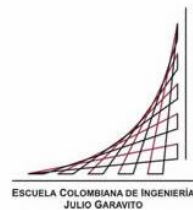


Maestría en Ingeniería Civil

Evaluación de los efectos sobre el sistema hidrogeológico producidos por la actividad minera en las minas Calenturitas y PLJ de Prodeco SAS

Camila Fernanda Nieto Clavijo

Bogotá, D.C., 19 de octubre de 2016

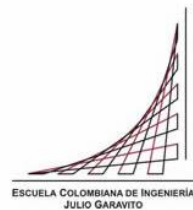


**Evaluación de los efectos sobre el sistema hidrogeológico
producidos por la actividad minera en las minas Calenturitas y
PLJ de Prodeco SAS**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

**Próspero Emiro Robles Burbano
Director**

Bogotá, D.C., 19 de octubre de 2016



La tesis de maestría titulada “Evaluación de los efectos sobre el sistema hidrogeológico producidos por la actividad minera en las minas Calenturitas y PLJ de Prodeco SAS”, presentada por Camila Fernanda Nieto Clavijo, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis
Próspero Emiro Robles Burbano
Jurado
Germán Ricardo Santos
Jurado
Héctor Alfonso Rodríguez

Bogotá, D.C., 19 de octubre de 2016

Dedicatoria

A mi amado esposo por su apoyo invaluable durante este proceso, por soportarme en los momentos en los que era muy difícil de soportar, por ser mi mayor motivador e inspirador, mi motivo para continuar cuando estuve sin fuerzas, por siempre alentarme a superarme y exigirme más de mí.

A mis padres, por cada uno de sus esfuerzos, por todas las traspasadas a lo largo de su vida por sacarnos adelante a mi hermano y a mí, por presionarme para que sacara adelante este trabajo, por ser los mejores padres que pude tener, por su amor incondicional, por sus enseñanzas, por poder contar siempre con ustedes. Los amo.

A mi hermano, quien siempre ha estado presente en cada logro, así sea peleando. Gracias por ser parte de mi vida.

Agradecimientos

Si no fuera por la mano poderosa de mi amado Padre Dios, mi vida en este momento no sería la misma. A ti, mi hermoso Señor, te agradezco por tu amor, por haber conservado mi vida, por una nueva oportunidad, porque sin tu gracia jamás hubiera conseguido nada de lo que hoy tengo y soy.

A mis tías, Geñita y Patricia, por quienes volví a los pies de mi Padre, por sus oraciones, por sus consejos, por estar en cada momento de mi vida, por amarme, por preocuparse por mí.

A mi director de tesis, profesor Emiro Robles, por su tiempo y su voluntad para guiarme durante el desarrollo de este trabajo.

A mis profesores, a quien debo todos los conocimientos adquiridos. Gracias por querer compartir toda su experiencia con todos nosotros, gracias por ser grandes profesionales, por su enorme paciencia, por dedicar su tiempo a esta ardua labor.

Resumen

Las minas PLJ y Calenturitas, se ubican en la zona carbonífera del departamento del Cesar, en jurisdicción de los municipios de La Jagua de Ibirico y El Paso. Están bajo concesión de la empresa Prodeco SAS hasta los años 2032 y 2028 respectivamente. El carbón explotable se encuentra sobre la unidad geológica del terciario Los Cuervos Miembro Medio.

En el área de estudio se encuentran acuíferos de porosidad primaria, que son los más productivos y están conformados por los sedimentos más recientes (Formación Cuesta y cuaternarios de llanura y terrazas). Se encuentran además acuíferos de baja capacidad, con flujo a través de fracturas, como son los de las Formaciones La Luna, Grupo Cogollo y Formación La Quinta, agrupadas todas ellas dentro de una sola unidad hidrogeológica. También se localizan rocas con bajo o nulo interés hidrogeológico como la Formación Barco, Los Cuervos y La Virgen, clasificadas como acuitardos y acuifugos. El sistema hidrogeológico es principalmente recargado a través de infiltración directa desde la precipitación, la cual recarga las unidades más someras (cuaternarios) y estos a su vez sirven de recarga de las unidades que los subyacen.

El trabajo realizado consistió en el análisis de la información de los estudios previos realizados para las minas PLJ y Calenturitas, principalmente los modelos numéricos predictivos. Para la mina PLJ el último trabajo de modelación numérica realizado fue en el año 2013, por Antea Group; para la mina Calenturitas, fue realizado en el año 2016 por SWS. Estos dos estudios fueron tomados como la base principal para determinar los efectos que ha tenido la minería en el sistema hidrogeológico sobre el cual se emplazan.

A partir del análisis realizado se encontró que la minería genera efectos sobre cuatro componentes del sistema hidrogeológico: niveles piezométricos, pérdida de acuíferos cuaternarios, cambio en la dinámica río-acuífero y variaciones en el régimen de recarga.

El cambio en los niveles piezométricos fue medido a partir de los abatimientos que genera la operación de las minas; se encontró que para ambas minas las depresiones importantes del nivel ocurren de manera localizada, limitada al contorno de los tajos, pero que fuera de estos son insignificantes.

En cuanto a los efectos sobre la pérdida de acuíferos se encontró que el volumen de agua contenida en los acuíferos cuaternarios que se perderá durante los 14 años aproximados que durará la actividad minera es de 1.557.526,74 m³.

Los efectos que la minería genera sobre la dinámica río-acuífero fueron contemplados en los ríos más importantes del área que corresponden al Tucuy, Sororia, Platanal, Maracas, Calenturitas y otros más pequeños que fueron modelados. Estos resultados muestran que en total el acuífero depósitos cuaternarios deja de entregar a los ríos aproximadamente 16 l/s, mientras que hace que la recarga que los ríos ejercen hacia el acuífero aumenta en aproximadamente 18 l/s.

El último efecto reconocido en el sistema hidrogeológico es el de las variaciones en el régimen de recarga, en el cual se observaron dos impactos: uno negativo, debido a la pérdida de recarga natural por la remoción de las unidades someras, y uno positivo, ocasionado por el posible aumento en la recarga, producto de la presencia de las áreas de retrollenado, que al permanecer saturadas favorecen la infiltración de aguas hacia las unidades subyacentes. Se estimó que la recarga en régimen natural que se perdería por la pérdida de las unidades someras es de 14.650 m³ al finalizar las actividades mineras; las áreas de retrollenado generan una recarga de 1.739.925 m³. En términos absolutos la recarga en el área aumentaría en 1.725.275 m³ (119 veces más que la recarga producida en régimen natural).

Tabla de contenido

Introducción	13
Objetivos.....	15
1. Objetivo general	15
2. Objetivos específicos.....	15
Capítulo I	16
Marco Conceptual	16
1. Hidrogeología	16
2. Tipos de acuíferos	17
3. Modelo hidrogeológico conceptual.....	20
4. Modelo hidrogeológico numérico	21
Capítulo II	23
Antecedentes	23
1. Área de estudio	23
2. Geología.....	24
3. Clima	34
4. Suelos	34
5. Hidrología.....	35
6. Hidrogeología	35
7. Modelo hidrogeológico conceptual.....	44
8. Modelo hidrogeológico numérico	48
Capítulo III	60
Metodología	60
1. Abatimientos.....	66
2. Pérdida de los acuíferos cuaternarios.....	68

3. Cambio en la dinámica río-acuífero	72
4. Variaciones en el régimen de recarga.....	73
Capítulo IV	75
Resultados y Contribución.....	75
1. Abatimientos.....	75
2. Pérdida de los acuíferos cuaternarios.....	77
3. Cambio en la dinámica río – acuífero.....	78
4. Variaciones en el régimen de la recarga.....	85
Conclusiones	87
Bibliografía.....	90

Índice de figuras

Figura 2. Acuífero libre.....	19
Figura 3. Acuífero confinado.....	19
Figura 4. Acuífero semiconfinado	20
Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	24
Figura 5. Esquema del Funcionamiento hidrogeológico del sistema La Jagua	46
Figura 6. Área de influencia de los modelos numéricos desarrollados para las minas Calenturitas y PLJ.....	50
Figura 7. Ubicación de las condiciones de frontera “river” (izquierda) y “constant head “derecha”	51
Figura 8. Direcciones del flujo de agua subterránea en estado inicial mina PLJ	52
Figura 9. Resultados de ingreso de agua al tajo mina PLJ como producto de la operación minera	53
Figura 10. Líneas equipotenciales y direcciones de flujo de agua subterránea al final del periodo de operación, año 2028, mina PLJ.....	54
Figura 11. Condiciones de contorno ingresadas en el modelo numérico Calenturitas.....	55
Figura 12. Direcciones del flujo de agua subterránea en estado inicial mina Calenturitas	56
Figura 13. Resultados de ingreso de agua a los sectores A, B y C mina Calenturitas como producto de la operación minera.....	58
Figura 14. Líneas equipotenciales y direcciones de flujo de agua subterránea al final del periodo de operación, año 2032, mina Calenturitas	58
Figura 15. Cortes sur - norte líneas equipotenciales y direcciones de flujo de agua subterránea al final de la operación mina Calenturitas.....	59
Figura 16. Corte oeste – este líneas equipotenciales y direcciones de flujo de agua subterránea al final de la operación mina Calenturitas.....	59
Figura 17. Superficie creada en QGis a partir de la piezometría inicial obtenida en el modelo calibrado de la mina PLJ.....	67
Figura 18. Superficie topográfica creada a partir del DEM de la NASA.....	68
Figura 19. Superficie base del cuaternario creada a partir de la superficie topográfica menos 15 m de espesor	69

Figura 20. Superficie piezométrica creada a partir de la piezometría desarrollada en el modelo conceptual.....	70
Figura 21. Espesor del acuífero cuaternario que se encuentra saturado.....	70
Figura 22. Zonas de cuaternario removidas por actividad minera	71
Figura 23. Zonas a calcular el volumen de recarga.....	74
Figura 24. Abatimientos producidos por la operación minera de PLJ.....	75
Figura 25. Abatimientos producidos por la operación minera de PLJ.....	76
Figura 26. Ríos incluidos en los modelos numérico Calenturitas y PLJ.....	78

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de los ensayos hidráulicos realizados en el área de estudio	38
Tabla 2. Valores de parámetros hidráulicos definidos para las capas del modelo mina PLJ	51
Tabla 3. Resultados de ingreso de agua al tajo mina PLJ como producto de la operación minera	53
Tabla 4. Propiedades hidráulicas calibradas para el modelo numérico Calenturitas	56
Tabla 5. Resultados de ingreso de agua a los sectores A, B y C mina Calenturitas como producto de la operación minera.....	57
Tabla 6. Importancia de los impactos sobre el sistema hidrogeológico	63
Tabla 7. Valores de recarga calibrados para cada unidad incluida en el modelo numérico para la mina Calenturitas	73
Tabla 8. Impacto de la operación minera en la mina PLJ sobre el río Tucuy.....	79
Tabla 9. Impacto de la operación minera en la mina Calenturitas sobre el río Tucuy.....	80
Tabla 10. Impacto de la operación minera en la mina PLJ sobre el río Sororia	81
Tabla 11. Impacto de la operación minera en la mina Calenturitas sobre el río Platanal..	81
Tabla 12. Impacto de la operación minera en la mina Calenturitas sobre el río Maracas .	83
Tabla 13. Impacto de la operación minera en la mina Calenturitas sobre el río Calenturitas	84
Tabla 14. Impacto de la operación minera en la mina Calenturitas sobre otros ríos.....	85
Tabla 15. Cálculo del volumen de recarga perdido por la remoción del área por actividad minera	86
Tabla 16. Cálculo del volumen de recarga ganado por la presencia de las áreas de retrollenado.....	86

Introducción

La mayor parte del carbón que el país exporta en la actualidad se explota en los departamentos de la Guajira y el Cesar. El área para la extracción minera de carbón del departamento del Cesar se ubica en el centro del departamento, a unos 100 km de la ciudad de Valledupar. Las reservas de esta cuenca son de alrededor de 3.123 millones de toneladas, que equivalen al 32% de las reservas del país (Simco, 2016). Según la información publicada por la iniciativa de Tierra Minada (2014), actualmente en la zona hay 221.658 Ha tituladas y la extracción de carbón se ha intensificado por la existencia de yacimientos, el aumento de empresas dedicadas a la extracción, la cercanía relativa a los puertos de exportación (Coronado, et al., 2014: 15; tomado de Cinep, 2014), la baja capacidad institucional para realizar seguimiento al sector extractivo y regular las actividades mineras, así como las políticas de atracción a la inversión y generosos beneficios tributarios (Pardo, 2013: 143; tomado de Cinep, 2014).

Todas las explotaciones de carbón que se llevan a cabo en la cuenca carbonífera del Cesar son a cielo abierto. Es conocido en materia general el impacto que este tipo de minería genera sobre los regímenes hidrológicos de la zona donde se desarrollan y en especial sobre las aguas subterráneas, generando un descenso en los niveles freáticos. En el caso de la cuenca carbonífera del Cesar, la minería se desarrolla sobre zonas que se han identificado con reservas potenciales de aguas subterráneas; según el Ingeominas (1995) las principales reservas calculadas se distribuyen de la siguiente manera:

- Sistema acuífero Llanura Aluvial (Qlla) con 75 millones de m^3/Km^2
- Sistema acuífero de sedimentitas de Arjona (Tpa) con 73 millones de m^3/Km^2

Estos acuíferos son aprovechados actualmente por la población por medio de aljibes y pozos someros, pero tienen potencial de ser explotados a mayor profundidad.

El presente trabajo se centra en el análisis de caso de dos minas encontradas entre los municipios de La Jagua de Ibirico y El Paso, en el departamento del Cesar, las cuales se encuentran bajo concesión de la empresa Prodeco SAS; estas minas son PLJ y

Calenturitas. A través de la revisión documental y análisis de la información presentada en estudios realizados para estas minas, especialmente en los modelos numéricos predictivos más actualizados, se pretende conocer los efectos que la actividad minera ha generado y/o generará sobre el sistema hidrogeológico en el cual se emplazan, centrando la atención en los efectos sobre los acuíferos cuaternarios debido a su potencial para ser utilizados por parte de la población.

El documento inicia ofreciendo los conceptos básicos para comprender la temática a abordar en el desarrollo del trabajo, los cuales se presentan en el Capítulo I. Inmediatamente después, en el Capítulo II, se presenta la caracterización geofísica del área de estudio, donde se abordan los componentes de geología, clima, suelos e hidrología, los cuales permiten conocer las principales particularidades del área que facultan para conceptualizar el sistema hidrogeológico del área; se presenta entonces el análisis conceptual hidrogeológico del área y se muestran los resultados de las modelaciones numéricas desarrollados para las minas PLJ y Calenturitas, los cuales son importantes para alcanzar los objetivos del trabajo. En el Capítulo III se aborda la metodología utilizada para la cuantificación de los efectos sobre el sistema hidrogeológico y en el Capítulo IV se presentan los resultados de la investigación.

Objetivos

1. Objetivo general

Determinar los posibles efectos sobre el sistema hidrogeológico que genera la operación de las minas PLJ y Calenturitas, administradas por Prodeco SAS, a través de la revisión documental y el análisis de la información encontrada en estudios previos realizados.

2. Objetivos específicos

- Hacer la recopilación y gestión de la información de los estudios previos disponibles de las minas PLJ y Calenturitas.
- Analizar la información hidrogeológica encontrada para el área de estudio.
- Establecer los componentes del sistema hidrogeológico que pueden ser impactados por el desarrollo de las minas PLJ y Calenturitas.
- Estimar los efectos que la actividad de las minas PLJ y Calenturitas generan sobre el sistema hidrogeológico sobre el cual se emplazan.

Capítulo I

Marco Conceptual

1. Hidrogeología

Según Custodio et al. (2013), la hidrogeología se define como la ciencia que estudia las aguas subterráneas en la naturaleza y sus relaciones con las aguas superficiales y con otras partes del ciclo hidrológico. La hidrogeología comprende los aspectos hidrológicos de flujo y del transporte de solutos, pero además de esto busca estudiar la relación de las aguas subterráneas con las aguas superficiales y marinas, la composición química e isotópica del agua, la relación roca-agua y la existencia de aguas connatas o paleoaguas. La hidrogeología también estudia los aspectos económicos, la gestión del agua, los aspectos sociales y éticos de su explotación, su conservación y su papel ecológico.

Se considera como agua subterránea aquella que satura los poros y fisuras del terreno, por lo cual se excluyen de ellas las aguas que se encuentran por encima de la zona vadosa ya que al estar sometidas a presiones menores que la atmosférica (succión) no fluyen a las captaciones; esta agua está disponible para su aprovechamiento por parte de las plantas. Sin embargo, esta zona no saturada constituye la principal vía de entrada para las aguas subterráneas (recarga) y por lo tanto es importante su cualificación y cuantificación.

La hidrogeología, como ciencia y técnica, tuvo una rápida evolución durante el siglo XX, y en especial en su último tercio. Utiliza conocimientos de otras numerosas ramas del saber con las que está relacionada y de esta manera aporta también nuevos conocimientos. Una de las disciplinas base para el conocimiento hidrogeológico es la geología ya que es en las formaciones geológicas en las que se almacena y tiene movimiento el agua subterránea. Acorde a Vélez (1999), estas son otras disciplinas asociadas al conocimiento de la hidrogeología:

- La hidroquímica, que permite el conocimiento de las características químicas del agua a explotar. Este aspecto es esencial desde el punto de vista técnico para la utilización.
- La mecánica de fluidos, para poder estudiar las leyes que rigen el movimiento de un fluido en un medio poroso.
- La hidrología de superficie, ya que los recursos superficiales están íntimamente relacionados con las aguas subterráneas.
- La climatología, para evaluar la precipitación y la evapotranspiración, factores esenciales desde el punto de vista cuantitativo, en particular en lo relativo a la recarga de los acuíferos.
- La estadística, en particular con el desarrollo de nuevos métodos basados en variables aleatorias que permiten estimar los recursos en aguas subterráneas de una región dada.

2. Tipos de acuíferos

Para poder hacer una clasificación de los acuíferos, o mejor, de las unidades hidrogeológicas, es preciso inicialmente definir dos propiedades de las unidades geológicas importantes desde el punto de vista hidrogeológico; estas propiedades son la porosidad y la conductividad hidráulica (o permeabilidad). De manera breve, la porosidad está ligada a la capacidad de almacenamiento de agua en las rocas y la conductividad es la "habilidad" de las mismas a dejar circular dicha agua bajo la acción de la gravedad. Teniendo en cuenta estas dos propiedades, habrá formaciones que tendrán una porosidad relativamente alta y a su vez permiten un fácil movimiento del agua, como por ejemplo los aluviones, las arenas, etc.; otras presentarán una alta porosidad, pudiendo por consiguiente almacenar considerables cantidades de agua, pero sin permitir el fácil desplazamiento de la misma, como ocurre con la mayoría de las arcillas y limos; finalmente, habrá otras formaciones que

no pueden ni almacenar ni transmitir el agua como lo son ciertas rocas metamórficas no fracturadas (Vélez, 1999).

Conforme a lo anterior Vélez presenta de manera clara la forma de clasificar las unidades hidrogeológicas de la siguiente manera:

Acuíferos: son formaciones geológicas que almacenan el agua y que a su vez permiten el movimiento de la misma, bajo la acción de las fuerzas de la gravedad, de tal forma que puede ser explotada en cantidades relativamente apreciables.

Acuicludos: son formaciones que almacenan el agua, a veces en proporciones altas, pero que no la transmiten en cantidades apreciables.

Acuitardos: son formaciones que almacenan el agua pero que sólo permiten el flujo de la misma en forma muy lenta, en comparación con los acuíferos. Estas formaciones pueden tener una gran importancia cuando se estudia el movimiento del agua a nivel regional, ya que sobre áreas relativamente grandes pueden transmitir grandes cantidades de agua a pesar de la baja velocidad de flujo. Así, pueden permitir el paso de agua de un acuífero a otro cuando éstos se encuentran separados por un acuitardo. Este fenómeno reviste particular importancia cuando se estudian casos de contaminación de las aguas subterráneas.

Acuifugos: son formaciones impermeables que no almacenan ni transmiten el agua.

Por otro lado, los acuíferos pueden clasificarse de acuerdo con las condiciones de presión hidrostática a las que está sometida el agua almacenada por ellos, condiciones que varían según la posición estratigráfica de la formación. De esta manera, puede hablarse de los siguientes tipos (Vélez, 1999):

Acuíferos libres o no confinados: Son aquellos que presentan una superficie libre de agua que está en contacto directo con la atmósfera, sometida por consiguiente a la presión atmosférica. Dicha superficie se denomina superficie freática o tabla de agua. La Figura 1 representa el estado de estos acuíferos.

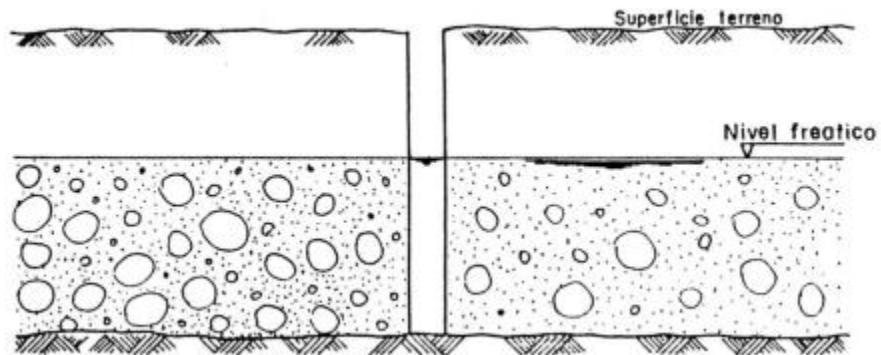


Figura 1. Acuífero libre
Fuente: Vélez, 1999

Acuíferos cautivos, confinados o artesianos: En estos acuíferos el agua se encuentra sometida a una presión mayor que la atmosférica y son formaciones permeables, limitadas por capas impermeables. En este caso la formación se encuentra completamente saturada. Aquí no existe una superficie libre del agua, pero si puede hablarse de una superficie piezométrica la cual es una superficie imaginaria que coincide con el nivel hidrostático del agua en el acuífero. La Figura 2 muestra el esquema de un acuífero confinado.

