

Maestría en Ingeniería Civil

**Planteamiento de un modelo matemático para la evaluación de acuíferos de
aguas termales: caso de estudio sistema geotérmico de Paipa**

Iván Camilo Chaparro Barreto



**Escuela Colombiana de Ingeniería
“Julio Garavito”
Facultad de Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Civil con Énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio
Ambiente
Bogotá D.C.
2020**

**Planteamiento de un modelo matemático para la evaluación de acuíferos de
aguas termales: caso de estudio sistema geotérmico de Paipa**

**trabajo de grado para optar por el título de maestría en ingeniería civil con
énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente**

director

Ing. Yuly Andrea Sánchez Londoño, I.C, ESP, MSC IC

Bogotá D.C. septiembre 2020

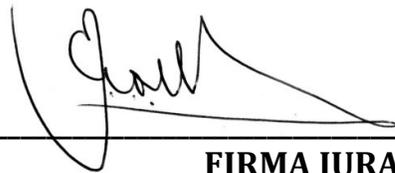
La tesis de maestría titulada “Planteamiento de un modelo matemático para la evaluación de acuíferos de aguas termales: caso de estudio sistema geotérmico de Paipa”, presentada por Iván Camilo Chaparro Barreto, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos hidráulicos y medio ambiente.



FIRMA DIRECTOR DEL PROYECTO:



FIRMA JURADO 1:



FIRMA JURADO 2:

RESUMEN

Tesis documental de estudio para la evaluación técnica de la explotación de acuíferos subterráneos geotermiales usando modelos matemáticos, donde se presenta el estado del arte referente a la industria turística y terapéutica que da origen a la explotación de este recurso. Se presenta el caso de estudio del sistema geotérmico que alimenta la industria turística de Paipa en el departamento de Boyacá - Colombia.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su más sincero agradecimiento a la Ingeniera Yuly Andrea Sánchez por su colaboración en la preparación de este manuscrito. Además, al ingeniero German Santos quien en calidad de docente motivo su trayecto profesional y un inmenso agradecimiento a mis padres Flaminio y Alcira por su apoyo incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	5
2	Planteamiento del problema	8
3	Marco TEÓRICO	9
3.1	Fuentes termales en Colombia	9
3.1.1	Sistemas hidrográficos de Colombia	9
3.1.2	Sistemas hidrogeológicos de Colombia	10
3.1.3	Área de influencia del caso de estudio	11
3.2	Hidrología de la zona	11
3.2.1	Climatología	11
3.3	Geología de la zona	12
3.4	Modelo hidrológico	13
3.4.1	Geometría, límites geológicos y condiciones de contorno del sistema	14
3.4.2	Balance hídrico	14
3.4.3	Redes de flujo	15
3.5	Modelo geológico	16
3.6	Modelo matemático	16
3.6.1	Fundamentos matemáticos	16
3.6.2	Modflow y Model Muse	18
4	Marco metodológico	20
4.1	Tipo de investigación	20

4.2	Compilación bibliográfica	21
4.3	Modelo hidrológico	21
4.3.1	Sistema de coordenadas de referencia espacial para el modelo	21
4.3.2	Área y zona hidrológica del modelo	22
4.3.3	Topografía del modelo hidrológico	22
4.3.4	Precipitación de las subcuencas	23
4.3.5	Evapotranspiración de cada subcuenca	23
4.3.6	Preprocesamiento con la herramienta HEC GEO-HMS	24
4.3.7	Hidrogramas unitarios de precipitación	25
4.3.8	Modelo HEC-HMS	27
4.4	Modelo geológico	28
4.5	Modelo matemático	28
5	<i>estado del arte</i>	31
5.1	Contexto Colombiano	31
5.2	Contexto Global	33
6	<i>Desarrollo del modelo</i>	38
6.1	Modelo hidrológico	38
6.2	Modelo geológico	44
6.2.1	Geotecnia de la zona	46
6.2.2	Modelo localizado	48
6.3	Modelo matemático	51
6.3.1	Calibración del modelo	57

7	<i>ANÁLISIS de resultados</i> _____	59
8	<i>Conclusiones Y RECOMENDACIONES</i> _____	68
9	<i>BIBLIOGRAFÍA</i> _____	71
10	<i>Anexos</i> _____	75

TABLA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 3-1 Mapa de zonas hidrogeológicas de Colombia (IDEAM, n.d.)</i>	10
<i>Ilustración 3-2 Zona de estudio</i>	11
<i>Ilustración 3-3 Zona de estudio geológico</i>	12
<i>Ilustración 3-4 Zona de estudio geológico</i>	13
<i>Ilustración 3-5 Balance hídrico simplificado de un sistema hidrogeológico Fuente: (Barrera García, 2019a)</i>	15
<i>Ilustración 3-6 Ejemplo de red de flujo Fuente: (Barrera García, 2019a)</i>	15
<i>Ilustración 3-7 Esquema del experimento de Darcy Fuente: (Barrera García, 2019b)</i>	17
<i>Ilustración 4-1 Esquema del hidrograma unitario del SCS Fuente: (Román-, n.d.)</i>	26
<i>Ilustración 4-2 Esquema de hidrograma unitario adimensional del SCS Fuente: (Román-, n.d.)</i>	27
<i>Ilustración 6-1 Mapa de la zona hidrológica del río Sogamoso</i>	38
<i>Ilustración 6-2 Topografía de la zona hidrológica de Sogamoso</i>	39
<i>Ilustración 6-3 Topografía de la zona hidrológica sin hundimientos</i>	40
<i>Ilustración 6-4 Cauces calculados con HecGeoHMS</i>	41
<i>Ilustración 6-5 Subcuencas obtenidas</i>	42
<i>Ilustración 6-6 Estaciones de precipitación y evapotranspiración</i>	43
<i>Ilustración 6-7 Mapa geológico de la zona</i>	44
<i>Ilustración 6-8 Mapa geotécnico de la zona</i>	46
<i>Ilustración 6-9 Zona de estudio presentada por Claudia Alfaro Fuente: (Alfaro–Valero et al., 2020)</i>	48
<i>Ilustración 6-10 Mapa de distribución de materiales Modelo Localizado</i>	49
<i>Ilustración 6-11 Fallas consideradas en el modelo localizado</i>	50
<i>Ilustración 6-12 Vista en planta de modelo geológico localizado.</i>	50
<i>Ilustración 6-13 Visualización 3D del modelo geológico</i>	51
<i>Ilustración 6-14 Topografía importada a Model Muse</i>	52
<i>Ilustración 6-15 Distribución espacial de materiales</i>	53
<i>Ilustración 6-16 Conductividades hidráulicas según material Fuente: (GEOCIENCIAS SAS, n.d.)</i>	54

<i>Ilustración 7-1 Resultados de la simulación #127</i>	61
<i>Ilustración 7-2 Diferencia entre la lámina de agua simulada y el nivel del terreno.</i>	62
<i>Ilustración 7-3 Lámina de agua resultado de la simulación #138</i>	63
<i>Ilustración 7-4 Diferencia entre la lámina de agua simulada y el nivel del terreno de la simulación #138.</i>	64
<i>Ilustración 7-5 Resultados de la simulación #138 en la formación Tílatá</i>	65
<i>Ilustración 7-6 Lámina de agua del modelo regional</i>	66
<i>Ilustración 7-7 Resultado en la segunda capa del modelo regional</i>	67

TABLAS

<i>Tabla 5-1 Resumen contexto colombiano</i>	33
<i>Tabla 5-2 Resumen contexto global</i>	36
<i>Tabla 6-1 Capas de acuíferos modelados en Model Muse</i>	52
<i>Tabla 6-2 Valores de conductividad iniciales para el modelo</i>	54
<i>Tabla 6-3 Ecuaciones de planos de falla del modelo local</i>	55
<i>Tabla 6-4 Localización y caudal de pozos de la industria turística</i>	57
<i>Tabla 7-1 Parámetros de simulaciones que convergen y coinciden con la realidad</i>	59
<i>Tabla 10-1 Datos de precipitación y evapotranspiración anuales en milímetros de cada subcuenca</i>	75
<i>Tabla 10-2 Infiltración anual de cada subcuenca</i>	77
<i>Tabla 10-3 Materiales encontrados en el área</i>	79
<i>Tabla 10-4 Parámetros de simulación para calibración del modelo local</i>	91

GLOSARIO

Acuícludo: Reservorio de agua conformado por formaciones geológicas subterráneas que contienen agua en cantidad apreciable y que no permiten el flujo de agua lento. Este cuerpo geológico puede recargar otras formaciones geológicas. (Barrera García, 2019a)

Acuífero: Reservorio de agua conformado por formaciones geológicas subterráneas que contienen agua en cantidad apreciable y que permiten el flujo de agua en su interior. (Barrera García, 2019a)

Acuífugo: Reservorio de agua conformado por formaciones geológicas subterráneas que no contienen agua. (Barrera García, 2019a)

Acuitardo: Reservorio de agua conformado por formaciones geológicas subterráneas que contienen agua pero que no permiten el flujo de agua en su interior por lo cual no es explotable. (Barrera García, 2019a)

Acuíferos confinados: Formaciones geológicas subterráneas que almacenan agua cuya capa superior se encuentra a presión y cuya capa inferior es impermeable. (Barrera García, 2019a)

Acuíferos libres: Formaciones geológicas subterráneas que almacenan agua cuya capa superior se encuentra a presión atmosférica y cuya capa inferior es una capa impermeable. (Barrera García, 2019a)

Acuíferos semiconfinados: Formaciones geológicas subterráneas que almacenan agua cuya capa superior se encuentra a presión y su capa inferior es semi impermeable por lo cual permite recarga de formaciones inferiores. (Barrera García, 2019a)

Calibración del modelo matemático: Proceso de calibración consiste en realizar un ajuste simultáneo de los parámetros hidrogeológicos hasta lograr que los valores de los

niveles freáticos simulados tengan una coincidencia aceptable con los valores observados (validación). (Barrera García, 2019b)

Coefficiente de almacenamiento: Volumen de agua que se obtiene de un acuífero, que tenga por base la unidad de área y por altura, la altura saturada del acuífero, cuando se deprime el nivel piezométrico en una unidad. (Barrera García, 2019a)

Conductividad hidráulica: Representa la mayor o menor facilidad con la que el medio deja pasar el agua por unidad de área transversal a la dirección del flujo.(Barrera García, 2019a)

DEM: Modelo digital de terreno.

Hidrogeología: Parte de la geología que estudia el ciclo de las aguas superficiales y subterráneas, así como su prospección, captación y protección. (Barrera García, 2019a)

Nivel freático: Superficie del agua almacenada en el suelo que está a presión atmosférica. (“ Nivel freático del suelo | ingeniero de caminos,” n.d.)

Permeabilidad hidráulica: Caudal que pasa o atraviesa una sección vertical unitaria del acuífero, bajo una diferencia de presión hidrostática y a una temperatura dada. (Barrera García, 2019a)

Porosidad eficaz para el flujo: Es la relación entre el volumen de espacios libres interconectados del suelo y el volumen total de la muestra. (Barrera García, 2019a)

Porosidad primaria: Porosidad causada por los espacios intersticiales libres en el suelo. (Barrera García, 2019a)

Porosidad secundaria: Porosidad causada por micro fisuras y fisuras presentes en el suelo por acción mecánica del entorno. (Barrera García, 2019a)

Porosidad total: Es la relación entre el volumen total de espacios libres presentes en el volumen total del suelo. (Barrera García, 2019a)

Pruebas de bombeo: Ensayo que se realiza para observar la respuesta de un acuífero frente a la extracción de agua almacenada en su interior. (GEOCIENCIAS SAS, n.d.)

Sistema hidrogeológico: Agrupación de varios reservorios subterráneos de agua que se consideran en conjunto para un uso racional del recurso hidrogeológico. (Barrera García, 2019a)

Transmisividad: Caudal que atraviesa una franja vertical del acuífero, que tenga por ancho la unidad de medida y por altura, la altura saturada del acuífero, bajo una diferencia de presión hidrostática y a una temperatura dada. (Barrera García, 2019a)

Zona saturada: Parte del suelo que contiene agua en la totalidad de los poros interconectados o fisuras presentes en su interior. (Barrera García, 2019a)

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo investigativo presenta el planteamiento de un modelo matemático para la evaluación hidráulica del acuífero geotermal que alimenta a la industria turística y terapéutica del municipio de Paipa, departamento de Boyacá - Colombia a partir de datos existentes. Adicionalmente se compilan trabajos referentes al estudio y modelamiento del recurso hidrogeológico geotermal alrededor del mundo.

El municipio de Paipa se destaca como sitio de interés turístico por sus aguas termales, debido a que es una de las principales actividades económicas.

Actualmente no se ha estudiado a profundidad el comportamiento físico de acuíferos subterráneos que producen aguas termales, se han realizado investigaciones en España, en la región de Cataluña, en Japón, entre otros lugares del mundo sobre la explotación de estos recursos para la industria energética. Para el caso colombiano se ha hecho la caracterización de las fallas geológicas y su relación con el flujo de calor dentro de los acuíferos cercanos al nevado del Ruíz, pero no se ha estudiado el comportamiento físico de este tipo de acuíferos para determinar su permeabilidad y transmisividad, entre otras características en Colombia.

A nivel mundial se han hecho estudios sobre el uso de acuíferos geotermales para generación de energía, pero en el campo de explotaciones con fines recreativos como baños termales, no se encuentran estudios. En Colombia se han realizado muy pocos trabajos en el área de aguas subterráneas, como tal no se encuentran modelaciones hidráulicas de acuíferos subterráneos que estén siendo explotados.

En la presente tesis se presenta una revisión bibliográfica que compiló estudios actuales sobre la temática planteada. Adicionalmente, se realizó un planteamiento de modelo matemático que se desarrolló usando información de fuentes secundarias como, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el IDEAM, la corporación autónoma de Boyacá CORPOBOYACA, la NASA, el DANE, entre otros. A partir de los datos recopilados de segundas fuentes se planteó un modelo matemático que describe el acuífero explotado en Paipa. Finalmente se analizaron los resultados obtenidos y se concluyó acerca del problema inicialmente descrito.

A partir del trabajo realizado en el acuífero geotermal de Paipa, se espera describir matemáticamente el comportamiento geofísico de un acuífero geotérmico, verificar si los datos existentes son suficientes para realizar este modelo y si se encuentran disponibles como datos abiertos. Adicionalmente encontrar una metodología adecuada para el análisis geofísico de un acuífero que permita manejar de manera apropiada el agua subterránea.

En el capítulo 2 se plantea el problema, se enmarca la temática dentro del área de conocimiento y dentro de la historia. Adicionalmente, se enmarca el estudio a nivel local y regional.

En el capítulo 3 se presenta el marco teórico a considerar para el desarrollo del modelo.

En el capítulo 4 se presenta el marco metodológico del presente estudio, en él se describe el proceso detallado realizado para alcanzar los objetivos planteados.

En el capítulo 5 se presenta la compilación bibliográfica de estudios realizados a nivel global y local acerca del modelamiento matemático de acuíferos geotermales.

En el capítulo 6 se presenta el modelo matemático planteado sobre el acuífero geotermal que alimenta la industria turística en Paipa.

En el capítulo 7 se analizan los resultados obtenidos en el desarrollo del modelo matemático planteado y finalmente se presentan las conclusiones a partir de los resultados obtenidos del desarrollo del trabajo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El modelo matemático planteado se enmarca en el área de la mecánica de fluidos en medios porosos más específicamente el área de las aguas geotermales. Las fuentes de aguas termales provenientes del terreno han sido ampliamente explotadas desde la prehistoria, frecuentemente se relacionan con entidades religiosas, así mismo se han usado por sus propiedades terapéuticas.

Actualmente dada la alta demanda por el recurso hídrico resulta importante comprender la forma en la que se comportan los recursos que explotamos, así como el medio del cual se originan. A nivel global se han realizado varios estudios que consideran modelaciones matemáticas para comprender de una manera adecuada el comportamiento de las fuentes subterráneas y su producto. Gran parte de los estudios se realizan con fines de explotación para la industria energética o minera. Alrededor del mundo no se encuentra un modelo aplicado a un acuífero geotermal con uso terapéutico o turístico.

MARCO TEÓRICO

3.1 Fuentes termales en Colombia

En el territorio colombiano se evidencia la existencia de numerosos afloramientos de aguas termales de los cuales, mayoritariamente, se producen debido a fenómenos volcánicos o magmáticos. Por otro lado, se encuentran sistemas hidrotermales que tienen origen en gradientes geotérmicos. (Alfaro, 2001) Estos sistemas se ven interrelacionados con los sistemas hidrográficos superficiales.

3.1.1 Sistemas hidrográficos de Colombia

En el contexto nacional se encuentran cuatro sistemas hidrográficos. El sistema del pacífico, conformado por más de 200 ríos, compuesto por: Las hoyas de los ríos Baudó, San Juan, Patía y el río Mira entre otros. Este sistema se caracteriza por su alta pluviosidad con ríos cortos y caudalosos. (Vargas Martínez, 2005)

El sistema Caribe, el sistema más importante en el contexto de la economía del país. Las hoyas más importantes que conforman este sistema son las de los ríos Magdalena, Cauca, Atrato, Sierra nevada de Santa Marta y la Guajira, los ríos León, Sinú y Catatumbo. El sistema de la Orinoquía caracterizado por sabanas y prados con altitudes entre 100 y 500 m.s.n.m. y una selva lluviosa con grandes ríos conocida como la Amazonía. Los ríos más importantes de este sistema son: Orinoco, Arauca, Meta, Vichada y Guaviare.

Finalmente se encuentra el sistema del Amazonas donde se encuentran los ríos más largos del país y los más destacados, desde el punto de vista económico son: Río Negro o Guainía, el Caquetá, el Vaupés y el Putumayo.

3.1.2 Sistemas hidrogeológicos de Colombia

Los sistemas de reservorios subterráneos del país se han dividido en cinco regiones hidrogeológicas: Caribe, Magdalena-Cauca, Orinoco, Amazonas y Pacifico. Cada región tiene características hidráulicas e hidrológicas similares.

A continuación, se presenta una imagen de la distribución de las mencionadas regiones:

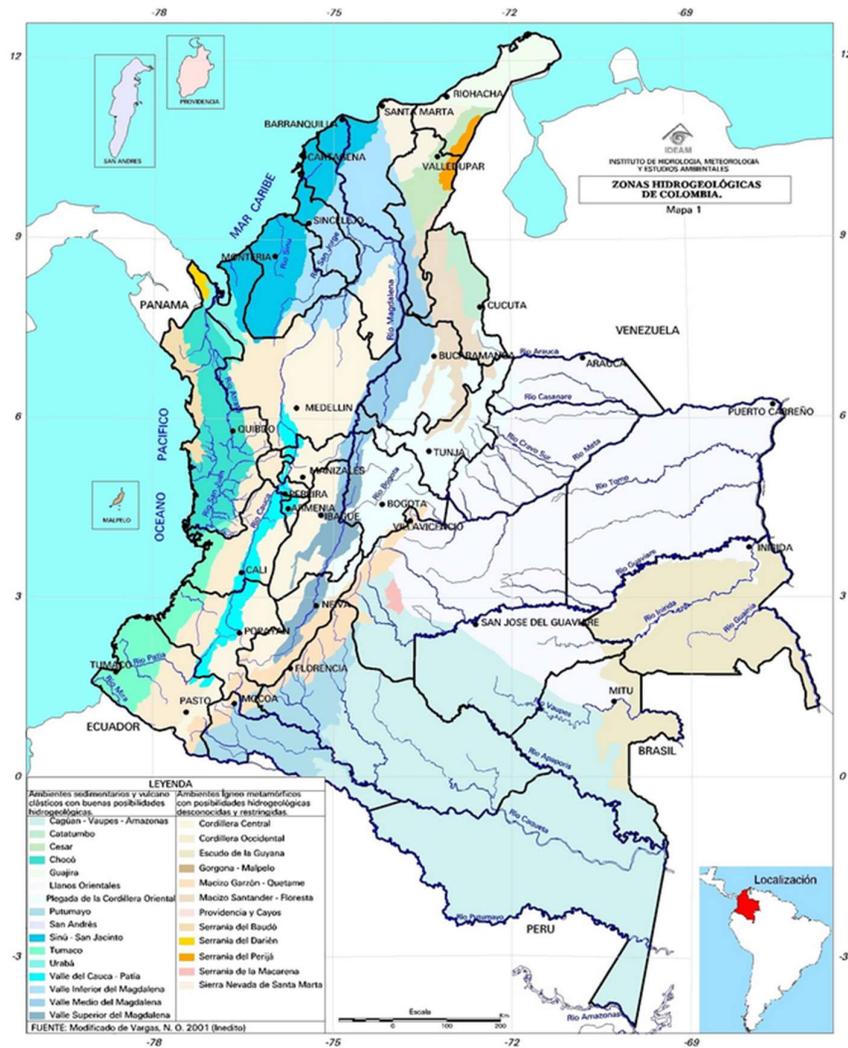


Ilustración 0-1 Mapa de zonas hidrogeológicas de Colombia

(IDEAM, n.d.)

3.1.3 Área de influencia del caso de estudio

El área de interés del presente trabajo se encuentra en la región Magdalena-Cauca la cual comprende las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca. (Militares, 1995). La zona de interés se sitúa cerca de la cuenca del río Sogamoso, donde se encuentran las vertientes del río Suarez, el río Fonce y Chicamocha; esta región corresponde a la zona hidrogeológica de la plegada de la cordillera oriental.

Hidrología de la zona

3.2.1 Climatología

3.2.1.1 Hidrografía

En el presente trabajo se consideró para el modelo hidrológico la zona del río Sogamoso el cual se alimenta de las vertientes de los ríos Suarez, Fonce y Chicamocha; esta área se encuentra en la cuenca del Magdalena-Cauca. (Ver Ilustración 3-2).

