

5.3 Simulación de aguas subterráneas

Mediante la simulación de las aguas subterráneas, se evaluó el potencial y su posibilidad de desarrollo. La simulación de aguas subterráneas fue llevada a cabo ejecutando los pasos descritos abajo.

- Implementación de simulación de aguas subterráneas de un área grande, donde se analiza la mayor parte del departamento de Cundinamarca incluyendo el Área de Estudio.
- Implementación de la simulación de aguas subterráneas para el Área de Estudio.

Los resultados del análisis se explican en seguida.

5.3.1 Simulación de aguas subterráneas en área de gran tamaño

(1) Área para la Aplicación de la Simulación de Agua subterránea del Área Grande

El Equipo del Estudio hizo un modelo de simulación de área grande que cubre el río Magdalena al oeste, el río Orinoco al este, incluyendo el Área de Estudio. El área grande determinada para la simulación es de 32.200 km², y cubre la mayor parte de los municipios de Cundinamarca (Ver Figura-5.14).

(a) Propósito de la simulación en un área grande

La simulación de aguas subterráneas en un área grande se llevó a cabo para analizar el sistema de flujo de aguas subterráneas en el área grande, incluida el Área de Estudio.

(b) Modelo de simulación de aguas subterráneas en un área grande

Una descripción general del modelo de simulación de agua subterránea de área grande se explica a continuación. Se utilizó el programa informático **Visual Modflow** para la simulación.

Tamaño del modelo

La distancia de la cuadrícula del modelo es de 1.500 metros y el número total de celdas es de 42.000.

Área modelada y condiciones de frontera

En la decisión de área modelada, se tuvieron en cuenta los siguientes puntos:

- Los límites del modelo necesitan condiciones de frontera. Por consiguiente, los límites del modelo deben ponerse lejos del Área de Estudio para que las condiciones de los límites no influyan el flujo del agua subterránea del Área de Estudio.
- Para examinar el flujo de aguas subterráneas del Área de Estudio, deben analizarse en el modelo los flujos de aguas subterráneas al río Magdalena y al Valle del Orinoco río Orinoco. Por consiguiente estas dos regiones deben ser incluidas en el modelo.
- La frontera del modelo debe corresponder al río Magdalena, el valle del río Orinoco, los otros ríos importantes y las principales divisorias de aguas (Ver Figura-5.15).

Basándonos en los principios arriba mencionados, las condiciones para los límites del modelo se establecieron como se explica a continuación (Figura-5.15).

- El límite de la cabeza constante se fijó en el río Magdalena.
- Se fijó como límite de la cabeza constante se fijó en la sabana del Orinoco.
- Para la otra frontera del modelo, "El límite de flujo de aguas subterráneas = 0" se fijó donde el límite corresponde a la divisoria de aguas, y "el límite de cabeza constante" se fijó donde el límite corresponde a ríos.
- Dentro del modelo, "el límite del Drenaje" se estableció en los ríos principales en el modelo.