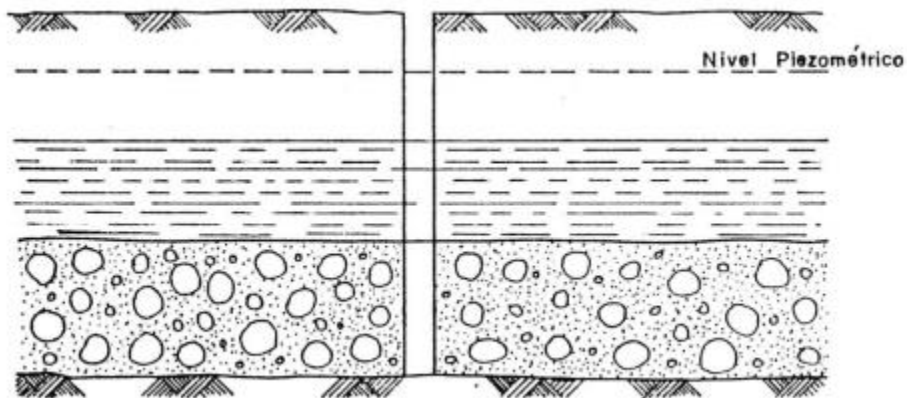


Figura 2. Acuífero confinado
Fuente: Vélez, 1999

Acuífero semi-confinado: Son acuíferos que se encuentran completamente saturados de agua y están limitados ya sea por su base o por el techo, o por ambos, por una capa o formación semipermeable (acuitardo). Esta situación permite que haya un flujo entre acuíferos que se encuentren separados por el acuitardo, flujo que puede efectuarse en

dirección de la diferencia de niveles piezométricos existente entre los mismos. La Figura 3 esquematiza el significado de un acuífero semiconfinado.

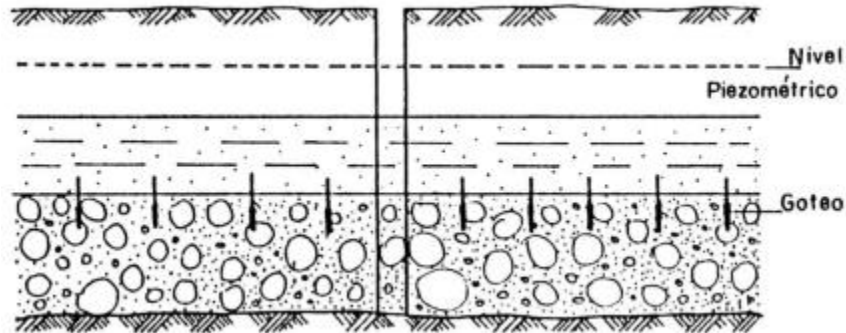


Figura 3. Acuífero semiconfinado
Fuente: Vélez, 1999

3. Modelo hidrogeológico conceptual

Conforme al IDEAM, los modelos hidrogeológicos conceptuales son representaciones en dos o tres dimensiones de las condiciones estáticas y dinámicas de los sistemas hidrogeológicos. Esta representación incluye la geometría de los acuíferos, delimitación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con sus posibilidades de almacenar y transmitir agua, características hidráulicas de los acuíferos, posición de los niveles piezométricos, condiciones del flujo de las aguas subterráneas y su relación con los componentes del ciclo hidrológico, características hidroquímicas y eventualmente isotópicas y delimitación de zonas de recarga, tránsito y descarga. En términos generales, sintetiza las condiciones básicas del estado y dinámica de las aguas subterráneas en el subsuelo y sus relaciones con los cuerpos de agua superficial y los aportes atmosféricos. Se realiza con base en el análisis e interpretación de información geológica, hidrológica, hidráulica, hidroquímica e isotópica y permite tener una visión del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos de un área dada a la escala deseada.

Algunos componentes que se deberían tener en cuenta para la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual son los siguientes:

Modelo Geológico Básico

Descripción geológica

Unidades geológicas

Unidades hidrogeológicas

Corte hidrogeológico

Mapa Geológico

Mapa hidrogeológico

Modelo hidrológico

Precipitación

ETP

Infiltración

Recarga (zonas, valor)

Condiciones de flujo

Inventario puntos de agua

Características hidráulicas

Conductividad, almacenamiento, transmisividad, tipos de acuíferos, caudales de explotación, características de las captaciones

Uso del agua subterránea

Uso por sectores (estadísticas), fuentes abastecedoras de acueductos

Características físico químicas del agua

Tipo de agua

Afectaciones por actividad antrópicas

Actividades económicas, fuentes de contaminación

4. Modelo hidrogeológico numérico

La modelación ha asumido un papel muy importante en el ámbito de las aguas subterráneas debido a que es muy frecuente la escasez de información y la complejidad de los sistemas a analizar, por lo tanto, a través de los modelos es posible llegar a la resolución de una amplia variedad de problemas.

Para poder desarrollar un buen modelo es trascendental definir sus objetivos y alcances para definir la metodología y enfoque a utilizar en este, ya que de estos elementos depende la complejidad del modelo a construir.

Existen diversos tipos de modelos (Gobierno de Chile, 2012): físicos, análogos, conceptuales o matemáticos (analíticos o numéricos). Los modelos físicos intentan

reproducir un sistema real en uno a escala (por ejemplo, una columna de suelo); los modelos análogos se utilizan para emular sistemas hidrogeológicos; los modelos conceptuales intentan reconocer las características más importantes de un sistema, sin llegar a cuantificarlo y, por último, los modelos analíticos y numéricos responden a una formulación matemática de los fenómenos de interés que permite cuantificarlos.

Debido a la complejidad de los sistemas y a que se ha invertido en el desarrollo de tecnologías, los modelos numéricos actualmente son los más utilizados para la representación de los sistemas hidrogeológicos.

A diferencia de los modelos analíticos, los modelos numéricos permiten la solución de cualquier sistema sin la necesidad de hacer supuestos ni simplificaciones mayores; sin embargo, estos modelos están condicionados por la capacidad de cálculo y por la solución, la cual no es exacta sino es una aproximación, cuya exactitud está ligada a la discretización tanto espacial como temporal utilizada para el modelo.

Por otro lado, la aplicabilidad de un modelo numérico está sujeta al cumplimiento de los supuestos adoptados en sus formulaciones. Por ejemplo, la ley de Darcy se cumple para medios porosos, si el sistema de ecuaciones está formulado bajo ley de Darcy, funcionará correctamente para este tipo de medios, pero dejan de ser válidas para medios fracturados; no obstante, en la práctica se utilizan modelos para medios fracturados basados en la ley de Darcy manejando los parámetros hidráulicos (Gobierno de Chile, 2012).

En términos generales, existen tres tipos de metodologías para la resolución numérica de ecuaciones diferenciales parciales: método de las diferencias finitas, método de los elementos finitos y método de los volúmenes finitos. En la práctica, los dos primeros son los que han sido mayormente aplicados a problemas de aguas subterráneas (op. cit).

Capítulo II

Antecedentes

1. Área de estudio

El departamento del Cesar se ubica al nororiente del país, en la región caribe de Colombia, entre los 07°41'16" y 10°52'14" de latitud norte y 72°53'27" y 74°08'28" de longitud oeste. Limita al norte con los departamentos de la Guajira y Magdalena; al este la República de Venezuela y el Departamento de Norte de Santander; al oeste con los departamentos del Magdalena y Bolívar y al sur con el Departamento de Santander (Castro, 2009).

La Cuenca Carbonífera del Cesar está ubicada en el Valle Bajo del Río Cesar, aproximadamente a 100 km al Sur de Valledupar, situada entre los municipios de Valledupar, Agustín Codazzi, Becerril, La Jagua de Ibirico, Chiriguaná y El Paso, ocupando la parte media del Departamento del Cesar, en las estribaciones Occidentales de la Serranía de Perijá, con una extensión de aproximadamente 4000 Km² (SGI, 2008).

El área de objeto de estudio está limitada a las minas Calenturitas y Prodeco La Jagua (PLJ), administradas por Prodeco SAS. La mina Calenturitas está ubicada 12 Km hacia el Nororiente del Corregimiento de La Loma, en el Municipio de El Paso; esta mina tiene una extensión de 6677 Ha (SGI, 2008). PLJ está ubicada en el municipio de La Jagua de Ibirico y se compone de cinco títulos mineros que estaban en poder de tres compañías: Carbones de La Jagua S.A., Consorcio Minero Unido S.A. y Carbones El Tesoro S.A.; después de comprar la totalidad de estas operaciones, Glencore procedió a integrarlas en una sola, con la aprobación de las autoridades competentes; el área integrada ocupa una superficie de 1869,52 Ha. (SGI, 2008).

La Figura 4 muestra la ubicación del área de estudio.

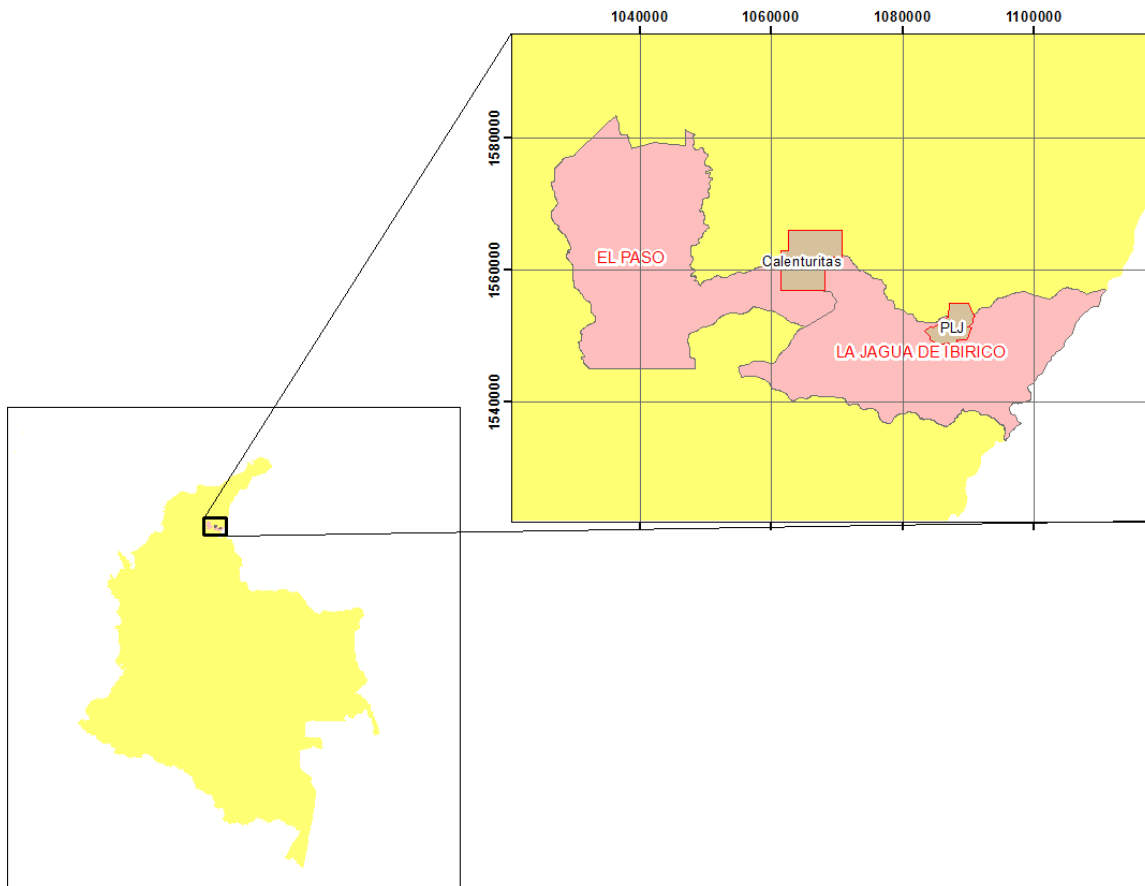


Figura 4. Ubicación del área de estudio
Fuente: El Autor

2. Geología

En la Serranía de Perijá, sobre el basamento ígneo - metamórfico, se encuentran rocas del Triásico - Jurásico representadas por la Formación La Quinta, compuesta por sedimentitas rojas de areniscas, limolitas, volcánicos y piroclásticos. Afloran las formaciones cretácicas de Río Negro (Barremiano), Lagunitas (Barremiano – Aptiano), Aguas Blancas (Aptiano - Albiano), La Luna (Huroniano - Coniaciano) y Molino (Campaniano - Maestrichtiano), que corresponden a lutitas negras con concreciones calcáreas y calizas grises (Cáceres et al., 1980). El Paleógeno y el Neógeno están representados por las formaciones Los Cuervos, Barco, Mirador y Cuesta, las cuales contienen lodolitas, areniscas y mantos de carbón, en

el caso de Los Cuervos, y conglomerados de areniscas en la Formación Cuesta; también aparecen depósitos cuaternarios no consolidados de carácter reciente.

Con respecto a la parte estructural, el área es cruzada por estructuras de tipo regional que se encuentran al Sureste y Este de La Jagua de Ibirico, como son las fallas de Arenas Blancas y de Perijá, las cuales son de carácter inversas, de alto ángulo y ponen en contacto unidades del Terciario (Paleógeno y Neógeno) con unidades del Mesozoico (Cretáceo y del Jurásico), respectivamente; jugando un papel decisivo en el estilo tectónico del área. Este tipo de falla define un estilo estructural de carácter compresivo, el cual actúa durante la orogenia andina (op. cit).

La principal característica de las estructuras de la zona carbonífera es que consisten de una serie de sinclinales y anticlinales con dirección NE-SW, las cuales forman un gran sinclinorio elongado con dirección N35°E, separadas por fallas inversas y anticlinales deformados, comprimidos y alargados, con igual tendencia regional, como producto de una fuerte compresión con sentido SE-NW.

A continuación, se presenta la descripción de las unidades geológicas encontradas en el área de estudio; esta descripción fue tomada de la memoria explicativa de la Geología de la Plancha 48 La Jagua de Ibirico (Hernández, 2003).

2.1. Estratigrafía.

2.1.1. Paleozóico

2.1.1.1. Unidad Metasedimentaria de La Virgen (PZmv)

Se agrupa con este nombre informal a una sucesión de rocas metasedimentarias y sedimentarias que afloran en la Serranía de Perijá. Está compuesta por rocas sedimentarias que han sido afectadas por metamorfismo regional de bajo a muy bajo grado, dispuestas en capas delgadas y medianas; metareniscas, metalimolitas, metalodolitas, metaconglomerados y en menor proporción filitas, esquistos y cuarcitas (?).

2.1.2. Triásico – Jurásico.

El Triásico y el Jurásico están representados por La Formación La Quinta y aflora en el área de la Serranía del Perijá.

2.1.2.1. Formación La Quinta (Jq)

La Formación La Quinta se compone de rocas clásticas, asociadas con rocas volcanoclásticas, como tobas, brechas y pórfidos; areniscas arcósicas, lutitas, limolitas abigarradas, de color rojo principalmente, con fractura concoidea, estratificación plano paralela, desde láminas delgadas hasta capas muy gruesas; conglomerados color rojo, cuya composición de clastos varía de volcánicos a graníticos, metamórficos. Está constituida por sublitoarenitas de grano fino a medio, friables, sublitoarenitas conglomeráticas de grano fino medio con intraclastos de limolitas rojas, intercaladas con limolitas gris verdosas y areniscas de grano fino grises, muestran estratificación ondulosa y plana paralela. El color de las rocas es rojo con variación dentro de un mismo nivel a gris claro y gris amarillento, geometría tabular y en artesa con estratificación plana a cruzada (Hernández, 2003). En algunos sectores las características litológicas varían y se observa un material más fino de color rojo asociado a areniscas tobáceas, tobas arenosas y areniscas de tono verdoso, que forman capas y estructuras lenticulares dentro de los estratos rojos. Así mismo se evidencian diques de unos 6,5 m de espesor de composición dacítica - andesítica ligeramente porfiríticos y con vacuolas de cuarzo; en algunos sectores se observan manifestaciones de malaquita. En ciertos afloramientos la unidad es atravesada por diques de ignimbritas oscuras con fragmentos volcánicos de 2 a 20 cm y hacia la parte media de la sección se presentan cenizas félsicas, flujos andesíticos basálticos, brechas y tobas.

2.1.3. Cretácico

2.1.3.1. Grupo Cogollo (K1c)

Este Grupo aparece en la zona de estudio aflorando con sus dos miembros (Formación Lagunitas y Formación Aguas Blancas).

- Formación Aguas Blancas

En la Cuenca del Cesar se dividen tres conjuntos (de base a tope): conjunto lodolítico calcáreo, conjunto arenoso y conjunto calcáreo superior. Conforme a lo establecido por Durham (1946) y Lill & Nugent (1950) éstos se han denominado como miembros Ánimas, Tucuy y Maracas, respectivamente. En el área de estudio aflora el Miembro Tucuy el cual se caracteriza por presentar hacia la base limolitas arenosas color gris oscuro, ligeramente calcáreas, algo fósiles, las cuales gradan localmente a areniscas de grano fino, subangular a subredondeado, moderadamente sorteadas, color pardo, compuestas de cuarzo, con matriz arcillosa, cemento silíceo o calcáreo. En menor proporción se encuentran arcillolitas limoarenosas, levemente calcáreas, algo fósiles, color gris pardo, carbonosas y moscovíticas.

- Formación Lagunitas

La unidad fue definida por Neelands (1922), la cual refiere su localidad tipo en la quebrada Jaguey cerca de la población de Lagunitas, en el valle del río Ranchería. El espesor medido en el pozo Papayal-1 y Cerrejón1 fue de 290 y 285 m, respectivamente. Está compuesta por calizas fosilíferas, de capas gruesas. Los fósiles que se encuentran son conchillas de pelecípodos, gasterópodos, corales y amonites (Hernández, 2003).

2.1.3.2. *Formación La Luna (K2I)*

En términos generales, la Formación La Luna está constituida por una alternancia de limolitas, arcillolitas, lutitas negras carbonosas y calcáreas, calizas bituminosas carbonosas, capas de chert negro azulado, concreciones, nódulos elipsoidales y discoidales con estratificación plano paralela con diferentes diámetros (20 cm – 1 m de diámetro). Las lodolitas están predominantemente hacia la base de la formación, al igual que las capas de chert, mientras que las calizas son más comunes en la parte superior. Es frecuente encontrar foraminíferos, amonites muy bien preservados, algunos bivalvos y restos de peces. Estratos de caliza arenosa en capas medianas; esparíticas, color gris claro, intercaladas con capas de areniscas de grano fino calcáreas delgadas con estratificación plano paralela ondulosa. En los análisis petrográficos realizados por García (1990) se

encontró que la mayoría de las calizas existentes en la formación son wackestones y mudstones con abundancia de foraminíferos planctónicos como heteroelix y globotruncana y en menor cantidad bivalvos y amonites (Hernández y Clavijo, 2002).

En la parte del piedemonte de la Serranía del Perijá aparece como una serie de calizas con recristalizaciones calcáreas, en paquetes con rumbo SW – NE y buzamientos hacia el NW predominantemente entre 15 y 37 grados. En el sector de la vereda Santa Fe, se observan paquetes potentes de shales grises, rumbo SW – NE y buzamientos de 60 grados NW; contrastando con los afloramientos del sector de Casablanca, donde se presentan lodolitas grises y negras calcáreas, con presencia de concreciones con restos de amonites recristalizados y laminación plana paralela, buzamientos disímiles y variables, principalmente por la presencia del Anticlinal de Becerril y de fallas inversas.

2.1.4. Terciario

2.1.4.1. Formación Barco (E1b)

Según Hernández (2003), en la cuenca del Cesar esta formación está compuesta principalmente por areniscas amarillentas, de grano fino, subangulares deleznales, ligeramente arcillosas y micáceas; con estratificación cruzada y laminación plana paralela continua y presenta delgadas intercalaciones de arcillolitas. Las capas varían en espesor de 0,30 a 20 m. Un tipo de arenisca frecuente en esta formación, especialmente en la parte media e inferior, es la llamada arenisca brillante; son areniscas relativamente limpias, de grano fino a medio, en las cuales el crecimiento secundario de granos de arena ha formado un gran número de caras cristalinas que brillan al sol, de aquí su nombre. Las lutitas y arcillolitas son generalmente grises, en parte limosas, micácea y carbonácea, localmente ricas en diminutos glóbulos de siderita. Es común la presencia de arcilla ferruginosa, parda, que forman delgadas masas lenticulares y pequeños nódulos. En la parte superior de la formación se halla generalmente carbón en uno o más lechos. Las lutitas y arcillas forman, por lo general, una tercera parte o la mitad del espesor total de la formación.

2.1.4.2. Formación Los Cuervos (E2c)

Esta Formación es una de la que mayores y mejores afloramientos exhibe en la zona de estudio, teniendo en cuenta que es la unidad donde se ubican los mantos de Carbón que actualmente se explotan en el área. Se adjudica el reporte por primera vez a Notestein et al. (1944); Peña (1983) designa a esta secuencia como Formación Los Cuervos Inferior, Medio y Superior.

- Formación Los Cuervos – Miembro Inferior

Esta unidad se caracteriza por la presencia de lodolitas, areniscas bioclásticas, shales carbonosos y cintas de carbón. Composicionalmente se identifica por la presencia de carbón, glauconita en los niveles arenosos, subarcosas a arcosas de grano fino a medio de color gris verdoso y los niveles arcillosos moteados grises rojizos, litoarenitas bioclásticas con fauna de pelecípodos y ostreidos. Estratigráficamente la base se caracteriza por ser arenosa, y los niveles de limolita y arcillolita aumentan hacia la parte media y techo del miembro, donde se intercalan con delgadas capas de areniscas y carbón que permite definir un límite aproximado con el miembro medio. De igual forma, es característico de esta unidad la alternancia de intercalaciones de capas de areniscas, lodolitas, shales carbonosos, calcarenitas bioclásticas, litoarenitas calcáreas bioclásticas y fosilíferas con espesores de 20 - 40 cm y cintas de carbón.

- Formación Los Cuervos – Miembro Medio

Aunque presenta aún un alto contenido de litología fina (arcillolitas y limolitas), tiene como característica distintiva la presencia de espesos paquetes arenosos, con niveles ferruginosos muy característicos (de 70 cm de espesor) a través de las capas y mantos de carbón que oscilan entre 0,3 y 5,2 metros de espesor, los cuales son económicamente rentables para la explotación y en los cuales se basa actualmente las actividades mineras.

Si bien el Miembro Medio constituye la parte más potente de esta secuencia sedimentaria, en el área se encuentra erodada en gran parte y se restringe a la parte media del Sinclinal de La Jagua. Presenta una expresión geomorfológica muy característica, y constituye altos

topográficos predominantes y las pendientes moderadas a fuertes de la unidad. Los niveles arenosos corresponden a areniscas cuarzosas con altos contenidos de hierro y es muy común la presencia de niveles ferruginosos y la formación de gruesas costras de hierro por intemperismo. No genera capa de suelo y tiene vegetación escasa.

En términos generales se puede describir este Miembro como conformado por capas de sublitoarenitas, subarcosas y cuarzoarenitas en gruesos paquetes que se intercalan con niveles arcillosos y limosos y presencia de delgados niveles limoníticos en nódulos y hardground. Las areniscas varían de grano fino a medio, en colores gris claro a gris verdoso con tonalidades rojizas por alteración; compuestas por cuarzo, minerales oscuros, magnetita, minerales de hierro, micas y, en algunos, feldespato y materia orgánica. Se presentan bien cementadas y lodosas, con laminación plana a ondulosa paralela continua y discontinua junto con estratificación cruzada y lenticular.