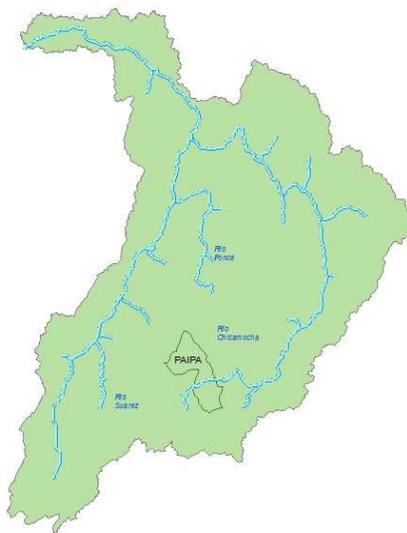


Ilustración 0-2 Zona de estudio

Geología de la zona

Para el modelo geológico se tomó en cuenta la zona comprendida por los municipios Paipa, Duitama, Sotaquirá, Combita, Tibasosa, Tuta, Tiravitoba, Oicata, Iza, Toca, Pesca, Chivata, Cuitiva, Tota y Siachoque. (Ver Ilustración 3-3).

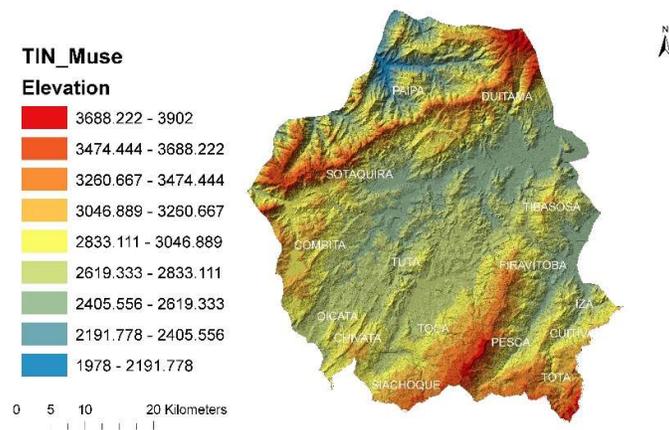


Ilustración 0-3 Zona de estudio geológico

Esta área se forma en las cercanías de la cordillera oriental, que se caracteriza por la presencia de fallas y pliegues geológicos. También prevalece la presencia de roca sedimentaria con intrusiones ígneas.

En la zona prevalecen rocas con facies de arenitas de origen sedimentario y sedimentos de origen fluvial. Se encuentran diferentes formaciones en las que se presentan materiales permeables que permiten el flujo del agua. A continuación, se presenta un mapa geológico del departamento de Boyacá construido a partir de información tomada del Servicio Geológico Colombiano. (Ver ilustración 3-4).

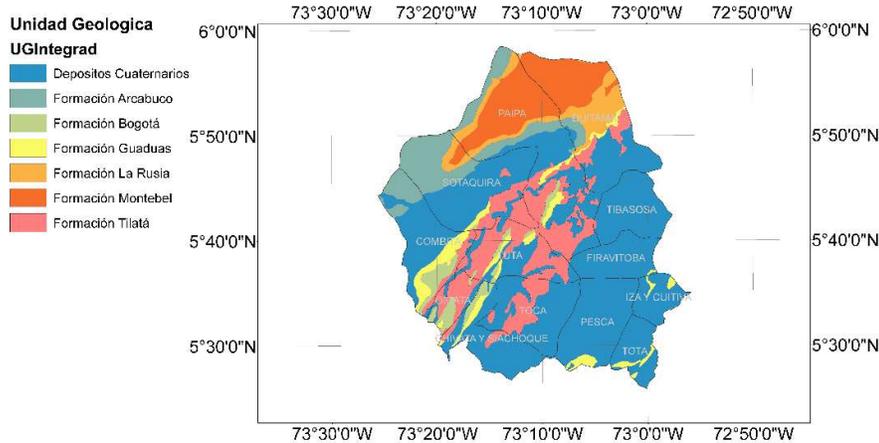


Ilustración 0-4 Zona de estudio geológico

Modelo hidrológico

El modelo hidrológico conceptual es una representación cualitativa y gráfica de un sistema y las relaciones entre los conceptos tales como características, parámetros, variables, constantes, límites e incógnitas. El modelo conceptual sirve para desglosar un problema e identificar cómo se comporta el sistema en el cual se desarrolla la solución.

Para lograr un modelo conceptual se deben definir adecuadamente los objetivos de este ya que son la base para abstraer el problema. Una vez definidos los objetivos del problema, se eligen los componentes de este. Finalmente, se representa el comportamiento del sistema modelado a través de gráficos que muestran las relaciones entre los componentes del sistema y sus dinámicas.

Para describir un sistema hidráulico e hidrogeológico se debe conocer las siguientes características del sistema:

- Geometría y límites geológicos del sistema
- Balance hídrico

- Red de flujo

3.4.1 Geometría, límites geológicos y condiciones de contorno del sistema

Se encuentran los siguientes límites o condiciones de contorno:

Límites impermeables: Se produce en capas o planos en los que no hay intercambio de agua debido a la baja permeabilidad de los materiales geológicos presentes o a una diferencia hidrostática nula.

Límites de piezometría constante: Se produce en contactos del acuífero a modelar y grandes cuerpos de agua tales como mares o grandes lagos.

Límites de gradiente constante: Zonas alejadas del acuífero que no afectan la pendiente hidráulica en la zona de estudio.

Condiciones de contorno: eventos que suceden al interior del acuífero tales como Pozos de inyección o bombeo, recarga de un área específica del acuífero, evapotranspiración en un área determinada, drenes del acuífero y ríos.

3.4.2 Balance hídrico

Según A. Barrera (Barrera García, 2019a) el balance hídrico permite cuantificar recursos y volúmenes de agua. Para realizar el balance se tiene en cuenta la conservación de la masa en el sistema, lo que entra menos lo que sale es igual a lo almacenado. Para usar el principio de conservación de la masa se debe definir al volumen de control, a partir de los límites y contornos del sistema, y el periodo de análisis. (Ver ilustración 3-5).

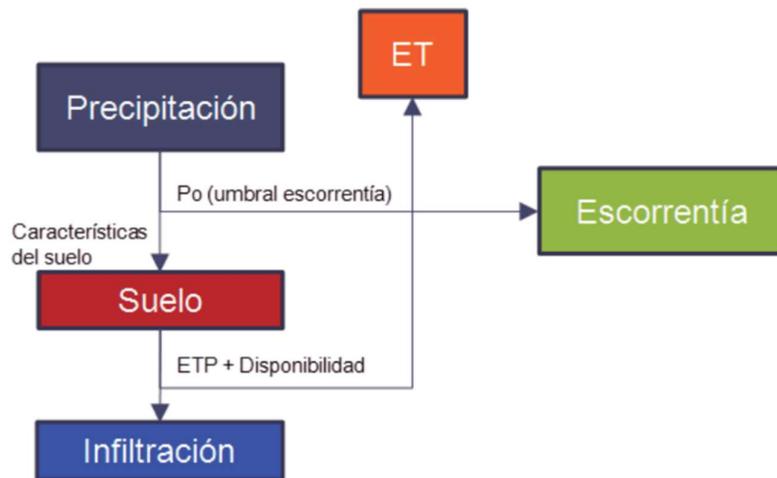


Ilustración 0-5 Balance hídrico simplificado de un sistema hidrogeológico Fuente: (Barrera García, 2019a)

3.4.3 Redes de flujo

Las redes de flujo permiten definir cuál es el sentido del flujo dentro del acuífero, como tal, constituyen una suposición de la dirección en la que se mueve el agua dentro del acuífero. (Ver ilustración 3-6).

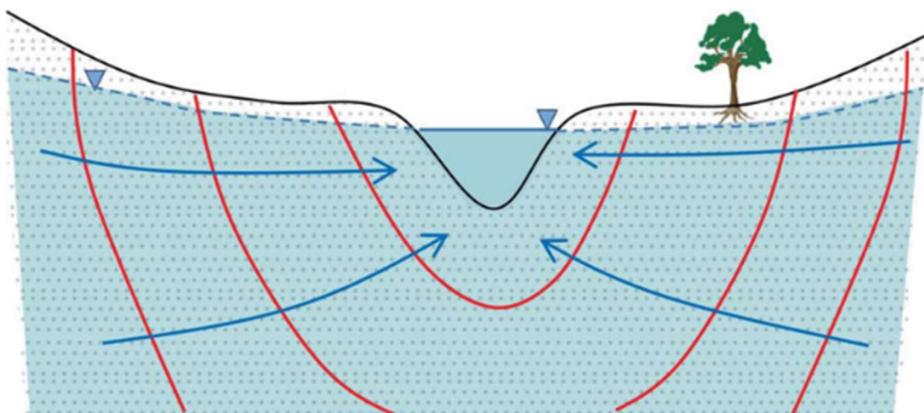


Ilustración 0-6 Ejemplo de red de flujo Fuente: (Barrera García, 2019a)

M o d e l o g e o l ó g i c o

Un modelo hipotético que caracteriza los estratos; generalmente, los estratos depositados en un ambiente o en un conjunto relacionado de ambientes. Los modelos geológicos conceptuales generalmente incorporan reglas sobre las posibles geometrías y sucesiones de capas, que pueden ser incluidas en una zona. Los modelos conceptuales generalmente incluyen conceptos de estratigrafía secuencial, tales como perfiles de capas, discordancias, superficies de inundación y superficies de erosión.

M o d e l o m a t e m á t i c o

El modelo matemático es una forma de representar un sistema haciendo uso de expresiones y formulaciones matemáticas. El modelo matemático permite predecir el comportamiento de los componentes dinámicos del sistema. Generalmente lo conforman ecuaciones diferenciales que describen el sistema y su comportamiento. (Crespo Martin, 2015)

3.6.1 Fundamentos matemáticos

3.6.1.1 Ley de Darcy

La ley de Darcy describe a partir de un experimento, el movimiento del flujo a través del medio poroso. Esta ley es válida para un medio saturado, continuo, homogéneo e isotrópico y cuando las fuerzas inerciales son despreciables. (Barrera García, 2019b) (Ver ilustración 3-7).

$$Q = k \frac{h_3 - h_4}{L} A = k * i * A$$

Donde:

Q: Caudal del flujo a través del medio poroso.

L: Longitud de la muestra.

k: coeficiente de permeabilidad de Darcy.

h3: Altura hidrostática sobre el plano de referencia a la entrada del medio poroso.

h4: Altura hidrostática sobre el plano de referencia a la salida del medio poroso.

A: Área transversal del medio poroso.

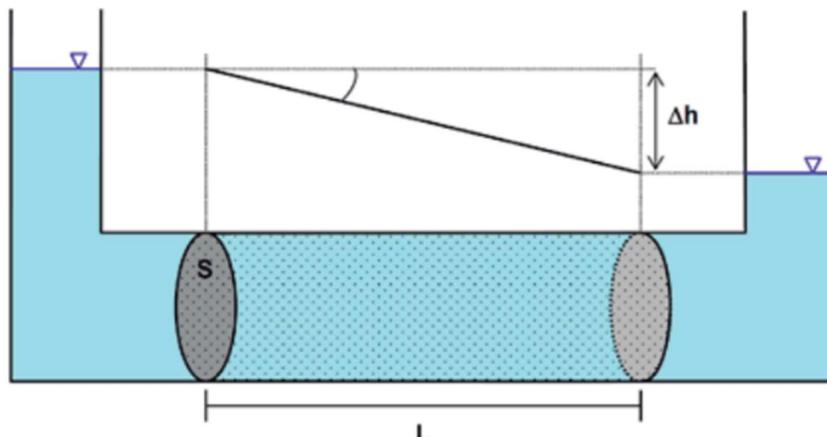


Ilustración 0-7 Esquema del experimento de Darcy Fuente:

(Barrera García, 2019b)

3.6.1.2 Teorema de continuidad o de la conservación de la masa

Según A. Barrera (2019) “En un volumen determinado de medio poroso saturado, la masa de fluido que entra en un determinado intervalo de tiempo es igual a la que sale en el mismo intervalo. Si las masas de entrada y salida no coinciden en el tiempo hay que admitir que se produce un cambio en la masa almacenada en ese mismo volumen.”

Por lo tanto:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Variación del almacenamiento}$$

3.6.1.3 Ecuación de flujo

La ecuación de flujo que se presenta en el modelo matemático de medios porosos describe el tránsito de agua a densidad constante en tres dimensiones a través de un medio poroso. Esta expresión matemática representa un equilibrio entre la materia que entra al sistema, la que sale y la que se almacena en un volumen finito para un periodo de tiempo determinado. (Barrera García, 2019b)

La ecuación de flujo es la siguiente:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{F}{K} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

x, y, z: son las coordenadas cartesianas ortonormales

h: Potencial hidráulico.

F: Entradas de caudal exteriores al sistema.

K: Permeabilidad hidráulica.

S: Coeficiente de almacenamiento del sistema.

T: Transmisividad del medio.

Exceptuando casos excepcionales, donde las condiciones del problema permiten simplificaciones a la ecuación, esta no tiene solución analítica, por ello se recurre a métodos numéricos para lograr resolver el problema. Se requiere discretizar el medio, dividirlo en celdas donde cada una representa un prisma de volumen finito.

3.6.2 Modflow y Model Muse

En el medio se encuentran varias herramientas computacionales disponibles para dar solución a sistemas complejos de modelamiento de medios porosos. El software de

código libre desarrollado por el servicio geológico de Estados Unidos Modflow permite representar el flujo subterráneo de agua y a su vez relacionarlo con elementos superficiales como ríos, embalses o lagos.

Modflow es distribuido de manera gratuita y tiene amplia documentación que sirve de guía para el proceso de modelación. Este software se actualiza constantemente. Adicionalmente, el servicio geológico de estados unidos presenta la interfaz gráfica Model Muse que también es de libre acceso. Este último, también cuenta con amplia documentación guía para el proceso.

El programa Model Muse permite previsualizar la información espacial y usa el código de Modflow para simular un flujo constante y no uniforme en un sistema irregular. Este código permite que las capas de acuíferos sean confinadas, no confinadas o una combinación que permite que dependiendo de las condiciones del problema la capa varíe su estado. El programa permite simular condiciones de contorno como lagos, ríos y embalses. Finalmente, el código de Modflow permite que las características hidráulicas del material sean anisotrópicas y heterogéneas.

MARCO METODOLÓGICO

T i p o d e i n v e s t i g a c i ó n

Se realizó una investigación aplicada al modelamiento de acuíferos subterráneos relacionados con sistemas geotermales. Se compiló un estado del arte que permitió determinar los métodos y herramientas que se han usado a nivel local o internacional para estudiar estos sistemas.

A partir del estado del arte, se determinó los métodos y herramientas convenientes para el modelamiento del sistema hidrotermal de Paipa. Se tomó en cuenta la existencia de software de licencia libre y la posibilidad de adquirir las licencias necesarias o la propiedad de ellas por parte de la Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”.

Para el planteamiento del modelo matemático del sistema hidrotermal de Paipa, se requirió de lo anteriormente descrito y datos de fuentes de información secundaria.

A partir del estado del arte y la información conseguida, se determinaron las variables del sistema hidrotermal que se tomaron en cuenta, así como las características; el nivel de detalle que permite la información de segundas fuentes y el método de evaluación de los resultados obtenidos.

Las variables y características del modelo matemático se determinaron a partir del modelo hidrológico, el modelo geológico y geotécnico de la zona de estudio. A continuación, se describe el proceso metodológico que se llevó a cabo:

Compilación bibliográfica

Como parte de la investigación se realizó una compilación bibliográfica referente al modelamiento numérico de fuentes hidrotermales para presentar el contexto nacional y el contexto global con artículos científicos que se encontraron referentes al tema. De cada artículo se preparó un breve resumen haciendo énfasis en la metodología, variables y características estudiadas, software usados, enfoque del modelo y conclusiones principales de cada autor. El análisis de la información se presenta en el capítulo 5. Estado del arte.

Modelo hidrológico

4.2.1 Sistema de coordenadas de referencia espacial para el modelo

Para el modelo hidrológico se estableció el sistema de referencia WGS_1984_UTM_Zone_18N, código WKID: 32618.

- ❖ *Projection: Transverse_Mercator*
- ❖ *False_Easting: 500000.0*
- ❖ *False_Northing: 0.0*
- ❖ *Central_Meridian: -75.0*
- ❖ *Scale_Factor: 0.9996*
- ❖ *Latitude_Of_Origin: 0.0*
- ❖ *Linear Unit: Meter (1.0)*

4.2.2 Área y zona hidrológica del modelo

Para el modelamiento hidrológico se tomaron mapas de la hidrografía colombiana a escala 1:500.000 elaborados por Fernando Salazar Holguín, a partir de mapas e información del HIMAT del IDEAM, de los resultados de modelamiento hidrológico del DEM SRTM de 3 segundos, con ILWIS 3.3 Academic y ArcGIS. Este mapa tiene coordenadas geográficas WGS-1984.

Los shapefiles tomados del mapa de modelamiento hidrológico colombiano se proyectaron al sistema de regencia determinado para el proyecto. La información obtenida se proyectó sobre la capa de departamentos y la de municipios del país obtenido de la comunidad ESRI en ArcGIS Online las cuales también fueron proyectadas al sistema de referencia del modelo.

A partir de la información obtenida, se determinó el área y la zona hidrográficas del sistema geotermal en el que se encuentra Paipa y el sistema hidrotermal que alimenta su industria. Lo anterior, se detalla en el capítulo 6 correspondiente al Desarrollo del modelo.

4.2.3 Topografía del modelo hidrológico

De la plataforma EARTHDATA de la NASA se descargaron imágenes satelitales de la zona de estudio con resolución 30x30. Se tomaron imágenes de la colección ASTER DEM V003 las cuales fueron filtradas por fecha a partir del 1 de enero de 2016 al 1 de enero de 2020, adicionalmente, se filtraron las imágenes con cobertura de nubes menor a 10%.

Las imágenes se procesaron con el software ArcGIS y se unieron a un único ráster, el cual se cortó a la extensión de la zona hidrológica estudiada. Con el ráster obtenido se creó un TIN o red irregular de triángulos para representar la superficie del terreno teniendo en

cuenta una tolerancia de 1 metro con la imagen satelital y un límite de 20.000 puntos para el proceso. La superficie generada se presenta en el capítulo 6 correspondiente al Desarrollo del modelo.

4.2.4 Precipitación de las subcuencas

De la plataforma del IDEAM se descargaron los datos de precipitación total mensual de las estaciones pluviométricas de tecnología convencional que se encontraran activas en la zona hidrológica en la que se encuentra el municipio de Paipa.

De las estaciones activas se eligieron 15 estaciones distribuidas espacialmente en la zona para el análisis estadístico. Se acotaron los datos de las estaciones activas desde el 1 de enero de 2000 a la fecha y se completaron los datos faltantes para su empleo. Para cada estación se determinó la precipitación y el promedio anuales para cada estación.

Las precipitaciones obtenidas se agregaron a la base de datos de las estaciones y se representaron gráficamente con software GIS sobre la zona hidrológica del río Suarez. En el capítulo 0 se presenta el Desarrollo del modelo y un mapa con la ubicación de las estaciones y subcuencas.

4.2.5 Evapotranspiración de cada subcuenca

De la plataforma del IDEAM se descargaron los datos de estaciones climatológicas con información de evapotranspiración mensual. Las estaciones se filtraron para tomar en cuenta estaciones climatológicas ordinarias con tecnología convencional que se encontrarán activas y se localizarán dentro de la zona hidrológica que contiene al municipio de Paipa.

Se encontraron varias estaciones que cumplían los criterios y solo diez de ellas con datos para descargar en el portal. Los datos se filtraron para tomar las mediciones desde el 1 de

enero del 2000 al 2020. Los datos obtenidos se completaron mes a mes para emplear la serie en un análisis estadístico.

Para cada estación se determinó el valor anual de evapotranspiración y el valor promedio de la serie anual para cada estación. Los datos obtenidos se agregaron a la base de datos de las estaciones climatológicas y se representaron gráficamente con software GIS sobre la zona hidrológica del río Suarez. En el capítulo 0 denominado Desarrollo del modelo, se presenta un mapa con la ubicación de las estaciones climatológicas y las subcuencas estudiadas.

4.2.6 Preprocesamiento con la herramienta HEC GEO-HMS

La superficie topográfica obtenida con las imágenes satelitales de la NASA se procesó para exportar el modelo de la zona hidrológica obtenida al software HEC-HMS. Inicialmente se usó la herramienta Fill Sinks para rellenar las imperfecciones que pudiesen existir en el ráster del modelo del terreno. El resultado obtenido se usó para calcular la dirección del flujo en cada una de las celdas del ráster, con la dirección de flujo se calcularon las celdas que acumulan el flujo para determinar el curso de los ríos presentes en la zona. Los ríos obtenidos se segmentaron y posterior a ello se calcularon las subcuencas de la zona de estudio.

A partir de la precipitación calculada para cada estación a base de información del IDEAM, se determinó el área de influencia de cada estación usando el método de polígonos de Thiessen. El resultado se cruzó con las áreas de cada subcuenca y se realizó una estadística zonal para determinar la precipitación promedio en cada una de ellas. La precipitación obtenida fue usada para el modelo hidrológico de HEC-HMS.

A partir de la evapotranspiración calculada para cada estación a base de información del IDEAM, se determinó el área de influencia de cada una de ellas. El resultado se cruzó con las áreas de cada subcuenca y se realizó una estadística zonal para determinar la evapotranspiración promedio en cada una de ellas. El resultado obtenido fue usado para el modelo hidrológico de HEC-HMS.