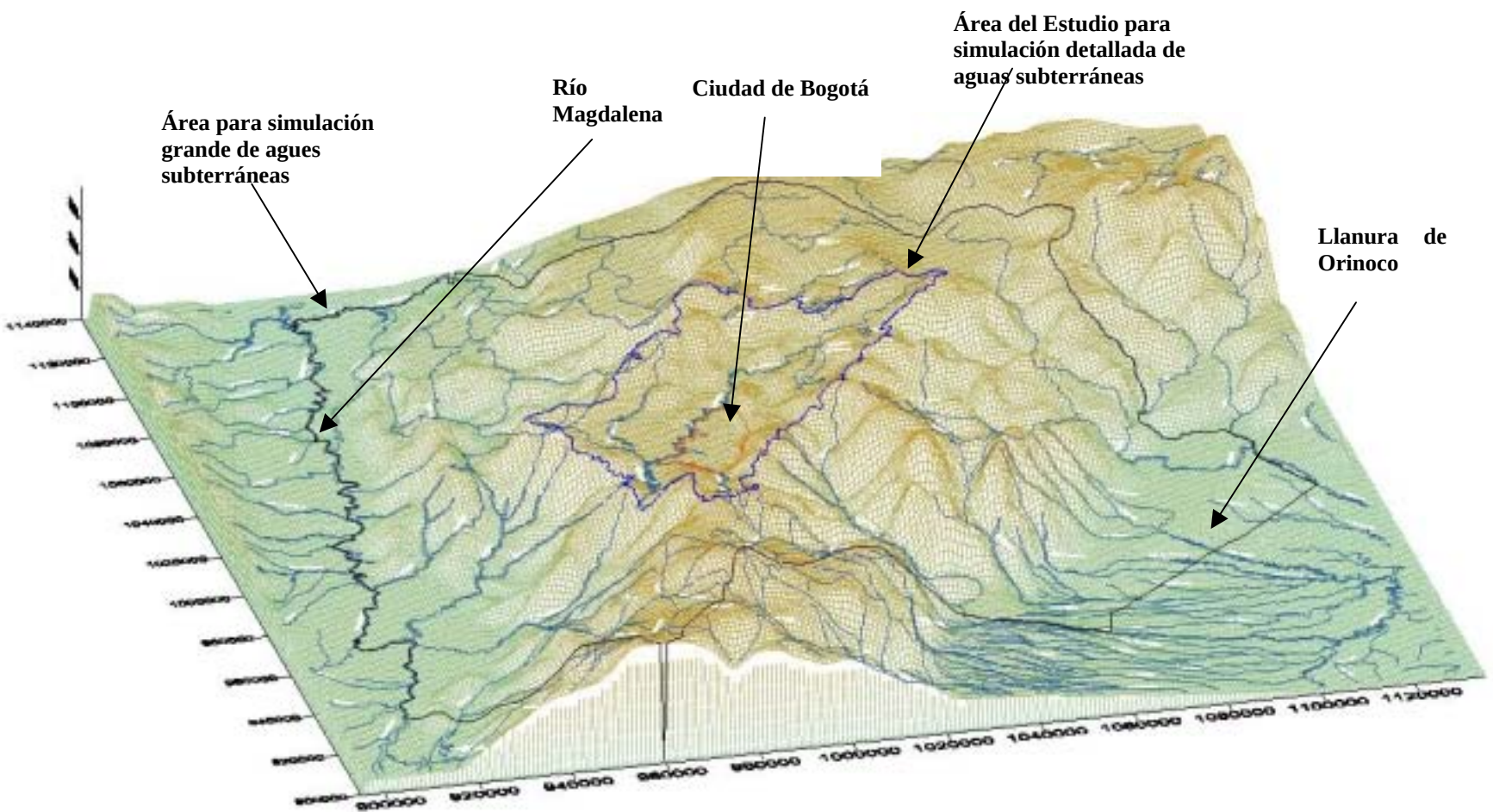


Figura-5.14 Área para la simulación de aguas subterráneas

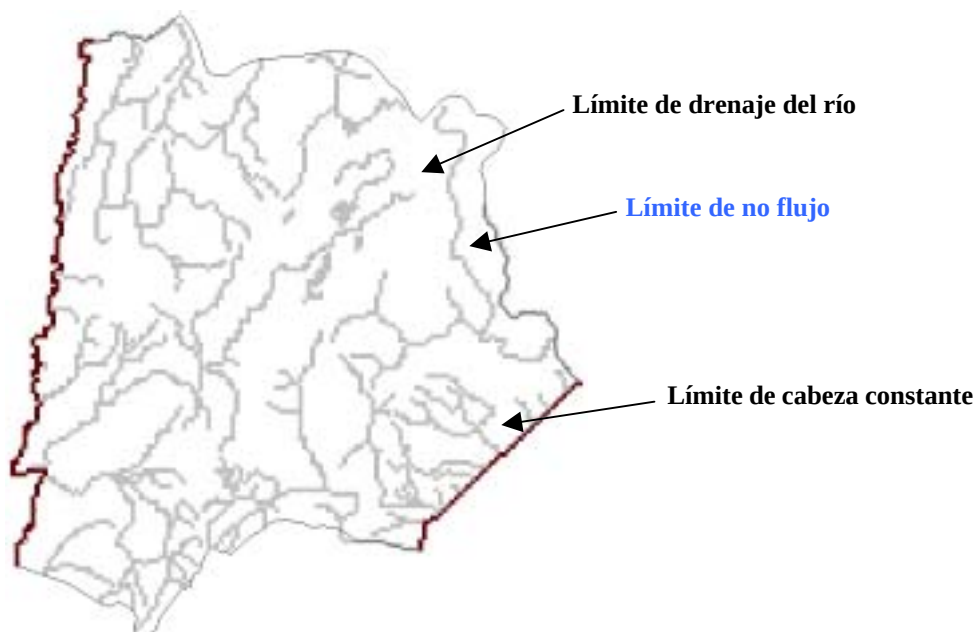


Figura-5.15 Condiciones de los límites del modelo

Estructura de los acuíferos

En la formulación del modelo de acuíferos, las secciones geológicas fueron hechas por el Equipo del Estudio basado en el “ATLAS GEOLOGICO DE COLOMBIA DIGITAL (INGEOMINAS, 1997).” El modelo geológico tridimensional se hizo basándose en estas secciones geológicas. Este modelo de la simulación tiene ocho acuíferos siguiendo la clasificación de mapas de INGEOMINAS. Un ejemplo de sección geológica se muestra en la Figura-5.16.

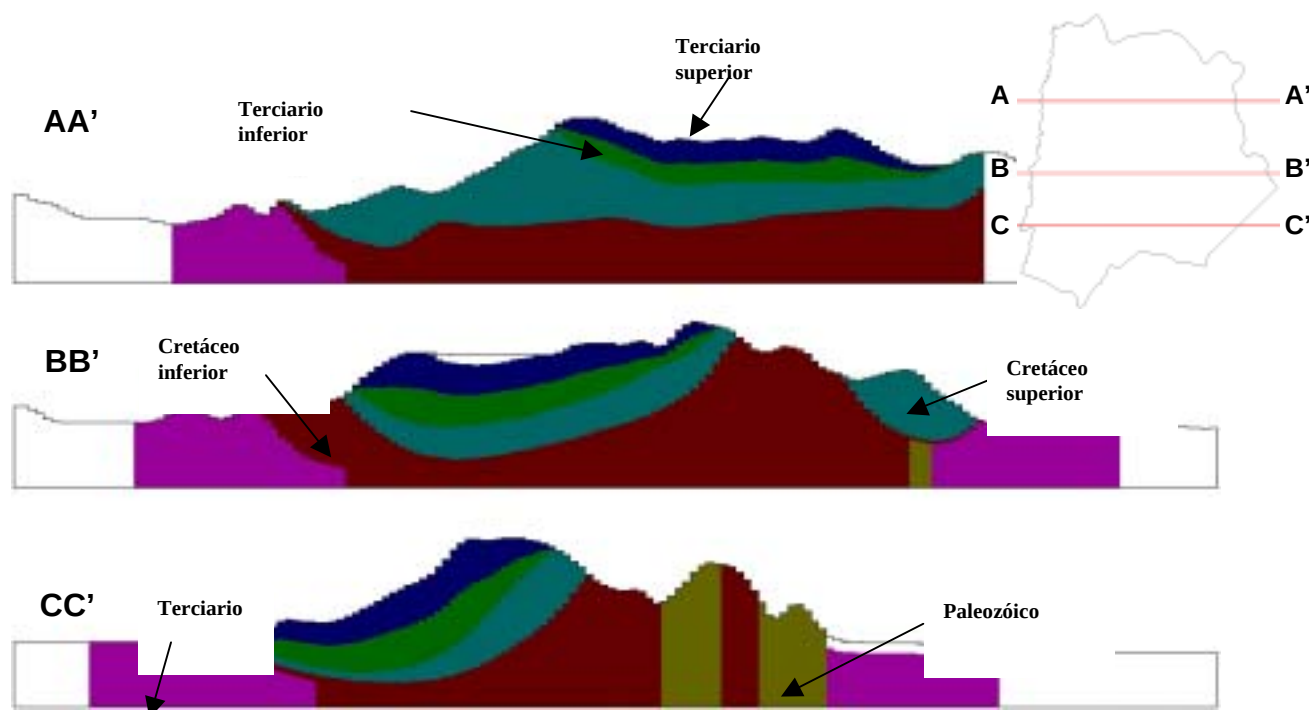


Figura-5.16 ejemplo de estructura de acuífera del modelo

Parámetros de los acuíferos

Los parámetros de los acuíferos se fijaron basándose en los valores estadísticos de parámetros de acuíferos que se analizaron en el Análisis Hidrogeológico. Los parámetros finales de los acuíferos usados para el modelo se muestran en la Tabla-5.14.

Tabla-5.14 Clasificación acuífera y Parámetros del Acuífero para la Simulación de Agua subterránea

No.	Acuífero	Coeficiente de permeabilidad (cm/s)	
		Horizontal	Vertical
1	Cuaternario	6×10^{-5}	3×10^{-6}
2	Terciario superior	3×10^{-4}	3×10^{-5}
3	Terciario inferior	3×10^{-4}	3×10^{-5}
4	Grupo Guadalupe superior	1.2×10^{-4}	1.2×10^{-5}
5	Grupo Guadalupe más bajo	6×10^{-5}	6×10^{-6}
6	Cretáceo medio	3×10^{-5}	3×10^{-6}
7	Cretáceo inferior	1.5×10^{-5}	1.5×10^{-6}
8	Paleozoico	6×10^{-5}	3×10^{-6}

Recarga de agua subterránea

No hay información confiable para la estimación de la recarga de aguas subterráneas del área modelada. De acuerdo con lo anterior, la recarga de agua subterránea se fijó basándose en las presunciones explicadas a continuación.

- La recarga de agua subterránea se estimó con base en los mapas anuales de lluvias del IDEAM y la CAR que cubren el departamento de Cundinamarca completo.
- El porcentaje de precipitación que se convierte en agua subterránea se estimó para cada tipo geológico con base en el Mapa de recarga elaborado por INGEOMINAS.
- En el curso de la aplicación de la simulación del agua subterránea, la recarga inicial se modificó varias veces dentro de un rango aceptable, para alcanzar un resultado razonable de la simulación. La recarga del agua subterránea final usada para el modelo se muestra en la Tabla-5.15.

Tabla-5.15 Recarga de agua subterránea por geología usada para el área grande en la simulación de aguas subterráneas

No.	Acuífero	Relación de recarga de agua subterránea (%) a la precipitación anual
1	Cuaternario	5%
2	Terciario superior	15%
3	Terciario más bajo	3%
4	Grupo de Guadalupe superior	10%
5	Grupo de Guadalupe más bajo	10%
6	Medio Cretaceous	3%
7	Cretaceous más bajo	3%
8	Paleozoic	3%

Pozos de bombeo

Para examinar la influencia en el sistema de flujo de aguas subterráneas por medio de pozos de bombeo en el Área de Estudio, se establecieron pozos simplificados en el Área de Estudio del modelo. El rendimiento total de los pozos cambió de 0%, 20%, 30%, 40% de la recarga total de aguas subterráneas al Área de Estudio. Por consiguiente, fue examinado el cambio de flujo de las aguas subterráneas por medio del cambio de rendimiento de los pozo.