- Formación Los Cuervos – Miembro Superior

El Miembro Superior se caracteriza por las arenas, limolitas y lodolitas con laminación plana paralela, claro oscuras con contenidos diferentes de materia orgánica que implican condiciones de baja energía con fluctuaciones pequeñas que marcan períodos fijos repetitivos, el aporte de sedimentos es continental por la abundancia de mica y materia orgánica. Dentro de este ambiente aparece una zona de pantano cerrado con abundante vegetación (moldes de hojas) y bioperturbación con la preservación de mantos de carbón lateralmente continuos, con bajo contenido de sulfuros que indican un menor aporte marino.

2.1.4.3. Formación Cuesta (N1c)

En términos generales la Formación Cuesta está constituida por una serie de interdigitaciones de conglomerados ferruginosos con areniscas deleznales que en ocasiones evidencian estratificación cruzada ondulosa y plana, de color morado intenso que sigue la estructura sedimentaria; con un alto contenido de clastos de cuarzo. Su meteorización da origen a un suelo de color rojo, granular y con desarrollo de pequeñas ondulaciones que contiene los cantos bien redondeados denominados “huevos de paloma”. Esta Formación está constituida por sedimentos semiconsolidados, mal calibrados con

algunas intercalaciones de conglomerados, limolitas y arcillolitas, ocasionalmente presenta costras de óxidos de hierro. Los sedimentos están dispuestos en capas horizontales, con inclinaciones muy suaves, que dan lugar a una topografía plana a ligeramente ondulada, o forman cerros de muy baja altura que sobresalen del Cuaternario aluvial.

Acorde a Hernández (2003), la secuencia completa de esta Formación presenta de techo a base unas capas poco consolidadas de areniscas conglomeráticas de tono rojizo de cantos subangulares y subredondeados de hasta 3 cm de diámetro. Hacia la base se encuentran areniscas de grano muy grueso, tabular de color pardo claro intercalada por pequeños niveles conglomeráticos. Continuando el descenso estratigráfico, aparece nuevamente una capa de arenisca conglomerática de tono rojizo con cantos subredondeados que alternan con capas de arenisca de grano grueso de color pardo rojizo. Suprayaciendo estas capas aparecen unas areniscas conglomeráticas de color pardo claro que van gradando con cantos subredondeados de buena redondez y baja esfericidad de composición ígnea.

2.1.5. Cuaternarios

Los sedimentos cuaternarios son generados por las dos principales arterias fluviales (ríos Cesar y Ariguaní) y sus afluentes, que por su composición y características se consideran de edad cuaternaria.

2.1.5.1. Terrazas (Qt)

Las terrazas están compuestas por cantos y bloques de hasta 1,50 m de diámetro, guijos y gravas de areniscas silíceas, muy bien cementadas, duras, de grano medio hasta conglomerático, y son blancas rojizas; algunos de los bloques son de calizas silíceas duras, embebidos en una matriz arenolodosa; con base en la morfología del área y la interpretación geológica se estima que su espesor puede ser superior a los 100 m. Este depósito es el remanente erosivo actual de un extenso cono de deyección que cubrió gran parte de la región en el piedemonte de la Serranía de Perijá; se encuentran vestigios de él en la parte alta de cerro de Piedra.

2.1.5.2. *Depósitos de llanura aluvial (Qlla)*

Los depósitos de llanura aluvial, corresponden a los depósitos acumulados por las corrientes en la zona plana y semiplana. Su expresión morfológica es una superficie hata (plana), donde los sedimentos de espesores variables se caracterizan por una granulometría fina, compuesta por arenas, limos arcillas que generalmente están cubiertas por un delgado nivel de gravas finas de algunos centímetros de espesor.

El espesor de este tipo de depósitos tiene variaciones notables (Arias & Morales, 1994). De acuerdo con algunas perforaciones de pozos de petróleo, con datos geoelectrónicos y observaciones de campo, se puede establecer que en el área de El Boquerón – La Loma, la llanura aluvial es de poco espesor; según Prodeco (1991, en Arias & Morales, 1994) varía entre 5 y 25 m de profundidad.

En el Mapa 1 se presenta la geología de superficie del área de estudio.

2.2. **Geología estructural**

2.2.1. ***Sinclinal La Loma y Anticlinal de Tucuy***

Presentan una dirección NE-SW, afectan la secuencia de areniscas de grano grueso y conglomerados de la Formación Cuesta y las rocas de la Formación Los Cuervos; los flancos presentan inclinaciones entre 13° y 18°, sin embargo, los buzamientos en las explotaciones alcanzan hasta los 35° en el cierre del sinclinal. La unidad litológica continúa al oriente y forma el Anticlinal de Tucuy cuya dirección es la misma que la del sinclinal.

2.2.2. ***Sinclinal Los Venados, Anticlinal de La Estancia, Anticlinal de Becerril***

Es una sucesión de pliegues ubicados inmediatamente al este del sinclinal de La Loma y el anticlinal de Tucuy. Son estructuras identificadas en subsuelo, por medio de estudios geofísicos. Presentan una dirección NE-SW. Afectan rocas neógenas, paleógenas y cretácicas. La evidencia en superficie es un cambio de dirección en las disposiciones de las

rocas de la Formación La Luna que afloran en la región de La Estancia. El Anticlinal de Becerril se prolonga hacia el norte cerca al municipio de Becerril.

2.2.3. Sinclinal de La Jagua

Se encuentra al NE del Municipio de La Jagua de Ibirico, aproximadamente a 5 km. Presenta forma ovoide, alargada hacia el norte, es ligeramente asimétrico, con un eje mayor de aproximadamente 10,4 km y más de 4 km de ancho. Hacia el sur, la estructura es amplia y se cierra al norte con un cabeceo al W. La dirección del eje es N55 o E (+10°). El sinclinal afecta rocas de la Formación Los Cuervos. Es un sinclinal abierto con un buzamiento en sus dos flancos entre 10° y 35°.

2.2.4. Anticlinal de La Jagua

Es una estructura asimétrica ubicada al este de La Jagua de Ibirico que afecta principalmente rocas del Miembro Medio de la Formación Los Cuervos. El eje presenta una Dirección de N25 o E (+10°) con una inmersión de 3° hacia el N. En el flanco oriental, las capas buzan entre 35-45° y en el flanco occidental 15-35°.

2.2.5. Falla Arenas Blancas

La Falla Arenas Blancas se localiza en la Serranía de Perijá, tiene un trazo bien definido desde el oriente de La Jagua de Ibirico, y se prolonga hacia el norte hasta la frontera con Venezuela. La tendencia recta de la traza de la Falla Arenas Blancas sugiere un buzamiento subvertical, pero podría ser de tipo inverso que pone en contacto rocas paleozoicas sobre secuencias jurásicas o cretácicas. En el sector de Arenas Blancas hay evidencias de efectos recientes de esta falla sobre depósitos cuaternarios: el depósito de abanico, al oeste del caserío de Poponte presenta capas no consolidadas inclinadas unos 15° al W. Al sureste de Cerro Largo y cubierta en su mayoría por depósitos cuaternarios del valle del río Sororia, se encuentra la Falla Arenas Blancas con trazo ligeramente curvilíneo y una dirección aproximada N50°E. Esta falla alinea el río Sororia, hasta llegar a loma Pinzón, y controla su curso con un giro de 90°.

3. Clima

El área de estudio se encuentra bajo la influencia de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), la cual interviene principalmente en el régimen pluviométrico. En general la zona se caracteriza por presentar valores altos y continuos de lluvia; la temperatura media es cercana a los 30°C. Estas dos condiciones son consecuencia directa de la presencia de la Serranía del Perijá, que origina un microclima con descarga de lluvias y humedad permanente durante largos periodos de tiempo (lluvias de tipo orográfico).

Desde el punto de vista de la precipitación se puede resumir que el área presenta un régimen bimodal, con dos períodos definidos de lluvias. La precipitación media anual es cercana a los 2000 mm, lo cual indica que la región se encuentra dentro de una zona de pluviosidad media alta.

La evapotranspiración potencial es del orden de 1950 mm/año, lo que supone que en periodos secos existe un importante déficit hídrico en el suelo y que la infiltración únicamente tiene lugar durante los periodos húmedos. De esta forma, la recarga durante los periodos de lluvia puede llegar a ser de aproximadamente 450 mm/año (SGI, 2008).

4. Suelos

Los suelos de la zona de estudio se consideran como de mediana productividad, con aptitud agropecuaria, limitados por un nivel freático fluctuante, carbonatos, inundaciones y suelos pedregosos; se clasifican dentro de las clases III, IV y V. Debido a un uso intensivo de los suelos se ha originado un aumento en los procesos erosivos; se presenta entonces erosión laminar, principalmente en las épocas de lluvias, erosión en surcos, erosión en cárcavas hacia el río Calenturitas y erosión eólica. Todo este régimen erosivo se presenta en las llanuras aluviales de desborde y de piedemonte y es gradualmente más intenso a medida que se intensifica la actividad agrícola (Corpocesar, 2006)

5. Hidrología

El río Cesar es el principal colector de aguas superficiales en el área de estudio. Nace en el departamento de La Guajira y recorre aproximadamente 380 kilómetros hasta su desembocadura en el río Magdalena. La pendiente media del cauce principal en el departamento del Cesar es de 0,35%, y la extensión total de la cuenca incluidas las zonas de la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía de Perijá es de 12.500 Km² (18.000 Km² si se considerara la cuenca que drena hacia la Ciénaga de Zapatosa) (Corpocesar, 2006).

El río Cesar es navegable sólo en pequeñas embarcaciones en época invernal, desde Valledupar hasta la Ciénaga de Zapatosa, aunque en algunos sectores la navegación se imposibilita por la sedimentación del lecho. Las principales cuencas hidrográficas que conforman la ecorregión del Valle del Río Cesar son: Badillo, Guatapurí, Pereira, Seco, Cesarito, Garupal, Chiriamo, Magiriamo, Tocaimo, Suarez, Fernambuco, Casacará, Calenturitas, Ariguaní y Arjona (op. cit).

El régimen de caudales de agua superficial está gobernado por las precipitaciones que suceden en las ecorregiones de la Sierra Nevada de Santa Marta y de la Serranía de Perijá. El río Cesar entrega al Magdalena un caudal medio de 202 m³/s (INGEOMINAS, Estudio Geotécnico e Hidráulico del río Cesar y sus áreas Cenagosas, 1995), con un rendimiento para la cuenca en su conjunto de 10 litros/seg/Km² (op. cit).

Individualmente, los ríos que mayor rendimiento tienen son el Badillo, Guatapurí, Chiriamo, Magiriamo, Sicarare, Calenturitas y Ariguaní, contribuyendo con el 60% del caudal medio anual del río Cesar (y cubren entre el 40% y el 50% del área) (op. cit).

6. Hidrogeología

En el área de estudio los acuíferos de mayor importancia por su extensión corresponden a los depósitos cuaternarios de origen aluvial y las rocas calcáreas de edad cretácica con alta

porosidad secundaria, en aquellos sitios donde las mismas conforman estructuras adecuadas para el almacenamiento del agua subterránea.

Los depósitos aluviales han sido estudiados a nivel regional debido a que son ampliamente encontrados en el área y además presentan una oferta hídrica suficiente para abastecer las necesidades actuales de la población, quienes explotan el recurso por medio de aljibes y pozos. Estos depósitos producen caudales bajos (menores de 5 L/s) y en cuanto a su calidad se conoce que presenta mayores concentraciones de iones bicarbonato, sodio y cloruros (SGI, 2008).

En el área de las minas, los depósitos cuaternarios han sido removidos debido a la actividad minera y solamente se conservan unos relictos. En la mina PLJ solamente se conserva una porción de cuaternario en el sector de Cerro de Piedra, que se encuentra aislada de los depósitos aluviales regionales; no obstante, según información de la mina, este pequeño reducto de los cuaternarios sigue funcionando como un acuífero de carácter local con una permeabilidad y capacidad de almacenamiento suficientes para regular la recarga procedente de la infiltración del agua de lluvia, de forma que la descarga de esta unidad se mantiene durante todo el año. Dicha descarga se efectúa a través de manantiales y surgencias difusas en el contacto de la unidad cuaternaria con la Formación Cuervos Superior (op. cit).

Dentro de la formación Cuervos, los niveles de carbón presentan propiedades acuíferas debido, por un lado, a los valores de permeabilidad y por otro, a la capacidad almacenamiento que les confiere el alto grado de fracturación y/o diaclasado que presentan (porosidad secundaria). No obstante, la capacidad de estos mantos está directamente proporcionada al espesor de los mismos, de forma que las propiedades acuíferas de los niveles disminuyen a medida que disminuye el espesor de los mantos (op. cit).

Por otro lado, los niveles de areniscas presentan alguna posibilidad para el almacenamiento de agua, pero es en baja proporción y está asociada a los tramos en la que estos niveles presentan mayor grado de fracturamiento. Desde el punto de vista hidrodinámico estos niveles se pueden clasificar como acuitardos.

Finalmente, los niveles de arcillolitas de la formación Cuervos, presentan permeabilidades bajas a muy bajas y una capacidad de almacenar agua muy reducida debido al alto porcentaje de materiales finos que presentan. Las arcillolitas se comportan como acuitardos, con una capacidad de transmitir y almacenar agua muy pobre. Desde el punto de vista hidrodinámico, los niveles de arcillolitas se comportan como niveles impermeables que confieren al sistema un alto grado de confinamiento.

6.1. Parámetros hidráulicos

Para la determinación de parámetros hidráulicos han sido desarrolladas diferentes pruebas: bombeo, slug test, lugeon y lefranc test, ubicados dentro del área de estudio y en diferentes unidades hidrogeológicas.

En total se tiene información de 183 ensayos, de los cuales 58 fueron realizados en los depósitos aluviales, 30 en la Formación Cuesta, 23 fueron realizados en las intercalaciones de arcillolitas de la Formación Cuervos, 19 en las intercalaciones de areniscas de la Formación Cuervos, 47 en los mantos de carbón y 6 en el suelo. La información de los ensayos realizados se presenta en el Anexo 1.

De acuerdo con la información de los ensayos, los depósitos aluviales presentan transmisividades entre 1.04×10^{-5} y $373 \text{ m}^2/\text{d}$ y conductividades entre 7.39×10^{-3} y 206 m/d , mostrando que se trata de un acuífero con capacidades entre muy bajas y medias altas y con coeficientes de almacenamiento entre 7.32×10^{-4} y 1.35×10^{-1} , indicando que se trata de un acuífero entre libre a semiconfinado. La capacidad específica de esta unidad se encuentra entre 0.03 y 0.23 l/s/m, es decir que su productividad está entre muy baja y baja.

La Formación Cuesta maneja un rango de transmividades entre 1.13×10^{-3} y $85.6 \text{ m}^2/\text{d}$, conductividades entre 4.99×10^{-5} y 46.4 m/d , lo cual es indicador de un acuífero que tiene capacidades entre muy bajas y medias. No se tiene información de almacenamiento de esta unidad. La capacidad específica se encuentra entre 0.16 y 7.30 l/s/m, indicando que su productividad se encuentra entre baja y muy alta.

Los mantos de carbón tienen una distribución de transmisividades entre 6.24×10^{-6} y $79.7 \text{ m}^2/\text{d}$ y permeabilidades entre 1.61×10^{-5} y 10.9 m/d , indicando que estos acuíferos presentan capacidades entre muy bajas y bajas; el coeficiente de almacenamiento para este acuífero es del orden entre 10^{-2} y 10^{-4} , por lo cual se presume que se trata de un acuífero semiconfinado. Su capacidad específica está entre 0.02 y 0.54 l/s/m , lo cual indica que tiene productividades entre muy bajas y bajas.

Por otro lado, los ensayos realizados en las intercalaciones entre los mantos de carbón, específicamente para las areniscas presentan transmisividades entre 6.92×10^{-5} y $5.29 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{d}$ y conductividades entre 5.62×10^{-5} y 3.8 m/d , indicando una capacidad entre baja y media para esta unidad. En cuanto a las intercalaciones con predominio de arcillolitas, las transmisividades se encuentran entre 3.69×10^{-2} y $8.37 \text{ m}^2/\text{d}$ y las conductividades entre 1.04×10^{-5} y 0.225 m/d , es decir que esta unidad tiene capacidades entre muy bajas y bajas. No se presentan datos de coeficiente de almacenamiento para estas dos unidades. Conforme a la información de transmisividad, la capacidad específica de estas unidades se encuentra entre 0.05 y 1 l/s/m .

Finalmente, también fueron realizados ensayos sobre el suelo a través de pruebas de infiltración principalmente. Los resultados de estas pruebas indican una transmisividad de $551 \text{ m}^2/\text{d}$, pero no es un valor representativo ya que solo fue realizada una prueba. Los valores de conductividad hidráulica se encuentran dentro de 0.21 y 42 m/d .

La Tabla 1 presenta el resumen de la información presentada en el Anexo 1.

Tabla 1. Resumen de los ensayos hidráulicos realizados en el área de estudio

Unidad	Conductividad			Transmisividad			Coeficiente de almacenamiento			Capacidad específica		
	m/d			m ² /d						l/s/m		
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
Aluvial	7.39E-03	2.06E+02	1.04E+01	1.04E-05	3.73E+02	4.13E+01	7.32E-04	1.35E-01	4.42E-02	0.03	0.23	0.11
Fm. Cuesta	4.99E-05	4.64E+01	3.88E+00	1.13E-03	8.56E+01	1.20E+01	-	-	-	0.16	7.30	2.70
Intercalaciones Areniscas	5.62E-05	3.80E+00	2.93E-01	6.92E-04	5.29E-01	2.05E-01	-	-	-	-	-	-
Intercalaciones Arcillolitas	1.04E-05	2.25E-01	3.63E-02	3.69E-02	8.37E+00	2.82E+00	-	-	-	-	-	0.05

Unidad	Conductividad			Transmisividad			Coeficiente de almacenamiento			Capacidad específica		
	m/d			m ² /d						l/s/m		
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
Mantos	1.61E-05	1.09E+01	6.91E-01	6.24E-06	7.97E+01	1.35E+01	1.50E-04	4.00E-02	7.66E-03	0.02	0.54	0.33
Suelo	2.05E-01	4.24E+02	7.10E+01	-	-	5.51E+02	-	-	-	-	-	-

Fuente: El Autor

6.2. Inventario de puntos de agua

No se tiene un inventario completo actualizado de todos los puntos de agua existentes en el área de estudio; sin embargo, para la elaboración del mapa de piezometría en los diferentes estudios realizados se han monitoreado los niveles de algunos puntos que se han incluido en el presente documento con la información más actualizada, correspondiente a los años 2014 y 2015.

En cuanto a los aljibes y pozos, dentro del inventario se registraron 46 aljibes y un pozo. Sus niveles oscilan entre los 0 y los 39 m de profundidad. Estos niveles fueron tomados en el periodo lluvioso principalmente.

Se encontraron en el área 25 piezómetros abiertos con niveles actualizados. Sus niveles se encuentran entre 0 y 64 m de profundidad.

Por otro lado, las minas han instalado piezómetros de hilo vibrátil con el propósito de monitorear los niveles de las aguas subterráneas y la presión de poro en los taludes de los tajos. Dentro del presente análisis se incluyeron las mediciones de 104 sensores, cuyos niveles tienen una gran variación debido a que están influenciados por la operación minera.

En el Mapa 2 se presenta la ubicación de estos puntos.

6.3. Unidades hidrogeológicas

6.3.1. Rocas y sedimentos con flujo esencialmente intergranular

6.3.1.1. Unidad Hidrogeológica I: Acuífero Formación Cuesta

Se trata de un acuífero de extensión regional y de comportamiento semiconfinado, compuesto por las intercalaciones de cuarzoareniscas y conglomerados de la Formación Cuesta. Este acuífero presenta una mediana productividad y se caracteriza por ser continuo y multicapa. Es utilizado por la población de la Loma para abastecimiento doméstico principalmente. De acuerdo con los ensayos realizados sobre esta unidad, maneja un rango de transmividades entre $1,13 \times 10^{-3}$ y $85,6 \text{ m}^2/\text{d}$ y conductividades entre $4,99 \times 10^{-5}$ y $46,4 \text{ m/d}$.

En esta unidad se encontraron 5 pozos, los cuales son bombeados para abastecimientos principalmente domésticos a caudales entre 9 y 11 l/s. Su nivel estático se encuentra entre los 2 y 4 m de profundidad.

6.3.1.2. Unidad Hidrogeológica II: Acuíferos Depósitos Cuaternarios

En esta unidad hidrogeológica fueron agrupadas todas las unidades geológicas de edad cuaternaria: Terrazas, Depósitos de Llanura Aluvial y Aluviales Recientes. Es un acuífero de capacidad entre muy baja y baja, compuesto, de forma general, por intercalaciones de gravas, arenas y arcillas en proceso de consolidación, con espesores no mayores a 20m, que pueden estar influenciados por la dinámica fluvial.

Es un acuífero discontinuo, multicapa, de carácter local, que se comporta como libre a semiconfinado. Es captado por medio de pozos y aljibes. Los aljibes presentan una profundidad máxima de 8 m. El nivel estático de este acuífero varía entre 1 y 18 m. El agua extraída es utilizada en su mayoría, para labores domésticas, pecuarias y para abastecimiento público.

Conforme con la información de los ensayos hidráulicos, presenta transmisividades entre $1,04 \times 10^{-5}$ y $373 \text{ m}^2/\text{d}$, conductividades entre $7,39 \times 10^{-3}$ y 206 m/d y coeficientes de almacenamiento entre $7,32 \times 10^{-4}$ y $1,35 \times 10^{-1}$.

6.3.2. Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas

6.3.2.1. Unidad Hidrogeológica III: Acuífero Formación La Luna, Grupo Cogollo y Acuífero Formación La Quinta

Son acuíferos conformados por rocas sedimentarias de ambiente marino a transicional, depositadas durante el jurásico y cretácico, compuestas por lutitas carbonosas, limolitas, arcillolitas, calizas y litoarenitas, de las formaciones La Luna, Grupo Cogollo y La Quinta. Su espesor en promedio se ha calculado en 315, 300, y 2.000 m respectivamente. En el área de estudio no se han perforado pozos que permitan conocer con exactitud sus características y un estimativo de sus parámetros hidráulicos, pero de acuerdo a sus características litológicas y estratigráficas se presume que son acuíferos confinados, de extensión local a regional, discontinuos, con capacidad específica entre 0,05 a 1,0 l/s/m, es decir, que su productividad varía entre muy baja y baja.

6.3.3. Rocas con limitados recursos de aguas subterráneas

6.3.3.1. Unidad Hidrogeológica IV: Acuitardo Formación Barco

Es una unidad de extensión regional y continua, compuesta por arcillolitas y areniscas de grano fino a muy fino de la Formación Barco, cuyo espesor se estima en 250 m. Debido a su granulometría, se presume que almacena y transmite el agua subterránea de manera ineficiente. Se estima que su capacidad es menor a 0.5 l/s, por lo tanto, tiene una productividad muy baja.