Por otro lado, se usaron mapas de vocación del suelo tomados del SGC para determinar la cobertura de este. Así mismo se tomaron mapas de uso del suelo para determinar la clasificación hidrológica del suelo según su potencial de escorrentía. A partir de estos mapas se determinó el número de curva para cada subcuenca, el cual es un parámetro requerido para calcular la escorrentía producto de una precipitación en la zona de estudio. Con la información de la cuenca procesada se generó el proyecto para HMS. Con el modelo se determinaron las características hidrológicas de la cuenca, y se procedió a exportar el modelo a HEC-RAS.

4.2.7 Hidrogramas unitarios de precipitación

Para determinar la escorrentía superficial que se genera a partir de las precipitaciones calculadas se determinó el hidrograma unitario producto de las precipitaciones que caen en cada subcuenca de la zona de estudio.

Para estudiar las subcuencas de la zona de estudio se determinó el hidrograma sintético unitario según la metodología del Soil Conservation Service (SCS).

El SCS simplifica el hidrograma producto de una lluvia neta a un esquema triangular. Este esquema nos proporciona datos fundamentales como el tiempo pico Q_p y el tiempo que toma en darse t_p . Para el SCS se tienen las siguientes ecuaciones:

$$t_p = 0.5D + t_r$$

Donde:

t_p : Tiempo de la punta (horas)

D : Duración de la precipitación neta (horas)

t_r : Tiempo de retardo, Lag (horas)

$$t_b = 2.67t_p$$

Donde:

t_b : tiempo de la base (horas)

$$Q_p = \frac{P * A}{1.8 * t_b}$$

Donde:

Q_p : caudal pico (m³/s)

P : precipitación horaria neta (mm)

A : Superficie de la cuenca (Km²)

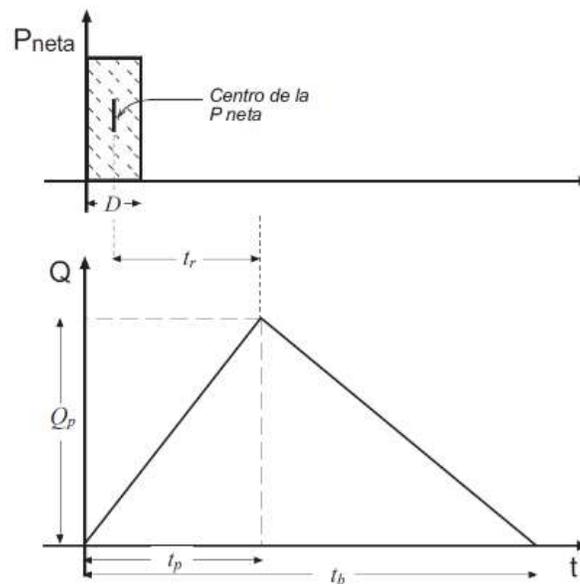


Ilustración 0-1 Esquema del hidrograma unitario del SCS

Fuente: (Román-, n.d.)

Para construir el hidrograma de cada subcuenca se tiene en cuenta adicionalmente el hidrograma unitario del SCS. A continuación, se presenta un esquema.

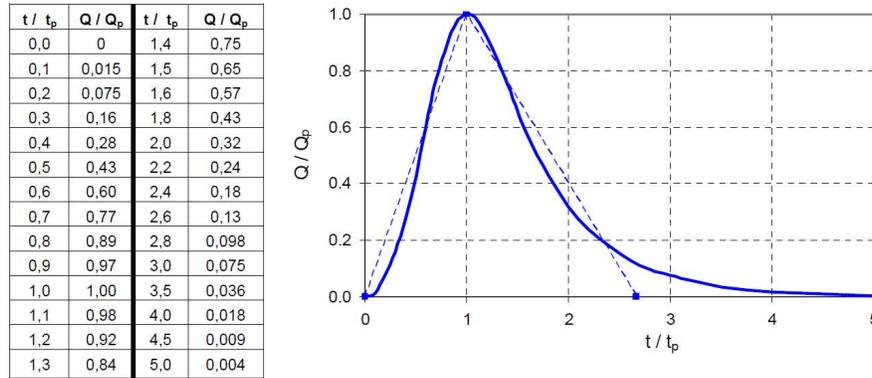


Ilustración 0-2 Esquema de hidrograma unitario adimensional del SCS Fuente: (Román-, n.d.)

4.2.8 Modelo HEC-HMS

Con el modelo importado desde ArcGIS, se establecieron los parámetros de cada cuenca y se determina usar el método del SCS para el tránsito de los hidrogramas. Se tomó en cuenta el método de Muskingum para calcular las pérdidas en el tránsito de la creciente.

El método de Muskingum requiere parámetros K y X del río de la cuenca. Para estos parámetros se tomaron los valores presentados por David Espinel en “ESTUDIO DE TRÁNSITO DE CRECIENTES CON DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA, EN EL RÍO FONCE AFLUENTE DEL RÍO SUÁREZ EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER” (ESPINEL, 2016). En este documento se determinaron los parámetros del río Fonce, a saber, $k=4.31$ Horas y $X=0.05$.

Para proceder, se alimentó el proyecto de HEC-HMS con los hidrogramas obtenidos con el método sintético del SCS. Se procedió a correr la aplicación para determinar el caudal de escorrentía y el volumen de infiltración para cada subcuenca.

M o d e l o g e o l ó g i c o

Para el modelo geológico se usó información de las planchas de geología a escala 1:100.000 del servicio geológico colombiano. Se determinaron las unidades geológicas presentes en el área del modelo y a partir de los informes de cada uno de los mapas se determinaron las formaciones geológicas que conforman el acuífero de estudio y las estructuras geotécnicas presentes.

La información se proyectó sobre las coordenadas UTM zona 18 norte y se representaron usando el software ArcGIS. Se planteó un modelo con varias capas según las formaciones geológicas encontradas y se determinó el espesor de cada capa y su composición de materiales según símbolo de unidad cronoestratigráfica, la formación a la que pertenece el material la descripción de este y su edad geológica.

El modelo se visualizó en el entorno del software Model Muse en donde se construyó a partir de la información preparada previamente en ArcGIS.

M o d e l o m a t e m á t i c o

Para el modelo matemático se usó el software de licencia libre Modflow, este programa resuelve la ecuación de flujo subterráneo mediante iteraciones sucesivas a partir de la información geológica e hidráulica. Para usar este software se puede preparar la información georreferenciada mediante ArcGIS, adicionalmente se usó la interfaz gráfica Model Muse durante el proceso.

El programa requiere la información geológica y geotécnica preparada en el modelo geológico y a su vez datos de precipitación y evapotranspiración tomados del modelo hidráulico.

Los datos alimentan el modelo de diferencias finitas de la ecuación de flujo presentada a detalle en el marco teórico 0 Modelo matemático.

El modelo numérico itera la ecuación de flujo en elementos que subdividen el área de estudio. En el proceso se tomaron en cuenta el tipo de acuífero que se tiene, confinado o libre; el estado del medio el cual puede ser saturado o no saturado según el nivel freático; la geometría del acuífero tal como la presencia de fallas, pliegues, distribución de materiales en la zona, ríos y lagos. También se tomó en consideración condiciones de contorno como límites impermeables, límites piezométricos, como lagos o embalses, límites de gradiente constante. Finalmente, se consideró condiciones de contorno como pozos de bombeo, drenajes y zonas de recarga y evapotranspiración partiendo del estudio hidrológico.

Se importó la información al software Modflow usando la interfaz gráfica Model Muse. Del modelo hidrológico se tomaron los shapefiles de cuencas, ríos, lagos y fallas preparados previamente en ArcGIS. Así mismo se importó la información espacial de la distribución de materiales en el área.

A partir del modelo geológico, se determinó el número de capas a considerar en el modelo según el número de formaciones geológicas y profundidades de cada una de ellas.

A partir del modelo hidrológico y geológico se determinaron las condiciones de frontera y contorno a usar, así como su magnitud; se determinó además la conductividad de cada material a partir de referencias bibliográficas pues no se encuentran valores exactos representativos de la zona.

Se tomaron en cuenta en el modelo las estructuras geotécnicas que se representaron con ecuaciones de un plano por cada falla, presente en la zona de estudio.

El modelo fue calibrado tomando en cuenta el acuífero geotermal que aflora de manera libre en puntos cercanos a los termales de Paipa y en la zona cercana al río Chicamocha. El modelo se ejecutó repetidamente hasta encontrar parámetros de conductividad de los materiales que permitieran el nivel observado en campo, así mismo una discrepancia baja en el balance hidráulico del acuífero, es decir una diferencia porcentual entre los volúmenes de entrada y salida menor a 1% o mayor a -1%. Los valores encontrados se compararon contra aquellos encontrados en la literatura y a partir de ellos se plantearon los análisis y las conclusiones.

ESTADO DEL ARTE

C o n t e x t o C o l o m b i a n o

Los acuíferos de aguas termales comprenden una temática actual que no ha sido desarrollada ampliamente, no obstante, se presentan una serie de trabajos referentes que aportan un punto de partida para el presente trabajo.

En el ámbito colombiano se encuentra la caracterización de fallas y modelación de transferencia de calor en el acuífero ubicado al noroeste del volcán del Ruiz; este documento caracteriza la zona de estudio con información tomada en campo, se hace uso del software de licencia libre OpenGeoSys. Los autores plantean la posibilidad de usar modelos de falla continua, este tipo de modelo considera el entorno fracturado como un continuo; y consideran un modelo con fallas discretas en donde se contempla la ubicación de las fallas dentro del medio y tres escenarios en el modelo para observar la influencia de fallas geológicas profundas en la transferencia de calor en el acuífero. Se observa que las fallas tienen una alta influencia sobre la transferencia de calor dentro del acuífero, así como la orientación de estas. (Moreno, Lopez-Sanchez, Blessent, & Raymond, 2018)

Por otro lado, se encuentra el Análisis de las características fisicoquímicas del agua subterránea de la cuenca del río Chicú, Colombia, usando indicadores hidroquímicos y estadística multivariante. En este documento se encuentra la evaluación de las características hidroquímicas de una cuenca de intra-montaña, se usaron indicadores hidrogeoquímicos en diez pozos que fueron monitoreados en campo. A partir de los datos de campo se determinaron las características hidrogeoquímicas por la interacción agua sedimento y se determinó la calidad del agua. Finalmente, se concluyó que en la matriz

agua sedimento, se suscitan procesos de intercambio catiónico reverso y meteorización de los minerales presentes en las formaciones que conforman el acuífero analizado, así mismo, que las muestras de agua obtenidas no presentan características de calidad que permita su uso para riego o consumo humano. (López Velandia, 2018)

Además, se encuentra la determinación del origen y la composición de las aguas termales ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénaga (Magdalena), Colombia. Este documento presenta un estudio cualitativo descriptivo se consideran características de las de aguas termales a través de estudios cuantitativos de los resultados de las muestras tomadas. Los autores realizan una revisión bibliográfica, además se toman muestras en campo para analizar la composición del agua y se realiza un análisis del origen del acuífero. Para este trabajo se realizó un estudio fisicoquímico de las muestras tomadas en campo, así como un análisis de la geología local. Finalmente, se concluye que las aguas tienen un origen geotérmico y se evidencia una intervención de aguas lluvias y de aguas fluviales. A partir de los análisis se caracteriza al acuífero como un afloramiento hipertermal clorurado en el municipio de Ciénaga y hipotermal sulfurado con cloruro en el municipio de Becerril. (Rojas Martínez, Fortich Duarte, & Pavajeau Maestre, 2014)

Por otro lado, se encuentra una recopilación de estudios de exploración y un modelo conceptual del sistema geotermal de Paipa realizado por Claudia Alfaro. En el artículo se presenta una descripción del sistema hidrotermal a nivel geológico, se desarrolla un modelo conceptual a partir de la integración de un modelo tridimensional hecho a partir de estudios de gravedad y magnéticos, con modelos magnetotelúricos de la zona. (Alfaro-Valero et al., 2020)

A continuación, se presenta una tabla resumen.

Tabla 0-1 Resumen contexto colombiano

<i>Nombre articulo</i>	<i>Autores</i>	<i>Tipo de estudio</i>
caracterización de fallas y modelación de transferencia de calor en el acuífero ubicado al noroeste del volcán del Ruiz	Moreno, Lopez-Sanchez, Blessent, & Raymond	Modelo numérico de fallas continuas
Análisis de las características fisicoquímicas del agua subterránea de la cuenca del río Chicú, Colombia, usando indicadores hidroquímicos y estadística multivariante	López Velandia	Modelo estadístico
determinación del origen y la composición de las aguas termales ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénaga (Magdalena), Colombia	(Rojas Martínez, Fortich Duarte, & Pavajeau Maestre	Estudio cualitativo descriptivo
recopilación de estudios de exploración y un modelo conceptual del sistema geotermal de Paipa	Alfaro-Valero et al	Modelo conceptual

C o n t e x t o G l o b a l

A nivel mundial encontramos otros estudios de interés para tener en cuenta. Se encuentran estudios en España, Japón, Francia, Estados Unidos y Turquía.

En España se encuentra el estudio hidrogeológico de los manantiales y su aplicación geológica: caso de las aguas termales, carbónicas y sulfhídricas de Cataluña. Para el estudio de los acuíferos de interés de este trabajo se contempló un estudio hidráulico, un estudio isotópico de los fluidos geotérmicos, así como un estudio químico de los mismos. Como resultado a dichas técnicas los autores establecen que: las fuentes son estables en cuanto a la temperatura del agua, la recarga y el almacenamiento son muy superiores a la descarga, se determina que manantiales tienen un origen meteórico y cuales son simplemente fuentes de agua que se calientan durante su tránsito por el subsuelo. (Albert, Corominas, & París, 1979)

En Japón se encuentra un estudio para la exploración geotérmica de recursos hidrotermales para la industria de la generación eléctrica. Este trabajo utiliza el método de medición de pH y creación de mapas de distribución de este, los mencionados mapas muestran la distribución de pH para fuentes termales y afloramientos no termales en 75 puntos del campo geotermal de Matsu Hiuchi Dake. En los mapas se encuentran puntos de alto pH en locaciones del campo en donde podría formarse el reservorio geotermal dado su proximidad a una falla geológica. El estudio concluye que el método de medición y mapeo de pH es adecuado para la exploración de recursos geotermales dada su sencillez de bajo costo. (Suzuki, Ioka, & Muraoka, 2017)

En Francia encontramos un reporte sobre el estado del campo hidrotermal de la estación Amélie-les-Bains. Estado de lieux. Este reporte es presentado por el servicio geológico nacional francés “Bureau de Recherches Géologiques et Minières” en este documento se caracteriza la zona de estudio analizando el entorno geológico, la hidrología de la zona tomando la precipitación como fuente de recarga; así mismo se analiza la climatología.

También, se analiza la temperatura del acuífero y su variación mes a mes. El estudio presenta un modelo conceptual del acuífero, además se realiza una caracterización fisicoquímica del agua e isotópica. Finalmente, el documento presenta un diagnóstico del acuífero. (Caballero, Gironde, & Le Goff, 2012)

En Estados Unidos se encuentra un estudio respecto la pérdida de capacidad de almacenamiento del acuífero de Central Valley en el estado de California agravado por intensos periodos de sequía y la sobreexplotación del recurso. Este estudio se basa en el análisis de medidas de altimetría laser SAR con datos GPS de las estaciones y en conjunto con medidas de nivel freático para conocer el comportamiento del terreno de la zona de estudio. Sumado a lo anterior, se toman las características mecánicas del acuífero para determinar la pérdida porcentual de la capacidad de este. Como resultado del análisis realizado sobre los coeficientes de almacenamiento del acuífero se concluye que esta sobrecargado, está perdiendo su capacidad y calidad. El estudio recomienda plantear planes de manejo de los recursos estudiados. (Ojha, Shirzaei, Werth, Argus, & Farr, 2018)

Finalmente, en Turquía se encuentra la traza de elementos hidrogeoquímicos de las aguas termales de Karakoçan (Elazığ) y Mazgirt (Tunceli), este de Anatolia, Turquía. Para este estudio se tomaron en cuenta 9 fuentes de aguas termales y 8 afloramientos de agua subterránea fría, las muestras de los referidos puntos se tomaron en estación lluviosa y estación seca, los caudales fueron medidos por método volumétrico. Finalmente, la información recogida en campo fue analizada de manera estadística usando el software SPSS. Como resultado se observa una variación apreciable en los parámetros considerados entre estaciones y que las aguas termales se ven influenciadas por la lluvia y la nieve a causa de la alta permeabilidad del suelo a causa de las fracturas geológicas de la

zona. Conjuntamente el documento presenta un modelo conceptual, en este modelo tiene en cuenta las fallas geológicas de la zona, las cuales se encuentran influenciadas por el volcanismo de la zona. El estudio también concluye que las aguas termales se cruzan con aguas frías lo cual hace descender la temperatura de estas antes de llegar a la superficie. (Öztekin Okan, Kalender, & Çetindağ, 2018)

A continuación, se presenta una tabla resumen del contexto global.

Tabla 0-2 Resumen contexto global

<i>Ubicación</i>	<i>Nombre artículo</i>	<i>Autores</i>	<i>Tipo de modelo o estudio</i>
España	estudio hidrogeológico de los manantiales y su aplicación geológica: caso de las aguas termales, carbónicas y sulfhídricas de Cataluña	Albert, Corominas, & París	Estudio hidráulico, estudio isotópico y químico de los fluidos geotérmicos
Japón	estudio para la exploración geotérmica de recursos hidrotermales para la industria de la generación eléctrica	Suzuki, Ioka, & Muraoka	medición de pH y creación de mapas de distribución de pH

<i>Ubicación</i>	<i>Nombre articulo</i>	<i>Autores</i>	<i>Tipo de modelo o estudio</i>
Francia	reporte sobre el estado del campo hidrotermal de la estación Amélie-les-Bains. Estado de lieux	Caballero, Gironde, & Le Goff	Modelo conceptual del acuífero y estudio isotópico del agua hidrotermal
Estados Unidos	Pérdida sostenida de agua subterránea en el Valle Central de California exacerbada por períodos de intensa sequía	Ojha, Shirzaei, Werth, Argus, & Farr	análisis de medidas de altimetría laser SAR con datos GPS en conjunto con medidas de nivel freático
Turquía	traza de elementos hidrogenoquimicos de las aguas termales de Karakoçan (Elazığ) y Mazgirt (Tunceli), este de Anatolia, Turquía	Öztekin Okan, Kalender, & Çetindağ	Análisis estadístico

DESARROLLO DEL MODELO

Modelo hidrológico

Para el modelo hidrológico se consideró la cuenca en la que se encuentra el sistema hidrotermal de estudio. Esta cuenca pertenece al área Magdalena-Cauca en la zona hidrológica del río Sogamoso. A continuación, se presenta un mapa de la zona. (Ver Ilustración 6-1).

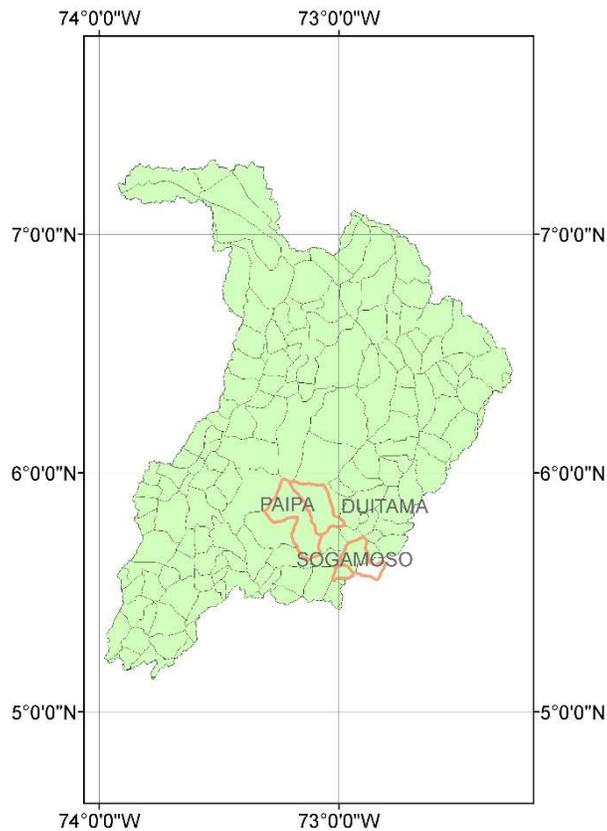


Ilustración 0-1 Mapa de la zona hidrológica del río Sogamoso

Para el área de la zona hidrológica se descargaron imágenes satelitales de la plataforma de la nasa EARTH DATA para determinar la topografía del terreno. A continuación, se presenta una imagen del modelo tridimensional elaborado para la zona. (Ver Ilustración 6-2).

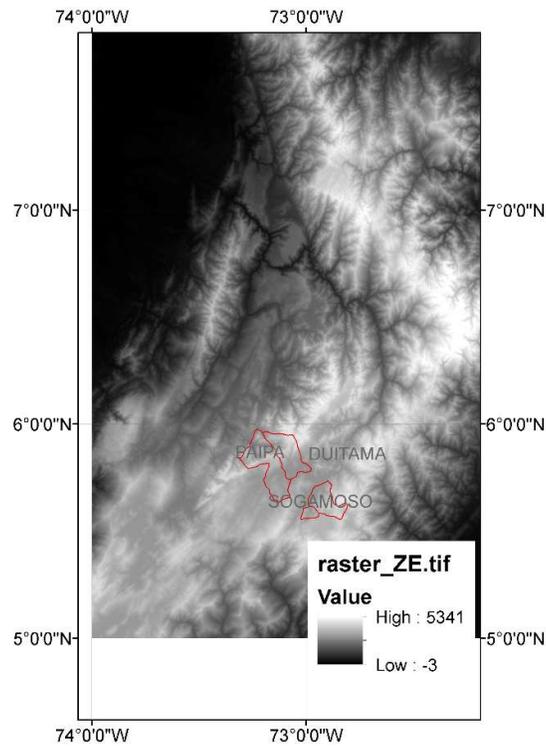


Ilustración 0-2 Topografía de la zona hidrológica de Sogamoso

A partir de la topografía obtenida se encuentra un terreno montañoso de la cordillera oriental de los Andes. Se evidencia además que el municipio de Paipa se encuentra en un altiplano de la cordillera mencionada.

