRO-5	1104983	1278502	931.29	919.60	919.68	919.68	920.40	919.68	920.04	920.55	920.26	920.26	920.26	920.98	921.27
SRO-6	1105265	1278461	931.76	922.96	922.96	923.68	923.68	923.18	923.03	922.60	923.03	923.03	923.11	925.05	924.98
SRO-7	1105600	1278377	939.89	930.18	930.18	930.18	930.18	930.18	930.18	930.18	929.60	929.60	930.10	931.90	931.90
SRO-9	1105414	1278259	933.83	908.21	908.21	908.21	908.93	908.36	908.28	908.36	908.28	908.21	908.21	910.23	910.01
SL-2	1105544	1277983	932.08	919.77	919.77	919.77	919.85	920.13	920.42	920.35	920.13	920.13	920.00	920.00	921.93
SG-2	1105368	1277373	922.37	913.45	913.40	913.40	914.12	914.12	914.12	914.48	914.12	914.12	914.12	916.13	916.13
SG-1	1105538	1276941	911.79	901.39	901.39	902.11	902.11	902.04	902.11	902.11	901.75	901.75	902.11	904.13	903.91
SG-4	1105901	1277443	926.11	923.38	922.66	922.66	922.66	922.30	922.58	922.73	922.30	922.30	922.30	923.95	924.24
SG-5	1105862	1276913	910.16	901.25	901.20	901.92	901.92	901.27	901.56	901.56	901.56	901.56	901.56	903.51	903.72
SV-1	1106081	1276602	914.54	900.75	900.75	900.75	900.75	901.11	901.33	901.47	901.04	900.18	900.18	902.19	903.06
SV-2	1106242	1276996	926.45	921.27	921.27	921.27	920.55	919.61	919.25	917.88	919.32	919.25	919.25	921.27	920.55
SN-5	1104446	1281090	934.47	917.80	917.80	917.79	917.07	919.23	917.79	917.94	917.58	917.03	917.07	915.92	918.87
SR-2	1104079	1281488	920.89	896.60	896.60	896.60	896.60	896.75	896.96	897.25	896.75	896.75	896.82	896.60	898.69

Piezómetro	Coordenada X	Coordenada Y	Cota Terreno	NIVEL PIEZOMÉTRICO 1986											
				Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
SM-1	1107160	1279067	1020.56	1026.04	1026.04	1026.18	1025.89	1025.75	1025.75	1025.75	1025.75	1025.89	1025.89	1025.75	1025.61
SM-2	1106974	1279619	1018.16	1013.04	1013.04	1013.19	1013.04	1013.04	1012.32	1012.32	1012.32	1012.32	1010.09	1010.09	1012.18
SM-3	1106831	1280210	1038.34	1025.00	1022.90	1023.48	1023.62	1022.40	1022.04	1022.04	1022.04	1022.33	1022.33	1022.90	1023.05
SM-4	1106975	1280899	1060.01	1026.00	1025.70	1025.71	1025.93	1024.63	1024.35	1024.35	1024.35	1025.07	1025.07	1025.21	1024.49
SN-5	1106464	1280670	1032.59	1018.00	1016.72	1016.51	1017.08	1015.79	1015.64	1015.64	1014.71	1014.71	1014.71	1015.43	1014.92
SRO-8	1105957	1278394	953.89	949.00	947.87	947.87	947.87	950.96	951.47	951.47	947.72	947.72	947.80	951.11	950.03
SM-7	1105422	1280727	984.52	971.00	969.66	969.52	969.59	968.58	968.80	968.80	968.20	968.22	968.20	968.22	967.86
SM-6	1105945	1281070	1005.98	980.00	977.86	977.86	977.86	978.22	977.86	977.86	977.80	978.44	978.40	977.86	978.36
SM-8	1105066	1281217	965.03	938.00	936.37	936.95	937.31	936.23	939.11	939.11	938.97	938.97	938.07	938.03	938.53
SR-3	1104535	1278247	914.24	893.45	891.58	891.07	891.86	891.36	891.58	891.58	891.58	891.43	891.43	891.43	891.43
SN-7	1104262	1281163	929.89	914.30	912.06	912.06	912.71	912.28	912.35	912.35	912.35	912.21	912.21	912.21	912.42
SN-3	1104488	1280770	937.93	914.80	915.00	915.00	918.88	918.30	918.30	918.09	917.94	917.94	918.16	918.16	918.30
SN-4	1104788	1280712	955.70	936.00	934.05	934.05	934.70	934.41	934.05	934.05	933.90	933.90	934.00	934.19	934.05
SNA-4	1104670	1280295	949.03	931.00	928.71	931.01	929.21	929.00	929.00	929.00	903.44	903.44	928.85	928.85	928.49
SD-4	1104439	1280533	939.18	919.56	919.00	917.11	916.61	919.63	918.00	915.24	914.66	914.66	914.66	916.82	918.91