6.3.3.2. *Unidad Hidrogeológica V: Acuitardo Formación Cuervos y Acuífugo Formación la Virgen*

Esta unidad está conformada por rocas que por sus características de porosidad y permeabilidad generan acuitardos y acuífugos. Está compuesta por areniscas intercaladas con arcillolitas grises a negras carbonosas y mantos de carbón, de la Formación Cuervos; no obstante, los mantos, pueden generar acuíferos delgados, confinados, con agua de mala calidad. También esta unidad está conformada por rocas sedimentarias que sufren bajo grado de metamorfismo, metarenitas, metalodolitas y metalimolitas de la Formación La Virgen.

Debido a que en el área de estudio se han perforado piezómetros para el monitoreo de presiones de poros en la Formación Cuervos, donde se han realizado ensayos hidráulicos, es posible tener indicios de sus características: Los mantos de carbón tienen una distribución de transmisividades entre 6.24×10^{-6} y $79.7 \text{ m}^2/\text{d}$, conductividades entre 1.61×10^{-5} y 10.9 m/d y coeficientes de almacenamiento del orden de 10^{-2} y 10^{-4} ; las intercalaciones con predominio de areniscas presentan transmisividades entre 6.92×10^{-5} y $5.29 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{d}$ y conductividades entre 5.62×10^{-5} y 3.8 m/d ; las intercalaciones con predominio de arcillolitas, presentan transmisividades entre 3.69×10^{-2} y $8.37 \text{ m}^2/\text{d}$ y conductividades entre 1.04×10^{-5} y 0.225 m/d .

De acuerdo con análisis realizados sobre el agua encontrada en la Formación Cuervos se encontró que el agua de este acuitardo presenta conductividad eléctrica que va de 190 a 830 $\mu\text{S/cm}$, con afinidad cálcico sulfatada en sus capas no carbonosas, mientras que el agua almacenada en los mantos de carbón presenta conductividad eléctrica entre 1000 y 3000 $\mu\text{S/cm}$, con alta mineralización y valores altos de alcalinidad, SDT, calcio, sulfatos y hierro.

El Mapa 2 muestra la distribución de estas unidades en el área de estudio.

6.4. Piezometría

La piezometría desarrollada en este documento fue construida con base en los niveles de los puntos de agua reportados en el numeral 6.2, los cuales corresponden a los años 2014 y 2015.

Las mayores alturas del nivel freático se encuentran al sur este del área de estudio, cerca de la Serranía del Perijá, donde se alcanzan niveles de 200 m.s.n.m. Estos niveles empiezan a descender paulatinamente hacia el oeste del área, hasta llegar a los 40 m.s.n.m, cerca de la mina Calenturitas. Se observa cómo las minas tienen una influencia muy importante de manera local ya que en el área de los tajos los niveles han disminuido, llegando a alturas actuales de -60 m.s.n.m. para el área de PLJ y -30 m.s.n.m. para Calenturitas. Así mismo, las áreas de retrolenado generan un aumento de los niveles freáticos, estando condicionados a las alturas de estas zonas y a la precipitación del área ya que su saturación está directamente relacionada con la lluvia.

En cuanto a los gradientes hidráulicos observados en el área, las zonas que no están influenciadas por las minas presentan gradientes bajos, con un nivel freático casi horizontal, cercano al comportamiento de la topografía. De manera local, la operación minera genera un aumento en los gradientes hidráulicos naturales, siendo mucho más pronunciados en el área de PLJ ya que esta mina lleva más tiempo en actividades. El aumento de estos gradientes hidráulicos es evidente debido a que ocasiona un incremento en la presión de poros de los taludes, lo que se traduce en una mayor probabilidad de que se produzcan deslizamientos, por lo cual se han tenido que hacer inversiones en pozos y drenes que permitan disminuir la presión en las paredes, disminuyendo los gradientes hidráulicos cercanos a los tajos.

En el Mapa 2 se presenta la piezometría interpretada para el área de estudio.

7. Modelo hidrogeológico conceptual

En el área de estudio se identifican 5 unidades hidrogeológicas, clasificadas principalmente por su capacidad específica, de acuerdo a la información disponible para cada una de ellas. La clasificación incluye acuíferos de media a muy baja productividad hasta acuifugos, por lo que la dinámica del sistema hidrogeológico es variable.

Las unidades hidrogeológicas I y II presentan flujo intergranular, es decir porosidad primaria, y son las unidades con mejores propiedades hidráulicas encontradas en el área de estudio.

La primera unidad hidrogeológica identificada es la conformada por la Formación Cuesta, la cual es la unidad más productiva en el área. Esta unidad es recargada de forma directa a través de la precipitación y recarga a las unidades que la subyacen. En esta unidad se han perforado pozos para el abastecimiento de la población ubicada en el corregimiento de La Loma. Las pruebas hidráulicas realizadas en ella presumen un acuífero de baja a media productividad para el área de estudio. Debido a su mayor permeabilidad, los gradientes hidráulicos encontrados en ella son pequeños y las isopiezas se encuentran más separadas entre sí. Debido a que su extensión es regional, tiene una mayor importancia que los acuíferos aluviales.

Seguidamente se encuentran los acuíferos cuaternarios, los cuales se agrupan en la unidad hidrogeológica II ya que no es posible hacer una diferencia entre ellos. La productividad de esta unidad se encuentra entre muy baja y baja, de extensión local, recargada de forma directa por medio de la precipitación y/o a través de los ríos que fluyen sobre los depósitos; así mismo constituyen la recarga principal de las unidades que los subyacen. Sobre estas unidades se encuentran principalmente aljibes, utilizados para uso doméstico.

La segunda clasificación corresponde a las unidades con porosidad secundaria, cuya productividad depende de la cantidad de fracturas encontradas y su interconexión. Se identificó solamente una unidad hidrogeológica, conformada por las formaciones Luna, La Quinta y el Grupo Cogollo. Son formaciones cuya productividad como acuíferos es muy

baja, a pesar de que presentan una extensión regional y un amplio espesor. Sus propiedades hidráulicas no se conocen en el área de estudio ya que no se han perforado pozos o piezómetros sobre esta, así que los rangos descritos son una presunción. Su recarga se produce principalmente a través de las unidades que la suprayacen, pero en las zonas en las que aflora y existen fracturas que lo permitan, la recarga se realiza de manera directa.

El siguiente grupo de unidades hidrogeológicas tiene poco o nulo interés hidrogeológico y se trata de las unidades Barco, Los Cuervos y La Virgen. Todas estas formaciones tienen una muy baja productividad ya que poseen muy pocas fracturas interconectadas. Los mantos de carbón de la formación Los Cuervos presentan una capacidad un poco mayor debido a las fracturas presentes en estos; sin embargo el agua que fluye a través de las fracturas no se considera de buena calidad para el consumo. Hacia el sector de las minas se encuentran aflorando estas unidades, es por eso que el mapa de isopiezas muestra una contracción de las isolíneas en esta zona, indicador del aumento del gradiente hidráulico por los materiales poco permeables que están aflorando. En general esta unidad es recargada fuera del área de estudio, pero en la zona de la mina se recarga de manera directa por lo que se encuentran emergiendo, debido a la operación minera.

Debido a que las minas están ocasionando un funcionamiento hidrogeológico independiente de manera muy local, dominado por la presencia de los mantos de carbón y de la geología estructural, es importante detallar en este comportamiento, por lo cual, a continuación, se describe el funcionamiento del sistema hidrogeológico que genera cada mina.

7.1. Funcionamiento hidrogeológico mina La Jagua – PLJ

El movimiento del agua en los mantos de carbón explotables de La Jagua (miembro medio) está controlado estructuralmente. El agua se mueve siguiendo el buzamiento de los mantos de carbón con dirección hacia el eje del sinclinal. El movimiento del agua desde los flancos hacia el eje del sinclinal se ve afectado por las fallas y la densidad de diaclasado.

La Formación Los Cuervos le da forma el sinclinal de La Jagua con dirección SW – NE y presenta una morfología asimétrica, mostrando mayores inclinaciones hacia el flanco Oeste de aproximadamente 25 a 30° e inclinaciones más suaves en el flanco este, de aproximadamente 10 -15°. Tanto al norte como al sur se origina un cabeceo del sinclinal, lo que hace que se cierre el mismo. Esta forma del sinclinal y el límite del anticlinal La Jagua al este y del anticlinal el Ojinegro al oeste, permiten que el sinclinal se comporte como una cuenca hidrogeológica cerrada por la Formación Los Cuervos Inferior, por debajo del manto 45. En la Figura 5, se muestra esquemáticamente el funcionamiento hidrogeológico del sinclinal.

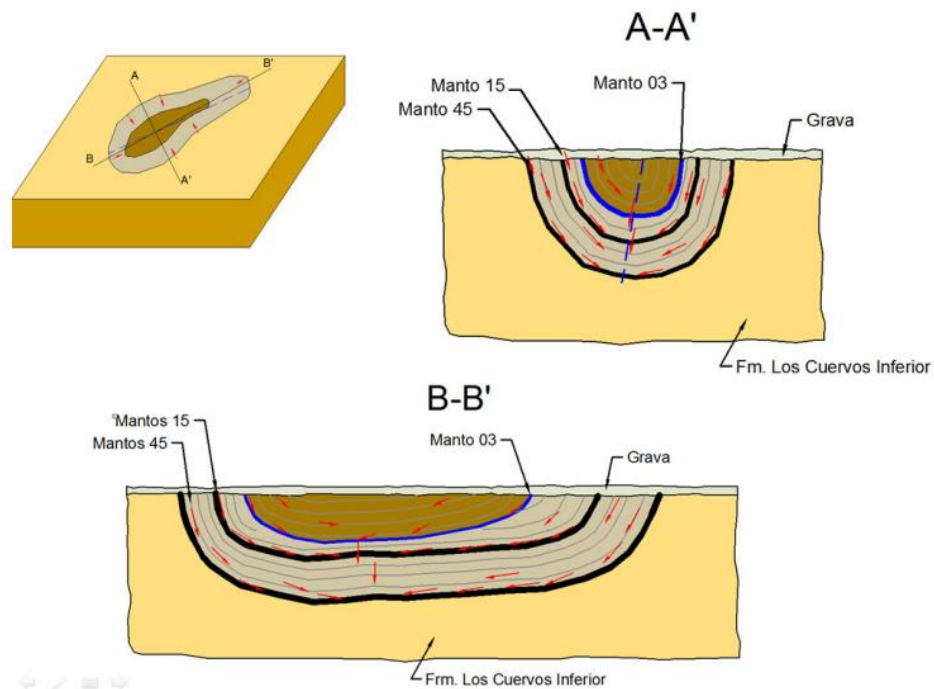


Figura 5. Esquema del Funcionamiento hidrogeológico del sistema La Jagua
Fuente: SWS, 2013

La disposición de la estratificación en Los Cuervos Medio, la tectónica de fallas / pliegues, y la granulometría de las distintas capas, favorecen que el flujo subterráneo se transporte a través de conductos preferenciales. La disposición de los materiales y estructuras en la cuenca del Sinclinal La Jagua flanqueada a ambos lados por los anticlinales, favorece la

concentración y acumulación de agua, actuando estos anticlinales como fronteras que limitan la extensión lateral del sistema subterráneo local.

La recarga del sistema hidrogeológico del sinclinal de La Jagua se realiza a través del aluvial a los mantos de carbón. El aluvial se recarga en la estación húmeda mediante la infiltración directa de lluvia y a través del río Tucuy. El aluvial funciona como una fuente de recarga constante a los mantos de carbón. En las zonas donde el aluvial ha sido retirado por la actividad minera, la recarga a los mantos de carbón se realiza por infiltración de la precipitación directamente en los mantos.

7.2. Funcionamiento hidrogeológico de la mina Calenturitas

El medio hidrogeológico de la mina Calenturitas se encuentra caracterizado con las unidades hidrogeológicas de las unidades de cuaternario, Cuervos y Barco. Su comportamiento es de acuíferos y acuitardos; se encuentran en un medio saturado, pudiéndose inferir los potenciales hidráulicos de las aguas subterráneas.

El movimiento principal del agua subterránea está condicionado principalmente por la salida hacia los tajos y la topografía; la salida hacia los tajos afecta localmente las direcciones de flujo. En menor medida y de manera estacional, también se ve influenciado por los cauces más importantes del área de estudio.

La dirección del flujo del agua subterránea presenta una tendencia general desde el Este hacia el Oeste – Sur Oeste. De manera local, el flujo se ve influenciado por el minado y su efecto de desaguado y en menor medida por pozos de explotación encontrados en la mina, lo que condiciona y redirecciona la dirección del flujo localmente.

Las capas de arena y grava, presentes en la parte inferior del aluvial, tienen la capacidad de transmitir agua en grandes cantidades, es por ello que conforma la principal fuente de recarga a las unidades inferiores, como a la formación Los Cuervos y Barco, por poseer mayor capacidad de almacenamiento. La recarga desde el aluvial a los mantos de carbón será mayor en aquellas zonas de contacto donde los mantos presentan menor alteración,

permitiendo que el agua pase desde el aluvial hacia los mantos de carbón por las juntas del fracturamiento o diaclasado.

El aluvial se recarga en la estación húmeda mediante la infiltración directa de la lluvia y a su vez recarga las unidades inferiores. En las zonas donde el aluvial ha sido retirado por la actividad minera, o donde no exista, la recarga a las otras unidades hidrogeológicas del sistema se realiza a través de la infiltración directa del agua de lluvia. Además de la recarga vertical, el sistema subterráneo presenta transferencia lateral, es el caso de la Formación Barco, en el extremo noreste de la zona de estudio, la cual transmite el agua subterránea lateralmente hacia las formaciones de menor carga hidráulica.

8. Modelo hidrogeológico numérico

El modelo hidrogeológico numérico tiene como fin, determinar el comportamiento del sistema acuífero definido en el modelo hidrogeológico conceptual, bajo condiciones de intervención antrópica, en este caso, con el desarrollo actual del avance de explotación minera de cada una de las minas estudiadas. Los modelos fueron desarrollados por Prodeco, con propósitos meramente operacionales, razón por la cual son locales, es decir que en cada uno se incluye el área de la mina y parte de sus alrededores, pero no se incluye completamente el área que se ha venido describiendo en los apartados anteriores.

Los modelos numéricos de flujo para las minas PLJ y Calenturitas fueron construidos usando el programa modular tridimensional de diferencias finitas para la solución de problemas de flujo de aguas subterráneas desarrollado por el USGS, MODFLOW. El código Modflow ofrece una solución numérica robusta, tanto en términos de piezometría, como en el cierre de balance de aguas y es ampliamente usado a nivel mundial. Este método resuelve la ecuación de flujo por el método de diferencias finitas y se adapta con facilidad a los medios con desnivel topográfico reducido, como en el caso del área de estudio. En la Figura 6 se presenta el área modelada en cada trabajo desarrollado.

Como se observa en la Figura 6, la extensión del modelo numérico de la mina Calenturitas es amplia y alcanza a abarcar la mina PLJ pero en su análisis no se incluyó la influencia de

esta mina sino únicamente se tuvieron en cuenta los efectos generados localmente por Calenturitas. El modelo de PLJ es de carácter local e incluye la mina y un área adicional alrededor de esta.

8.1. Modelo numérico mina La Jagua – PLJ

Inicialmente fue desarrollado un modelo en estado estacionario en el cual simulamos las condiciones del sistema para el año 2013; este modelo se tomó como el estado inicial para las simulaciones transitorias que fueron ejecutadas hasta el año 2028, de acuerdo al plan de minado entregado por Prodeco. El objetivo de esta modelación era el de conocer los caudales de ingreso al tajo desde las unidades hidrogeológicas interceptadas, especialmente la Formación los Cuervos.

Para la determinación de los parámetros hidráulicos se tomó como base fuentes de información secundaria como son el estudio de manejo de aguas realizado por INGEOMINAS (1996), un estudio de CONSULSCON (2010) y un informe de SGI (2008) siendo estos datos los valores de partida, los cuales se ajustaron durante el proceso de calibración del modelo en estado permanente.

Como condiciones de frontera fueron ingresados los ríos más importantes del área, incluidos bajo los paquetes “river” y “constant head”. En la Figura 7 se presenta la ubicación de estas condiciones de frontera dentro del modelo numérico.

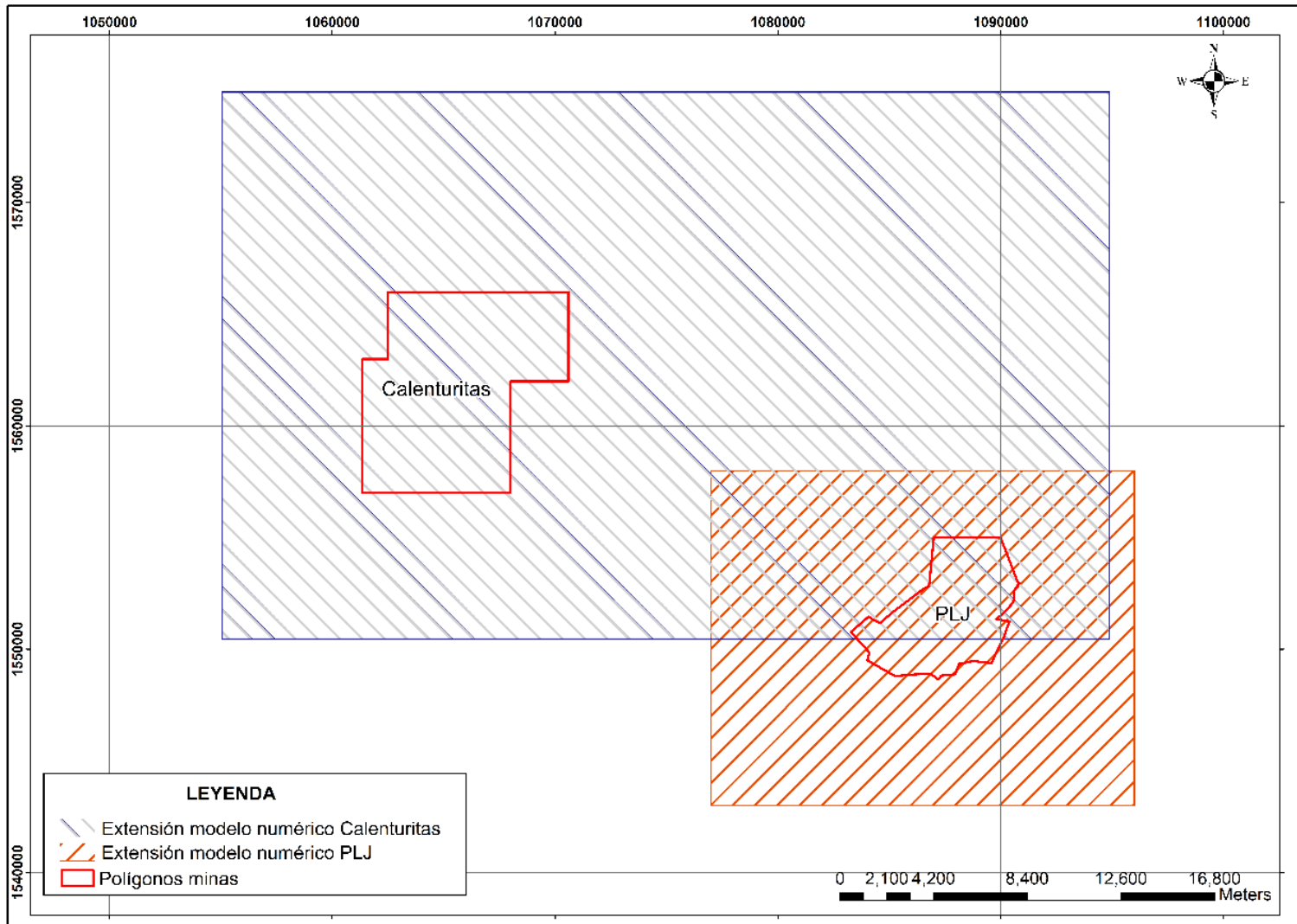


Figura 6. Área de influencia de los modelos numéricos desarrollados para las minas Calenturitas y PLJ
Fuente: El Autor

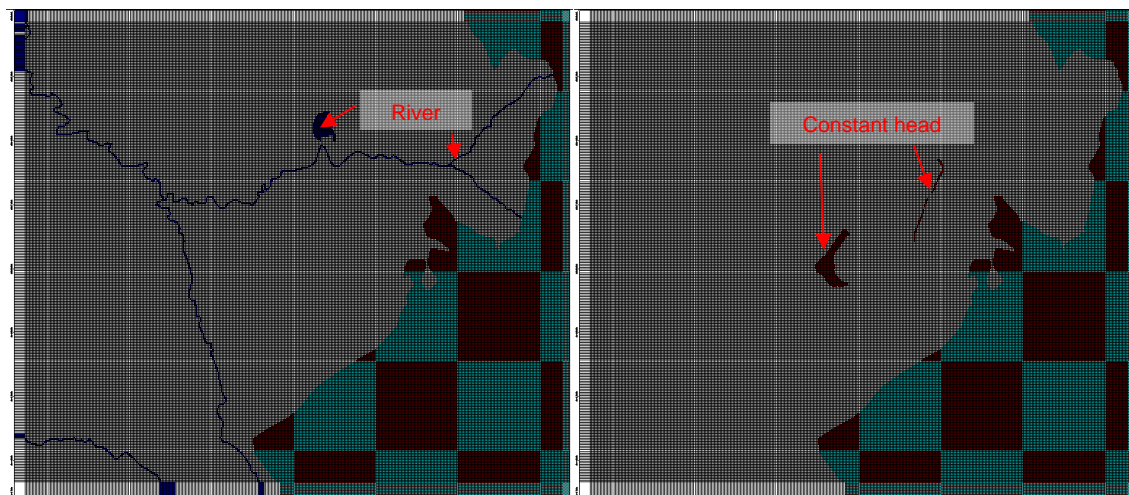


Figura 7. Ubicación de las condiciones de frontera “river” (izquierda) y “constant head” “derecha”

Fuente: ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2.014.

Se ingresó además el valor de recarga como un porcentaje del valor de la precipitación media anual para cada unidad hidrogeológica modelada. Para la simulación de los tajos fueron ingresadas celdas de tipo “drain”, ajustados a la altura del piso del tajo para cada año simulado.