A partir de la topografía observada, se procedió a utilizar la herramienta Fill Sinks para rellenar los sumideros o picos producto a la resolución de las imágenes satelitales. A continuación, se presenta un mapa del resultado. (Ver Ilustración 6-3).

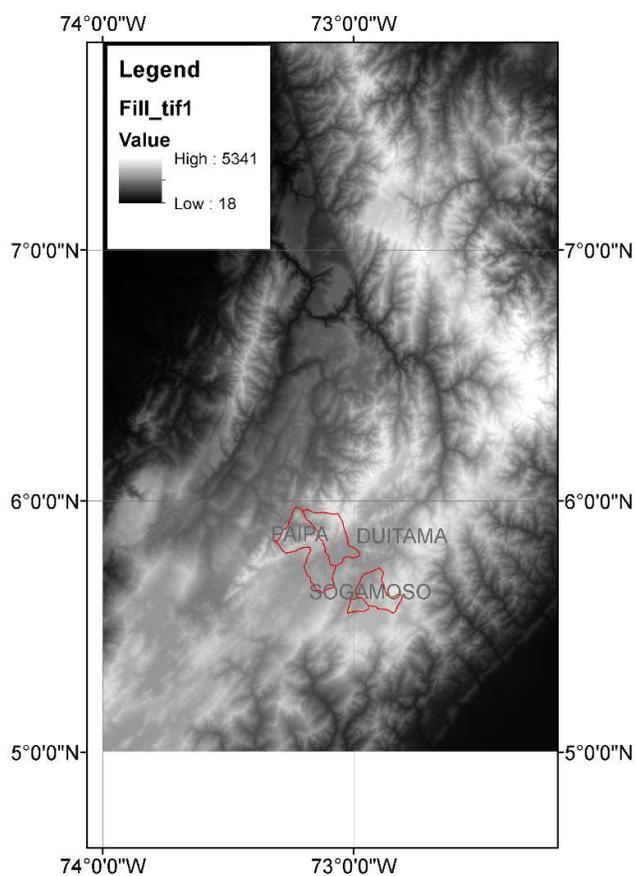


Ilustración 0-3 Topografía de la zona hidrológica sin hundimientos

En el anterior mapa se evidencia la variación de la menor altura registrada en la zona debido a la eliminación de los hundimientos con la herramienta.

Con el ráster anterior, se calculó la dirección de flujo con la herramienta Flow Dir del complemento HecGeoHMS, a partir del resultado se calculó la acumulación del flujo para determinar el cauce de las corrientes para el estudio hidrológico, a continuación, se presentan los cauces obtenidos:

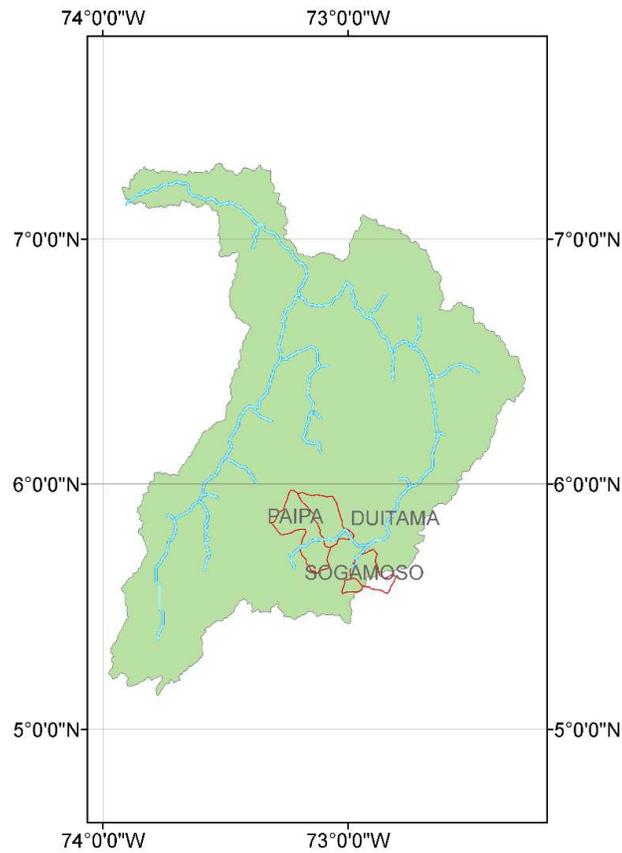


Ilustración 0-4 Cauces calculados con HecGeoHMS

Los cauces observados corresponden a las corrientes del río Suarez en la parte oeste del mapa, la corriente del río Chicamocha en la parte este; ambas alimentan la corriente del

río Sogamoso que a su vez alimenta al río Magdalena aguas abajo de la zona contemplada en este estudio.

El proceso procede con la determinación de las subcuencas presentes en la cuenca. A continuación, se presenta el mapa de las subcuencas obtenidas: (Ver Ilustración 6-5).

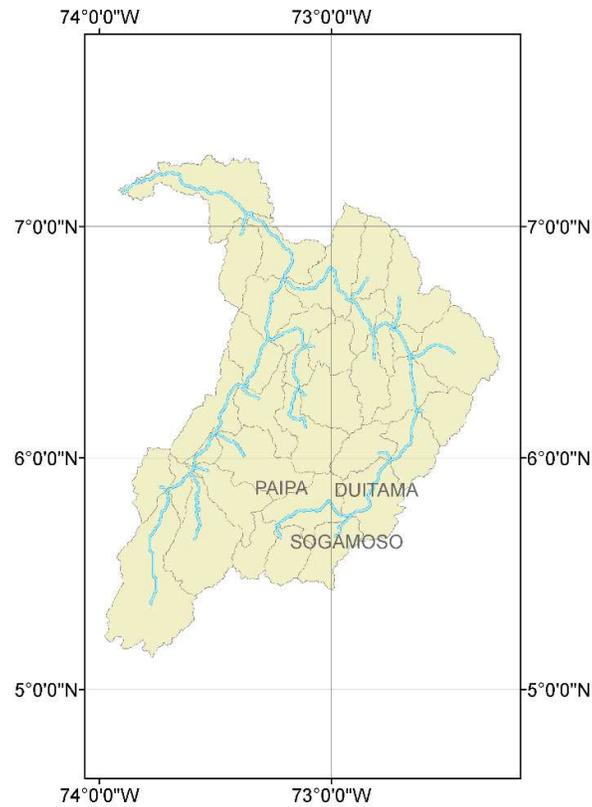


Ilustración 0-5 Subcuencas obtenidas

En la imagen obtenida se observa que el área de Paipa se encuentra relacionada con la corriente del río Chicamocha, es en esta corriente en donde los manantiales descargan las aguas posteriores a su aprovechamiento.

Para alimentar el modelo hidrológico superficial también se tomó información del IDEAM, a continuación, se presenta un mapa con la ubicación de las estaciones de precipitación y evaporación tomadas en cuenta. (Ver Ilustración 6-6).

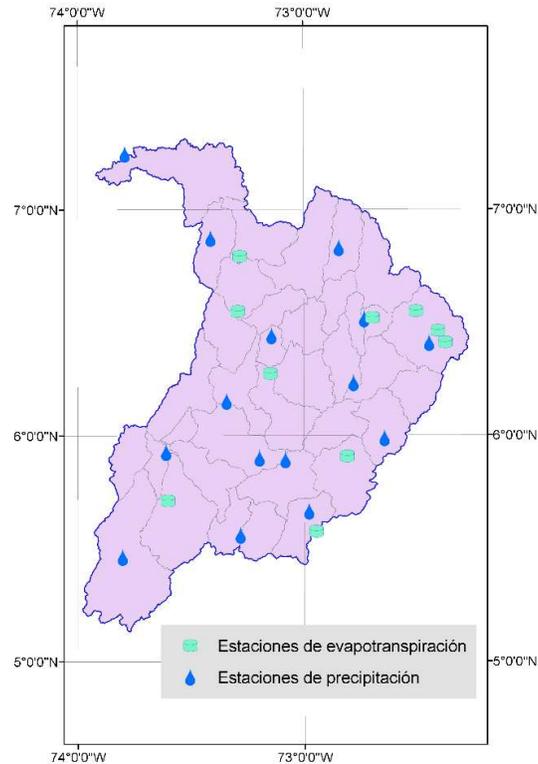


Ilustración 0-6 Estaciones de precipitación y evaporación

A partir de los datos de cada estación, se usó el método de polígonos de Thiessen y estadísticas zonales en ArcGIS para determinar el valor de la precipitación y la evaporación de cada cuenca, como se presenta en la tabla 10-1 de los anexos donde se encuentran los valores de precipitación y evaporación calculados para cada subcuenca.

Con los datos obtenidos se prepara la cuenca para ser exportada al software Hec-HMS, el cual es de licencia libre. Partiendo de los datos de precipitación y evaporación de cada

cuenca se determinó un hidrograma unitario para determinar la cantidad de agua que sale como escorrentía. En los anexos se presentan los datos de infiltración de cada cuenca obtenidos en Hec-HMS en la tabla 10-2 Infiltración anual de cada subcuenca.

Modelo geológico

Para analizar las estructuras geológicas que se relacionan con el acuífero de estudio, se determinó realizar un modelo regional limitado a 15 municipios de los cuales se encuentran en la parte superior de la zona hidrológica anteriormente analizada. A continuación, se presenta un mapa geológico de la zona regional a estudiar construido a partir de información tomada del Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Unidad CU

unidad Geologica

-  Depositos Cuaternarios
-  Formación Arcabuco
-  Formación Bogotá
-  Formación Guaduas
-  Formación La Rusia
-  Formación Montebel
-  Formación Tiltatá

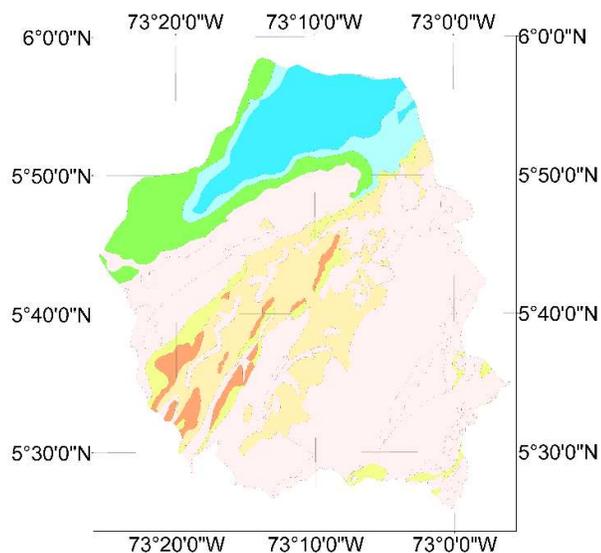


Ilustración 0-7 Mapa geológico de la zona

Según Andrés Velandia (Velandia Nossa, 2015) en la zona de estudio, se encuentran las siguientes formaciones:

Formación Arcabuco: Se encuentran cuarzoarenitas blancas e intercalaciones de shales rojizos. Tienen un espesor aproximado de 520 metros y una edad estimada del jurásico superior.

Formación la Rusia: Está constituida por intercalaciones de arenitas rojizas y blancas finas, arenitas conglomeráticas, y limolitas rojizas a verdes. Se calcula un espesor aproximado de 344 metros. Su edad aproximada es Jurásica, post Liásico Superior.

Formación Tilatá: Constituida principalmente por capas cuarzoarenitas intercaladas por limolitas y arcillolitas. Esta capa tiene un espesor aproximado de 150 metros y una edad estimada del Plioceno a Pleistoceno.

Formación Guaduas: Formada por una secuencia de arcillas grises, arenitas friables y horizontales de carbón. Tienen un espesor aproximado de 570 metros y se estima su edad del cretáceo superior o terciario.

Formación Bogotá: Se exponen arcillas friables, arcillas rojizas a amarillentas. Se estima un espesor cercano a los 250 metros con una edad del paleoceno.

Formación Montebel: Conformada por arcillositas laminadas negras, limonitas rojizas y verdes, arenitas arcillosas y feldespáticas y algunos niveles conglomeráticos. Tiene un espesor aproximado de 410 metros. La edad de esta roca no tiene consenso, pero parece ser de finales del triásico. (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2018)

Depósitos cuaternarios: Formado por depósitos de arenitas, limos, arcillas y conglomerados los cuales tienen origen reciente por la actividad lacustre y fluvial y se encuentran dispersos sobre la formación Tilatá. Esta capa tiene un espesor aproximado de 40 metros.

6.1.1 Geotecnia de la zona

En el área de estudio se encuentran tres fallas a considerar, la falla de Boyacá, la falla de Chivatá y la falla de Soápaga. (Ver Ilustración 6-8).

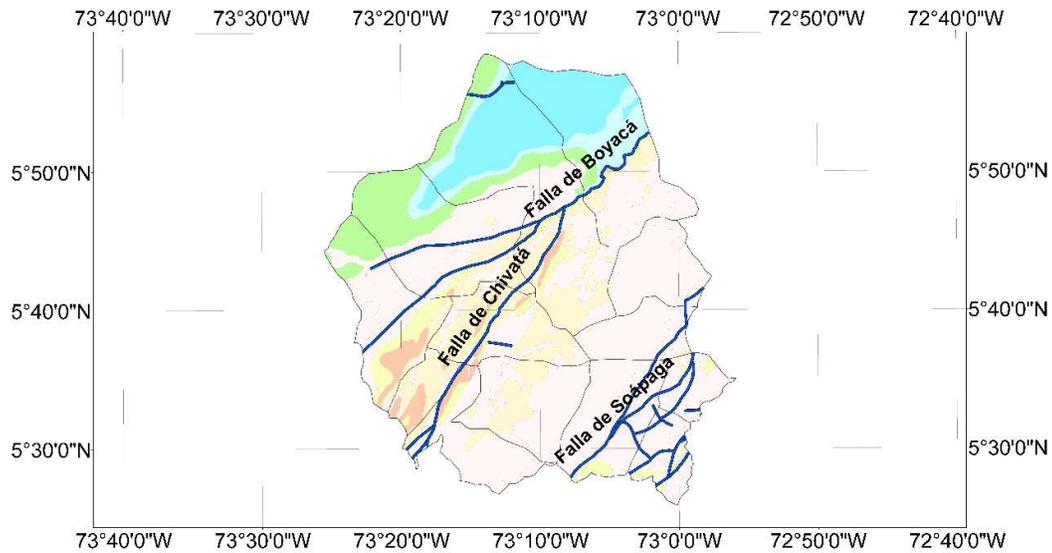


Ilustración 0-8 Mapa geotécnico de la zona

A partir de la información del SGC se planteó un modelo geológico de cuatro capas o cuatro acuíferos, la primera capa, denominada depósitos cuaternarios, conformada por depósitos aluviales y en general materiales sedimentarios con algunos materiales de intrusiones ígneas de origen volcánico; la segunda capa conformada por materiales presentes en la formación Tilatá al costado sur de la falla de Boyacá y la formación Montebel al norte de la falla; la tercera capa conformada por las formaciones Bogotá dispuesta bajo la formación Tilatá y la formación La Rusia bajo la Montebel. Finalmente, La última capa conformada por la formación Guaduas bajo la formación Bogotá y la formación Arcabuco bajo La Rusia.

Las cuatro capas se simularon con espesores de 50 metros para la primera, 300 metros de espesor para la segunda capa, 300 metros de espesor para la tercera y 550 metros para la última capa. Por otro lado, se contempla la geotecnia del terreno considerando las fallas presentes en el área. Se consideraron tres sistemas de fallas en el modelo regional. La falla Boyacá, la falla de Soápaga y la falla de Chivatá, no obstante, en el costado sur de Paipa se encuentra un sistema de fallas complejo, por lo cual, se desarrolla un modelo localizado a escala municipal en la zona con una estructura geológica similar al regional. Este modelo coincide con el área de estudio del modelo conceptual presentado por Claudia Alfaro mencionado en el estado del arte “*Recopilación de estudios de exploración y un modelo conceptual del sistema hidrotermal de Paipa*”. Este estudio se enfoca en el área denominada ITP-Lanceros. A continuación, se presenta una imagen del área de estudio que corresponde a la imagen presentada por Claudia Alfaro. (Ver Ilustración 6-9).

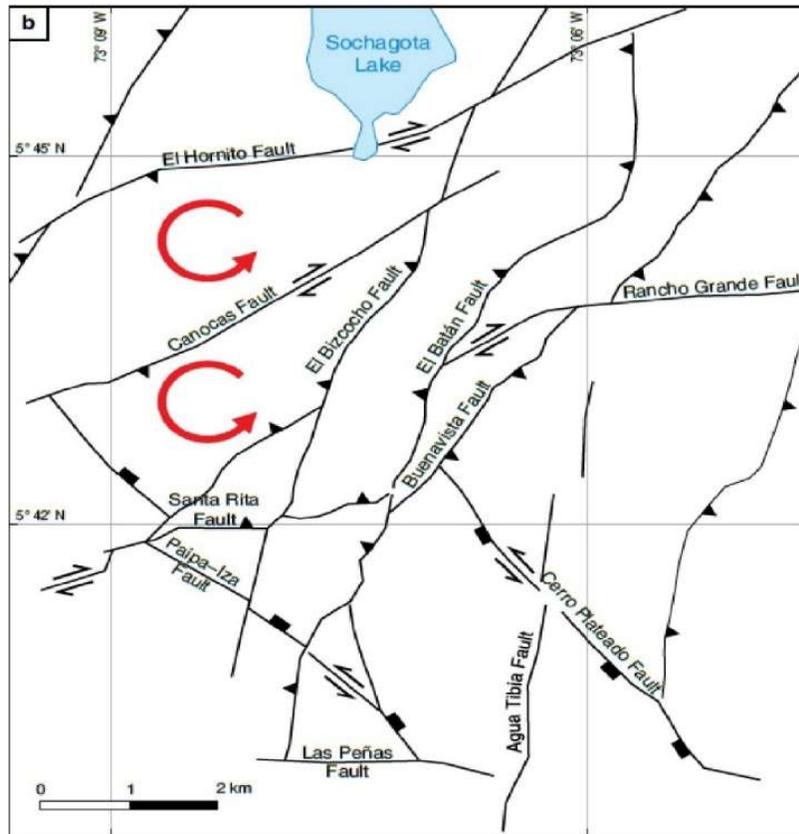


Ilustración 0-9 Zona de estudio presentada por Claudia Alfaro

Fuente: (Alfaro-Valero et al., 2020)

6.1.2 Modelo localizado

Este modelo contempla el área de los municipios de Paipa y Duitama que se encuentran bajo la falla de Boyacá y el área del municipio de Tibasosa. Claudia Alfaro menciona en su modelo conceptual que esta es la posible zona de recarga del sistema geotermal de Paipa. (Ver Ilustración 6-10).

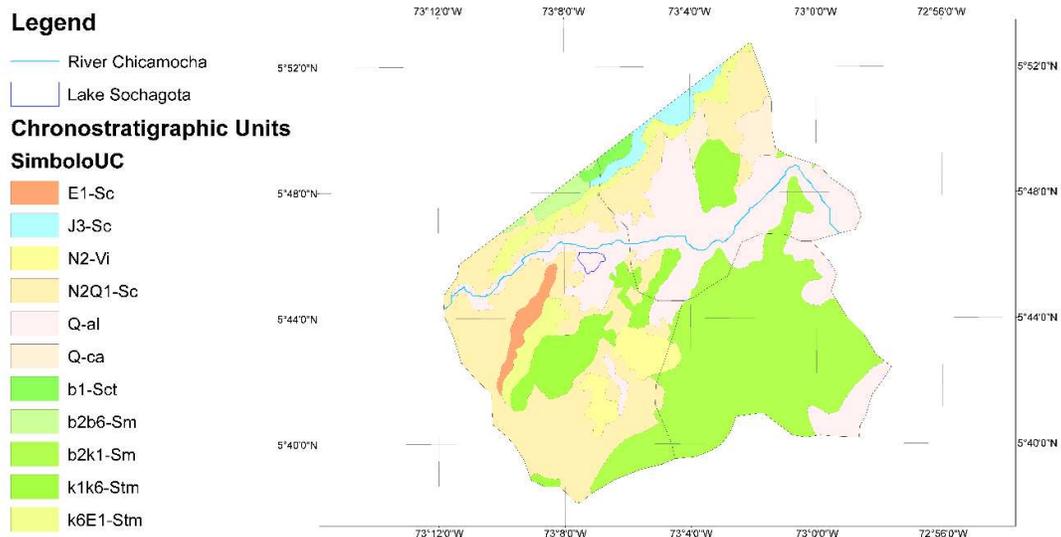


Ilustración 0-10 Mapa de distribución de materiales Modelo

Localizado

En el anterior mapa se presenta la distribución espacial de los materiales según la unidad estratigráfica a la que pertenecen. En el mapa se muestra, además, con puntos verdes, la localización del área de estudio mostrada en la ilustración 6-7.

Para esta zona se consideran las siguientes fallas: El Hornito, Canoas, El Bizcocho, Cerro Plateado, El Batan, Rancho Grande, Paipa-Iza, Agua Tibia, Buenavista, Santa Rita, Lanceros, Boyacá, El Tunó, Las Penas.