SN-1	1104237	1280563	930.23	908.00	908.00	908.00	911.82	911.24	911.03	911.03	910.58	910.88	911.10	911.10	911.24
SN-2	1104292	1280322	932.90	917.00	915.74	915.45	913.73	915.74	915.74	915.74	915.70	915.89	915.74	915.74	915.74
SNA-2	1104382	1279883	939.32	923.00	921.31	920.95	921.96	921.17	921.30	921.31	920.88	920.88	922.03	922.03	921.45
SA-9	1104409	1279706	938.46	927.00	925.89	924.38	926.40	926.40	924.60	924.60	925.60	926.47	926.47	926.47	926.04
SA-8	1104155	1279748	929.04	914.00	912.75	912.75	913.00	913.00	910.70	910.73	912.17	912.17	912.17	913.47	913.00
SA-5	1103960	1279551	919.24	908.00	906.42	906.27	906.63	906.56	906.27	906.27	906.78	906.78	906.78	906.99	906.99
SS-3	1104295	1279133	929.20	908.00	906.41	906.12	906.41	907.06	906.17	906.19	906.34	906.34	906.55	906.55	906.34
SJ-4	1104561	1278680	924.59	921.23	921.23	920.51	921.95	921.59	921.23	921.23	921.50	921.95	922.00	923.39	923.39
SS-5	1104827	1279080	939.59	932.57	932.42	932.21	933.14	932.57	932.57	932.57	932.57	932.78	933.00	933.29	932.71
SRO-5	1104983	1278502	931.29	921.00	919.68	919.54	919.68	919.68	919.68	919.68	920.00	920.26	919.47	919.47	919.32
SRO-6	1105265	1278461	931.76	924.00	922.96	923.39	923.18	922.96	923.18	923.18	923.32	923.32	923.32	923.32	922.96
SRO-7	1105600	1278377	939.89	931.90	929.67	929.82	930.03	929.96	929.96	929.96	929.46	930.18	930.18	930.68	929.67
SRO-9	1105414	1278259	933.83	909.65	908.21	908.50	908.36	908.21	908.21	908.21	908.21	908.57	908.57	908.43	908.36
SL-2	1105544	1277983	932.08	921.90	919.85	919.80	919.77	920.49	920.49	919.77	919.77	920.85	920.85	921.21	920.64
SG-2	1105368	1277373	922.37	915.56	914.12	912.00	912.00	914.12	914.12	913.97	913.97	914.26	914.12	914.12	916.00
SG-1	1105538	1276941	911.79	903.91	902.11	902.04	902.26	902.11	902.11	902.11	902.11	902.11	903.48	903.48	902.26
SG-4	1105901	1277443	926.11	924.24	922.15	921.94	922.08	922.08	922.08	921.22	921.22	922.30	922.30	922.44	922.30
SG-5	1105862	1276913	910.16	903.70	901.92	901.92	901.78	901.42	901.42	901.42	901.42	901.42	901.42	901.78	901.56
SV-1	1106081	1276602	914.54	903.00	900.82	901.62	899.60	900.03	900.75	900.75	901.11	901.11	901.11	901.62	900.90
SV-2	1106242	1276996	926.45	920.50	918.02	917.66	917.00	917.09	920.19	920.19	920.19	917.66	917.66	918.24	918.02
SN-5	1104446	1281090	934.47	919.38	919.30	916.93	916.50	917.79	916.35	916.35	916.35	917.43	917.43	917.43	917.22
SR-2	1104079	1281488	920.89	898.76	897.18	897.18	897.54	895.38	896.96	896.96	896.90	896.90	896.90	896.90	895.88

Piezómetro	Coordenada X	Coordenada Y	Cota Terreno	NIVEL PIEZOMÉTRICO 1987											
				Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
SM-1	1107160	1279067	1020.56	1025.39	1025.39	1025.39	1025.53	1025.03	1025.17	1025.03	1025.17	1025.17	1025.80	1025.89	1025.89
SM-2	1106974	1279619	1018.16	1009.44	1009.44	1012.18	1012.18	1011.96	1013.04	1013.04	1013.04	1011.60	1010.16	1010.16	1013.76
SM-3	1106831	1280210	1038.34	1022.54	1022.33	1022.33	1022.54	1021.82	1018.01	1017.86	1017.86	1020.60	1020.60	1020.74	1020.38
SM-4	1106975	1280899	1060.01	1025.70	1025.70	1025.21	1025.21	1025.57	1025.57	1025.57	1025.57	1026.65	1026.65	1026.65	1026.65
SN-5	1106464	1280670	1032.59	1014.78	1014.35	1014.35	1014.20	1014.20	1013.70	1013.70	1013.70	1014.20	1014.20	1014.20	1013.84
SRO-8	1105957	1278394	953.89	950.03	950.03	950.03	950.17	948.59	948.59	948.59	948.59	948.60	953.63	950.24	947.87
SM-7	1105422	1280727	984.52	967.50	967.36	967.36	967.50	966.42	966.42	966.28	966.28	966.06	966.06	966.64	966.42