A partir de estos datos ingresados se realizó la corrida en estado estacionario, por medio de la cual fue calibrado el modelo y se obtuvieron los valores de los parámetros hidráulicos para cada unidad, presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de parámetros hidráulicos definidos para las capas del modelo mina PLJ

UNIDAD GEOLÓGICA	ESPESOR PROMEDIO (m)	T (m ² /d)	K EQUIVALENTE (m/d)	Ss	Sy	Por. Ef	Por. Tot
Depósitos Aluviales en general	10	31,22	3.11	6.00E-02	0,35	0,28	0,35
Formación Cuesta	20	40	2	4.21E-04	0,3	0,19	0,3
Formación Cuervos miembros Superior y Medio	240	5,4	0.21	1.30E-06	0,4	0,08	0,4
Formación Cuervos Miembro Inferior	280		0.05	2.50E-06	0,5	0.1	0,5
Estéril y retrollenado	20 m de espesor saturado en el retrollenado		5	2.50E-05	0,5	0.09	0,5

UNIDAD GEOLÓGICA	ESPESOR PROMEDIO (m)	T (m ² /d)	K EQUIVALENTE (m/d)	Ss	Sy	Por. Ef	Por. Tot
Formación Barco	Más de 500 m		0.8	1.50E-05	0.2	0.05	0.2

Fuente: ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2.014

Con el modelo calibrado se obtuvieron los resultados definitivos de piezometría y direcciones de flujo para el año 2013 (año base), los cuales se presentan en la Figura 8.

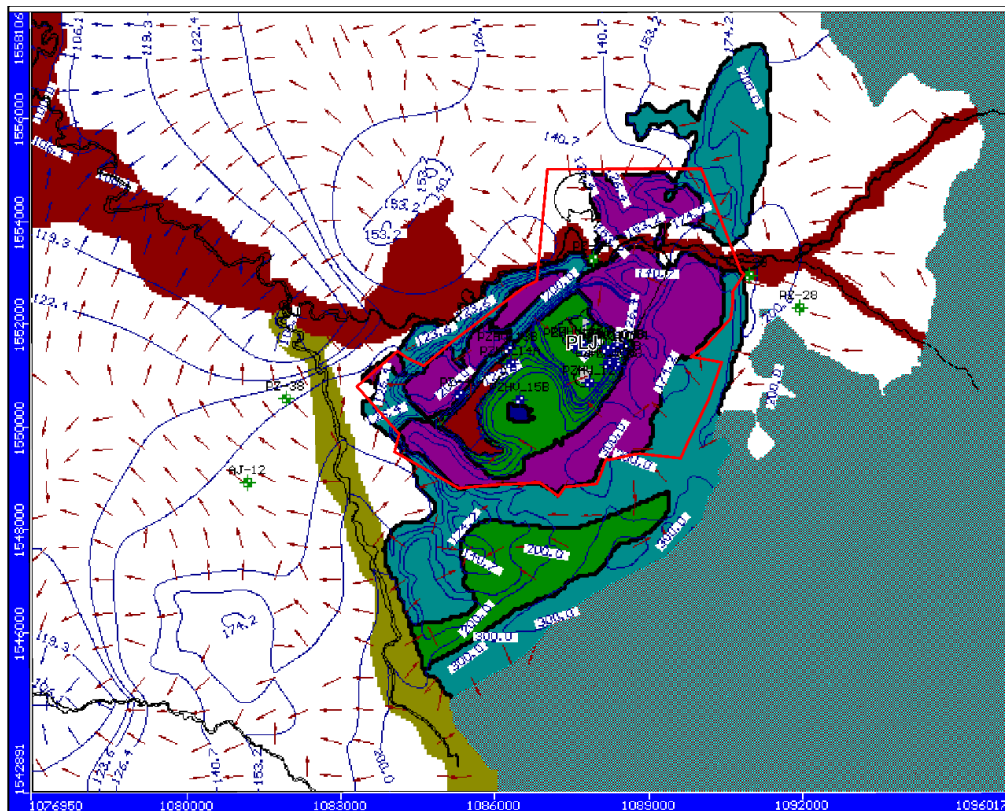


Figura 8. Direcciones del flujo de agua subterránea en estado inicial mina PLJ

Fuente: ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2.014

Con base en los resultados de la modelación en régimen permanente se corrieron los escenarios en régimen transitorio, con el objetivo de estimar el aporte de agua subterránea hacia el tajo para cada uno de los años de explotación minera. Este aporte depende del área y profundidad de los tajos propuestos en el desarrollo minero a futuro.

La Tabla 3 y Figura 9 muestran los resultados de la modelación para los caudales de ingreso al tajo en los periodos de simulación transitorios tomados. Se puede observar que el mayor

caudal de ingreso se espera para en el año 2.016, con 30 l/s, ya que para este año el tajo tiene la mayor superficie para explotar, en los niveles 5, 6 y 7. El menor caudal se esperaba para el año 2015, con 11 l/s.

Tabla 3. Resultados de ingreso de agua al tajo mina PLJ como producto de la operación minera

AÑO	CAUDAL ENTRANTE AL TAJO (l/s)
2014	29
2015	12
2016	30
2017	12
2018	18
2019-2023	25
2024-2025	29
2026-2028	12

Fuente: ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2.014

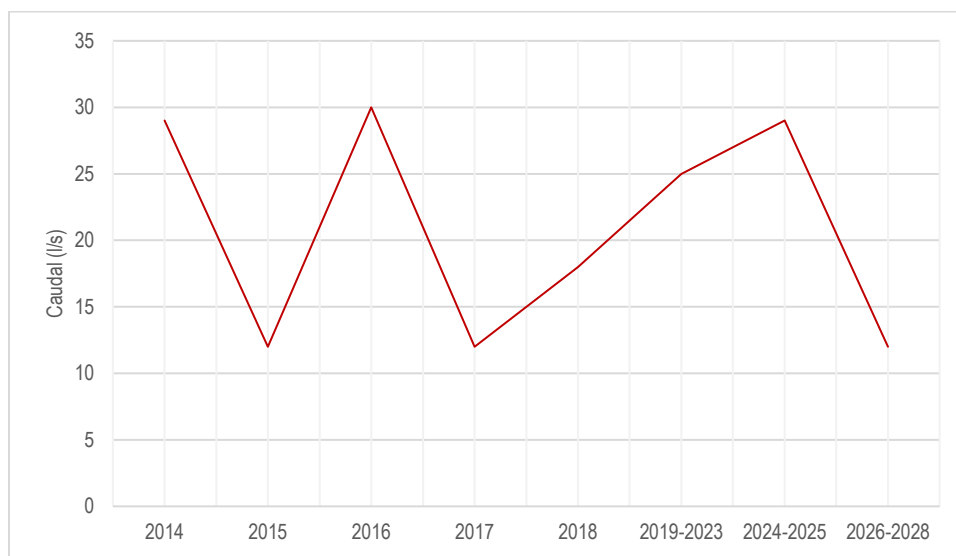


Figura 9. Resultados de ingreso de agua al tajo mina PLJ como producto de la operación minera

Fuente: ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2.014

Se obtuvieron además los mapas de piezometría para cada año de operación minera; el mapa de piezometría al finalizar el periodo de operación se presenta en la Figura 10. Conforme va avanzando la operación minera la dirección de flujo del agua en el miembro

medio de la Formación Cuervos se dirige hacia el frente de explotación. No se observa deflexión ni en líneas equipotenciales, ni de dirección de flujo de agua subterránea en los sectores externos a la mina (La Jagua de Ibirico, la Victoria y oeste del reservorio Danies).

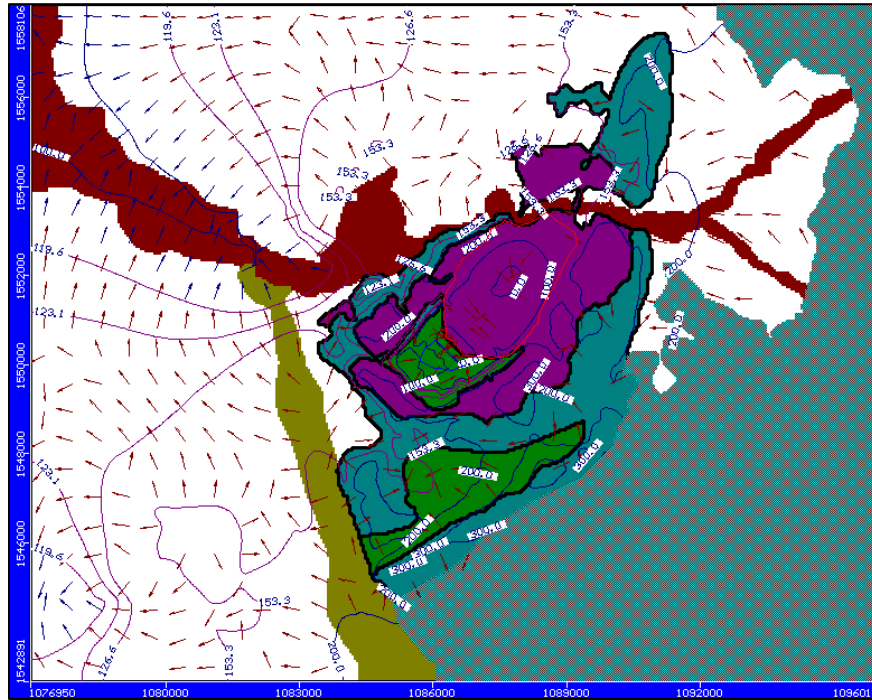


Figura 10. Líneas equipotenciales y direcciones de flujo de agua subterránea al final del periodo de operación, año 2028, mina PLJ
Fuente: ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2.014

8.2. Modelo numérico mina Calenturitas

El modelo numérico operacional de la mina Calenturitas fue desarrollado por SWS (2016). El objetivo de esta modelación era el de actualizar un modelo preexistente; esta actualización se realizó con base en nuevos antecedentes de geología, niveles piezométricos y el plan de minado completo. Se requería conocer el caudal de ingreso de agua al tajo desde las unidades interceptadas para la construcción del plan de manejo de aguas de la mina.

Inicialmente se construyó un modelo en estado estacionario que representa las condiciones del sistema para finales del año 2015 en el cual se ingresó como diferentes zonas de conductividad todas las unidades hidrogeológicas que afloran en el área de estudio. Para

la definición de los parámetros hidráulicos se tomó como base los valores que se utilizaron en el modelo anterior del área, pero fueron sujetos al proceso de calibración.

Las condiciones de contorno ingresadas fueron las de river (simulando los principales ríos), GHB (simulando la interacción del sistema con los sistemas adyacentes), drain (simulando el tajo) y wall (simulando barreras impermeables que se han instalado para disminuir el ingreso de agua a los tajos desde los cuaternarios). En la Figura 11 se presentan las condiciones de contorno ingresadas dentro del modelo numérico.

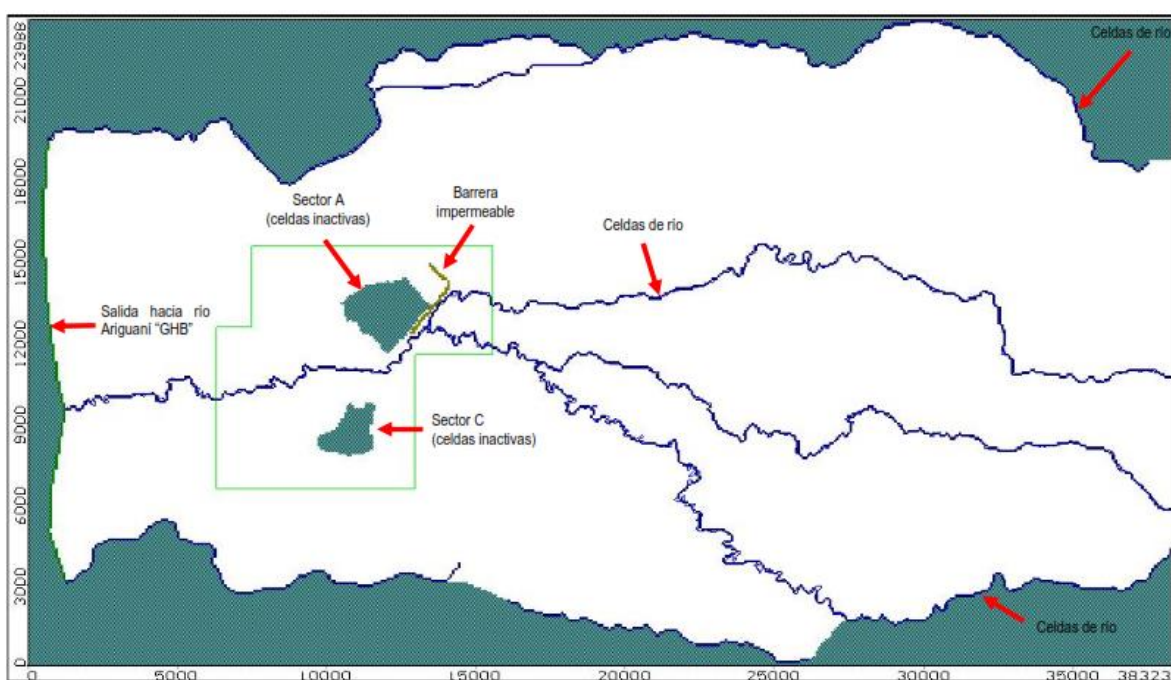


Figura 11. Condiciones de contorno ingresadas en el modelo numérico Calenturitas
Fuente: SWS, 2016

Se incluyeron también diferentes zonas de recarga directa, diferenciadas de acuerdo a la unidad hidrogeológica correspondiente.

Finalizado el proceso de calibración se obtuvieron los resultados definitivos de propiedades hidráulicas, piezometría y direcciones de flujo que se presentan en la Tabla 4 y Figura 12.

Tabla 4. Propiedades hidráulicas calibradas para el modelo numérico Calenturitas

UNIDAD	Permeabilidad Hidráulica inicial	Permeabilidad Hidráulica calibrada
	k (m/d)	k (m/d)
Unidad Hidrogeológica I (UH-I): Depósitos de terrazas aluviales	10	10
Unidad Hidrogeológica II (UH-II): Depósitos aluviales (Qa1)	6	10
Unidad Hidrogeológica III (UH-III): Depósitos Aluviales Recientes (Qa2)	20	20
Unidad Hidrogeológica IV (UH-IV): Formación Cuesta	7	50
Unidad Hidrogeológica V (UH-V): Formación Cuervos Superior	0.0001	0.05
Unidad Hidrogeológica VI (UH-VI): Formación Cuervos Medio encima de la cota de drenaje	0.01	0.015
Unidad Hidrogeológica VI (UH-VI): Formación Cuervos Medio debajo de la cota de drenaje	0.01	0.2
Unidad Hidrogeológica VII (UH-VII): Formación Cuervos Inferior	0.005	0.002
Unidad Hidrogeológica VIII (UH-VIII): Formación Barco	0.05	0.9
Unidad Hidrogeológica IX (UH-IX): Sustrato del Cretácico	---	5

Fuente: SWS, 2016

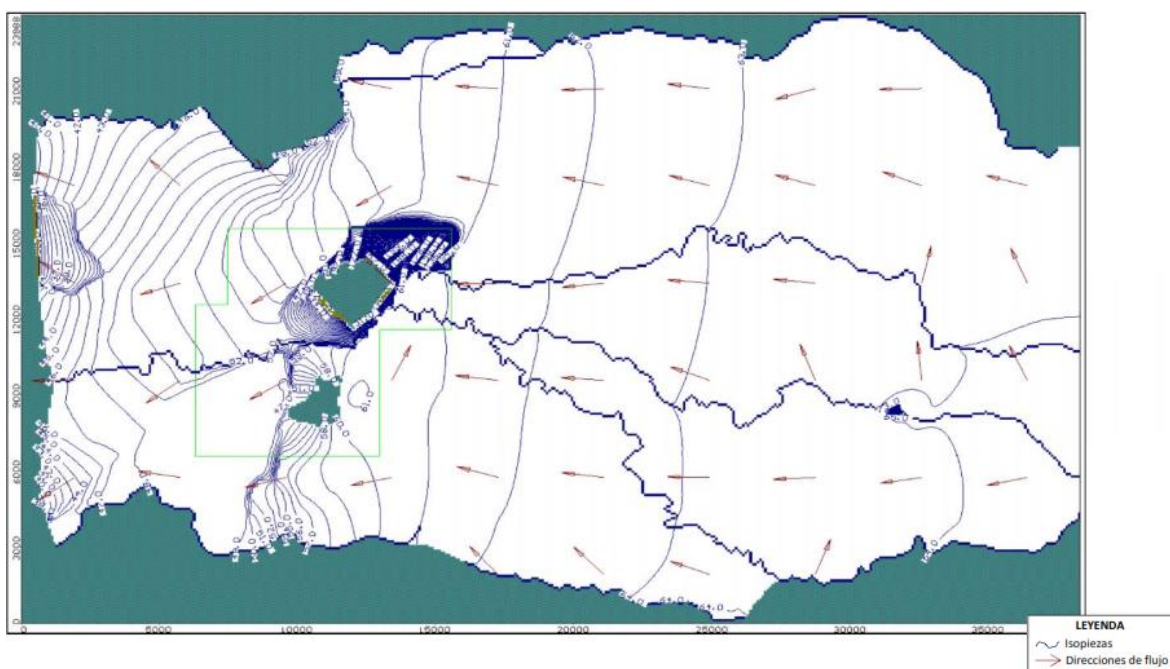


Figura 12. Direcciones del flujo de agua subterránea en estado inicial mina Calenturitas
Fuente: SWS, 2016

Este modelo calibrado fue la base para ejecutar la modelación en estado transitorio, la cual va desde el año 2016 hasta el año 2032, 18 años de operación minera, de acuerdo al plan de minado entregado por Prodeco. Esta modelación también incluyó el desvío del río

Calenturitas hacia el Sector B de la mina, que se propuso realizarse en un estudio previo debido a que el río estaba atravesando este tajo, además de una barrera hidráulica asociada a este desvío, que disminuye la entrada de agua desde los acuíferos cuaternarios.

La simulación realizada permitió hacer un estimativo del caudal de ingreso a cada uno de los tajos durante el tiempo de operación de la mina. En total, el máximo caudal de ingreso a los tajos ocurre en el año 2025, donde ingresan 905 L/s (480 L/s del sector A, 162 L/s Sector B y 353 L/s Sector CD). El tajo A es en el cual se manejan los mayores caudales, pero en promedio, este tajo recibe el 43% de caudal total, el tajo B el 16% y el tajo CD el 41% restante. En la Tabla 5 y Figura 13 se muestra el ingreso de agua anual para cada tajo.

Tabla 5. Resultados de ingreso de agua a los sectores A, B y C mina Calenturitas como producto de la operación minera

	Sector A	Sector B	Sector CD	Total
	L/s	L/s	L/s	L/s
2016	244	6	213	463
2017	91	5	185	281
2018	100	5	278	382
2019	107	4	231	342
2020	177	4	388	570
2021	163	5	303	471
2022	157	4	264	425
2023	153	4	246	403
2024	574	43	350	967
2025	480	162	353	995
2026	398	158	311	867
2027	372	218	295	885
2028	363	191	281	835
2029	373	235	273	881
2030	381	331	267	979
2031	368	271	262	902
2032	358	247	259	864

Fuente: SWS, 2016

Así mismo, las Figuras 14 a 16 muestran que la operación de la mina genera descensos en cada tajo como consecuencia de la perforación, pero son restringidos específicamente al contorno de cada uno. Los cambios en la piezometría alcanzan a ser percibidos en un radio de aproximadamente 115 m alrededor de la mina, alcanzando valores máximos de 5 m.

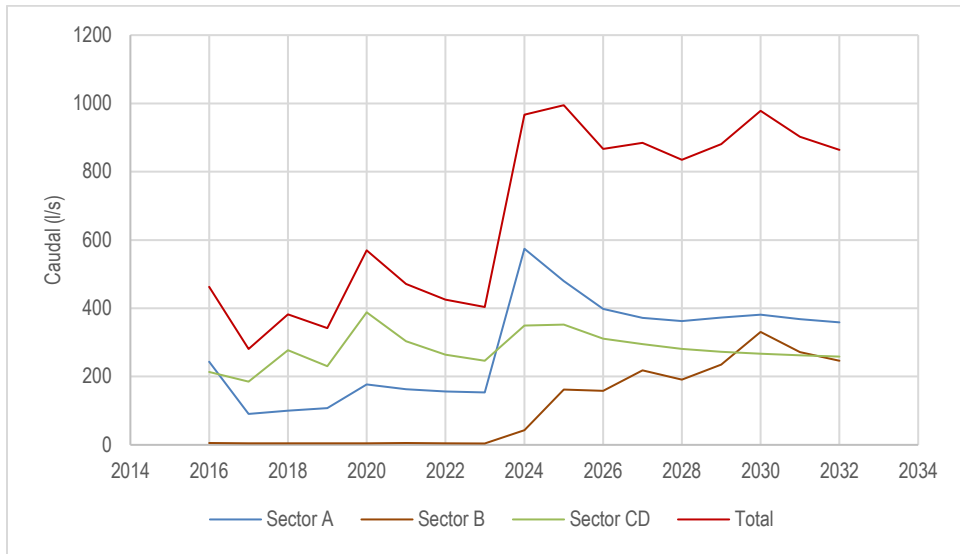


Figura 13. Resultados de ingreso de agua a los sectores A, B y C mina Calenturitas como producto de la operación minera
Fuente: SWS, 2016

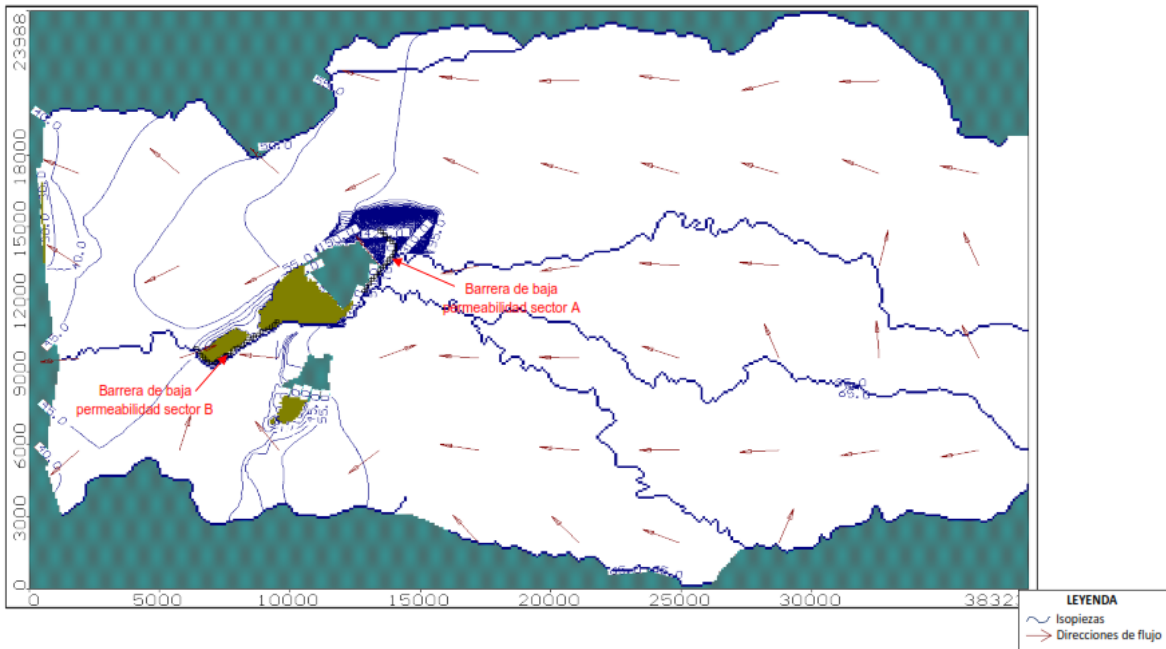


Figura 14. Líneas equipotenciales y direcciones de flujo de agua subterránea al final del periodo de operación, año 2032, mina Calenturitas
Fuente: SWS, 2016