A continuación, se presenta un mapa con la localización de las fallas consideradas. (Ver Ilustración 6-11).

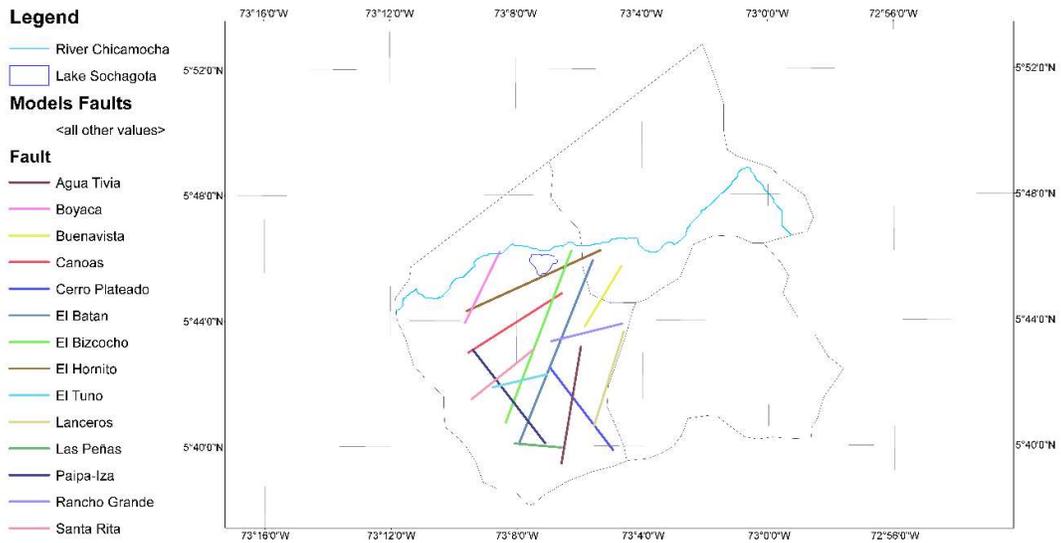


Ilustración 0-11 Fallas consideradas en el modelo localizado

A continuación, se observa una imagen de la capa superior del modelo geológico en donde se representan los materiales de la zona según conductividad hidráulica. (Ver Ilustración 6-12).

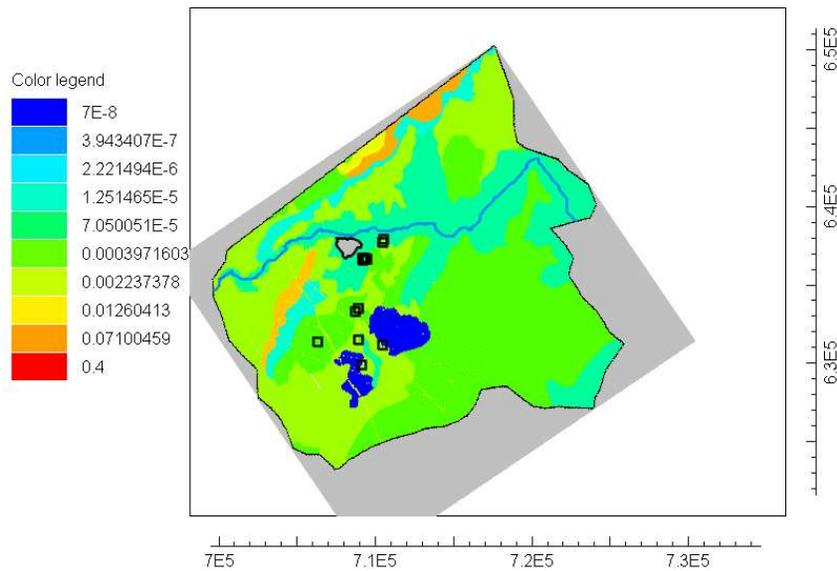


Ilustración 0-12 Vista en planta de modelo geológico localizado.

En la imagen se observa la distribución de materiales que coincide con la información aportada del Shapefile del SGC. Además, se encuentra la corriente del río Chicamocha, el lago Sochagota, los pozos desde donde se explota el acuífero y las fallas mencionadas.

En la tabla 10-3 material encontrado en anexos, se encuentra la información de cada material contemplado en el modelo geológico.

A continuación, se presenta una representación 3D del modelo, visualizada en Model Muse (ver ilustración 6-13).

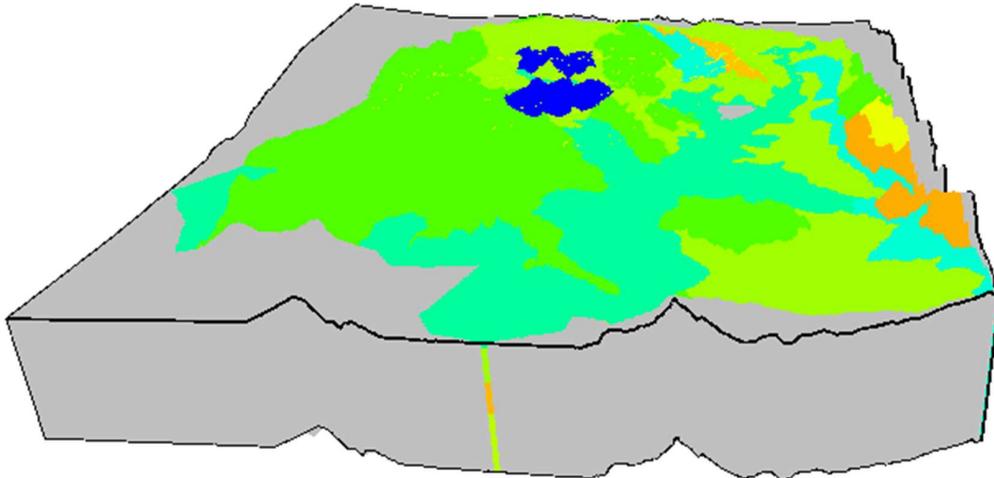


Ilustración 0-13 Visualización 3D del modelo geológico

Modelo matemático

A partir de la información obtenida en el modelo hidrológico y geológico se construyó el modelo matemático, el cual contemplo una escala local en donde se observa el área comprendida entre Paipa, Duitama y Tibasosa y una escala regional donde se

consideraron 15 municipios y los parámetros obtenidos de la calibración del modelo localizado.

El modelo topográfico mostrado en el desarrollo del modelo hidrológico se exportó a Model Muse como un archivo ASCII, a partir de él se interpoló la superficie denominada Model_Top. A continuación, se presenta una imagen del terreno construido en Model Muse. (Ver Ilustración 6-14).

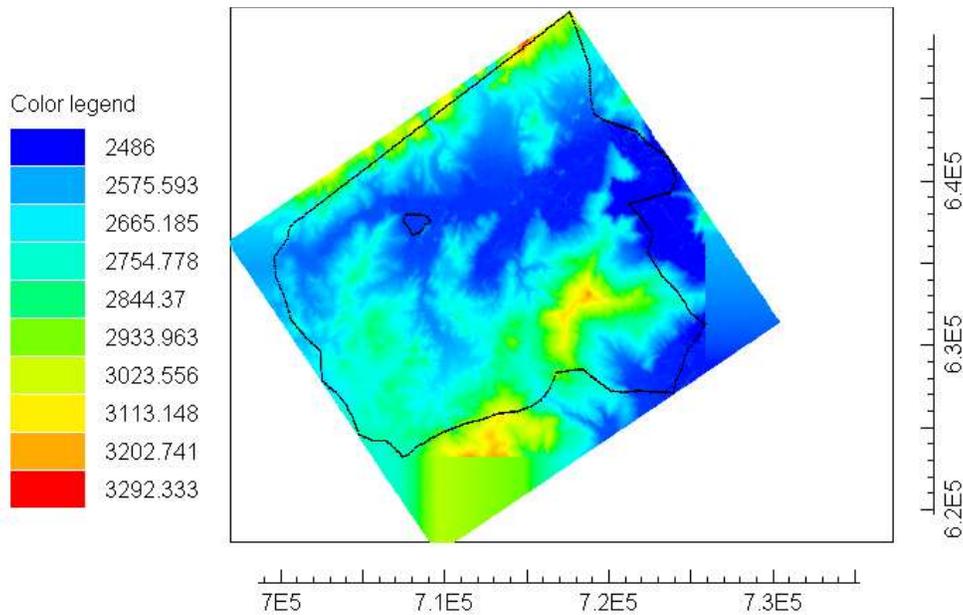


Ilustración 0-14 Topografía importada a Model Muse

A partir de la capa Model_Top mostrada en la anterior imagen, se determina la altura de las capas límite de cada uno de los acuíferos respetando los espesores determinados para cada uno de ellos en el modelo geológico conceptual. A continuación, se muestra una tabla con las capas de acuíferos definidas en Model Muse.

Tabla 0-1 Capas de acuíferos modelados en Model Muse

Nombre de la capa	Ecuación	Espesor de la capa
-------------------	----------	--------------------

Nombre de la capa	Ecuación	Espesor de la capa
Model Top	topoacll	
Depósitos Cuaternarios Bottom	Model_Top-50	50
Formación Tilatá Bottom	Model_Top-350	300
Formación Bogotá Bottom	Model_Top-650	300
Formación Guaduas Bottom	Model_Top-1200	550

Una vez definidos los límites de cada capa se procede a importar la información de la distribución espacial de materiales en el área. A continuación, se presentan mapas de la distribución de materiales. (Ver Ilustración 6-15).

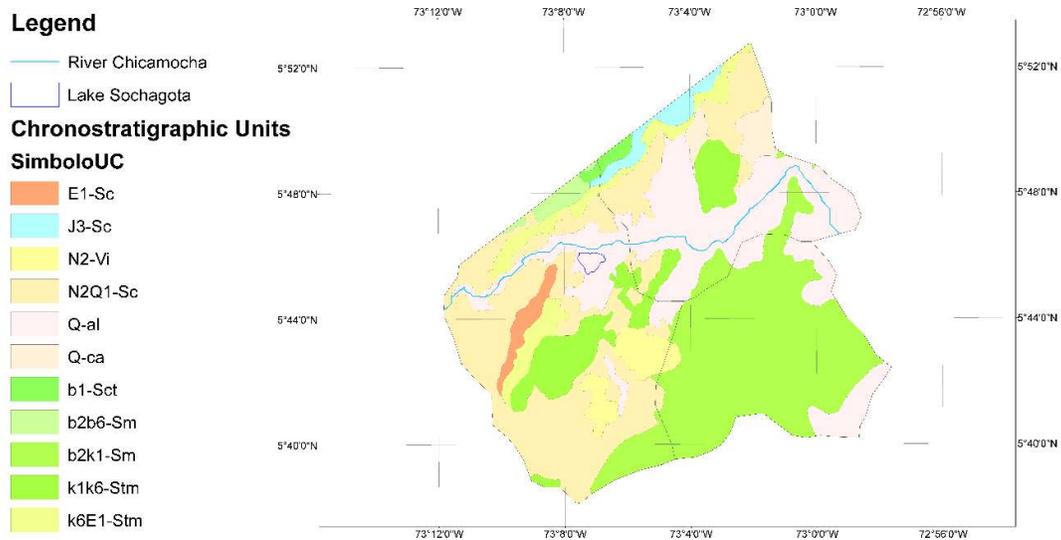


Ilustración 0-15 Distribución espacial de materiales

Para estimar el flujo entre los acuíferos se requiere determinar el valor de la conductividad de cada uno de los materiales, para ello se tomaron valores de referencia de la literatura, estos se modificaron posteriormente en el proceso de calibración del modelo, el cual se

describe más adelante. A continuación, se presenta una ilustración con referencias bibliográficas de valores teóricos para la conductividad del suelo según el material.

Tabla 80 Valores de la conductividad hidráulica (m/día)

		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Grava	25 a 2500	100 a 10 ⁵	100 a 10 ⁶	10 a 1000	
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0,1 a 500	0,01 a 1000	1 a 1000	1 a 100	1 a 100
	Arena media	0,1 a 50				
	Arena fina	0,02 a 20			0,01 a 1	0,01 a 1
	Arena arcillosa			0,01 a 100	0,001 a 0,1	
	Silt, loess	10 ⁻⁴ a 2	10 ⁻⁴ a 1	10 ⁻⁴ a 1	0,001 a 0,1	10 ⁻⁴ a 1
	Arcilla	10 ⁻⁶ a 4*10 ⁻⁴	10 ⁻⁷ a 10 ⁻³		10 ⁻⁶ a 10 ⁻³	10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
Arcilla marina inalterada	10 ⁻⁷ a 2*10 ⁻⁴		10 ⁻¹¹ a 10 ⁻⁷			
Rocas Sedimentarias	Calizas carstificadas	0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10 ⁷
	Calizas, dolomías	10 ⁻⁴ a 0,5	0,001 a 0,5	10 ⁻⁴ a 1		10 ⁻⁴ a 1
	Areniscas	3*10 ⁻⁵ a 0,5	10 ⁻⁵ a 1	10 ⁻⁵ a 1		
	Argilitas (siltstone)	10 ⁻⁶ a 0,001				
	Pizarras sedimentarias (Shale) intactas	10 ⁻⁸ a 2*10 ⁻⁴	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸		10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸
	Pizarras sed. (Shale) fracturadas/alteradas		10 ⁻⁴ a 1			
Rocas cristalinas	Basalto inalterado, sin fracturar		10 ⁻⁸ a 10 ⁻³			10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
	Basalto fracturado/vesicular cuaternario		10 a 1000			0,1 a 10 ⁰
	Escorias basálticas		0,001 a 1000			
	Basalto permeable	0,03 s 2000		0,02 a 1000		
	Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵		10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵
	Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	0,001 a 25	10 ⁻⁵ a 1	0,0005 a 20		10 ⁻⁵ a 1
	Granito alterado	0,3 a 5				
	Gabro alterado	0,05 a 0,3				

Ilustración 0-16 Conductividades hidráulicas según material

Fuente: (GEOCIENCIAS SAS, n.d.)

A continuación, se muestra una tabla con los valores iniciales para la conductividad.

Tabla 0-2 Valores de conductividad iniciales para el modelo

b1-Sct	0.01
b2b6-Sm	0.0002
b2k1-Sm	0.0002
E1-Sc	0.001
e6e9-Sct	0.0001
J1J2-VCct	0.0001

J3-Sc	0.01
k1k6-Stm	0.0001
k6-Stm	0.01
k6E1-Stm	0.01
N2-Vi	0.000001
N2Q1-Sc	0.01
Q-al	0.003
Q-ca	0.003

Adicionalmente se toma en cuenta las fallas, para representarlas en el modelo y establecer planos de falla representados con la ecuación de un plano, cada plano de falla se asigna a un elemento rectangular que representara las características hidrológicas de la falla a partir de la ecuación del plano. La ecuación de un plano es:

$$Z = Z_o - \frac{1}{\sin(B)} * (\sin(A) * \cos(B) * (X - X_o) + \cos(A) * \cos(B) * (Y - Y_o))$$

Donde:

(X_o, Y_o, Z_o): Coordenadas de un punto conocido en el plano

A: Azimut de la falla

B: Buzamiento de la falla

A continuación, se presenta una tabla con las ecuaciones de cada plano de falla que se usaron en el modelo:

Tabla 0-3 Ecuaciones de planos de falla del modelo local

0	El Hornito	2538-11.4737132456699*(0.0868240888334652*(X-707711.657179)+0.906563238925084*(Y-636403.172328))
1	Canoas	2554-11.4737132456699*(0.0868240888334652*(X-706629.083201)+0.840032843347035*(Y-633922.899141))
2	El Bizcocho	2675-11.4737132456699*(0.0868240888334652*(X-708000.34419)+0.355270538792307*(Y-633115.808117))
3	Cerro Plateado	2631-11.4737132456699*(0.0868240888334652*(X-710539.753957)+0.604734696431723*(Y-628866.42592))
4	El Batán	2556-2.92380440016309*(0.32139380484327*(X-709022.034776)+0.350103765345513*(Y-632223.168311))
5	Rancho	2606-5.75877048314363*(0.171010071662834*(X-

	Grande	$710842.639006)+0.955760878961392*(Y-633372.34422))$
6	Paipa-Iza	$2815-28.6537083478438*(0.0348782368720627*(X-706269.275763)+0.611184479576624*(Y-629614.204045))$
7	Agua Tibia	$2601-19.1073226092974*(0.0522642316338267*(X-709917.963021)+0.163094087974699*(Y-629110.70013))$
8	Buenavista	$2542-11.4737132456699*(0.0868240888334652*(X-711787.098519)+0.517438765685016*(Y-635491.144146))$
9	Santa Rita	$2828-5.75877048314363*(0.171010071662834*(X-705904.28504)+0.767289394578696*(Y-630915.493494))$
10	Lanceros	$2699-11.4737132456699*(0.0868240888334652*(X-712132.517243)+0.299854146450539*(Y-630658.951211))$
11	Boyacá	$2660-1.22077458876146*(0.469846310392954*(X-704714.382096)+0.250795451242213*(Y-636021.886324))$
12	El Tunó	$2833-11.4737132456699*(0.0868240888334652*(X-706901.656001)+0.96891592736795*(Y-630527.652872))$
13	Las Penas	$2740-11.4737132456699*(0.0868240888334652*(X-707986.805626)+0.992620178573432*(Y-626731.350704))$

Para el modelo se consideró que la conductividad de las celdas que intersecan un plano de falla tiene diez veces la conductividad promedio de la capa o acuífero que intersecan.

Para terminar de formular el modelo, se tomó en cuenta el río como elemento de drenaje del acuífero, este se tomó en cuenta en el paquete de drenaje como condición de frontera del modelo matemático. Este paquete permite que se descargue flujo desde el acuífero cuando la cabeza es mayor a la elevación del río.

Por otro lado, se toma en cuenta el lago Sochagota como elemento de condición de frontera con el paquete de lagos de Model Muse, este paquete permite simular la interacción de cuerpos de agua lenticos como embalses o lagos.

Adicionalmente se consideraron los pozos con los que se explota el acuífero con el paquete WELL de Model Muse, este permite tener elementos que descarguen el acuífero con caudales negativos o que lo recarguen con caudales positivos. A continuación, se muestra una tabla con los pozos explotados considerados para el modelo local.

Tabla 0-4 Localización y caudal de pozos de la industria turística

FID	Nombre	LATITUD	LONGITUD	Q_m3_s
0	Solapa 1	5.76786829	-73.09854798	0
1	Pozo hotel lanceros	5.75567302	-73.11060616	0.000177
2	Pozo las marismas Solapa 2	5.76642267	-73.0991282	0
3	Pozo ojo del diablo	5.75633266	-73.11037936	0.00359
4	El delfín La playa 2	5.72833633	-73.11348662	0.0005
5	Santa Rita	5.70893643	-73.13727658	0.0003
6	Pozo inundado	5.7567289	-73.1095736	0.001
7	Pozo escondido	5.75674747	-73.10986244	0.000042
8	Baltan La playa 2	5.72631371	-73.11543748	0.001
9	Olitas	5.69524093	-73.1119233	0.006
10	Pozo Blanco	5.75637089	-73.11101589	0.0008
11	Fondo piscina olímpica	5.75659306	-73.10874072	0
12	El Hervidero	5.71020029	-73.11329607	0
13	Balneario Publico	5.7571991	-73.10946616	0
14	Pozo azul	5.70713724	-73.09937784	0.0061
15	Erica	5.75729	-73.11073	0

Finalmente se tienen en cuenta los paquetes de recarga para considerar la infiltración y el paquete de la evapotranspiración con los valores calculados anteriormente en el modelo hidrológico.

6.2.1 Calibración del modelo

El modelo se ejecutó variando los parámetros de conductividad de los materiales en la zona, observando el nivel de la lámina de agua en la zona cercana al río para calibrarlo

respecto a la observación de campo. Los parámetros de conductividad de cada simulación se muestran en los anexos en la tabla 10-4. En ella se ve la conductividad de cada material y se observa si el modelo converge o no asignando un valor de 1 de lograr la convergencia. Se muestra la cantidad de agua que entra y sale del acuífero (IN y OUT) en m^3/s y la discrepancia o diferencia porcentual entre entradas y salidas de caudales del acuífero, el cual es una medida del balance hidráulico de cada simulación. Finalmente, en la última celda se ve el nivel de la lámina de agua en el área cercana a ITP lanceros que es el valor observado a nivel de cota del terreno de 2500 msnm.

Adicionalmente los parámetros logrados a partir de la calibración en la corrida 138 se ingresaron en el modelo regional para determinar el comportamiento del sistema en una escala mayor y verificar las conductividades logradas en la calibración del modelo original.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se muestra una tabla compilando algunas de las simulaciones que convergieron que resultaron con una discrepancia menor a 1 o cercana a 1 y que lograron un nivel de la lámina de agua cercano a la cota del terreno en el área de ITP Lanceros como se observa en la realidad.