Figura-5.17 Distribución de pozos

(2) Resultados de la simulación de aguas subterráneas en el área grande

Sistema de flujo de aguas subterráneas

El flujo de aguas subterráneas calculados con una tasa de bombeo del 40% de recarga de las aguas subterráneas y sin la misma, se muestra en la Figura-5.19 y en la Figura-5.18 respectivamente, el sistema de flujo de aguas subterráneas es clasificado en dos tipos:

- Sistema de flujo de aguas subterráneas que fluyen al Río de Magdalena.
- Sistema de flujo de aguas subterráneas que fluyen a la Sabana del Orinoco.
-

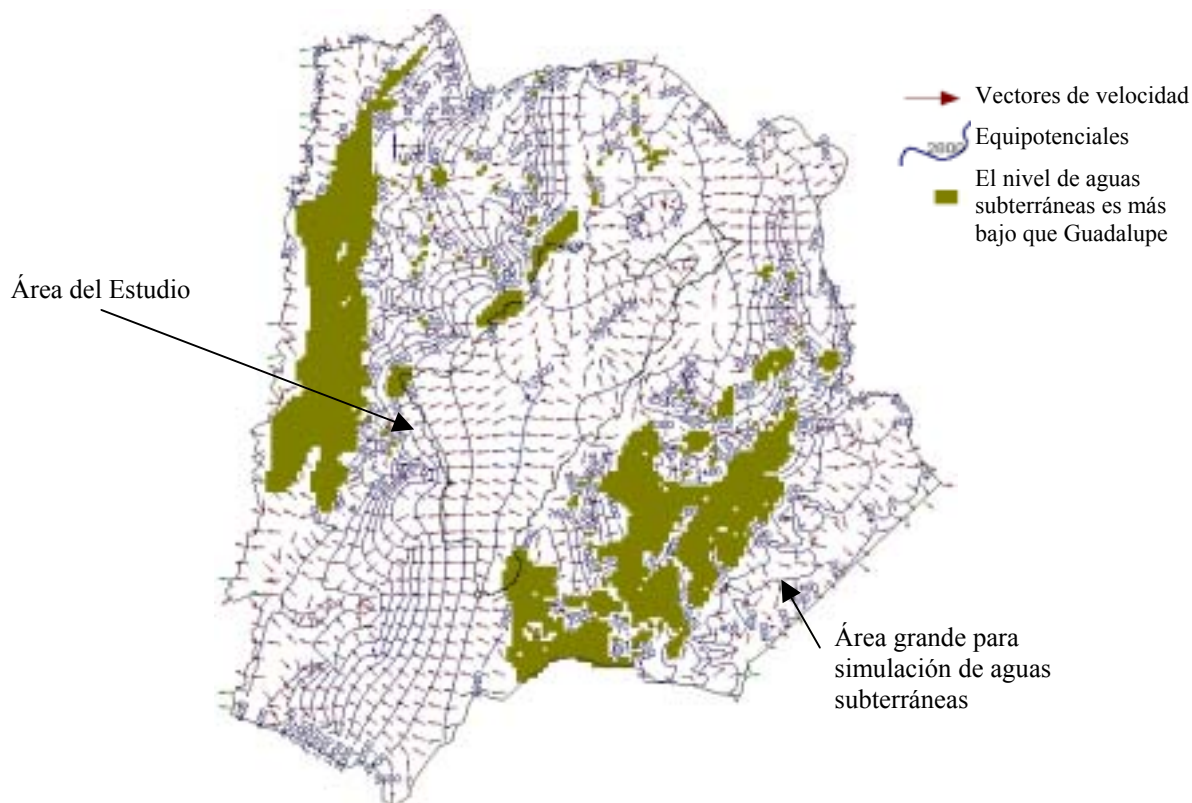


Figura-5.18 Resultados de simulación de aguas subterráneas en un área grande (Rendimiento = 0% de recarga)

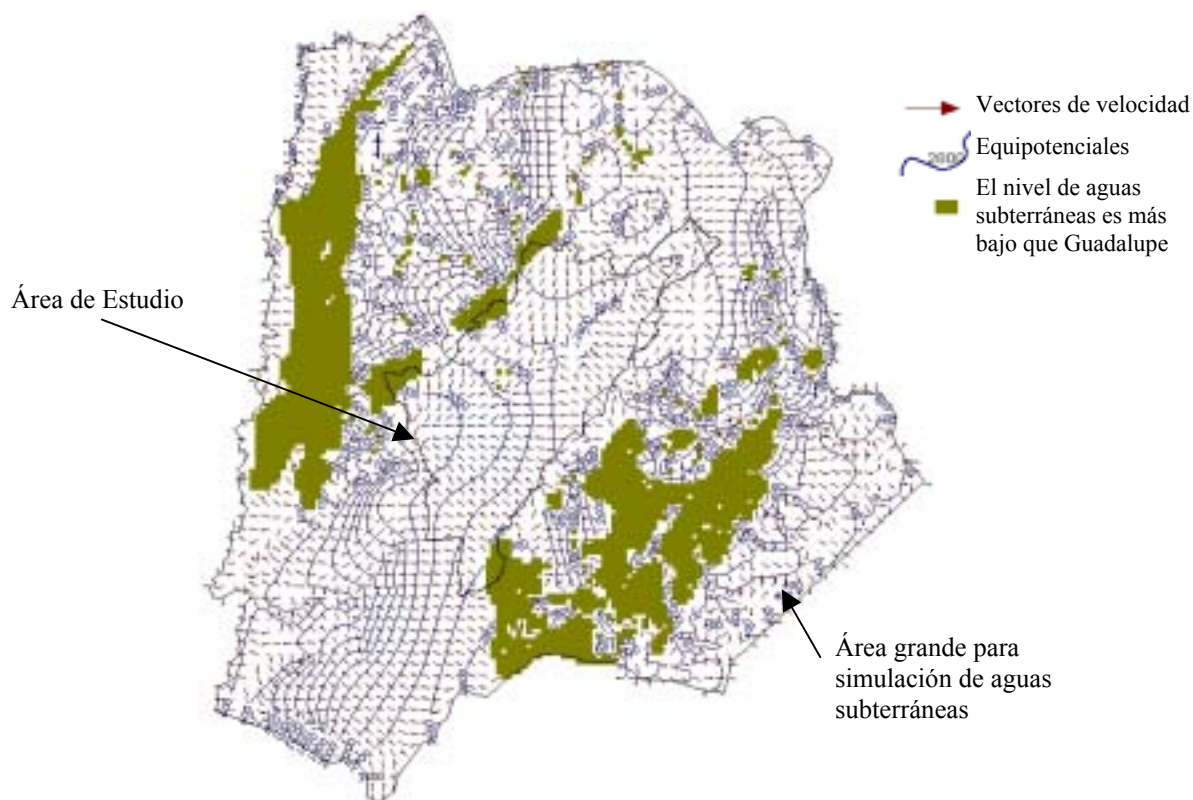


Figura-5.19 Resultados de simulación de aguas subterráneas en un área grande (Rendimiento = 40 % de la recarga)

La mayor parte del Área de Estudio está incluido en el sistema de flujo de aguas subterráneas que se dirigen en dirección sur-oeste al río Magdalena. (Ver Figura-5.18 y Figura-5.19).

Influencia del bombeo en el sistema de flujo de las aguas subterráneas del Área de Estudio

Según la Figura-5.20, la influencia ejercida por el bombeo en el sistema de flujo de aguas subterráneas en el Área de Estudio es la siguiente:

- A medida que el bombeo aumenta, el flujo de aguas subterráneas hacia los pozos se acelera, y al mismo tiempo, el nivel de las aguas subterráneas desciende alrededor de los pozos.
- Como aparece en la Figura-5.20, la divisoria de las aguas subterráneas se extiende del Área de Estudio hacia las regiones circundantes por aumento del bombeo. El aumento del bombeo agranda el área influenciada por el bombeo. Sucede entonces que las aguas subterráneas fuera de del Área de Estudio son finalmente arrastradas hacia el Área de Estudio.