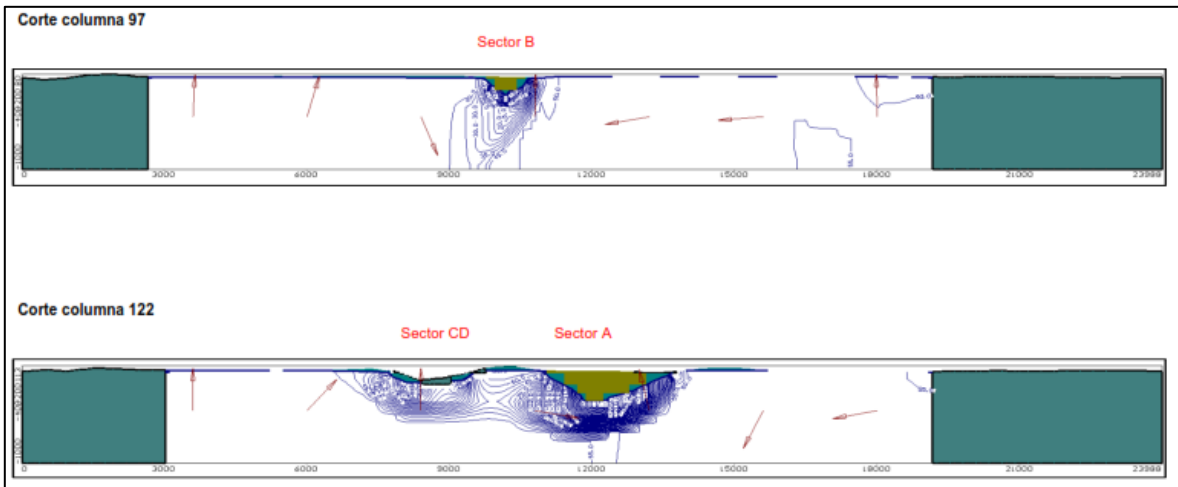


Figura 15. Cortes sur - norte líneas equipotenciales y direcciones de flujo de agua subterránea al final de la operación mina Calenturitas
Fuente: SWS, 2016

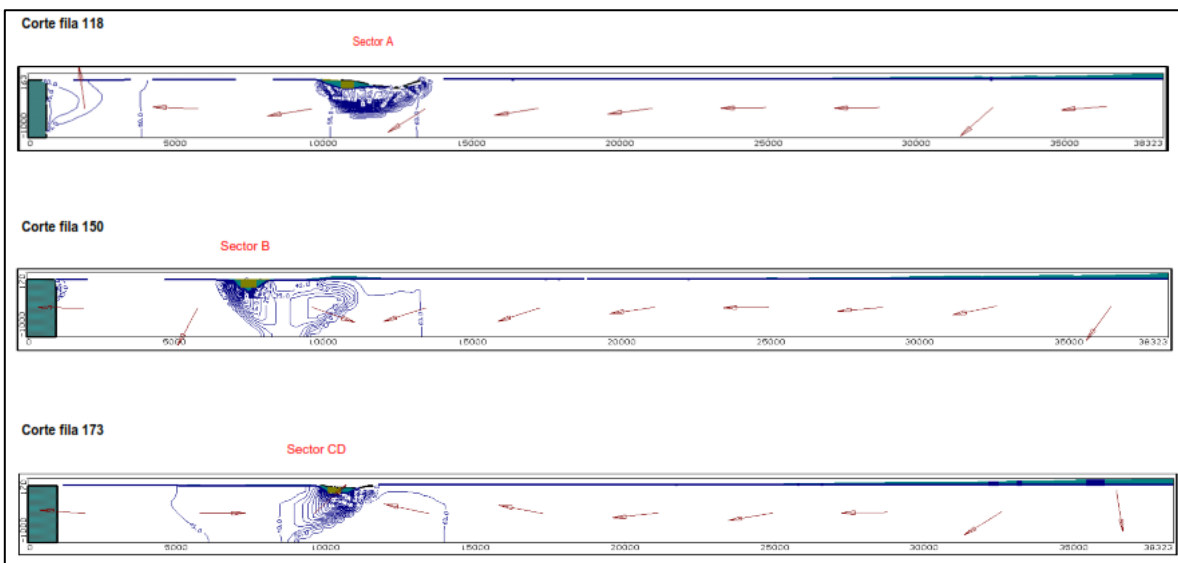


Figura 16. Corte oeste – este líneas equipotenciales y direcciones de flujo de agua subterránea al final de la operación mina Calenturitas
Fuente: SWS, 2016

Capítulo III

Metodología

Acorde con los objetivos del presente trabajo, se tomó la información previa disponible para las minas PLJ y Calenturitas, especialmente de las modelaciones numéricas de cada una y fue analizada.

Primeramente, se llevó a cabo la identificación de los componentes del sistema hidrogeológico que podrían ser impactados por la actividad minera. Esta identificación se realizó a partir de un ejercicio de análisis interpretativo del todo el proceso de minería, a partir del cual se logró definir que los componentes del sistema hidrogeológico que podrían ser impactados por la minería son:

- Piezometría
- Volumen de acuíferos
- Direcciones de flujo
- Caudal extraído a través de pozos, aljibes y manantiales
- Régimen de recarga
- Dinámica río-acuífero
- Calidad de las aguas subterráneas

Con esta identificación y teniendo en cuenta todas las etapas de un proyecto minero fue construida una matriz de doble entrada, en la cual, en la vertical se ubican los siete componentes del sistema hidrogeológico identificados y los impactos que pueden ocurrir sobre estos y en la horizontal se ubican todas las etapas de desarrollo del proyecto. Se evalúa de esta manera la importancia de cada impacto ambiental en cada etapa de la minería.

Para la evaluación de la importancia ambiental de los impactos fueron valoradas seis variables para cada uno, las cuales serán descritas a continuación:

- a. Tipo de impacto:** Se definió si se trata de un impacto beneficioso (+) o perjudicial (-) para el medio, de la siguiente forma:

Positivo: Mejora la calidad ambiental del entorno.

Negativo: Deteriora la calidad ambiental del entorno.

- b. Alcance:** Se refiere al área de influencia del impacto en relación con el entorno donde se genera. Se valoró de acuerdo a la siguiente escala:

Puntual: (1) El Impacto queda confinado dentro del área donde se genera.

Local: (5) Trasciende los límites del área de influencia.

Regional: (10) Tiene consecuencias a nivel regional.

- c. Probabilidad de ocurrencia:** Se refiere a la posibilidad que se dé el impacto.

Baja: (1) Existe una posibilidad muy remota de que suceda.

Media: (5) Existe una posibilidad media de que suceda.

Alta: (10) Es muy posible que suceda en cualquier momento.

- d. Duración:** Se refiere al tiempo que permanecerá el efecto positivo o negativo del impacto en el ambiente.

Breve: (1) Alteración del recurso durante un lapso de tiempo muy pequeño.

Temporal: (5) Alteración del recurso durante un lapso de tiempo moderado.

Permanente: (10) Alteración del recurso permanente en el tiempo.

- e. Recuperabilidad:** Se refiere a la posibilidad de reconstrucción, total o parcial del recurso afectado por el impacto.

Reversible: (1) Puede eliminarse el efecto por medio de actividades humanas tendientes a restablecer las condiciones originales del recurso.

Recuperable: (5) Se puede disminuir el efecto a través de medidas de control hasta un estándar determinado.

Irrecuperable/irreversible: (10) El/los recursos afectados no retornan a las condiciones originales a través de ningún medio.

- f. **Magnitud:** Se refiere a la dimensión del impacto, es decir, la severidad con la que ocurrirá la afectación y/o riesgo sobre el recurso.

Baja: (1) Alteración mínima del recurso. Existe bajo potencial de riesgo sobre el recurso o el ambiente.

Moderada: (5) Alteración moderada del recurso. Tiene un potencial de riesgo medio sobre el recurso o el ambiente.

Alta: (10) Alteración significativa del recurso. Tiene efectos importantes sobre el recurso o el ambiente.

La importancia se obtiene entonces al sumar la valoración de cada uno de los parámetros descritos anteriormente:

$$I=TI*(A+P+D+R+M)$$

I= Importancia del impacto

A= Alcance

P= Probabilidad de ocurrencia

R= Recuperabilidad

M= Magnitud

Aplicando el anterior procedimiento se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 6. A partir de la suma de la importancia de los impactos de forma horizontal se determinaron los impactos ambientales más significativos (evaluación de la significancia) que la operación minera genera en el sistema hidrogeológico de las minas.

Se jerarquizó la significancia de los impactos de la siguiente manera:

VALORACIÓN DE LA SIGNIFICANCIA		CALIFICACION
5	41	Baja
42	81	Moderada
82	127	Alta

Tabla 6. Importancia de los impactos sobre el sistema hidrogeológico

		TRABAJOS DE EXPLORACIÓN																																						
		PROSPECCIÓN								Exploración Geológica de Superficie					Exploración Geológica del subsuelo					Evaluación y Modelo Geológico					Programa de Trabajos y Obras (PTO) (Viabilidad técnica y económica)															
		TI	A	P	D	R	M	I	TI	A	P	D	R	M	I	TI	A	P	D	R	M	I	TI	A	P	D	R	M	I	TI	A	P	D	R	M	I				
Piezometría	Descenso de los niveles piezométricos	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	5	5	1	5	5	-21	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-5
Volumen de acuíferos	Pérdida de agua contenida en los acuíferos	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-5
Direcciones de flujo	Cambio en las direcciones de flujo	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	5	5	1	5	5	-21	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-5
Caudal extraído a través de pozos, aljibes y manantiales	Disminución del caudal extraído en el área a través de pozos, aljibes y manantiales	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-5
Régimen de recarga	Disminución de la recarga de los acuíferos	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-5
	Aumento de la recarga de los acuíferos	1	1	1	1	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1	1	5
Dinámica río-acuífero	Disminución en el caudal entregado desde los ríos a los acuíferos	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	5	5	5	5	5	-25	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-5
	Disminución en el caudal entregado desde los acuíferos a los ríos	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	5	5	5	5	5	-25	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-5
Calidad de las aguas subterráneas	Contaminación de las aguas subterráneas	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-5

Fuente: El Autor

Continuación importancia de los impactos sobre el sistema hidrogeológico

		CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE																								OBRAS Y TRABAJOS DE EXPLOTACIÓN DE MINEÍA A TAJO ABIERTO							
		Ajuste de los diseños del PTO								Apertura y desarrollo de frentes mineros y obras de infraestructura para beneficio y transformación								Obras civiles y de infraestructura															
		TI	A	P	D	R	M	I		TI	A	P	D	R	M	I		TI	A	P	D	R	M	I									
Piezometría	Descenso de los niveles piezométricos	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	5	5	5	5	1	-21	-1	5	5	5	5	1	-21	-1	5	5	10	5	5	-30				
Volumen de acuíferos	Pérdida de agua contenida en los acuíferos	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	5	5	5	5	1	-21	-1	5	5	5	5	1	-21	-1	5	5	10	5	5	-30				
Direcciones de flujo	Cambio en las direcciones de flujo	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	5	5	5	5	1	-21	-1	5	5	5	5	1	-21	-1	5	5	10	5	5	-30				
Caudal extraído a través de pozos, aljibes y manantiales	Disminución del caudal extraído en el área a través de pozos, aljibes y manantiales	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	5	5	1	-13				
Régimen de recarga	Disminución de la recarga de los acuíferos	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	5	5	5	1	1	-17	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	5	5	10	5	5	-30				
	Aumento de la recarga de los acuíferos	1	1	1	1	1	1	5	1	5	5	5	1	1	17	1	1	1	1	1	1	5	1	5	5	5	5	5	25				
Dinámica río-acuífero	Disminución en el caudal entregado desde los ríos a los acuíferos	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	5	5	1	1	1	-13	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	5	5	10	5	5	-30				
	Disminución en el caudal entregado desde los acuíferos a los ríos	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	5	5	1	1	1	-13	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	5	5	10	5	5	-30				
Calidad de las aguas subterráneas	Contaminación de las aguas subterráneas	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	-5				

Fuente: El Autor

Continuación importancia de los impactos sobre el sistema hidrogeológico

		BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN							CIERRE Y ABANDONO							SIGNIFICANCIA DE LOS IMPACTOS	CALIFICACIÓN DE LOS IMPACTOS	
		TI	A	P	D	R	M	I	TI	A	P	D	R	M	I			
Piezometría	Descenso de los niveles piezométricos	-1	5	5	5	5	5	-25	-1	1	1	1	1	1	1	-5	127	Alta
Volumen de acuíferos	Pérdida de agua contenida en los acuíferos	-1	5	5	5	5	5	-25	-1	1	1	1	1	1	1	-5	123	Alta
Direcciones de flujo	Cambio en las direcciones de flujo	-1	5	5	5	5	5	-25	-1	1	1	1	1	1	1	-5	123	Alta
Caudal extraído a través de pozos, aljibes y manantiales	Disminución del caudal extraído en el área a través de pozos, aljibes y manantiales	-1	1	1	5	5	1	-13	-1	1	1	1	1	1	1	-5	62	Moderada
Régimen de recarga	Disminución de la recarga de los acuíferos	1	-1	5	5	5	5	19	-1	1	1	1	1	1	1	-5	97	Alta
	Aumento de la recarga de los acuíferos	1	1	5	5	5	5	21	1	1	1	1	1	1	1	5	94	Alta
Dinámica río-acuífero	Disminución en el caudal entregado desde los ríos a los acuíferos	-1	5	1	5	5	5	-21	-1	1	1	1	1	1	1	-5	95	Alta
	Disminución en el caudal entregado desde los acuíferos a los ríos	-1	5	1	5	5	5	-21	-1	1	1	1	1	1	1	-5	95	Alta
Calidad de las aguas subterráneas	Contaminación de las aguas subterráneas	-1	1	1	1	1	1	-5	-1	1	1	1	1	1	1	-5	46	Moderada

Fuente: El Autor

Los principales impactos encontrados se relacionan con los abatimientos de los niveles piezométricos naturales, pérdida de la cobertura de los acuíferos cuaternarios, variaciones en la dinámica natural entre los cuerpos de agua superficial y subterráneos y cambios en el régimen natural de recarga. Por esta razón se realizó la estimación de estos impactos.

A continuación, se presenta la metodología de cuantificación de cada uno de los impactos determinados.

1. Abatimientos

Para determinar los abatimientos generados por la actividad minera, se realizó la comparación entre la piezometría inicial obtenida durante la calibración de los modelos hidrogeológicos y la piezometría al final de cada periodo de operación, que para PLJ es el año 2028 y para Calenturitas es el año 2032.

Para hacer la comparación entre la piezometría inicial y final se utilizó el software de uso libre QGis 2.14, el cual tiene herramientas que permiten la creación de superficies a partir de isolíneas y además permite hacer operaciones numéricas (álgebra de mapas) con estas superficies creadas.

Se crearon entonces las superficies correspondientes a la piezometría de los periodos iniciales y de los periodos finales obtenidos en cada modelo numérico (Figuras 8, 10, 12 y 14). En la Figura 17 se presenta un ejemplo de la superficie resultante creada en QGis.

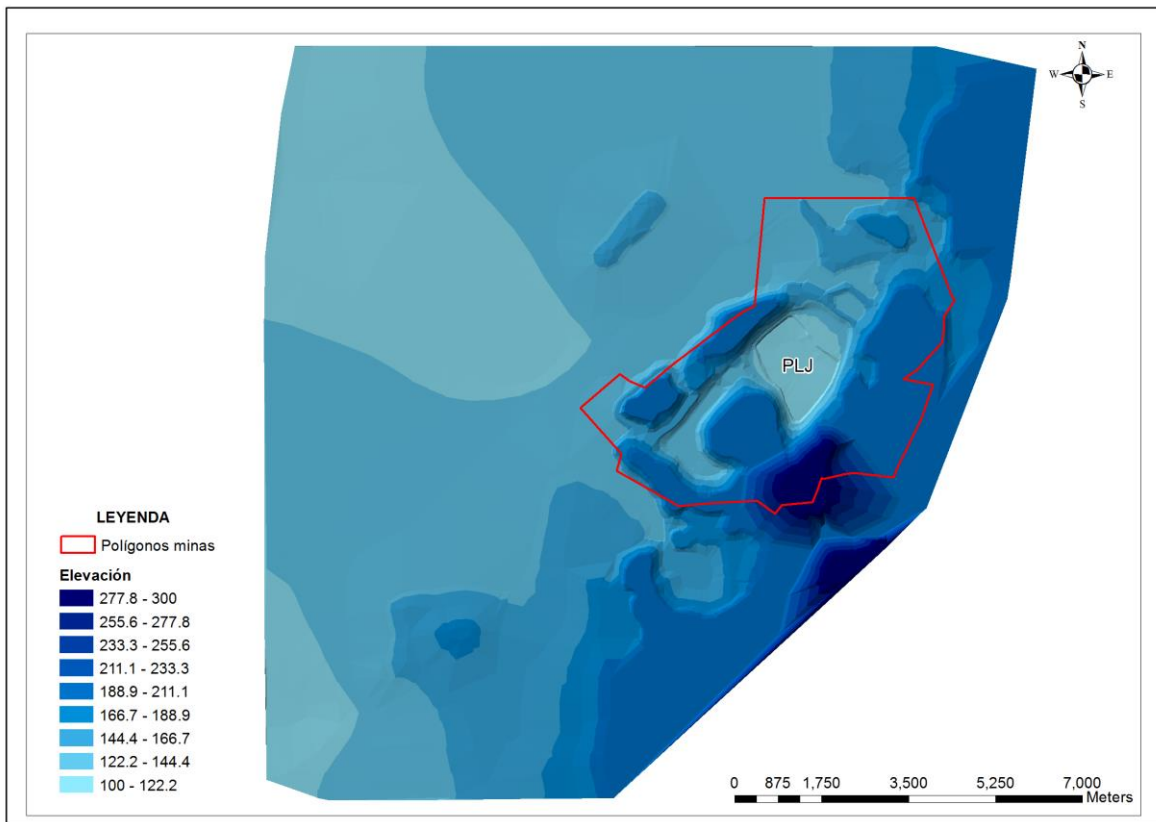


Figura 17. Superficie creada en QGIS a partir de la piezometría inicial obtenida en el modelo calibrado de la mina PLJ
Fuente: El Autor

Los abatimientos fueron calculados como:

$$\text{Abatimiento} = S_i - S_f$$

Donde:

S_i : Superficie piezométrica del año inicial utilizado como base de comparación (2013 PLJ y 2015 Calenturitas)

S_f : Superficie piezométrica al finalizar las actividades mineras (2028 PLJ y 2032 Calenturitas)

Los resultados son obtenidos también como una superficie a partir de la cual se construyeron líneas de contornos de igual abatimiento.

2. Pérdida de los acuíferos cuaternarios

Para determinar la pérdida de acuíferos del cuaternario es necesario calcular el volumen de acuífero cuaternario encontrado inicialmente en el área y que debido a la actividad minera fue removido.

Con este fin, utilizando la herramienta QGis se construyó la superficie topográfica, tomando como referencia el DEM de la NASA, con resolución de 30m. La Figura 18 muestra la superficie topográfica creada.

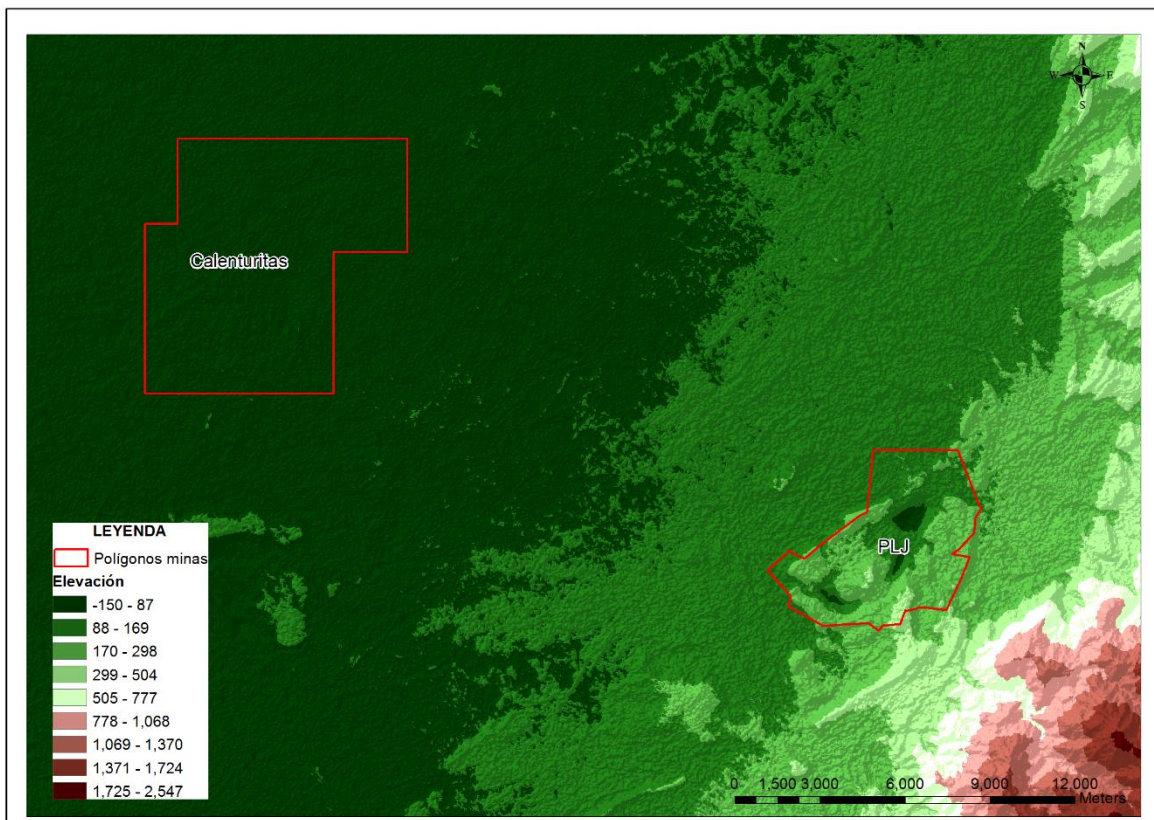


Figura 18. Superficie topográfica creada a partir del DEM de la NASA
Fuente: El Autor

A partir de información secundaria se obtuvo que el espesor promedio de los cuaternarios para esta zona es de alrededor de 15 m. Con este espesor promedio y la superficie anterior se creó una superficie denominada base del cuaternario, mostrada en la Figura 19.