Tabla 0-1 Parámetros de simulaciones que convergen y coinciden con la realidad

Material	121	122	125	126	127	132
b1-Sct	0.05	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
b2b6-Sm	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
b2k1-Sm	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
E1-Sc	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
e6e9-Sct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
k1k6-Stm	0.0009	0.0009	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
k6-Stm	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001
k6E1-Stm	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001
N2-Vi	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.00000001
N2Q1-Sc	0.002	0.002	0.0015	0.001	0.001	0.001
Q-al	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
Q-ca	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00048	0.00048	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032
Z2	0.00200	0.00200	0.00150	0.00100	0.00100	0.00100
Z3	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000
Z4	0.01667	0.01667	0.01667	0.01667	0.01667	0.01667
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	1	1	1
IN	2.127	2.1204	2.1297	2.1365	2.1365	1.9902
OUT	2.0336	2.0686	2.109	2.1522	2.1495	2.0038
Discrepancia	4.49	2.48	0.97	-0.73	-0.61	-0.68
Lamina ITP	2499.45	2499.69	2499.94	2500.25	2500.24	2499.61
Material	133	138	139			
b1-Sct	0.005	0.005	0.005			
b2b6-Sm	0.0003	0.0003	0.0003			
b2k1-Sm	0.0003	0.0003	0.0003			
E1-Sc	0.03	0.03	0.03			
e6e9-Sct	0.0001	0.0001	0.0001			
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001			
J3-Sc	0.05	0.05	0.05			
k1k6-Stm	0.0003	0.0003	0.00005			

k6-Stm	0.00001	0.00001	0.00001
k6E1-Stm	0.00001	0.00001	0.00001
N2-Vi	0.00000005	0.00000007	0.00000007
N2Q1-Sc	0.001	0.001	0.001
Q-al	0.00003	0.00003	0.00003
Q-ca	0.001	0.001	0.001
Zk	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00032	0.00032	0.00024
Z2	0.00100	0.00100	0.00100
Z3	0.04000	0.04000	0.04000
Z4	0.00167	0.00167	0.00167
Lake Lakeance	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05
Converge	1	1	1
IN	1.9969	1.9938	1.9938
OUT	2.0188	2.0117	2.0136
Discrepancia	-1.09	-0.89	-0.98
Lamina ITP	2499.69	2499.65	2499.66

En la anterior tabla, se observa la conductividad de cada material encontrado en la zona para las simulaciones número 121, 122, 125, 126, 127, 132, 133, 138 y 139. Adicionalmente en las filas denominadas Z1, Z2, Z3 y Z4 corresponden a los promedios de conductividad de cada una de las capas del modelo siendo Z1 la conductividad promedio de la capa denominada depósitos cuaternarios.

A continuación, se ilustra el nivel de la lámina de agua de la simulación #127, la cual tiene la menor discrepancia entre las simulaciones. (Ver Ilustración 7-1).

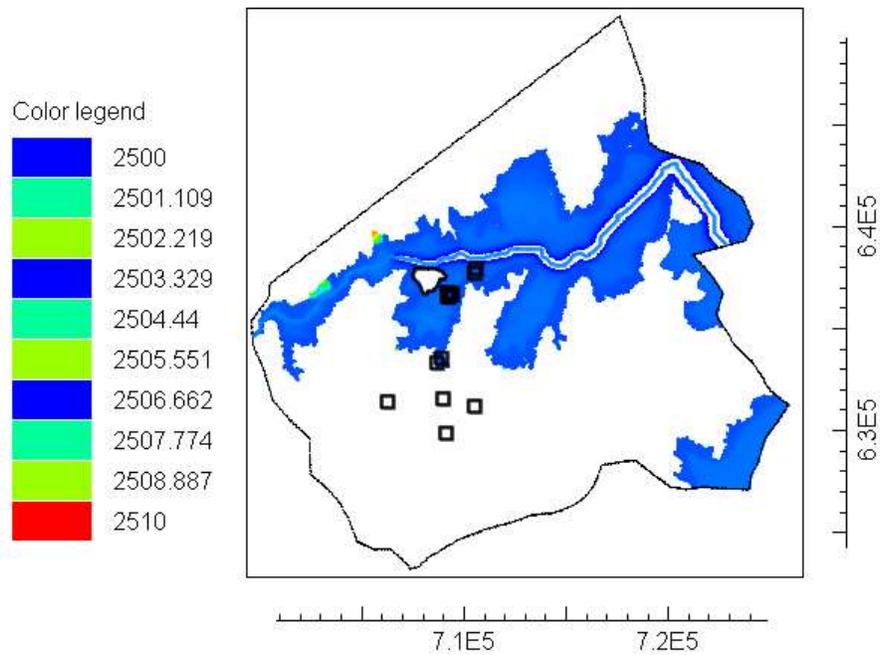


Ilustración 0-1 Resultados de la simulación #127

Para lograr una representación adecuada, se filtraron los resultados para mostrar aquellos con valores entre 2500 y 2510, no obstante, se puede observar que en esta simulación la cabeza está muy por encima del nivel del terreno en el área con intrusiones magmáticas. A continuación, se presenta una imagen de la diferencia de la lámina de agua obtenida por el modelo y el nivel del terreno. (Ver Ilustración 7-2).

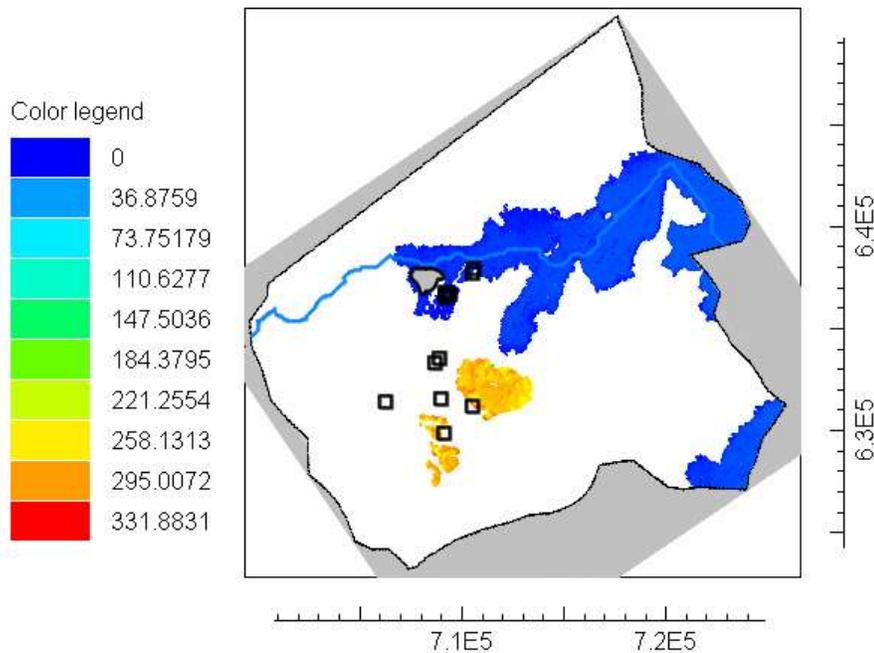


Ilustración 0-2 Diferencia entre la lámina de agua simulada y el nivel del terreno.

En la imagen se observa como la simulación no es adecuada pues se encuentra un nivel 300 metros por encima del nivel del terreno para el área con intrusión de lavas de origen andesítico.

Esta simulación permite destacar la relevancia de las intrusiones de lava andesítica en el sistema hidrogeotermal. En las simulaciones ejecutadas en el proceso de calibración, destaca la sensibilidad del acuífero a la conductividad de las mencionadas intrusiones. Los parámetros obtenidos muestran que ellas tienen una conductividad muy baja en relación con el resto de los materiales encontrados en la capa superior.

A continuación, se muestra el resultado obtenido con la simulación #138. (Ver Ilustración 7-3).

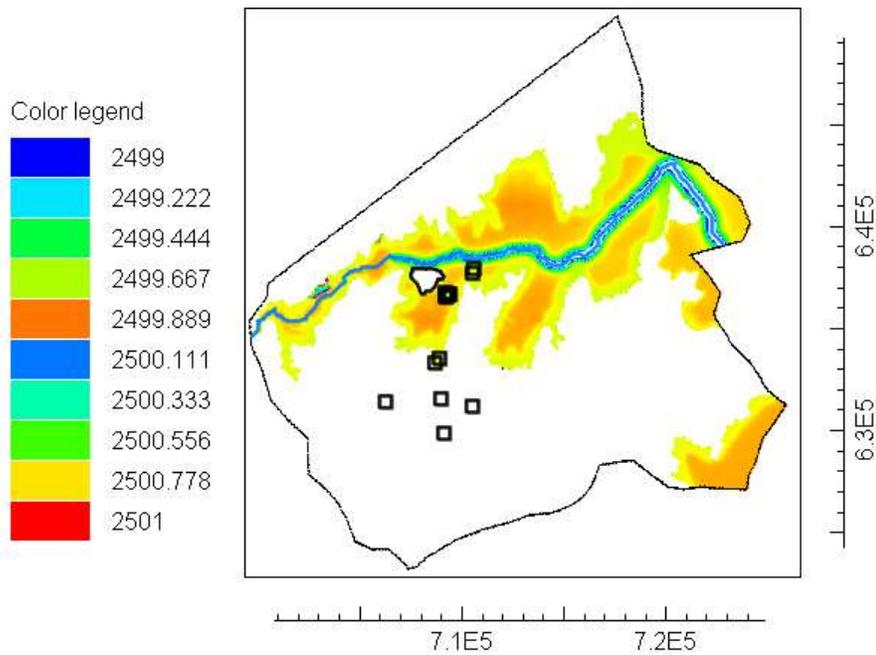


Ilustración 0-3 Lámina de agua resultado de la simulación #138

En la imagen, se muestra la simulación para la capa superior con los parámetros de la corrida #138. La representación se filtró entre los valores 2499 y 2501 pues para esta zona de interés no se observa una variación notable para el rango completo. A continuación, se presenta una ilustración de la diferencia de la lámina de agua y el nivel del terreno para la misma simulación. (Ver Ilustración 7-4).

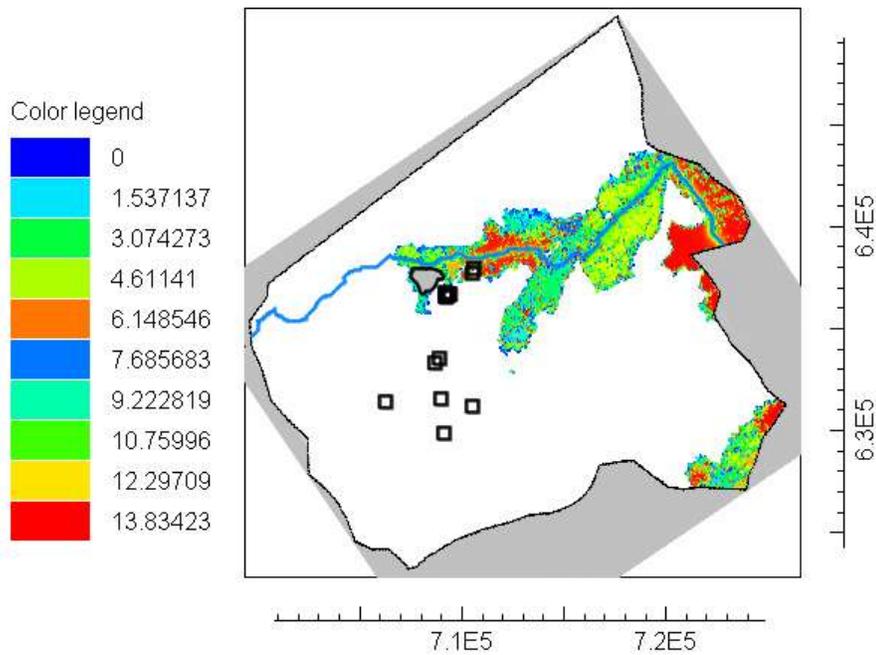


Ilustración 0-4 Diferencia entre la lámina de agua simulada y el nivel del terreno de la simulación #138.

En la imagen, se observa que el nivel de la lámina de agua tiende a ser mayor aguas abajo del río. Los resultados obtenidos en esta simulación y en otras similares destacan los depósitos aluviales como un material de alta incidencia en la lámina de agua. Así mismo, se destaca la importancia del río como ente regulador del sistema actuando como drenaje. A continuación, se presenta una ilustración de los resultados de la simulación #138 en la segunda capa donde se encuentra la formación Tiltá (ver ilustración 7-5).

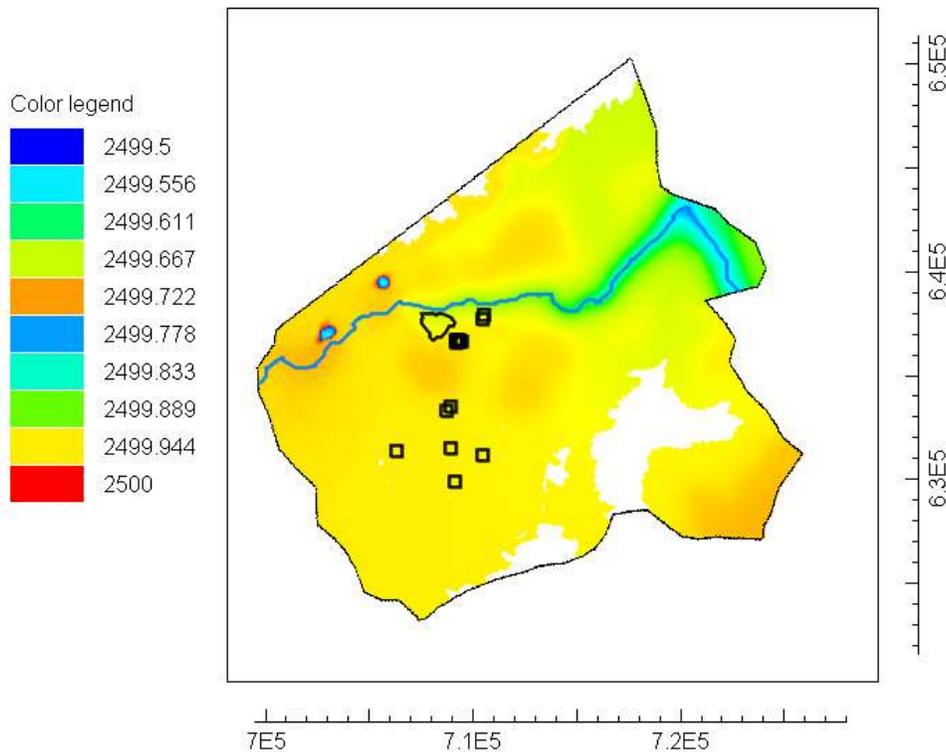


Ilustración 0-5 Resultados de la simulación #138 en la formación Tilatá

En la imagen se observa como el río Chicamocha continúa influenciando el modelo de flujo del acuífero en la formación Tilatá. Las anomalías que se observan en la parte superior izquierda se encuentran sobre la capa K6E1-Stm de la formación Guaduas esto puede deberse a la baja permeabilidad ya que está compuesta de arcillolitas y cuarzo arenitas.

Entre las simulaciones que no resultaron satisfactorias llama la atención la número 95. En la mencionada simulación, la lámina de agua llegó a un nivel muy superior de lo esperado, la cota 2530.54. En esta simulación la conductividad de la formación Tilatá es 20 veces más baja que en la simulación #138. Esto puede mostrar la importancia de esta

formación en el sistema geotermal de Paipa. Por otro lado, simulaciones como la número 60 destacan pues la conductividad propuesta para el material K6E1-Stm es demasiado alta para un material arcilloso a saber 0.01 m/día, 1000 veces más alto que la iteración #138 que logró resultados aceptables. Se observa en su resultado un nivel de lámina de agua muy por debajo de él que se encuentra en campo y una alta discrepancia del resultado. A continuación, se muestra una ilustración del modelo regional, en el cual, se consideraron inicialmente los parámetros del modelo local y se variaron para obtener un nivel de lámina de agua similar al que se tiene en la zona de ITP Lanceros. (Ver Ilustración 7-6).

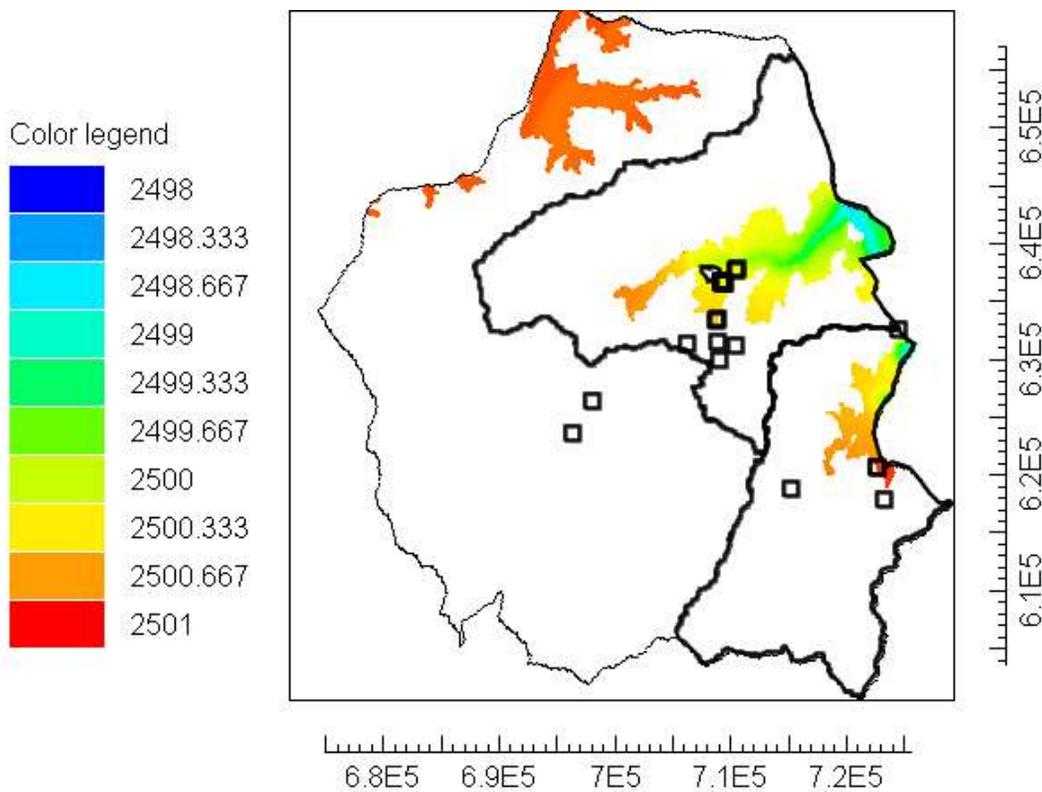


Ilustración 0-6 Lámina de agua del modelo regional

En el modelo regional fue necesario variar la conductividad de los depósitos aluviales de llanura, en esta ocasión se subió este parámetro para lograr un resultado acorde al modelo local. Este comportamiento muestra la relevancia de los depósitos aluviales en el modelo, así mismo resalta al río como elemento hidrológico regulador del sistema hidrotermal modelado. Se muestra a continuación, el resultado obtenido en la segunda capa conformada por la formación Tilatá y la formación Montebel (ver ilustración 7-7).

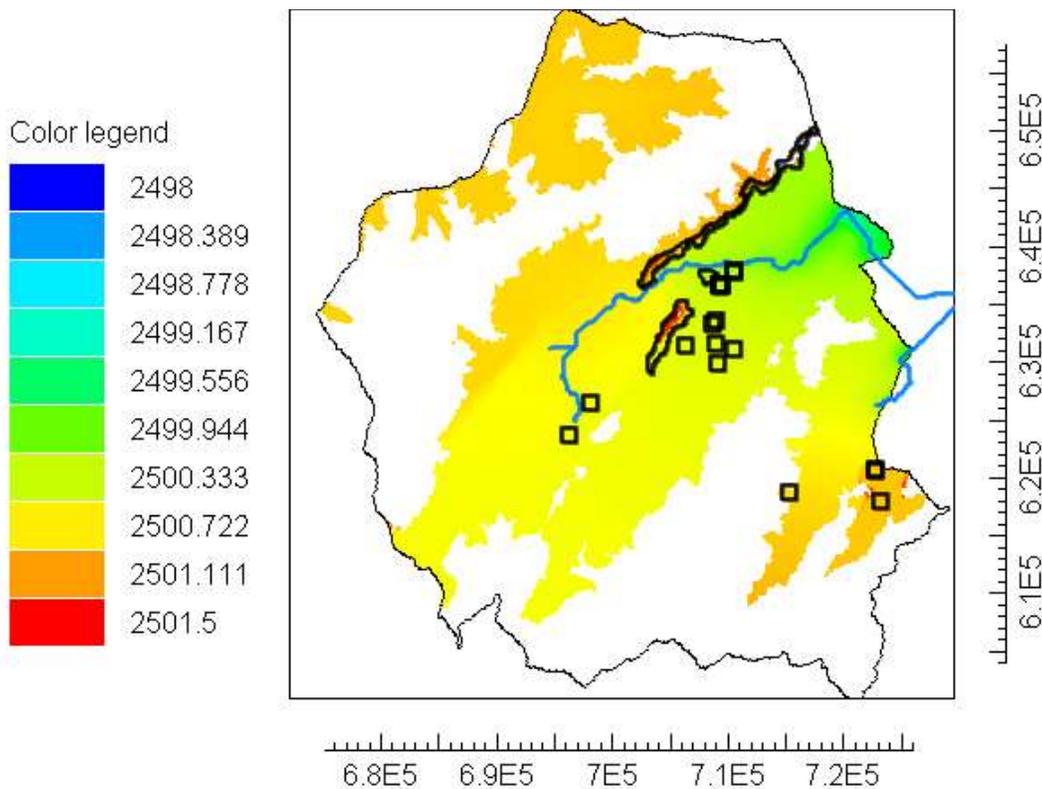


Ilustración 0-7 Resultado en la segunda capa del modelo regional

Nuevamente se puede observar que el flujo del acuífero tiene relación con la corriente del río Chicamocha. Se observa, un nivel superior relacionado con la capa K6E1-Stm de la formación Guaduas, capa de arcillolitas con cuarzoarenitas de menor permeabilidad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Actualmente se no ven varios estudios enfocados en sistemas hidrogeológicos con influencias termales. Los métodos más usados para el estudio y análisis de los recursos coinciden en el empleo de softwares gestores de información geoespacial para la realización de mapas enfocados al transporte de iones y contaminantes presentes en las aguas termales. La mayor parte de estudios realizados referentes a este recurso se relacionan con la industria energética o minera.