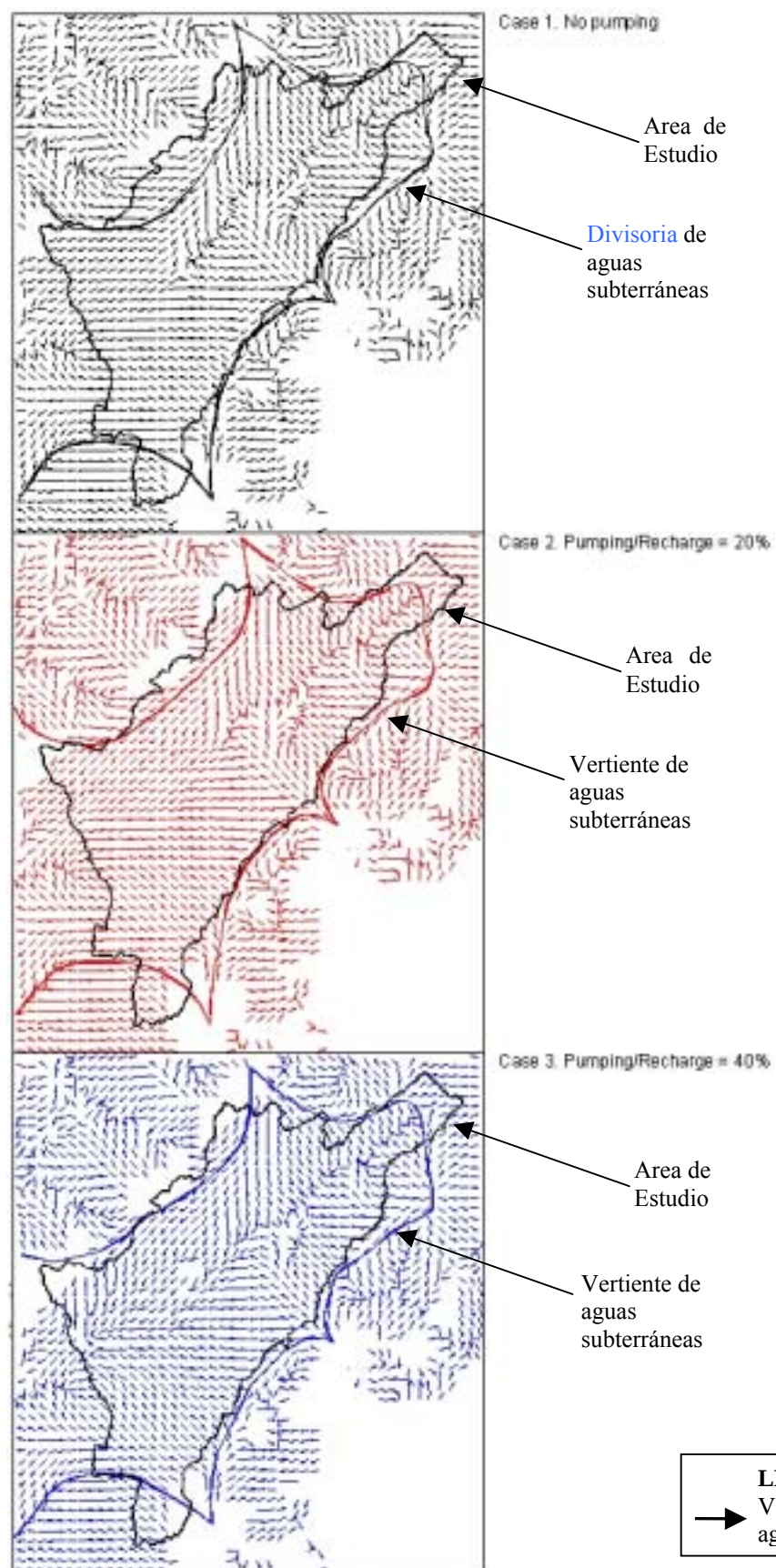


Figura-5.20 Cambio de divisoria de aguas subterráneas por tasa de bombeo en el Área de Estudio

(3) Conclusiones de los resultados de la simulación

De los resultados de la simulación de aguas subterráneas en un área grande, se concluye lo siguiente:

- Antes del desarrollo actual de las aguas subterráneas del Área de Estudio, estas aguas subterráneas estaban fluyendo hacia la dirección sur-oeste, al Río Magdalena siguiendo la pendiente general del Área de Estudio.
- Después del comienzo del desarrollo de las aguas subterráneas, el flujo de las aguas subterráneas hacia los pozos presentes se aceleró, y al mismo tiempo, el nivel de las aguas subterráneas desciende en el Área de Estudio.
- La divisoria de agua subterránea del sistema de flujo al que el Área de Estudio pertenece, se ha extendido hacia fuera del Área de Estudio a medida que el desarrollo de las aguas subterráneas ha aumentado.
- Las anteriores conclusiones significan que el flujo de las aguas subterráneas no está limitado dentro del Área de Estudio. A medida que el bombeo aumenta, el área influenciada crece hacia fuera de los límites del Área de Estudio.
- Los niveles de las aguas subterráneas del Área de Estudio pueden bajarse continuamente a medida que el bombeo aumenta, si el flujo de agua subterránea está limitado dentro del Área de Estudio. Sin embargo, como el desarrollo de las aguas subterráneas ha aumentado, el área influenciada crece hacia el exterior del Área de Estudio, de donde fluye el agua subterránea. El descenso del nivel del agua subterránea finalmente se detiene cuando el bombeo y el ingreso de agua subterránea se equilibran.

5.3.2 Simulación de aguas subterráneas del Área de Estudio

(a) Propósito de la simulación

Un modelo de simulación detallada del área de Estudio fue hecho para examinar lo adecuado de la recarga de aguas subterráneas de 144mm/año que se estimó en el análisis del balance hídrico.

(b) Modelo de la simulación

El modelo de la simulación para el Área de Estudio se explica abajo. *Modflow Visual* se usó para esta simulación.

Tamaño del modelo

La distancia de la malla del modelo es de 1000 metros y el número del total de celdas es $105 \times 120 = 52.500$.

Área modelada y condiciones de los límites

Un área de 105km x 120km, que incluye toda el Área de Estudio fue modelada para la simulación. Al establecer las condiciones de frontera, se hizo referencia a los resultados de la simulación para un área grande.

< Condiciones de los límites dentro del Área de Estudio >

Sólo unas cuantas “Condiciones de drenaje de ríos” se le dieron al modelo dentro del Área de Estudio. La recarga de aguas subterráneas dada al modelo no incluye el flujo base de los ríos que se explican en la SECCIÓN-2 de este informe. Por consiguiente, las “Condiciones de drenaje de ríos” no son necesarias para el modelo, bajo la presunción de que el agua de recarga no fluye hacia los ríos. Sin embargo, las “Condiciones de drenaje de ríos” se impuso a una pequeñas partes del modelo, para evitar resultados inadecuados.

< Condiciones de los límites del Área de Estudio >

Según el resultado de la simulación de aguas subterráneas en un área grande, las aguas subterráneas fluyen a las cuencas del río Magdalena y del río Orinoco. Por consiguiente, el sistema de ríos por fuera del Área de Estudio se determinó en el modelo como las “Condiciones de drenaje de ríos”.