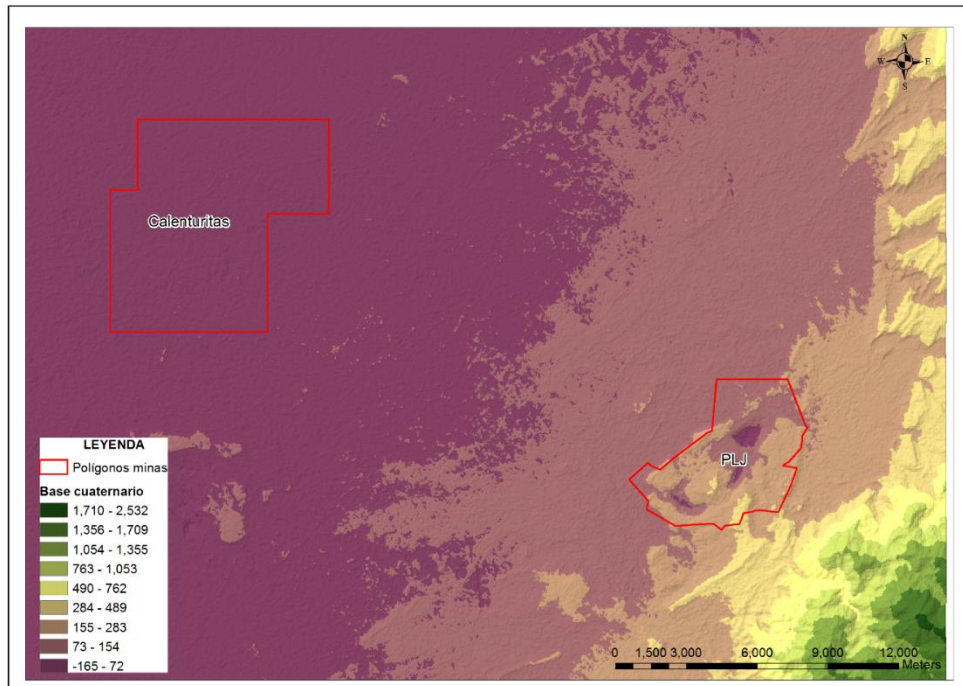


Figura 19. Superficie base del cuaternario creada a partir de la superficie topográfica menos 15 m de espesor
Fuente: El Autor

Esta superficie de la base del cuaternario fue restada a la superficie piezométrica construida a partir de los contornos de piezometría presentados en el Mapa Hidrogeológico, la cual es presentada en la Figura 20.

Al desarrollar esta resta se obtiene el espesor del acuífero que se encuentra saturado. Los resultados de esta operación se presentan en la Figura 21.

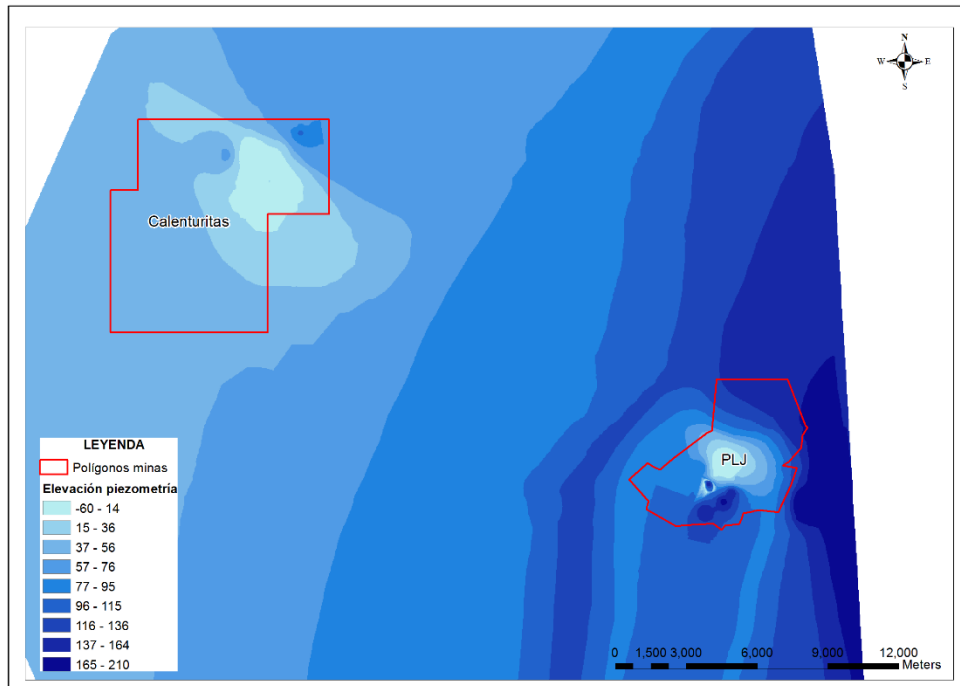


Figura 20. Superficie piezométrica creada a partir de la piezometría desarrollada en el modelo conceptual
Fuente: El Autor

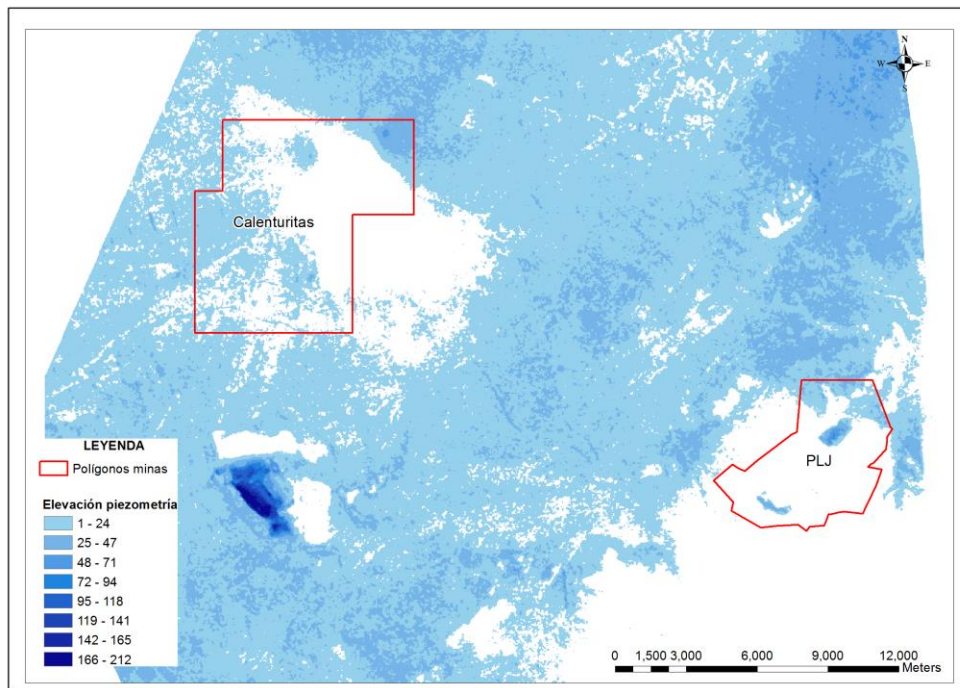


Figura 21. Espesor del acuífero cuaternario que se encuentra saturado
Fuente: El Autor

Posteriormente se realiza la comparación de los mapas de geología inicial (antes de la actividad minera) y el plan de minado para cada mina, determinando así el área de la unidad del cuaternario que ha sido y será descapotada durante las actividades de explotación, la cual se muestra en la Figura 22.

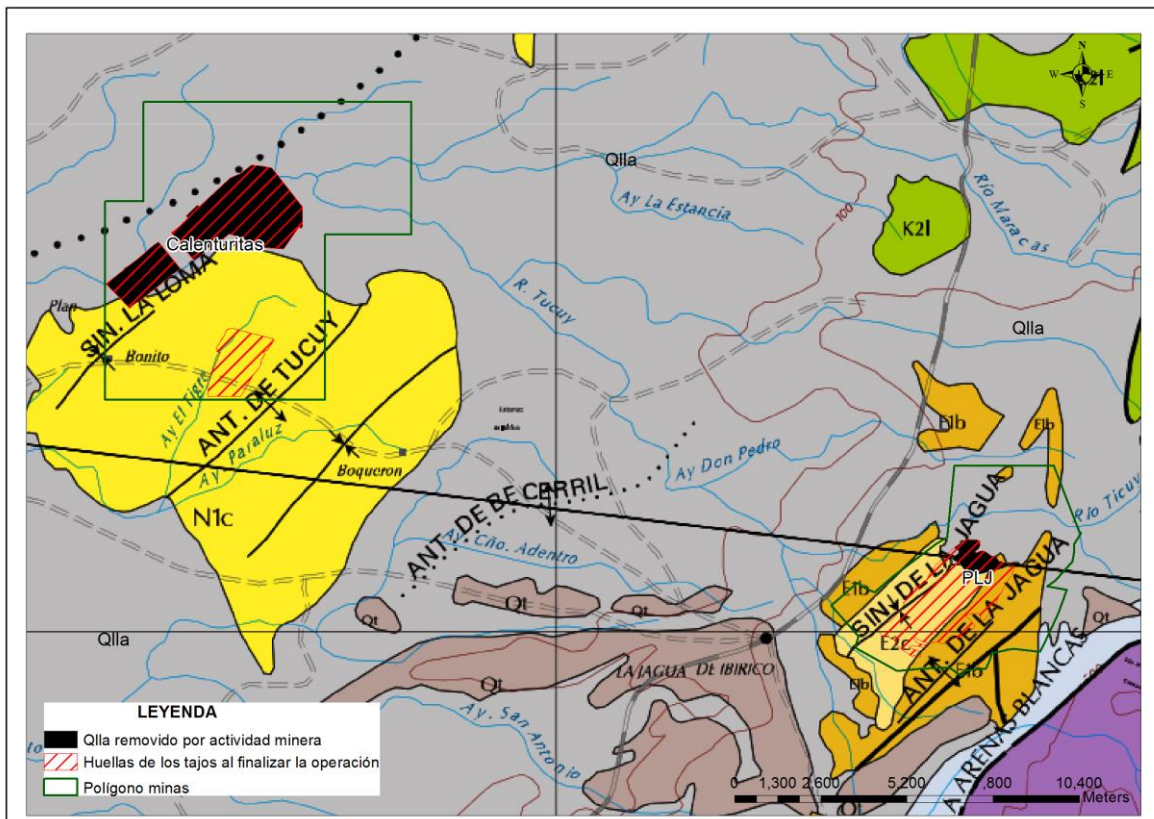


Figura 22. Zonas de cuaternario removidas por actividad minera
Fuente: El Autor

El volumen saturado perdido de cada acuífero se obtuvo a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Vol. Saturado Perdido de Acuífero Cuaternario} = \text{Área de la unidad cuaternaria perdida} \times \text{Espesor de la unidad cuaternaria perdida}$$

A partir de la expresión anterior se obtiene el volumen total de material perdido de cada unidad del cuaternario que se encuentra saturada. Este cálculo fue realizado por medio del QGIS.

Finalmente debe obtenerse el volumen de agua contenido en esta porción del cuaternario que será removido y, por lo tanto, será el volumen de agua que se perderá. Para conocer este volumen debe multiplicarse el Vol. Saturado Perdido de Acuífero Cuaternario y la porosidad efectiva del acuífero cuaternario.

3. Cambio en la dinámica río-acuífero

Una manera práctica de medir los cambios que la operación minera genera sobre el sistema inicial es midiendo los efectos que tiene sobre el caudal que es entregado desde los acuíferos hacia los ríos, ya que es fácil de medir a través de los modelos numéricos desarrollados.

La medición del impacto se realizó a través de la comparación de las condiciones iniciales del sistema (en el periodo base – modelo estacionario), con las modelaciones transitorias para cada mina.

La metodología utilizada consiste en calcular la diferencia entre cada uno de los valores de drenaje (aporte del acuífero al río) o filtración (aporte del río al acuífero) obtenidos para las diferentes fuentes de agua a evaluar, en cada uno de los años de operación simulados con el valor obtenido para el escenario base:

$$I_v = Q_{op} - Q_B$$

Donde, I_v es el impacto volumétrico, Q_{op} es el caudal de drenaje o filtración estimado para el año de operaciones y Q_B es el caudal de drenaje estimado para el escenario base.

Finalmente, para estimar el porcentaje de afección, se dividió el resultado de la diferencia anterior entre el caudal obtenido para el escenario base según la siguiente expresión:

$$I\% = I_v / Q_B = (Q_{op} - Q_B) / Q_B$$

Los valores positivos indican un incremento del caudal drenado o filtrado durante la época de operaciones respecto al escenario base, que representa el régimen natural, mientras que los valores negativos indican una disminución del caudal drenado o filtrado durante la etapa de operaciones respecto al escenario base.

4. Variaciones en el régimen de recarga

El régimen de recarga natural de los acuíferos del área es modificado debido principalmente a la presencia de las zonas de retrolenado que al permanecer saturadas favorecen la infiltración de agua hacia las unidades subyacentes. Se espera que este impacto sea positivo y llegue a compensar la disminución de la recarga natural originada por el descapote de los cuaternarios.

De acuerdo con los modelos numéricos desarrollados, la recarga natural en la zona corresponde a un porcentaje de la precipitación efectiva, que se encuentra el 0.1 y el 2%; sin embargo, para las zonas de retrolenado este porcentaje aumenta al 50%. La Tabla 7 muestra el valor de la recarga ingresada para cada unidad en el modelo numérico desarrollado por SWS (2016).

Tabla 7. Valores de recarga calibrados para cada unidad incluida en el modelo numérico para la mina Calenturitas

UNIDAD	VALORES CALIBRADOS	
	PORCENTAJE DE RECARGA RESPECTO A LA PRECIPITACIÓN EFECTIVA	RECARGA
	%	mm/año
Aluviales y aluviales recientes	1	1
Depósitos de terrazas	2	2.1
Fm Cuesta	1	1
Fm Cuervos Miembro Superior	0.5	0.5
Fm Cuervos Miembro Medio (Carbón)	0.5	0.5
Fm Cuervos Miembro Inferior	0.1	0.1
Fm Barco	1	1
Estéril y retrolenado	50	54

Fuente: SWS, 2016

Para calcular el cambio en el régimen natural de recarga se calculó el valor de recarga anual perdido debido al descapote de los cuaternarios y el volumen la recarga “artificial”

debida a la presencia de las zonas de retrolenado (ver Figura 23) al finalizar la operación minera a través de la siguiente ecuación.

$$\text{Vol. Anual de Recarga} = \text{Recarga (mm/año)} \times \text{Área (m}^2\text{)}$$

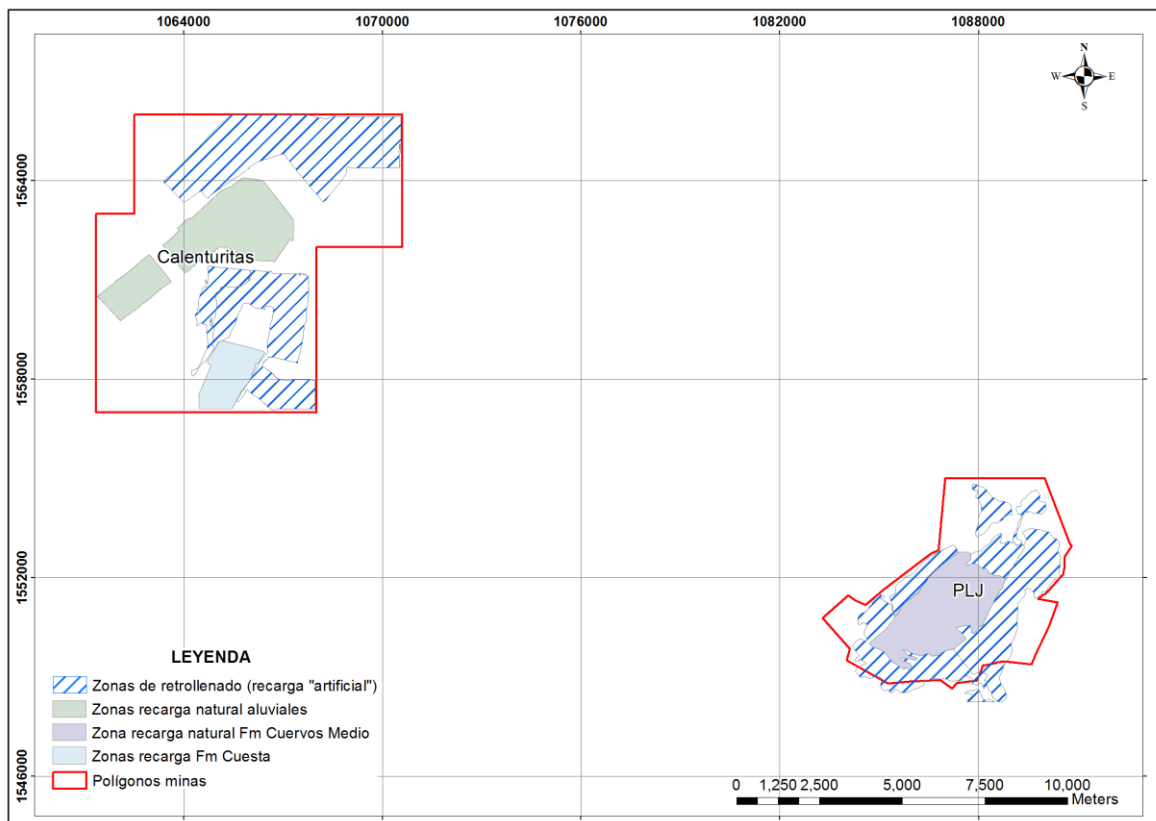


Figura 23. Zonas a calcular el volumen de recarga
Fuente: El Autor

La diferencia entre la recarga natural que se daría por la presencia de las unidades del cuaternario y la recarga “artificial” debido a las zonas de retrolenado corresponde al impacto final de la operación minera.

Capítulo IV

Resultados y Contribución

1. Abatimientos

Como se mencionó en el capítulo anterior, para calcular los abatimientos producidos al final de la operación minera se realizó una comparación entre los niveles piezométricos del año base (2013 para PLJ y 2015 para Calenturitas) y los niveles piezométricos al final de la operación minera (2028 para PLJ y 2032 para Calenturitas), obteniendo los contornos de isoabatimientos para cada zona, como se muestra en las Figuras 24 y 25.

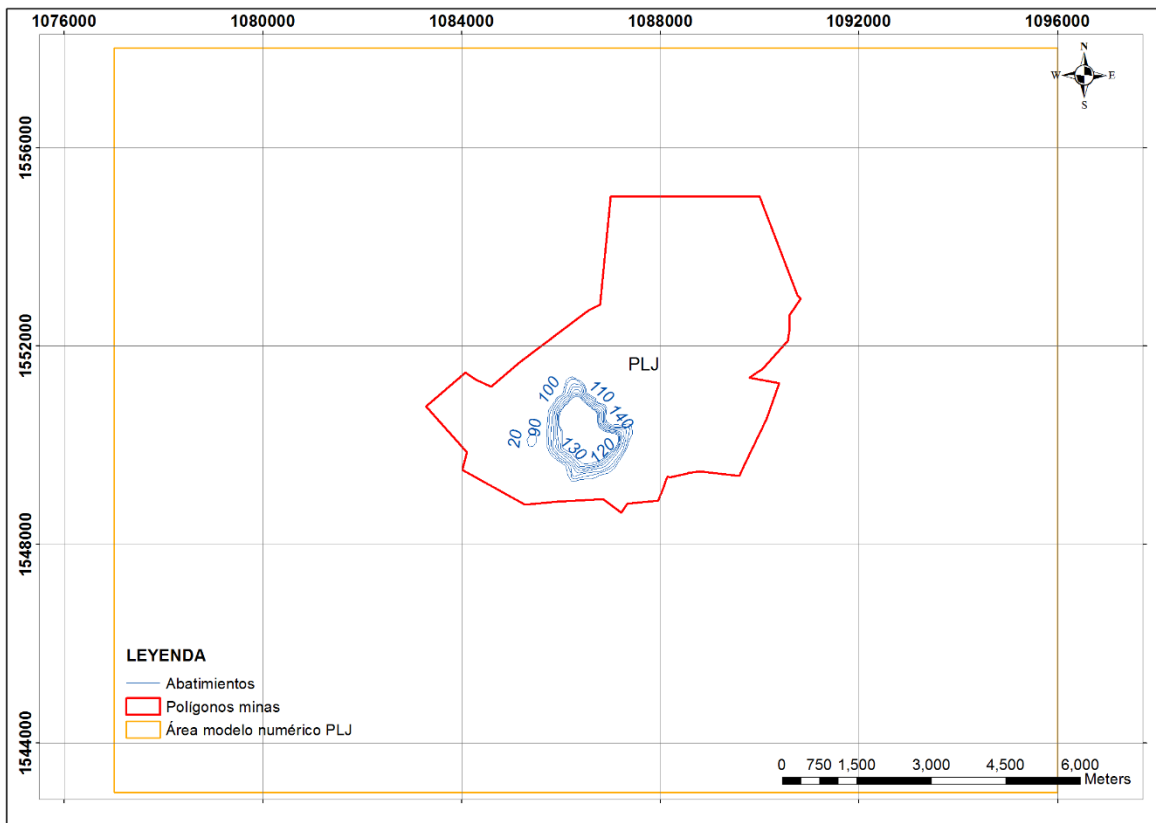


Figura 24. Abatimientos producidos por la operación minera de PLJ
Fuente: El Autor

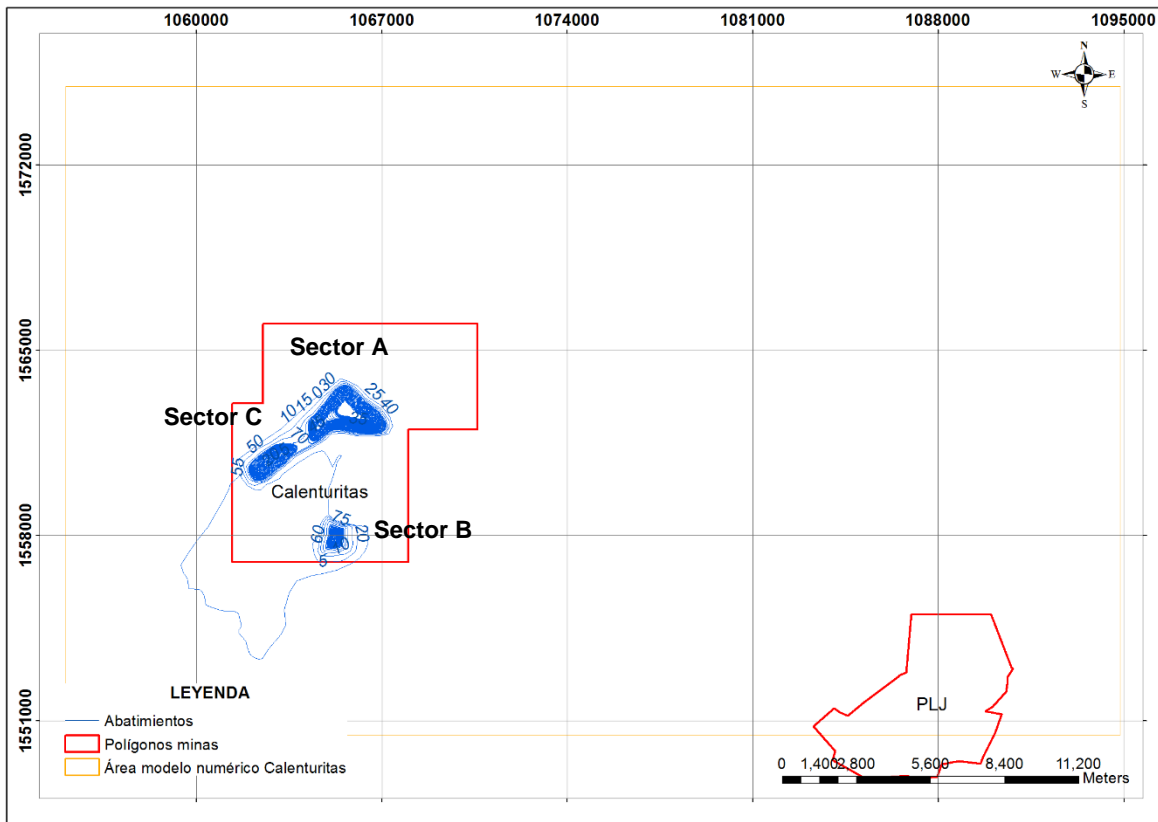


Figura 25. Abatimientos producidos por la operación minera de PLJ
Fuente: El Autor

En la Figura 24 se puede observar que los abatimientos generados por la mina PLJ se localizan al interior del polígono concesionado para la actividad minera, alcanzando un máximo abatimiento hacia el sector de Cerro de Piedra, con 160 m, ya que es un área que hasta el momento no ha sido intervenida, por lo cual en ella aún se encuentran relictos de cuaternario; durante los años 2024 y 2025 se iniciará la apertura del bloque 9, que involucra directamente la remoción de esta zona, ocasionando evidentemente grandes abatimientos en los niveles de las aguas subterráneas de manera local. Al norte del proyecto minero, se alcanzan abatimientos máximos de 2,4 m, pero sin salirse del polígono concesionado. En las zonas más cercanas a la Jagua de Ibirico no se alcanzan a presentar abatimientos.