El método de análisis para el presente estudio comenzó con la consecución de información de segundas fuentes. En el Servicio Geológico Colombiano se encuentran mapas geológicos que permiten determinar la distribución espacial de los materiales en el área de interés, no obstante, no se encuentran muchos cortes estratigráficos que permitan determinar con buena precisión los espesores de las capas del acuífero. Además, los pocos estudios referentes al tema no se encuentran distribuidos en toda el área por lo que generan mucha incertidumbre. Los espesores elegidos para las capas del modelo geológico conceptual se basaron en los informes que acompañaban los mapas de la geología de la zona.

En el IDEAM se encuentra gran cantidad de información de estaciones pluviométricas y de evapotranspiración. Se debe tener cuidado para completar datos faltantes de cada una de las estaciones y lograr series completas para varias estaciones que se encuentren bien distribuidas en el área de análisis.

Se preparó la topografía de la zona a partir de imágenes satelitales de la NASA. Es necesario cerciorarse que las imágenes se encuentren procesadas y que no tienen

presencia de nubes pues ello genera errores en el modelo topográfico. La resolución de las imágenes es de 30X30 lo cual es adecuado para el análisis regional a escala municipal.

La Corporación Autónoma de Boyacá aportó un informe de monitoreo de caudal fuentes sector ITP municipio de Paipa, en este informe se encontraron valores de caudales de explotación de los pozos de la zona. Sin embargo, la cantidad de datos es muy poca y no permitió realizar una calibración de mayor precisión y la validación del modelo. Por otro lado, no se encuentran datos de los pozos más allá de la zona de ITP Lanceros.

No se encontraron registros de pruebas de bombeo que permitan determinar conductividades hidráulicas de los materiales de la zona, razón por la cual se recurrió a valores de literatura para el planteamiento del modelo. Sería recomendable realizar toma de datos de pruebas de bombeo en diferentes estaciones del año para analizar el comportamiento más detallado del sistema frente a las variaciones climatológicas de la zona.

Se realizaron sucesivas simulaciones del modelo variando los parámetros de conductividad hidráulica de cada uno de los materiales encontrados en el área. Resalta entre ellas la relevancia de los depósitos aluviales en donde se encuentran flujos locales, su interacción con la precipitación directa y con la corriente del río Chicamocha, todo ello favorecido por la topografía de la cuenca, la cual favorece el flujo regional hacia la parte baja de la corriente. Sería recomendable establecer la conductividad de los depósitos aluviales en campo para disminuir la incertidumbre del modelo planteado.

Destaca también la intrusión de lavas andesíticas al sur este de Paipa, esta intrusión por su baja permeabilidad y nivel topográfico podría generar gradientes de presión que influyan en el flujo de agua en el área. Por otro lado, si este material tiene permeabilidad

secundaria debida a fisuras, este material no influiría en gran medida, por ello sería recomendable estudiar la conductividad hidráulica en campo de esta intrusión. Así mismo, sería recomendable estimar la conductividad del material b2k1-sm pues él podría influir en el proceso de recarga del acuífero.

Entre las simulaciones realizadas resalta la formación Tilatá, por ello sería recomendable estudiar la conductividad de los materiales que la conforman para lograr un mejor detalle en el modelo planteado.

Sería recomendable estudiar la conductividad del lecho del río Chicamocha realizando diferentes mediciones a lo largo del cauce, así mismo, la conductividad del lecho del lago Sochagota a fin de determinar de manera más precisa la interacción de estos cuerpos superficiales con el acuífero geotermal. Por otro lado, sería adecuado realizar campañas de estudios isotópicos a lo largo de la cuenca del río Chicamocha que permita un análisis hidrogeoquímico para establecer conexiones entre acuíferos y hacer un seguimiento a la calidad del agua que se usa en la industria turística.

Se recomienda realizar pruebas de bombeo en los pozos existentes para lograr una calibración de mayor precisión del modelo y una validación del mismo.

Finalmente se recomienda detallar mejor la topografía de la zona de ITP Lanceros permitiendo una calibración más adecuada del modelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2018). *Informe de prospectividad Area cordillera*. Retrieved from [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones y Poster Tcnicos/Cordillera_Oriental.pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones_y_Poster_Tcnicos/Cordillera_Oriental.pdf)
- Albert, J. F., Corominas, J., & París, C. (1979). El estudio hidrogeologico de los manantiales y su aplicacion geologica: caso de las aguas termales, carbonicas y sulfhídricas de Cataluña. *Acta Geològica Hispànica. Homenatge a Lluís Solé i Sabarís*.
- Alfaro-Valero, C. M., Rueda-Gutiérrez, J. B., Matiz-León, J. C., Beltrán-Luque, M. A., Rodríguez-Rodríguez, G. F., Rodríguez-Ospina, G. Z., ... Malo-Lázaro, J. E. (2020). Paipa Geothermal System, Boyacá: Review of Exploration Studies and Conceptual Model. *The Geology of Colombia*, 4(May), 36. <https://doi.org/https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.04>
- Alfaro, C. (2001). INVENTARIO DE MANANTIALES TERMALES EN COLOMBIA.
- Barrera García, A. (2019a). MÓDULO 1. HIDROGEOLOGÍA. In *SIMULACIÓN NUMÉRICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS CON VISUAL MODFLOW* (pp. 1-23).
- Barrera García, A. (2019b). MÓDULO 2. MODELOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA. In *SIMULACIÓN NUMÉRICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS CON VISUAL MODFLOW* (pp. 1-20).
- Caballero, Y., Gironde, C., & Le Goff, E. (2012). Ressource en eau thermale de la station d'Amélie-les-Bains. Etat des lieux. Rapport BRGM/RP-60618-FR, 56.

- Crespo Martin, P. C. (2015). *Introducción al modelado de Sistemas físicos*, 15. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2133/4422>
- ESPINEL, D. O. (2016). ESTUDIO DE TRÁNSITO DE CRECIENTES CON DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA, EN EL RÍO FONCE AFLUENTE DEL RÍO SUÁREZ EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER. *UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- GEOCIENCIAS SAS. (n.d.). *MODELACIÓN DE FORMACIONES GEOLÓGICAS PRIORITARIAS QUE CONSTITUYEN ACUÍFEROS Y DISEÑO DE LA RED DE MONITOREO DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS Y CALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA DEL RÍO ALTO SUAREZ*. Bogotá D.C.
- IDEAM. (n.d.). Zonas_Hidrogeologicas_Colombia_mapa.JPG.jpg (Imagen JPEG, 1938 × 2599 píxeles) - Escalado (29 %). Retrieved November 29, 2019, from http://www.ideam.gov.co/documents/14691/15142/Zonas_Hidrogeologicas_Colombia_mapa.JPG/478e8f9a-9c7c-44d3-b03b-b193a9f2af8d?t=1423323873126
- Ingeniero de caminos. (n.d.). Nivel freático del suelo. Retrieved August 10, 2020, from <https://ingeniero-de-caminos.com/nivel-freatico/>
- López Velandia, C. C. (2018). Análisis de las características fisicoquímicas del agua subterránea de la cuenca del río chicú, Colombia, usando indicadores hidroquímicos y estadística multivariante. *Ingeniería y Ciencia*, 14(28), 35–68.
<https://doi.org/10.17230/ingciencia.14.28.2>
- Militares, E. de I. (1995). *Agua subterranea y perforacion de pozos* (2nd ed.). Santafé

de Bogotá: Presencia.

Moreno, D., Lopez-Sanchez, J., Blessent, D., & Raymond, J. (2018). Fault characterization and heat-transfer modeling to the Northwest of Nevado del Ruiz Volcano. *Journal of South American Earth Sciences*, *88*, 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.08.008>

Ojha, C., Shirzaei, M., Werth, S., Argus, D. F., & Farr, T. G. (2018). Sustained Groundwater Loss in California's Central Valley Exacerbated by Intense Drought Periods. *Water Resources Research*, *54*(7), 4449–4460. <https://doi.org/10.1029/2017WR022250>

Öztekin Okan, Ö., Kalender, L., & Çetindağ, B. (2018). Trace-element hydrogeochemistry of thermal waters of Karakoçan (Elazığ) and Mazgirt (Tunceli), Eastern Anatolia, Turkey. *Journal of Geochemical Exploration*, *194*, 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.07.006>

Rojas Martínez, E., Fortich Duarte, M., & Pavajeau Maestre, H. (2014). Determinación del origen y la composición de las aguas termales ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénaga (Magdalena), Colombia. *Ingenium*, *8*(21), 35. <https://doi.org/10.21774/ing.v8i21.441>

Román-, F. J. S. S. (n.d.). *Hidrología Superficial (III): Relación Precipitación - Escorrentía*. Retrieved from <http://hidrologia.usal.es>

Suzuki, Y., Ioka, S., & Muraoka, H. (2017). Geothermal resource exploration by stream pH mapping in Mutsu Hiuchi Dake volcano, Japan. *Energies*, *10*(7), 1–11. <https://doi.org/10.3390/en10071009>

Vargas Martínez, N. O. (2005). ZONAS HIDROGEOLOGICAS HOMOGÉNEAS DE

COLOMBIA HOMOGENEOUS HYDROGEOLOGICAL ZONES OF COLOMBIA Por:
Nelson Omar Vargas Martínez 1 Geólogo-Esp. Recursos Hidráulicos, 17.
Retrieved from
<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/15025/31ZONASHIDROGEOLOGICASHOMOGENEASDECOLOMBIA-dic9-2005.pdf/dd9add89-9cfe-4551-a9ae-0ad9789b661f>

Velandia Nossa, F. A. (2015). ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO PARA LA BUSQUEDA DE AGUAS SUBTERRANEAS Y PRE DISEÑO DE UN POZO, VEREDA TOIBITA, PAIPA BOYACA, *1*(30), 77-87.

ANEXOS

Tabla 0-1 Datos de precipitación y evapotranspiración anuales
en milímetros de cada subcuenca

SubCuenca	Panual_mm	EVTa_mm
W380	2277.164311	91.41000366
W390	1869.599976	92.57444988
W400	1745.747593	91.41000366
W410	1441.756717	100.9452685
W420	1360.800049	141.1560785
W430	1976.586642	115.4406206
W440	1274.238744	131.8708353
W450	1260.993268	144.5599976
W460	1236.426588	144.5599976
W470	2073.389768	134.8321463
W480	1224.400024	144.5599976
W490	1474.412651	134.3629542
W500	2252.003073	129.5623907
W510	952.1614062	92.63462842
W520	1916.606544	122.9544695
W530	2074	107.8252318
W540	1401.764016	125.986599
W550	2889.806854	111.2376672
W560	2009.982028	100.1709221
W570	1830.886084	103.0912557

SubCuenca	Panual_mm	EVTa_mm
W580	3002.222088	104.4255085
W590	1102.31949	89.30987912
W600	1019.750786	59.59610095
W610	2004.510009	106.2422028
W620	2265.665507	102.8571923
W630	1303.028648	89.12999725
W640	945.4982849	89.39455569
W650	1807.400024	106.3300018
W660	1464.678839	106.3300018
W670	1807.400024	106.3300018
W680	1102.361964	106.3300018
W690	1798.600182	106.3300018
W700	1062.345856	106.3300018
W710	1175.84935	91.47186901
W720	774.2199715	91.13998291
W730	531.4208681	104.04436
W740	542.5329802	91.13999939

Tabla 0-2 Infiltración anual de cada subcuenca

SubCuenca	Infa_mm
W380	782.52
W390	719.64
W400	551.16
W410	567.48
W420	568.32
W430	589.8
W440	534.84
W450	532.56
W460	554.88
W470	584.76
W480	552.12
W490	640.56
W500	704.76
W510	456.48
W520	662.52
W530	585
W540	592.92
W550	765.84
W560	675.6
W570	692.64
W580	712.68
W590	481.92
W600	462
W610	578.04

SubCuenca	Infa_mm
W620	706.56
W630	585.96
W640	474.96
W650	485.64
W660	605.88
W670	460.2
W680	482.04
W690	645.24
W700	509.88
W710	553.2
W720	416.88
W730	325.68
W740	326.64

Tabla 0-3 Materiales encontrados en el área

ID	SimboloUC	UGIntegrad	Descripción	Edad
1	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario
2	E1-Sc	Formación Bogotá	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas	Paleoceno
3	k6E1-Stm	Formación Guaduas	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzo arenitas de grano fino, Mantos de carbón a la base,	Maastrichtiano-Paleoceno
4	E1-Sc	Depósitos Cuaternarios	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas	Paleoceno
5	k1k6-Stm	Depósitos Cuaternarios	Shales; calizas; fosforitas; cherts y cuarzo arenitas, Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur,	Cenomaniano-Maastrichtiano
6	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario
7	k6E1-Stm	Formación Guaduas	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzo arenitas de grano fino,	Maastrichtiano-Paleoceno

ID	SimboloUC	UGIntegrad	Descripción	Edad
			Mantos de carbón a la base,	
8	k1k6-Stm	Depósitos Cuaternarios	Shales; calizas; fosforitas; cherts y cuarzo arenitas, Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur,	Cenomaniano-Maastrichtiano
9	E1-Sc	Formación Bogotá	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas	Paleoceno
10	k1k6-Stm	Depósitos Cuaternarios	Shales; calizas; fosforitas; cherts y cuarzo arenitas, Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur,	Cenomaniano-Maastrichtiano
11	e6e9-Sct	Depósitos Cuaternarios	Arenitas de grano fino a conglomeráticas interestratificadas con arcillolitas y limolitas, Ocasionalmente; lentes de hierro oolítico y carbón,	Bartoniano-Chatiano
12	b2k1-Sm	Depósitos Cuaternarios	Shales con yeso y chert intercalados con calizas y arenitas	Valanginiano-Cenomaniano
13	J1J2-VCct	Formación Montebel	Arenitas; limolitas y calizas intercaladas con tobas;	Jurásico Inferior-

ID	SimboloUC	UGIntegrad	Descripción	Edad
			brechas; aglomerados y lavas riolíticas a andesíticas,	Jurásico Medio
14	k1k6-Stm	Depósitos Cuaternarios	Shales; calizas; fosforitas; cherts y cuarzo arenitas, Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur,	Cenomaniano-Maastrichtiano
15	k6-Stm	Formación Guaduas	Arcillolitas grises y negras y arcillolitas abigarradas con intercalaciones de cuarzo arenitas de grano fino a grueso, Frecuentes mantos de carbón,	Maastrichtiano
16	b2b6-Sm	Depósitos Cuaternarios	Shales con yeso; cherts; calizas y arenitas,	Valanginiano-Albiano
17	k1k6-Stm	Depósitos Cuaternarios	Shales; calizas; fosforitas; cherts y cuarzo arenitas, Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur,	Cenomaniano-Maastrichtiano
18	N2Q1-Sc	Formación Tilatá	Conglomerados de bloques a guijos con intercalaciones de arcillas y arenitas de grano fino a grueso	Plioceno-Pleistoceno
19	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario

ID	SimboloUC	UGIntegrad	Descripción	Edad
20	E1-Sc	Formación Bogotá	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas	Paleoceno
21	k6E1-Stm	Formación Guaduas	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzo arenitas de grano fino, Mantos de carbón a la base,	Maastrichtiano-Paleoceno
22	N2Q1-Sc	Formación Tilatá	Conglomerados de bloques a guijos con intercalaciones de arcillas y arenitas de grano fino a grueso	Plioceno-Pleistoceno
23	Q-ca	Depósitos Cuaternarios	Abanicos aluviales y depósitos coluviales	Cuaternario
24	N2Q1-Sc	Formación Tilatá	Conglomerados de bloques a guijos con intercalaciones de arcillas y arenitas de grano fino a grueso	Plioceno-Pleistoceno
25	k6-Stm	Formación Guaduas	Arcillolitas grises y negras y arcillolitas abigarradas con intercalaciones de cuarzo arenitas de grano fino a grueso, Frecuentes mantos de carbón,	Maastrichtiano
26	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario

ID	SimboloUC	UGIntegrad	Descripción	Edad
27	k6-Stm	Formación Guaduas	Arcillolitas grises y negras y arcillolitas abigarradas con intercalaciones de cuarzo arenitas de grano fino a grueso, Frecuentes mantos de carbón,	Maastrichtiano
28	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario
29	b1-Sct	Formación Arcabuco	Cuarzo arenitas de grano fino a conglomeráticas con intercalaciones de lodolitas y conglomerados	Berriasiano
30	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario
31	k6E1-Stm	Formación Guaduas	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzo arenitas de grano fino, Mantos de carbón a la base,	Maastrichtiano- Paleoceno
32	N2Q1-Sc	Formación Tilatá	Conglomerados de bloques a guijos con intercalaciones de arcillas y arenitas de grano fino a grueso	Plioceno- Pleistoceno
33	E1-Sc	Formación Bogotá	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas	Paleoceno

ID	SimboloUC	UGIntegrad	Descripción	Edad
34	k6E1-Stm	Formación Guaduas	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzo arenitas de grano fino, Mantos de carbón a la base,	Maastrichtiano-Paleoceno
35	k6E1-Stm	Formación Guaduas	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzo arenitas de grano fino, Mantos de carbón a la base,	Maastrichtiano-Paleoceno
36	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario
37	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario
38	E1-Sc	Formación Bogotá	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas	Paleoceno
39	k1k6-Stm	Depósitos Cuaternarios	Shales; calizas; fosforitas; cherts y cuarzoarenitas, Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur,	Cenomaniano-Maastrichtiano
40	E1-Sc	Formación Bogotá	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas	Paleoceno
41	N2Q1-Sc	Formación	Conglomerados de bloques a	Plioceno-

ID	SimboloUC	UGIntegrad	Descripción	Edad
		Tilatá	guijos con intercalaciones de arcillas y arenitas de grano fino a grueso	Pleistoceno
42	k6E1-Stm	Formación Guaduas	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino, Mantos de carbón a la base,	Maastrichtiano-Paleoceno
43	k1k6-Stm	Depósitos Cuaternarios	Shales; calizas; fosforitas; cherts y cuarzoarenitas, Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur,	Cenomaniano-Maastrichtiano
44	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario
45	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario
46	k6E1-Stm	Formación Guaduas	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino, Mantos de carbón a la base,	Maastrichtiano-Paleoceno
47	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario
48	N2-Vi	Depósitos Cuaternarios	Lavas e ignimbritas de composición andesítica	Plioceno

ID	SimboloUC	UGIntegrad	Descripción	Edad
49	k1k6-Stm	Depósitos Cuaternarios	Shales; calizas; fosforitas; cherts y cuarzoarenitas, Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur,	Cenomaniano-Maastrichtiano
50	k1k6-Stm	Depósitos Cuaternarios	Shales; calizas; fosforitas; cherts y cuarzoarenitas, Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur,	Cenomaniano-Maastrichtiano
51	N2Q1-Sc	Formación Tiltá	Conglomerados de bloques a guijos con intercalaciones de arcillas y arenitas de grano fino a grueso	Plioceno-Pleistoceno
52	k1k6-Stm	Depósitos Cuaternarios	Shales; calizas; fosforitas; cherts y cuarzoarenitas, Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur,	Cenomaniano-Maastrichtiano
53	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario
54	e6e9-Sct	Depósitos Cuaternarios	Arenitas de grano fino a conglomeráticas interestratificadas con arcillolitas y limolitas, Ocasionalmente; lentes de	Bartoniano-Chatiano

ID	SimboloUC	UGIntegrad	Descripción	Edad
			hierro oolítico y carbón,	
55	N2-Vi	Depósitos Cuaternarios	Lavas e ignimbritas de composición andesítica	Plioceno
56	N2Q1-Sc	Formación Tilatá	Conglomerados de bloques a guijos con intercalaciones de arcillas y arenitas de grano fino a grueso	Plioceno- Pleistoceno
57	k1k6-Stm	Depósitos Cuaternarios	Shales; calizas; fosforitas; cherts y cuarzoarenitas, Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur,	Cenomaniano- Maastrichtiano
58	N2-Vi	Depósitos Cuaternarios	Lavas e ignimbritas de composición andesítica	Plioceno
59	b2k1-Sm	Depósitos Cuaternarios	Shales con yeso y chert intercalados con calizas y arenitas	Valanginiano- Cenomaniano
60	J1J2-VCct	Formación Montebel	Arenitas; limolitas y calizas intercaladas con tobas; brechas; aglomerados y lavas riolíticas a andesíticas,	Jurásico Inferior- Jurásico Medio
61	k6E1-Stm	Formación Guaduas	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino, Mantos de carbón a la base,	Maastrichtiano- Paleoceno

ID	SimboloUC	UGIntegrad	Descripción	Edad
62	E1-Sc	Formación Bogotá	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas	Paleoceno
63	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario
64	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario
65	k6E1-Stm	Formación Guaduas	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino, Mantos de carbón a la base,	Maastrichtiano- Paleoceno
66	E1-Sc	Depósitos Cuaternarios	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas	Paleoceno
67	b1-Sct	Formación Arcabuco	Cuarzoarenitas de grano fino a conglomeráticas con intercalaciones de lodolitas y conglomerados	Berriasiano
68	Q-ca	Depósitos Cuaternarios	Abanicos aluviales y depósitos coluviales	Cuaternario
69	N2Q1-Sc	Formación Tilatá	Conglomerados de bloques a guijos con intercalaciones de arcillas y arenitas de grano	Plioceno- Pleistoceno