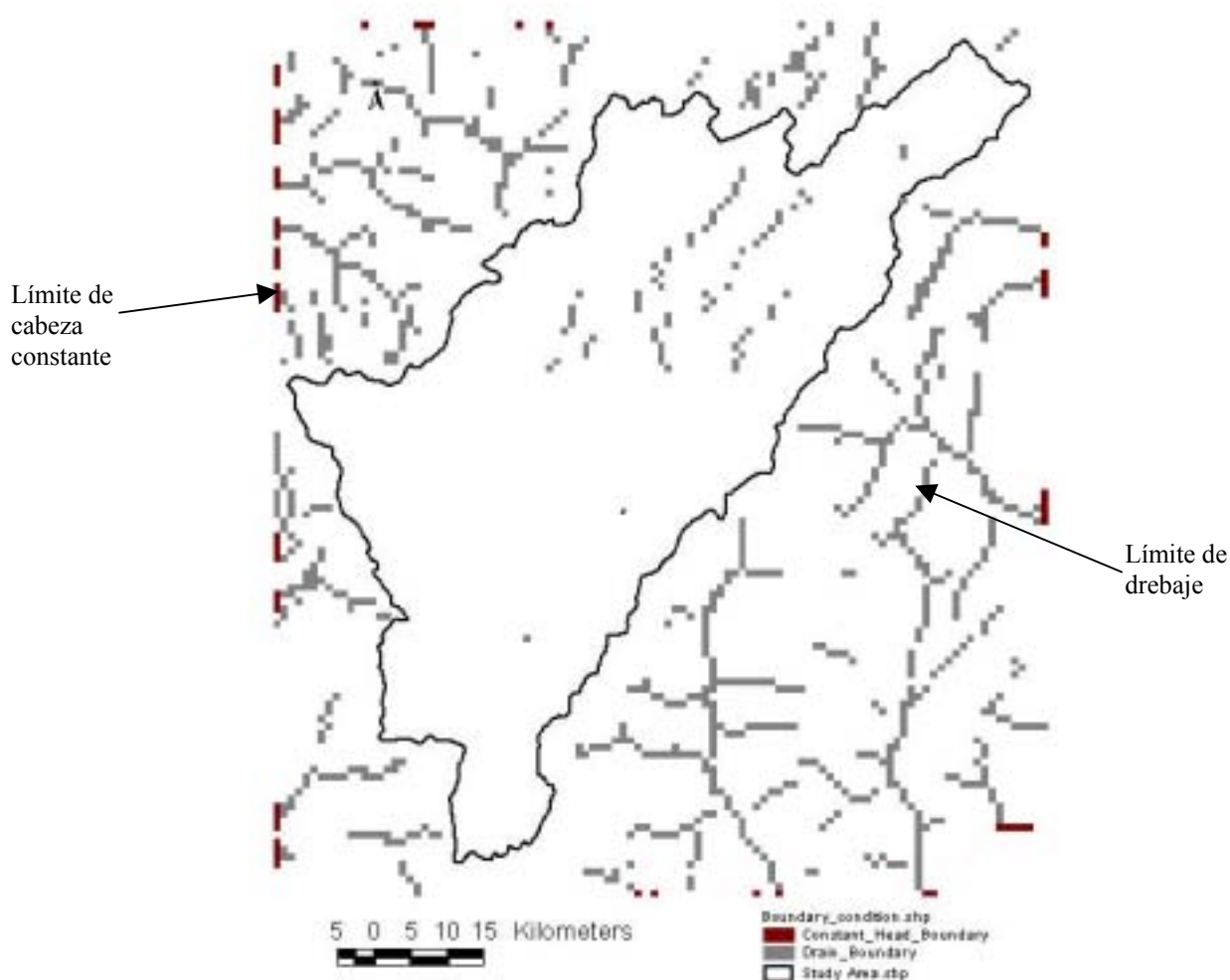
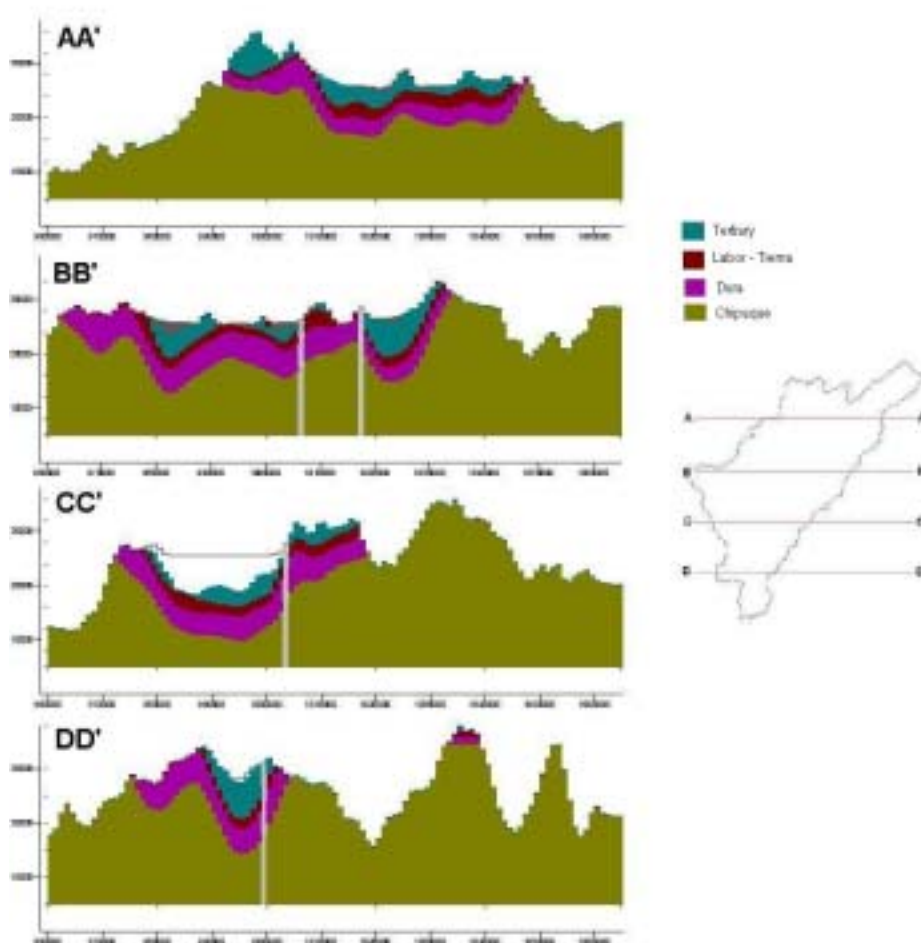


Figura-5.21 Condiciones de los límites del modelo

Estructura de los acuíferos

En la formulación del modelo de acuíferos, el Equipo de Estudio hizo secciones geológicas basadas en el mapa geológico existente de 1/100,000 de INGEOMINAS. Luego, se elaboró el modelo geológico tridimensional basados en estas secciones geológicas. Este modelo de simulación tiene cinco acuíferos siguiendo la clasificación del mapa de INGEOMINAS como mostramos en la Tabla-5.16. Un ejemplo de sección geológica del modelo aparece en la Figura-5.22.



Parámetros de acuíferos

Los parámetros iniciales de acuíferos se fijaron basándonos en los valores estadísticos de parámetros acuíferos que se analizaron en el Análisis Hidrogeológico de este informe. La relación (permeabilidad vertical) / (permeabilidad horizontal) es fija (1/15). Los parámetros acuíferos finales se muestran en la エラー! リンクが正しくありません。 .