SM-6	1105945	1281070	1005.98	977.86	977.72	977.72	977.72	977.64	977.64	977.57	977.57	978.00	978.00	977.86	977.50
SM-8	1105066	1281217	965.03	938.53	938.15	938.25	938.25	937.31	937.02	936.95	936.95	936.88	936.88	937.60	938.39
SR-3	1104535	1278247	914.24	891.58	891.58	891.58	892.01	891.58	891.79	892.01	892.30	892.08	892.08	892.15	892.15
SN-7	1104262	1281163	929.89	912.64	912.21	912.21	912.21	912.35	912.21	912.28	912.21	912.21	912.21	912.42	911.34
SN-3	1104488	1280770	937.93	917.94	918.09	918.09	917.80	917.73	917.73	918.23	918.09	917.58	917.60	918.01	917.94
SN-4	1104788	1280712	955.70	933.69	933.47	933.47	933.33	933.11	933.11	933.47	933.40	933.40	933.45	933.47	933.47
SNA-4	1104670	1280295	949.03	928.85	929.00	929.00	928.85	928.49	928.49	928.13	930.29	929.93	929.90	928.28	929.43
SD-4	1104439	1280533	939.18	917.00	916.82	916.82	915.96	916.70	916.25	919.34	918.84	916.10	916.10	916.10	919.34
SN-1	1104237	1280563	930.23	910.88	911.03	911.03	910.74	910.67	910.67	911.17	911.03	910.52	910.70	910.95	910.88
SN-2	1104292	1280322	932.90	915.53	915.67	915.67	915.38	914.16	915.74	915.74	915.89	915.38	915.70	915.74	915.74
SNA-2	1104382	1279883	939.32	922.39	922.39	922.39	921.60	921.09	921.09	922.17	921.60	922.17	921.60	921.60	921.09
SA-9	1104409	1279706	938.46	926.47	926.04	926.04	926.04	925.32	925.32	925.89	925.89	925.89	926.11	926.11	926.04
SA-8	1104155	1279748	929.04	913.25	913.47	913.00	912.89	911.81	911.45	913.04	912.89	912.89	912.89	913.25	913.25
SA-5	1103960	1279551	919.24	906.85	906.90	906.99	906.85	906.85	906.85	907.35	907.21	907.14	907.14	907.14	905.91
SS-3	1104295	1279133	929.20	906.34	906.34	906.34	906.34	906.19	906.34	906.34	906.41	906.19	906.55	906.55	906.34
SJ-4	1104561	1278680	924.59	921.80	921.00	920.50	921.95	921.80	921.37	922.31	922.09	922.31	922.10	922.09	921.80
SS-5	1104827	1279080	939.59	932.78	932.93	932.93	932.71	932.57	932.71	933.29	932.93	932.78	932.90	932.93	932.93
SRO-5	1104983	1278502	931.29	919.32	919.47	919.47	919.32	919.54	919.54	920.04	919.32	919.83	919.80	919.68	919.32
SRO-6	1105265	1278461	931.76	923.11	923.39	923.39	923.11	923.11	923.11	923.54	923.61	923.32	923.32	923.32	923.11
SRO-7	1105600	1278377	939.89	930.18	930.18	930.18	929.96	929.46	929.46	930.54	930.32	930.18	930.18	930.32	930.32
SRO-9	1105414	1278259	933.83	908.21	908.21	908.28	908.07	907.49	908.36	908.57	908.57	908.28	908.28	908.93	908.93
SL-2	1105544	1277983	932.08	920.64	920.64	920.64	920.57	920.64	920.64	921.14	921.00	920.85	920.85	921.14	920.64
SG-2	1105368	1277373	922.37	913.76	913.54	913.54	913.40	913.25	913.40	914.12	914.04	913.54	913.54	913.97	913.97
SG-1	1105538	1276941	911.79	902.76	902.26	902.26	902.11	902.11	902.11	902.83	902.83	902.47	902.47	902.98	902.62
SG-4	1105901	1277443	926.11	922.30	922.30	922.30	922.51	921.58	921.22	921.94	921.94	921.94	921.94	922.08	921.94
SG-5	1105862	1276913	910.16	901.42	901.56	901.56	901.92	901.20	901.20	901.20	901.35	901.20	901.20	901.20	900.84
SV-1	1106081	1276602	914.54	901.47	901.47	901.33	901.47	898.95	898.95	901.40	901.00	900.75	898.74	898.74	898.59
SV-2	1106242	1276996	926.45	917.66	920.70	920.69	920.91	916.80	916.80	919.25	918.89	920.55	920.55	921.34	920.55
SN-5	1104446	1281090	934.47	917.43	917.65	917.65	917.07	915.63	916.50	916.50	916.35	916.35	916.35	919.30	919.30
SR-2	1104079	1281488	920.89	897.11	897.32	897.32	895.16	896.96	896.96	897.32	897.25	897.32	896.75	896.75	897.32