ID	SimboloUC	UGIntegrad	Descripción	Edad
			fino a grueso	
70	E1-Sc	Formación Bogotá	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas	Paleoceno
71	J3-Sc	Formación La Rusia	Capas rojas constituidas por arenitas; conglomerados y limolitas,	Jurásico Superior
72	k6E1-Stm	Formación Guaduas	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino, Mantos de carbón a la base,	Maastrichtiano- Paleoceno
73	b2b6-Sm	Depósitos Cuaternarios	Shales con yeso; cherts; calizas y arenitas,	Valanginiano- Albiano
74	k1k6-Stm	Depósitos Cuaternarios	Shales; calizas; fosforitas; cherts y cuarzoarenitas, Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur,	Cenomaniano- Maastrichtiano
75	Q-al	Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	Cuaternario
76	E1-Sc	Depósitos Cuaternarios	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas	Paleoceno

ID	SimboloUC	UGIntegrad	Descripción	Edad
77	k1k6-Stm	Depósitos Cuaternarios	Shales; calizas; fosforitas; cherts y cuarzoarenitas, Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur,	Cenomaniano-Maastrichtiano

Tabla 0-4 Parámetros de simulación para calibración del modelo

local

Material / Simulación	33	34	35	36	37	38
b1-Set	0.01	0.01	0.01	0.2	0.01	0.002
b2b6-Sm	0.0002	0.0002	0.0004	0.004	0.0002	0.0002
b2k1-Sm	0.0002	0.0002	0.0004	0.004	0.0002	0.0002
E1-Sc	0.001	0.001	0.001	0.06	0.003	0.003
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.002	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.002	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.01	0.01	0.01	0.2	0.01	0.01
k1k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0004	0.002	0.0001	0.0001
k6-Stm	0.01	0.01	0.01	0.2	0.01	0.002
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.2	0.01	0.01
N2-Vi	0.000001	0.000001	0.000001	0.00002	0.000001	0.000001
N2Q1-Sc	0.01	0.01	0.01	0.02	0.001	0.001
Q-al	0.003	0.01	0.003	0.06	0.003	0.003
Q-ca	0.003	0.01	0.003	0.06	0.003	0.003
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00100	0.00315	0.00114	0.02000	0.00100	0.00100
Z2	0.01000	0.01000	0.01000	0.02000	0.00100	0.00100
Z3	0.00550	0.00550	0.00550	0.13000	0.00650	0.00650
Z4	0.01000	0.01000	0.01000	0.20000	0.01000	0.00200
Lake Lakeance	1	1	1	1	1	1
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	0	1	1
IN	2.0026	3.0179	2.0103	28.1898	1.6574	1.4468
OUT	27.5026	19.3108	17.4446	58.4345	17.2275	9.7865
Discrepancia	-172.85	-145.94	-158.67	-69.83	-164.89	-148.48
Lamina ITP	2491.82	2489.99	2490.5	2488.89	2494.14	2492.86

Material	39	40	41	42	43	44
b1-Set	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
b2b6-Sm	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
b2k1-Sm	0.0006	0.0006	0.0006	0.0002	0.0002	0.0002
E1-Sc	0.001	0.001	0.003	0.003	0.003	0.003
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
k1k6-Stm	0.0003	0.0003	0.0003	0.0001	0.0001	0.0001
k6-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
N2-Vi	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
N2Q1-Sc	0.01	0.001	0.001	0.005	0.0005	0.00005
Q-al	0.01	0.01	0.01	0.003	0.003	0.003
Q-ca	0.01	0.01	0.01	0.003	0.003	0.003
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00328	0.00328	0.00328	0.00100	0.00100	0.00100
Z2	0.01000	0.00100	0.00100	0.00500	0.00050	0.00005
Z3	0.00550	0.00550	0.00650	0.00650	0.00650	0.00650
Z4	0.01000	0.01000	0.01000	0.01000	0.01000	0.01000
Lake Lakeance	1	1	1	1	1	1
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	0	1	1	1
IN	3.0047	2.1101	5.7794	1.6774	1.3126	2.6713
OUT	21.5825	14.0121	13.566	19.8282	13.2044	15.4862
Discrepancia	-151.12	-147.65	-80.5	-168.8	-163.83	-141.15
Lamina ITP	2490.16	2492.27	2492.43	2491.66	2494.8	2500.1

Material	45	46	47	48	49	50
b1-Set	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
b2b6-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
b2k1-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
E1-Sc	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
k1k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
k6-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001	0.01
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
N2-Vi	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
N2Q1-Sc	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
Q-al	0.003	0.01	0.03	0.03	0.003	0.003
Q-ca	0.003	0.01	0.003	0.003	0.003	0.003
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00100	0.00315	0.00100	0.00515	0.00100	0.00100
Z2	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
Z3	0.00650	0.00650	0.00650	0.00650	0.00650	0.00650
Z4	0.01000	0.01000	0.01000	0.01000	0.00400	0.01000
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	100
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	0	0	0	1	1
IN	2.7082	3.9282	6.6136	3.6716	1.2654	2.4324
OUT	18.2767	8.4397	8.1239	8.7407	6.8885	14.8642
Discrepancia	-148.38	-72.95	-20.5	-81.68	-137.92	-143.75
Lamina ITP	2500.14	2495.87	2495.29	2495.94	2496.2	2499.5

Material	51	52	53	54	55	56
b1-Set	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01
b2b6-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.002	0.0002	0.0002
b2k1-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.002	0.0002	0.01
E1-Sc	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01
k1k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.001	0.0001	0.0001
k6-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
N2-Vi	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
N2Q1-Sc	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00001
Q-al	0.003	0.003	0.001	0.003	0.003	0.003
Q-ca	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00100	0.00100	0.00069	0.00169	0.00100	0.00251
Z2	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00001
Z3	0.00650	0.00650	0.00650	0.00650	0.02650	0.00650
Z4	0.01000	0.01000	0.01000	0.01000	0.02333	0.01000
Lake Lakeance	1	0.001	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	1	1	0
IN	2.6713	1.9042	1.4232	2.3962	2.6306	2.6955
OUT	15.4862	12.5613	12.3121	17.3424	21.94	29.6995
Discrepancia	-141.15	-147.35	-158.55	-151.44	-157.17	-166.72
Lamina ITP	2499.6	2498.3	2502	2499.3	2499.54	2497.9

Material	57	58	59	60	61	62
b1-Set	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
b2b6-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
b2k1-Sm	0.005	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
E1-Sc	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.001
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
k1k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
k6-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
N2-Vi	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
N2Q1-Sc	0.00005	0.00005	0.00001	0.00001	0.00802	0.01
Q-al	0.003	0.01	0.01	0.003	0.003	0.01
Q-ca	0.003	0.01	0.01	0.003	0.003	0.01
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00174	0.00315	0.00315	0.00100	0.00100	0.00315
Z2	0.00005	0.00005	0.00001	0.00001	0.00802	0.01000
Z3	0.00650	0.00650	0.00650	0.00650	0.00650	0.00550
Z4	0.01000	0.01000	0.01000	0.01000	0.01000	0.01000
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	0	0	1
IN	2.5486	1.0401	0.4535	0.3188	0.309	2.4304
OUT	5.6669	4.5703	1.6223	0.9639	2.4066	23.7913
Discrepancia	-75.91	-125.84	-112.61	-100.6	-2.0976	-162.93
Lamina ITP	2496.7	2494.6	2491.52	2490.84	2492.72	2490.33

Material	63	64	65	66	67	68
b1-Set	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001	0.0005
b2b6-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
b2k1-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
E1-Sc	0.001	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
k1k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
k6-Stm	0.0001	0.0001	0.01	0.01	0.001	0.0001
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
N2-Vi	1.00E-06	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
N2Q1-Sc	0.01	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
Q-al	0.003	0.003	0.003	0.001	0.001	0.003
Q-ca	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00100	0.00100	0.00100	0.00069	0.00069	0.00100
Z2	0.01000	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
Z3	0.00550	0.00650	0.00650	0.00650	0.00650	0.00650
Z4	0.00340	0.00340	0.01000	0.01000	0.00100	0.00023
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	1	1	1
IN	1.8628	0.7988	2.0949	2.4236	2.2151	2.4125
OUT	20.7704	3.5539	5.8012	9.2253	3.9454	5.0874
Discrepancia	-167.08	-126.59	-93.88	-116.78	-56.18	-71.33
Lamina ITP	2491.65	2495.64	2495.06	2497.8	2496.6	2495.9

Material	70	69	71	72	73	74
b1-Set	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
b2b6-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
b2k1-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
E1-Sc	0.003	0.003	0.03	0.03	0.03	0.03
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.01	0.001	0.01	0.01	0.01	0.01
k1k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
N2-Vi	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
N2Q1-Sc	0.00005	0.00005	0.00005	0.005	0.005	0.00005
Q-al	0.003	0.003	0.003	0.003	0.0003	0.0003
Q-ca	0.003	0.003	0.003	0.003	0.0003	0.0003
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00017	0.00017
Z2	0.00005	0.00005	0.00005	0.00500	0.00500	0.00005
Z3	0.00650	0.00200	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000
Z4	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	1	1	1
IN	2.4125	2.168	2.3763	3.2161	2.0952	1.9301
OUT	5.0874	3.9835	5.2668	20.5388	9.2582	2.6057
Discrepancia	-71.33	-59.03	-75.64	-145.84	-126.18	-29.79
Lamina ITP	2495.9	2495.2	2495.77	2491.62	2493.3	2494.55

Material	75	76	77	78	79	80
b1-Set	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.005	0.005
b2b6-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001
b2k1-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001
E1-Sc	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
k1k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
N2-Vi	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
N2Q1-Sc	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
Q-al	0.00003	0.00009	0.00007	0.0001	0.0001	0.0001
Q-ca	0.0003	0.0003	0.0003	0.001	0.001	0.001
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00013	0.00014	0.00013	0.00025	0.00025	0.00022
Z2	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
Z3	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000
Z4	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00173	0.00173
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	1	1	1
IN	2.3368	2.002	2.0447	2.3692	2.3451	2.3528
OUT	5.4453	3.1897	3.3128	4.515	4.4994	4.5088
Discrepancia	-79.89	-45.76	-47.34	-62.34	-62.95	-62.84
Lamina ITP	2517.17	2497.6	2500.4	2510.3	2511.43	2511.14

Material	81	82	83	84	85	86
b1-Set	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
b2b6-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
b2k1-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
E1-Sc	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
k1k6-Stm	0.001	0.01	0.005	0.003	0.001	0.003
k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
N2-Vi	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
N2Q1-Sc	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.0001
Q-al	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Q-ca	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00052	0.00329	0.00175	0.00114	0.00052	0.00114
Z2	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00010
Z3	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000
Z4	0.00173	0.00173	0.00173	0.00173	0.00173	0.00173
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	1	1	1
IN	2.1742	2.3154	2.3152	2.1447	2.1742	2.1259
OUT	3.1266	4.4901	4.4787	2.8787	3.1266	3.022
Discrepancia	-35.93	-63.91	-63.69	-29.23	-35.93	-34.81
Lamina ITP	2506.9	2513.25	2513.14	2505.98	2506.97	2505.76

Material	87	88	89	90	91	92
b1-Sct	0.005	0.005	0.005	0.005	0.05	0.05
b2b6-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
b2k1-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.002
E1-Sc	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.01	0.01	0.001	0.05	0.05	0.05
k1k6-Stm	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
N2-Vi	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.0000001
N2Q1-Sc	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
Q-al	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Q-ca	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Zk	10.00	20.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00114	0.00114	0.00114	0.00114	0.00114	0.00142
Z2	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
Z3	0.02000	0.02000	0.01550	0.04000	0.04000	0.04000
Z4	0.00173	0.00173	0.00173	0.00173	0.01673	0.01673
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	1	1	1
IN	2.1584	2.1535	2.175	2.1322	2.1353	2.3127
OUT	2.8276	2.8286	3.1327	2.7863	2.7848	4.4932
Discrepancia	-26.85	-27.1	-36.09	-26.6	-26.4	-64.08
Lamina ITP	2507.17	2506.99	2507	2505.99	2505.17	2513.25

Material	93	94	95	96	97	98
b1-Set	0.005	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
b2b6-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
b2k1-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0005
E1-Sc	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
k1k6-Stm	0.0002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
k6-Stm	0.0001	0.001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
N2-Vi	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.0000001
N2Q1-Sc	0.00005	0.00005	0.00005	0.0005	0.0005	0.0005
Q-al	0.0001	0.0001	0.00003	0.00003	0.00005	0.00005
Q-ca	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00028	0.00114	0.00113	0.00113	0.00113	0.00118
Z2	0.00005	0.00005	0.00005	0.00050	0.00050	0.00050
Z3	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000
Z4	0.00173	0.01733	0.01673	0.01673	0.01673	0.01673
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	1	1	1
IN	2.2078	2.3162	2.4936	2.1864	2.2341	2.3307
OUT	3.1487	4.506	3.0442	1.6321	2.478	2.5923
Discrepancia	-35.13	-64.19	-19.88	29.03	-10.35	-10.63
Lamina ITP	2505.11	2513.4	2530.54	2511.17	2510.34	2509.95

Material	99	100	101	102	103	104
b1-Set	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
b2b6-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
b2k1-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
E1-Sc	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
k1k6-Stm	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
N2-Vi	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.0000001
N2Q1-Sc	0.0005	0.001	0.002	0.002	0.02	0.02
Q-al	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
Q-ca	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00048	0.00048	0.00048	0.00048	0.00048	0.00048
Z2	0.00050	0.00100	0.00200	0.00200	0.02000	0.02000
Z3	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000
Z4	0.01673	0.01673	0.01673	0.01673	0.01673	0.01673
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	1	1	1
IN	2.2347	2.0807	2.0788	2.1032	1.9798	1.9811
OUT	1.6809	1.1361	0.9541	2.103	1.3739	1.497
Discrepancia	28.29	58.73	74.16	0.01	36.13	27.84
Lamina ITP	2510.92	2504.16	2500.21	2500.19	2496.51	2496.51

Material	105	106	107	108	109	110
b1-Set	0.1	0.1	0.1	0.05	0.05	0.05
b2b6-Sm	0.0002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
b2k1-Sm	0.0002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
E1-Sc	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.08	0.08	0.08	0.05	0.05	0.05
k1k6-Stm	0.0009	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
N2-Vi	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.0000001
N2Q1-Sc	0.02	0.02	0.02	0.05	0.002	0.001
Q-al	0.00003	0.00003	0.00003	0.0001	0.0001	0.00003
Q-ca	0.0001	0.0001	0.0001	0.0003	0.0003	0.001
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00034	0.00056	0.00056	0.00060	0.00060	0.00070
Z2	0.02000	0.02000	0.02000	0.05000	0.00200	0.00100
Z3	0.05500	0.05500	0.05500	0.04000	0.04000	0.04000
Z4	0.03340	0.03340	0.03340	0.01673	0.01673	0.01673
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	1	1	1
IN	1.975	1.982	1.9444	2.0308	2.0246	2.143
OUT	1.5041	1.49	1.465	2.3709	2.1048	2.207
Discrepancia	27.07	28.34	28.13	-15.45	-3.89	-2.94
Lamina ITP	2496.5	2496.5	2496.63	2493.22	2492.9	2500.53

Material	111	112	113	114	115	116
b1-Sct	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.005
b2b6-Sm	0.001	0.0005	0.001	0.0005	0.001	0.001
b2k1-Sm	0.001	0.001	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
E1-Sc	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
e6e9-Sct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
k1k6-Stm	0.001	0.0005	0.001	0.0005	0.001	0.001
k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
N2-Vi	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.00000001
N2Q1-Sc	0.001	0.001	0.001	0.001	0.00008	0.00008
Q-al	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
Q-ca	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00074	0.00055	0.00066	0.00047	0.00066	0.00066
Z2	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00050	0.00008
Z3	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000
Z4	0.01673	0.01673	0.01673	0.01673	0.01673	0.00173
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	1	1	1
IN	1.9814	1.9814	1.9814	1.9814	1.9962	2.0531
OUT	2.0294	2.0232	2.0163	2.025	2.1828	2.2893
Discrepancia	-2.39	-2.09	-1.75	-2.17	-8.93	-10.88
Lamina ITP	2489.74	2489.73	2489.72	2489.73	2490.35	2493.13

Material	117	118	119	120	121	122
b1-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.5	0.05	0.005
b2b6-Sm	0.001	0.001	0.001	0.0002	0.0002	0.0002
b2k1-Sm	0.0005	0.0005	0.0005	0.0002	0.0002	0.0002
E1-Sc	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
k1k6-Stm	0.001	0.001	0.001	0.0009	0.0009	0.0009
k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.001	0.00001	0.00001
k6E1-Stm	0.01	0.01	0.01	0.001	0.00001	0.00001
N2-Vi	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.00000001
N2Q1-Sc	0.0001	0.00005	0.002	0.002	0.002	0.002
Q-al	0.00008	0.00005	0.00005	0.00003	0.00003	0.00003
Q-ca	0.0008	0.0008	0.0005	0.001	0.001	0.001
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00060	0.00059	0.00055	0.00048	0.00048	0.00048
Z2	0.00010	0.00005	0.02000	0.00200	0.00200	0.00200
Z3	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000
Z4	0.00010	0.00010	0.00010	0.16673	0.01667	0.00167
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	1	1	1
IN	2.09	2.1701	2.1686	2.0485	2.127	2.1204
OUT	2.167	2.2119	2.2403	2.1587	2.0336	2.0686
Discrepancia	-3.62	-1.91	-3.25	-5.24	4.49	2.48
Lamina ITP	2495.93	2499.46	2499.63	2500.14	2499.45	2499.69

Material	123	124	125	126	127	128
b1-Set	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
b2b6-Sm	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
b2k1-Sm	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
E1-Sc	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
k1k6-Stm	0.0009	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
k6-Stm	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001
k6E1-Stm	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001
N2-Vi	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.00000001
N2Q1-Sc	0.001	0.0015	0.0015	0.001	0.001	0.001
Q-al	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
Q-ca	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00048	0.00028	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032
Z2	0.00100	0.00150	0.00150	0.00100	0.00100	0.00100
Z3	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000
Z4	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	1	1	0
IN	2.1383	2.1295	2.1297	2.1365	2.1365	2.1364
OUT	2.16	2.1034	2.109	2.1522	2.1495	2.1389
Discrepancia	-1.01	1.23	0.97	-0.73	-0.61	-0.12
Lamina ITP	2500.29	2499.9	2499.94	2500.25	2500.24	2500.18

Material	129	130	131	132	133	134
b1-Set	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.05
b2b6-Sm	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002
b2k1-Sm	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002
E1-Sc	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
k1k6-Stm	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0009
k6-Stm	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.01
k6E1-Stm	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.01
N2-Vi	0.00000001	0.000005	0.0000005	0.0000001	0.00000005	0.0000001
N2Q1-Sc	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.0005
Q-al	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
Q-ca	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00048
Z2	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00050
Z3	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000
Z4	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.02333
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	NWT	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	0	1	1	1	1	0
IN		1.9981	1.9981	1.9902	1.9969	
OUT		2.0958	2.0881	2.0038	2.0188	
Discrepancia		-4.77	-4.41	-0.68	-1.09	
Lamina ITP		2500.099	2500.058	2499.61	2499.69	

Material	135	136	137	138	139	140
b1-Set	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
b2b6-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.00003
b2k1-Sm	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.00003
E1-Sc	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
k1k6-Stm	0.0009	0.0009	0.0009	0.0003	0.00005	0.00005
k6-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.00001	0.00001	0.00001
k6E1-Stm	0.0001	0.0001	0.0001	0.00001	0.00001	0.00001
N2-Vi	0.0000001	0.00000005	0.00000005	0.00000007	0.00000007	0.00000007
N2Q1-Sc	0.0005	0.0005	0.001	0.001	0.001	0.001
Q-al	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
Q-ca	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Zk	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00048	0.00048	0.00048	0.00032	0.00024	0.00018
Z2	0.00050	0.00050	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100
Z3	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000	0.04000
Z4	0.00173	0.00173	0.00173	0.00167	0.00167	0.00167
Lake Lakeance	10	10	10	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05	M05	M05	M05
Converge	1	1	1	1	1	1
IN	2.03	2.0045	1.997	1.9938	1.9938	1.9939
OUT	2.3367	2.0556	2.0458	2.0117	2.0136	2.0165
Discrepancia	-14.04	-2.52	-2.42	-0.89	-0.98	-1.13
Lamina ITP	2501.63	2500.134	2499.83	2499.65	2499.66	2499.68

Material	141	142	143
b1-Set	0.005	0.005	0.005
b2b6-Sm	0.00003	0.00003	0.00003
b2k1-Sm	0.00003	0.00003	0.00003
E1-Sc	0.08	0.08	0.05
e6e9-Set	0.0001	0.0001	0.0001
J1J2-VCct	0.0001	0.0001	0.0001
J3-Sc	0.08	0.08	0.03
k1k6-Stm	0.00005	0.00005	0.00005
k6-Stm	0.000001	0.000001	0.000001
k6E1-Stm	0.000001	0.000001	0.000001
N2-Vi	0.00000005	0.00000005	0.00000007
N2Q1-Sc	0.001	0.0001	0.0001
Q-al	0.00003	0.00003	0.00003
Q-ca	0.001	0.001	0.001
Zk	10.00	10.00	10.00
Z1	0.00018	0.00018	0.00018
Z2	0.00100	0.00010	0.00010
Z3	0.10000	0.08000	0.04000
Z4	0.00167	0.00167	0.00167
Lake Lakeance	10	10	10
Modelo	M05	M05	M05
Converge	1	1	0
IN	1.996	2.0517	2.0438
OUT	2.0496	2.0828	2.065
Discrepancia	-2.65	-1.5	-1.03
Lamina ITP	2499.83	2501.75	2501.66