Tabla-5.16 Clasificación acuífera y Parámetros del Acuífero para la Simulación de Agua subterránea

No.	Acuífero	Coeficiente de permeabilidad (m/día)	
		Horizontal	Vertical
1	Cuaternario	0.6	0.04
2	Terciario	0.06	0.004
3	Labor Tierna	1.0	0.067
4	Plaeners	0.5	0.033
5	Chipaque	0.13	0.009
6	Falla de Bogotá	10	10

Recarga de aguas subterráneas

La recarga de aguas subterráneas, que fue calculada utilizando el análisis del balance hídrico se adaptó al modelo, como se puede ver en la Figura-5.23. Por otro lado, allí no se detalla la información detallada sobre la recarga de aguas subterráneas fuera del Área de Estudio. Por consiguiente, la recarga de aguas subterráneas fuera del Área de Estudio se dio al modelo basándonos en los resultados del modelo de simulación para un área grande.

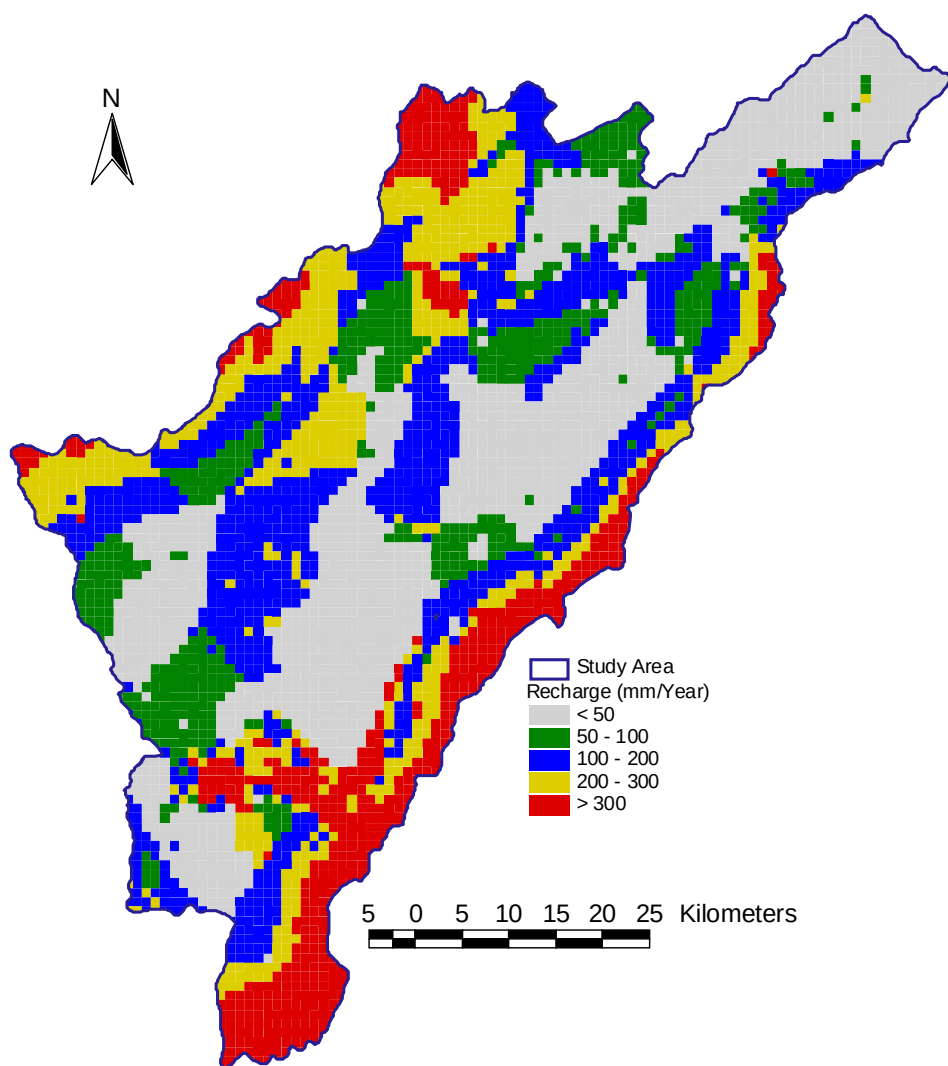


Figura-5.23 Recarga de aguas subterráneas del modelo de simulación

Bombeo actual

Los pozos de bombeo actuales del Área de Estudio dados al modelo, fueron basados en los resultados del inventario de pozos. El rendimiento de todos los pozos en el Área de Estudio (alrededor de 7.000 pozos) se aplicó al modelo. El rendimiento total es aproximadamente 320.000m³/día.

- La localización de los pozos se aplicó exactamente al modelo, basados en las coordenadas de la base de datos de los pozos.
- El acuífero de los pozos se identificó exactamente en el modelo, basados en la información de la base de datos de los pozos.
- El rendimiento de los pozos se aplicó exactamente al modelo, basados en la información de la base de datos de los pozos.
- Pozos con información poco razonable o sin suficiente información se modificaron adecuadamente y se aplicaron al modelo.

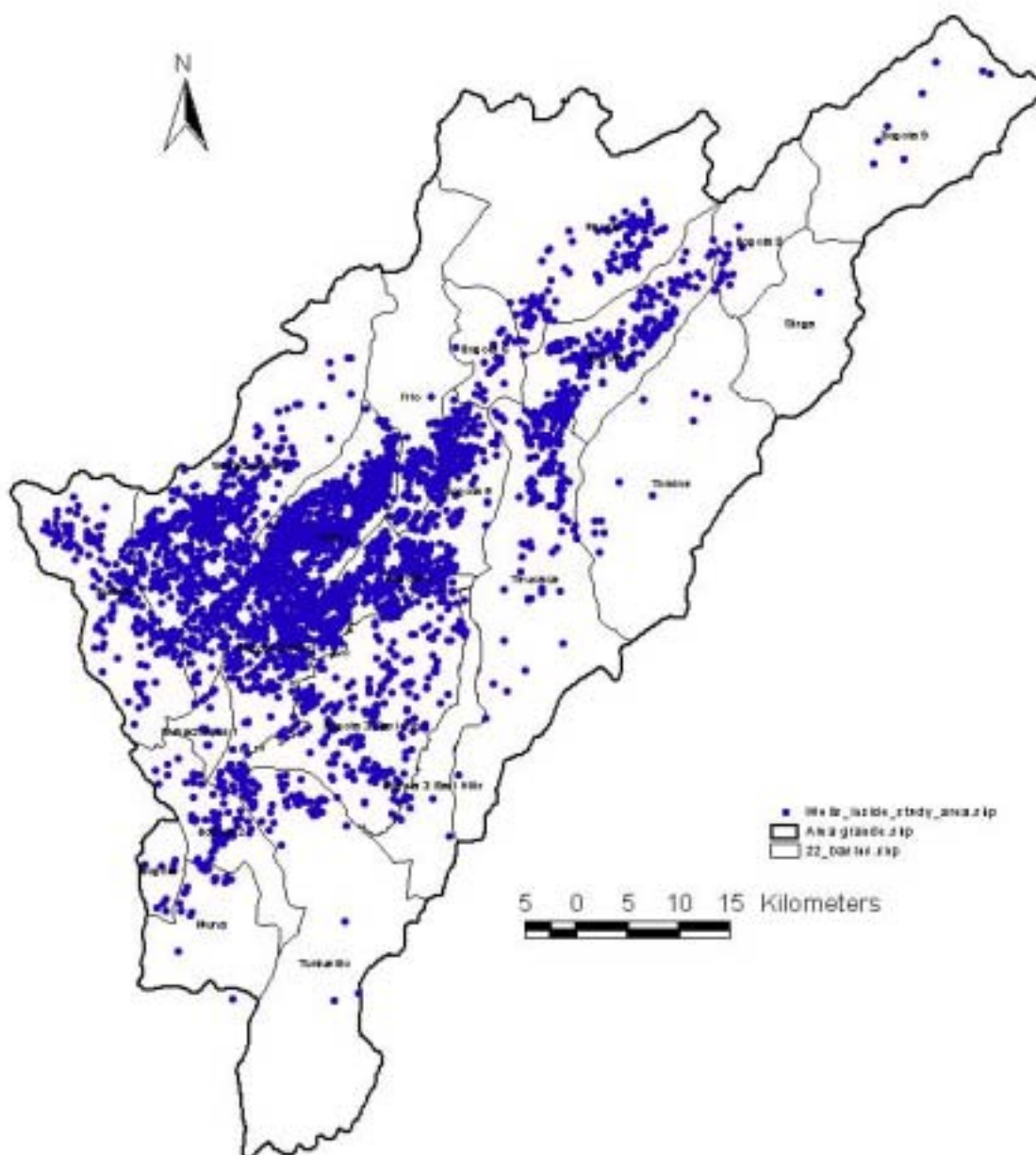


Figura-5.24 Pozos en el modelo de simulación

(3) Resultados de la simulación de agua subterránea del Área de Estudio

La simulación del agua subterránea se llevó a cabo bajo las condiciones expuestas anteriormente. Esta simulación se hizo con base en condiciones de estado estable. El resultado de la simulación se explica a continuación.

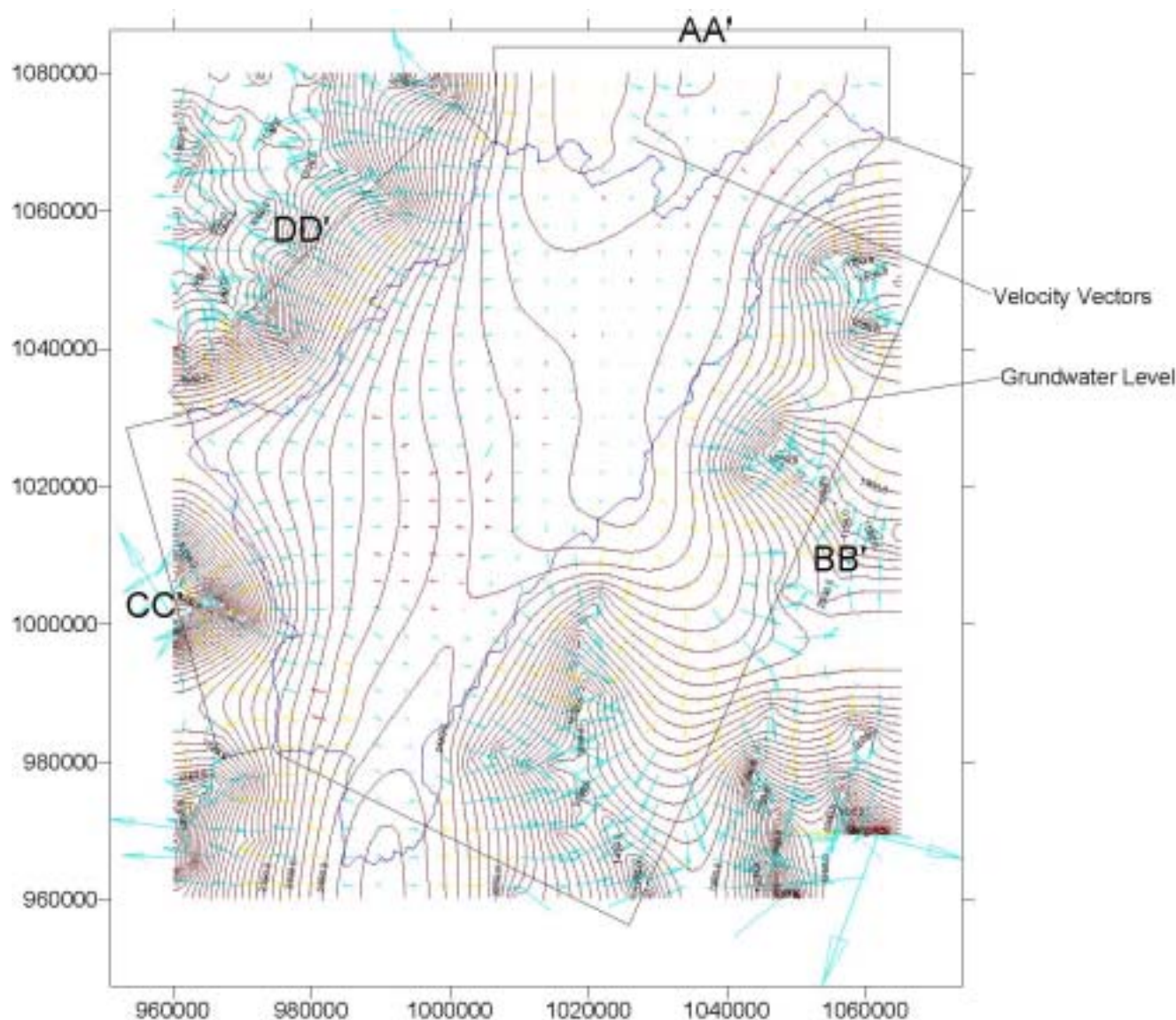


Figura-5.25 Nivel de las aguas subterráneas calculados del Cretáceo con la simulación

Nivel calculado de aguas subterráneas

El nivel calculado de aguas subterráneas para el Cretáceo se muestra en la Figura-5.25. El nivel de las aguas subterráneas calculado tiene la misma tendencia del nivel de las aguas subterráneas observado, pero es más plano y más suave que el observado. El nivel freático observado en los pozos es el nivel aparente de las aguas subterráneas, que es fuertemente afectado por la topografía. El agua subterránea de la zona no saturada normalmente conforma la tabla de agua aparente en montañas y planicies. Estas aguas subterráneas hacen un movimiento local de las aguas subterráneas fluyan hacia los ríos cercanos. Por otro lado, el nivel de las aguas subterráneas que fue calculado mediante esta simulación muestra un flujo regional de las aguas subterráneas.

Balance hídrico de aguas subterráneas de la simulación

El Balance hídrico calculado en la simulación se muestra en la Tabla-5.17. De la recarga de agua subterránea dada al modelo, que es 144 mm/año, 19% es bombeada (extraída) por los pozos y 81% fluye lejos del Área de Estudio.

Tabla-5.17 Balance de aguas subterráneas calculado con la simulación de aguas subterráneas

Balance de aguas subterráneas	Items	Resultados			
Aguas subterráneas en	Recarga de agua subterránea	1.690.000m ³ /día	144mm/año	19,6m ³ /seg	100%
Aguas subterráneas fuera	Bombeo de los pozos	321.000m ³ /día	27mm/año	3,7m ³ /seg	19%
	Aguas subterráneas que fluyen fuera del Modelo	1.368.900m ³ /día	117mm/año	15,9m ³ /seg	81%

Las aguas subterráneas que fluyen hacia afuera del Área de Estudio se detallan en la tabla -5.18.

Tabla-5.18 Aguas subterráneas que fluyen hacia afuera del Área de Estudio

Total	Flujo dentro y fuera		
	Límite	Dentro y fuera	%
1.368.900(m ³ /día)	Norte (A-A ')	94.640 (m ³ /día) flujo hacia	7%
	Este (B-B ')	621.920(m ³ /día) flujo fuera	45%
	Al sur (C-C ')	341.380(m ³ /día) flujo fuera	25%
	Oeste (D-D ')	500.240(m ³ /día) flujo fuera	37%

5.4 Evaluación del potencial de las aguas subterráneas

(1) El potencial de Agua subterránea fue analizado mediante los siguientes pasos:

- a) La recarga de aguas subterráneas fue estimada por medio del análisis del balance hídrico
- b) Lo adecuado de la recarga de aguas subterráneas estimada fue examinada mediante la simulación de aguas subterráneas.

Según el resultado de los dos análisis anteriores, la recarga de aguas subterráneas del Área de Estudio se estimó en 144mm/año en promedio. De este resultado, pueden obtenerse las conclusiones siguientes:

- 1) Del resultado del estudio existente sobre la edad de las aguas subterráneas, se ha dicho que las aguas subterráneas del Área de Estudio no están en movimiento. Sin embargo, el resultado de este Estudio mostró que dichas aguas sí están en movimiento. Por consiguiente, el recurso de las aguas subterráneas del Área de Estudio es considerado un recurso de agua renovable que recibe recarga y está incluso en el gran sistema de flujo de aguas subterráneas. La recarga de agua subterránea se estima en 150mm/año en este Estudio la misma cantidad de agua subterránea fluye hacia los acuíferos.
- 2) Si la cantidad explotada de agua subterránea excede la cantidad de recarga del agua subterránea, el nivel del agua subterránea continuará bajando porque el balance hídrico nunca está satisfecho. Por otro lado, si la cantidad de desarrollo del agua subterránea es menos que la cantidad de recarga de agua subterránea el descenso del nivel del agua subterránea se detendrá finalmente. Sin embargo, incluso en este caso, ocurrirá siempre un descenso del agua subterránea. La magnitud del descenso de las aguas subterráneas depende de la cantidad de la misma que ha de desarrollarse y el área del desarrollo. Para el desarrollo sostenible de las aguas subterráneas, deben predecirse bajas del nivel de dichas aguas subterráneas a causa de un nuevo

desarrollo de las mismas, bajo la asunción de una recarga de 144mm/año (de agua subterránea). El que este descenso de nivel de las aguas subterráneas sea aprobado o no, es un punto importante para planear un nuevo desarrollo de las aguas subterráneas.

(2) Desarrollo potencial de agua subterránea por cuenca

Rendimiento actual de los pozos y recarga del agua subterránea

La relación actual de uso del agua subterránea (rendimiento de pozo ÷ recarga de agua subterránea) se muestra en la tabla-5.19, por cuenca. El uso de agua subterránea total en el Área de Estudio es sólo 19% de la recarga del agua subterránea total. Hay una diferencia grande, sin embargo, en el uso del agua subterránea actual por cuenca, del 1% al 65%. Está claro que el rendimiento actual es mucho menor que la recarga de agua subterránea en cada cuenca. Por consiguiente, el bombeo y la recarga de agua subterránea ya han sido también equilibrados, y el descenso del nivel del agua subterránea ya se ha detenido en todas las cuencas.

Tabla-5.19 Rendimiento actual de pozos y recarga de agua subterránea por cuenca

Cuenca	Cuenca de drenaje (km ²)	Número de pozos	Rendimiento (mm/año)	Recarga de agua subterránea (mm/año)	Rendimiento ÷ Recarga de agua subterránea
Bogotá 1-3	678	1,559	42	105	40%
Bogotá 4-6	232	1,141	72	149	48%
Bogotá 7-9	557	429	18	62	29%
Bojaca	219	311	36	129	28%
Chicu	134	1,620	122	187	65%
Frio	194	320	23	100	24%
Neusa	432	185	7	187	4%
Sisga	152	1	0	143	1%
Muña	128	40	4	58	6%
Subachoque 1	32	18	3	71	5%
Subachoque 2	386	1,078	52	150	35%
Teusaca	353	256	15	166	9%
Tominé	368	21	1	109	1%
Tunjuelito	404	103	10	330	3%
Total	4.268	7.081	27	144	19%

La tasa de rendimiento del uso de agua subterránea ÷ Recarga de agua subterránea

Rendimiento seguro

Teóricamente, puede usarse 100% de la recarga de agua subterránea para desarrollos de la misma. Sin embargo, esto causaría un descenso considerable del nivel de agua subterránea y causaría impacto sobre los pozos existentes. Como se aprecia en la tabla-5.19, la tasa más alta de uso del agua subterránea en el Área de Estudio es 65%, en la cuenca del río Chicú. El desarrollo de agua subterránea causaría siempre un descenso del nivel de las aguas subterráneas y un descenso en este momento, del nivel de agua subterránea en el Área de Estudio parece ser aceptable. Por consiguiente, se recomienda que un rendimiento seguro deba estar en menos del 60% de la recarga del agua subterránea, que corresponde a la tasa más alta de uso actual del agua subterránea en el Área de Estudio. El rendimiento seguro por cuenca se propone como se indica en la エラー! リンクが正しくありません。 .

Para desarrollos del agua subterránea en pequeña escala (acuíferos Cuaternarios y Terciarios), deben planearse pozos de producción basados en el rendimiento seguro por cuenca. Por otro lado, para un desarrollo del agua subterránea de gran escala en el acuífero Cretáceo, la cantidad del nuevo desarrollo debe planearse basándose en la cantidad total del rendimiento seguro de las distintas cuencas que han de ser afectadas por este desarrollo, porque el acuífero Cretáceo se

extiende sobre varias cuencas. Es más, debe realizarse, con anterioridad, una simulación del agua subterránea, para estimar la influencia del desarrollo,.

Tabla-5.20 Rendimiento seguro por cuenca

Cuenca	Cuenca de drenaje (km ²)	Rendimiento seguro (mm/año)	Cuenca	Cuenca de drenaje (km ²)	Rendimiento seguro (mm/año)
Bogotá 1-3	678	63	Sisga	152	86
Bogotá 4-6	232	90	Muña	128	35
Bogotá 7-9	557	37	Subachoque 1	32	43
Bojaca	219	77	Subachoque 2	386	90
Chicu	134	113	Teusaca	353	100
Frío	194	60	Tominé	368	66
Neusa	432	112	Tunjuelito	404	198
Total	86 mm/año				

Nota) Rendimiento Seguro = Recarga de agua subterránea $\times$ 60%

Bombeo excesivo y subsidencia de la tierra

El riesgo ambiental causado por el bombeo excesivo hace que el recurso de las aguas subterráneas se agote y que ocurra una subsidencia de terrenos. El recurso de aguas subterráneas no se agotará si la cantidad extraída por bombeo es menor que la recarga de agua subterránea.

La subsidencia de la tierra que se observa fácilmente normalmente es causada por i) la depresión de la tierra que ocurre con los cambios en las condiciones de los ciclos de sequedad-humedad, ii) subsidencia local por trabajos de construcción. Por otro lado, la subsidencia de la tierra que es causada por el descenso de las aguas subterráneas se llama subsidencia regional, y tiene lugar gradualmente en áreas grandes, durante periodos largos de tiempo. Es difícil observar esta subsidencia por fenómenos superficiales del terreno, y solamente una nivelación de largo plazo de la elevación del terreno puede mostrar dicha subsidencia. En el Área de Estudio, tal nivelación no ha ocurrido hasta ahora y no hay ninguna evidencia de subsidencia regional. La subsidencia tiene lugar dependiendo del descenso del nivel de las aguas subterráneas y de la resistencia física del terreno. En el Área de Estudio, la formación geológica que sería afectada por un descenso del nivel del agua subterránea se encuentra a profundidades mayores de 100 metros (G.L.-100m). Esta formación presenta una fuerte resistencia a la subsidencia. Por consiguiente, la subsidencia por descenso del nivel de las aguas subterráneas es despreciable. No hay casi ninguna influencia, por subsidencia, en particular en la parte occidental de la Sabana de Bogotá, porque no hay ningún edificio alto con fundaciones profundas que serían dañada por dicha subsidencia del terreno.