Para el área de Calenturitas, cuyos abatimientos fueron presentados en la Figura 25, se observa que la mina genera los descensos esperados en cada tajo, como consecuencia de la perforación, pero son restringidos específicamente al contorno de cada tajo. Para el año 2032, hacia el Sector A (tajo central) se alcanzan los mayores abatimientos, del orden de

400 m, debido a que es el sector donde la mina alcanza su mayor profundidad; en el Sector C (oeste) los abatimientos alcanzan los 265 m y hacia el Sector B (sur) se alcanzan los 250 m de abatimiento. Este modelo muestra que los descensos de los niveles alcanzan a extenderse fuera del polígono concesionado, alrededor de 115 m al sur oeste de la mina; estos descensos alcanzan los 5 m, sin embargo, debido a que en esta zona se encuentra aflorando la Formación Cuervos, se consideran poco significativos.

2. Pérdida de los acuíferos cuaternarios

El área correspondiente a acuíferos del cuaternario presentada en la Figura 22, ocupa una superficie de 9,55 Km²; el espesor saturado máximo es de 59 m aproximadamente. El volumen total de material saturado para esta área es de 32.721.150 m³.

Los acuíferos cuaternarios encontrados en el área de estudio pueden ser tratados como acuíferos libres, por lo cual, los valores presentados en la Tabla 1 de coeficiente de almacenamiento coinciden con el valor de la porosidad efectiva. De acuerdo con esta tabla para esta unidad los valores de coeficiente de almacenamiento (porosidad efectiva) se encuentran entre $7,32E^{-04}$ y $1,35E^{-01}$, con un valor promedio de $4,76E^{-02}$. Para calcular el volumen de agua perdido debido a la remoción de los cuaternarios por la actividad de minería se utilizará el valor promedio, es decir 4,76% de porosidad efectiva.

Conforme a lo establecido anteriormente el volumen de agua que se perderá en los 14 años que perdurarán (aproximadamente) las actividades mineras de las minas Calenturitas y PLJ es de 1.557.526,74 m³. Este volumen de agua puede ser comparado con un pozo perforado en la zona que bombee de manera constante un caudal de 3,5 l/s. A pesar de que no se trata de un caudal que a simple vista parezca grande, la importancia que tiene el análisis de este impacto radica en que el acuífero jamás volverá a recuperar este volumen de agua, sino que será una pérdida del sistema hidrogeológico y no podrá estar disponible para su utilización por parte de la población.

3. Cambio en la dinámica río – acuífero

El análisis de los efectos que generan las minas PLJ y Calenturitas sobre la dinámica entre las fuentes de agua superficial y el acuífero sobre el cual discurren, que corresponde a los Depósitos de Llanura aluvial, fue desarrollado únicamente sobre las corrientes que fueron incluidas dentro de los modelos numéricos construidos para cada mina, las cuales se muestran en la Figura 26.

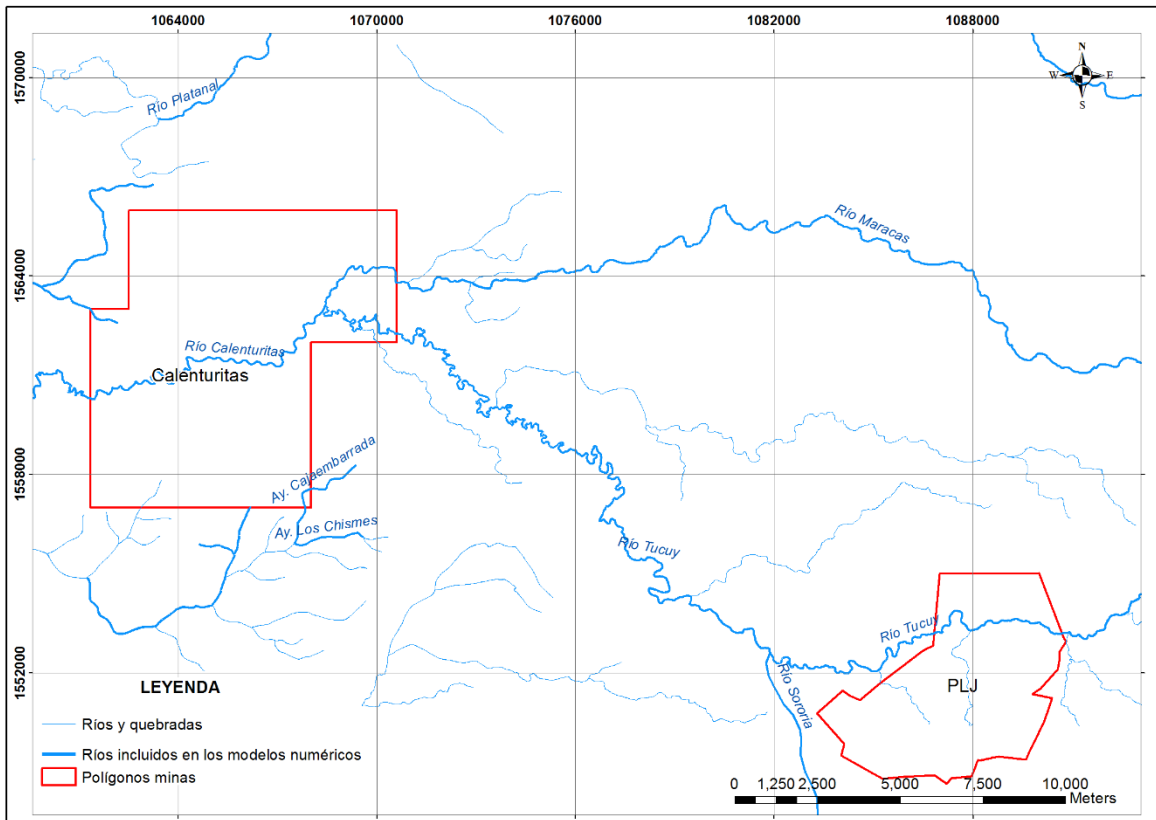


Figura 26. Ríos incluidos en los modelos numérico Calenturitas y PLJ
Fuente: El Autor

La evaluación de los efectos se realiza con base en los resultados entregados por los modelos numéricos. Estos resultados muestran que en total el acuífero depósitos cuaternarios deja de entregar a los ríos aproximadamente 16 l/s, mientras que la recarga que los ríos hacen hacia el acuífero aumenta en aproximadamente 18 l/s. A continuación, se presentan los resultados para cada río. Únicamente el río Tucuy fue incluido en los dos

modelos numéricos, por lo tanto, se hará un análisis del impacto en esta corriente de cada mina.

3.1. Río Tucuy

De acuerdo al modelo desarrollado para PLJ, el tramo modelado del río Tucuy, en las condiciones base (año 2013), recibe un aporte desde el acuífero depósitos de llanura aluvial de 216 l/s y el río aporta al acuífero un caudal de 49 l/s. La Tabla 8 permite observar que la operación minera genera un aumento creciente en el aporte que el río hace hacia el acuífero. El aumento de caudal alcanza un máximo de 5 l/s (aumento del 10% del caudal de aporte) para el final de la operación minera. De manera contraria, como habría de esperarse, la minería genera que el aporte del acuífero hacia el río se disminuya de manera creciente, llegando a reducirse en el periodo 2026-2028 en 13 l/s el caudal que originalmente entregaba el acuífero al río (disminución del 6% del caudal en el año base).

Tabla 8. Impacto de la operación minera en la mina PLJ sobre el río Tucuy

Año	Escenario Base	Escenario operación minera		Escenario Base	Escenario operación minera			
	Drenado desde el acuífero al río Tucuy (l/s)	Drenado desde el acuífero al río Tucuy (l/s)	IV	%IV	Filtración desde el río Tucuy hacia el acuífero (l/s)	Filtración desde el río Tucuy hacia el acuífero (l/s)	IV	%IV
2014	216	214	-1	-1%	49	50	0	0%
2015	216	214	-2	-1%	49	50	1	1%
2016	216	214	-1	-1%	49	50	1	1%
2017	216	214	-2	-1%	49	50	1	2%
2018	216	212	-3	-2%	49	51	2	4%
2019-2023	216	211	-4	-2%	49	52	3	6%
2024-205	216	210	-6	-3%	49	53	4	8%
2026-2028	216	202	-13	-6%	49	54	5	10%

Fuente: El Autor

Para el tramo del río Tucuy incluido dentro del modelo de la mina Calenturitas, las simulaciones en estado transitorio arrojaron que la operación de la mina no genera ningún efecto en el caudal que el acuífero cuaternario entrega sobre el río Tucuy. Este río en el escenario base no tiene aportes desde el acuífero y durante todo el tiempo de operación minera esta condición se mantiene. En cuanto al aporte que el río hace hacia al acuífero,

disminuye en 1 l/s (aprox. 1%); sin embargo, esta reducción es muy poco significativa, comparada con el caudal total que es filtrado desde el río, de 136 l/s.

La Tabla 9 muestra el cálculo del impacto volumétrico para el río Tucuy durante todo el periodo de operación minera.

Tabla 9. Impacto de la operación minera en la mina Calenturitas sobre el río Tucuy

AÑO	Escenario Base	Escenario operación minera			Escenario Base	Escenario operación minera		
	Drenado desde el acuífero al río Tucuy (l/s)	Drenado desde el acuífero al río Tucuy (l/s)	IV	%IV	Filtración desde el río Tucuy al acuífero (l/s)	Filtración desde el río Tucuy al acuífero (l/s)	IV	%IV
2015	0	0	0	0%	137	136	0	0%
2016	0	0	0	0%	137	136	0	0%
2017	0	0	0	0%	137	136	0	0%
2018	0	0	0	0%	137	136	-1	0%
2019	0	0	0	0%	137	136	-1	-1%
2020	0	0	0	0%	137	136	-1	-1%
2021	0	0	0	0%	137	136	-1	-1%
2022	0	0	0	0%	137	136	-1	-1%
2023	0	0	0	0%	137	136	-1	-1%
2024	0	0	0	0%	137	135	-1	-1%
2025	0	0	0	0%	137	135	-1	-1%
2026	0	0	0	0%	137	136	-1	-1%
2027	0	0	0	0%	137	136	-1	-1%
2028	0	0	0	0%	137	136	-1	-1%
2029	0	0	0	0%	137	136	-1	-1%
2030	0	0	0	0%	137	136	-1	-1%
2031	0	0	0	0%	137	136	-1	-1%
2032	0	0	0	0%	137	136	-1	-1%

Fuente: El Autor

3.2. Río Sororia

El análisis de este río fue realizado con base en los resultados del modelo numérico de la mina PLJ. En las condiciones iniciales, el acuífero depósitos cuaternarios entrega al río

Sororia un caudal de 12 l/s, mientras que el río aporta al acuífero un caudal de 95 l/s. La operación minera genera que el acuífero deje de entregar al río un caudal de 2 l/s (17% del caudal entregado en el año base) y que el río deje aportar al acuífero también 2l/s (2% del caudal filtrado en el año base). Se presume que estos caudales perdidos hacen parte del agua que ingresa al tajo durante el corte realizado a los acuíferos por la minería.

Tabla 10. Impacto de la operación minera en la mina PLJ sobre el río Sororia

Año	Escenario Base		Escenario operación minera		Escenario Base		Escenario operación minera	
	Drenado desde el acuífero al río Sororia (l/s)	Drenado desde el acuífero al río Sororia (l/s)	IV	%IV	Filtración desde el río Sororia hacia el acuífero (l/s)	Filtración desde el río Sororia hacia el acuífero (l/s)	IV	%IV
2014	12	12	-1	-4%	95	94	-1	-1%
2015	12	10	-3	-22%	95	93	-2	-2%
2016	12	10	-2	-20%	95	94	-1	-1%
2017	12	10	-2	-20%	95	94	-2	-2%
2018	12	10	-2	-19%	95	93	-3	-3%
2019-2023	12	10	-3	-22%	95	93	-2	-2%
2024-2025	12	10	-3	-21%	95	93	-2	-2%
2026-2028	12	10	-2	-17%	95	94	-2	-2%

Fuente: El Autor

3.3. Río Platanal

Las simulaciones en estado transitorio realizadas para el modelo numérico de la mina Calenturitas permiten observar que la operación de la mina no genera ningún efecto importante sobre este río; al final del periodo de operación minera se produce un aumento en el caudal del 1%, es decir 1 L/s.

La Tabla 11 muestra el cálculo del impacto volumétrico para el río Platanal durante todo el periodo de operación minera.

Tabla 11. Impacto de la operación minera en la mina Calenturitas sobre el río Platanal

AÑO	Escenario Base		Escenario operación minera		Escenario Base		Escenario operación minera	
	Drenado desde el acuífero al río Platanal (l/s)	Drenado desde el acuífero al río Platanal (l/s)	IV	%IV	Filtración desde el río Platanal al acuífero (l/s)	Filtración desde el río Platanal al acuífero (l/s)	IV	%IV
2015	76	76	0	0%	57	57	0	0%

AÑO	Escenario Base	Escenario operación minera			Escenario Base	Escenario operación minera		
	Drenado desde el acuífero al río Platanal (l/s)	Drenado desde el acuífero al río Platanal (l/s)	IV	%IV	Filtración desde el río Platanal al acuífero (l/s)	Filtración desde el río Platanal al acuífero (l/s)	IV	%IV
2016	76	76	0	0%	57	57	0	0%
2017	76	76	0	0%	57	57	0	0%
2018	76	76	0	0%	57	57	0	0%
2019	76	76	0	0%	57	57	0	0%
2020	76	76	0	0%	57	57	0	0%
2021	76	76	0	0%	57	57	0	0%
2022	76	76	0	0%	57	57	0	0%
2023	76	76	0	0%	57	57	0	0%
2024	76	76	0	0%	57	57	0	0%
2025	76	76	0	0%	57	57	0	0%
2026	76	76	0	0%	57	57	0	0%
2027	76	77	0	1%	57	57	0	0%
2028	76	77	0	1%	57	57	0	0%
2029	76	77	1	1%	57	57	0	0%
2030	76	77	1	1%	57	57	0	0%
2031	76	77	1	1%	57	57	0	0%
2032	76	77	1	1%	57	57	0	0%

Fuente: El Autor

3.4. Río Maracas

Las simulaciones en estado transitorio del modelo numérico desarrollado para la mina Calenturitas mostraron que la operación de la mina no genera ningún efecto sobre el aporte de agua que el acuífero entrega a este río; el escenario base muestra que el tramo simulado de este río no tiene aportes del acuífero depósitos cuaternarios y durante todo el tiempo de operación minera esta condición se mantiene. Sin embargo, el caudal que este río entrega al acuífero al final del periodo de operación disminuye en 2 l/s (2% de disminución del caudal que se infiltra en condiciones naturales).

La Tabla 12 muestra el cálculo del impacto volumétrico para el río Maracas durante todo el periodo de operación minera.

Tabla 12. Impacto de la operación minera en la mina Calenturitas sobre el río Maracas

AÑO	Escenario Base	Escenario operación minera			Escenario Base	Escenario operación minera		
	Drenado desde el acuífero al río Maracas (l/s)	Drenado desde el acuífero al río Maracas (l/s)	IV	%IV	Filtración desde el río Maracas al acuífero (l/s)	Filtración desde el río Maracas al acuífero (l/s)	IV	%IV
2015	0	0	0	0%	95	95	0	0%
2016	0	0	0	0%	95	95	-1	-1%
2017	0	0	0	0%	96	94	-1	-1%
2018	0	0	0	0%	96	94	-1	-2%
2019	0	0	0	0%	96	94	-2	-2%
2020	0	0	0	0%	96	94	-2	-2%
2021	0	0	0	0%	96	94	-2	-2%
2022	0	0	0	0%	96	94	-2	-2%
2023	0	0	0	0%	96	94	-2	-2%
2024	0	0	0	0%	96	94	-2	-2%
2025	0	0	0	0%	96	94	-2	-2%
2026	0	0	0	0%	96	94	-2	-2%
2027	0	0	0	0%	96	94	-2	-2%
2028	0	0	0	0%	96	94	-2	-2%
2029	0	0	0	0%	96	94	-2	-2%
2030	0	0	0	0%	96	94	-2	-2%
2031	0	0	0	0%	96	94	-2	-2%
2032	0	0	0	0%	96	94	-2	-2%

Fuente: El Autor

3.5. Río Calenturitas

Las simulaciones en estado transitorio del modelo desarrollado para la mina Calenturitas mostraron que la operación minera genera un aumento en el caudal que el acuífero depósitos cuaternarios entrega al río Calenturitas de 2 L/s para el final del periodo de operación, que representa el de incremento 51% en el caudal que el acuífero entrega al río, comparado con las condiciones base (año 2016); así mismo, el caudal filtrado desde el río hacia el acuífero aumenta significativamente (en un 86%). Estos aumentos tanto en el caudal drenado como en el filtrado pueden ocasionarse por al aumento de la recarga desde las zonas de retollenado, que es controlada por la interacción entre el río y el acuífero.

La Tabla 13 muestra los resultados del cálculo del impacto volumétrico para el río Calenturitas.

Tabla 13. Impacto de la operación minera en la mina Calenturitas sobre el río Calenturitas

AÑO	Escenario Base	Escenario operación minera			Escenario Base	Escenario operación minera		
	Drenado desde el acuífero al río Calenturitas (l/s)	Drenado desde el acuífero al río Calenturitas (l/s)	IV	%IV	Filtración desde el río Calenturitas al acuífero (l/s)	Filtración desde el río Calenturitas al acuífero (l/s)	IV	%IV
2015	4	5	1	30%	19	17	-2	-13%
2016	4	5	1	28%	19	17	-2	-12%
2017	4	4	1	24%	18	18	0	0%
2018	3	4	1	23%	17	18	1	5%
2019	3	4	1	22%	17	19	2	11%
2020	3	4	1	22%	17	21	4	22%
2021	3	4	1	24%	17	27	9	53%
2022	3	4	1	27%	17	27	9	54%
2023	3	4	1	30%	17	27	9	54%
2024	3	4	1	31%	17	29	11	65%
2025	3	5	1	33%	17	29	12	67%
2026	3	5	1	35%	17	29	12	67%
2027	3	5	1	38%	17	29	12	68%
2028	3	5	1	40%	17	30	12	69%
2029	3	5	1	43%	17	30	12	71%
2030	3	5	2	44%	17	31	13	76%
2031	3	5	2	47%	17	32	14	81%
2032	3	5	2	51%	17	33	15	86%

Fuente: El Autor

3.6. Otros ríos

Dentro de esta categoría de “otros ríos” se agruparon los ríos más pequeños modelados dentro del modelo numérico de la mina Calenturitas. El escenario base muestra que el aporte que el acuífero depósitos cuaternarios hace hacia estos ríos es de 15 L/s. La operación minera genera una reducción en este caudal de 2 L/s, lo cual representa un 23% del caudal que entrega el acuífero al río durante el año base. Por el contrario, el caudal que

este río aporta al acuífero para el final del periodo de operación presenta un aumento de 3 l/s (27% del caudal en condiciones base).

La Tabla 14 muestra el cálculo del impacto volumétrico para estos ríos.

Tabla 14. Impacto de la operación minera en la mina Calenturitas sobre otros ríos

AÑO	Escenario Base	Escenario operación minera		Escenario Base	Escenario operación minera			
	Drenado desde el acuífero a otros ríos (l/s)	Drenado desde el acuífero a otros ríos (l/s)	IV	%IV	Filtración desde otros ríos al acuífero (l/s)	Filtración desde otros ríos al acuífero (l/s)	IV	%IV
2015	15	15	0	0%	10	10	0	0%
2016	16	16	0	0%	10	10	0	0%
2017	16	16	0	0%	10	10	0	0%
2018	16	16	0	-1%	10	10	0	0%
2019	16	16	-1	-4%	10	10	0	1%
2020	16	15	-1	-7%	10	10	0	1%
2021	16	15	-2	-10%	10	10	0	1%
2022	16	14	-2	-13%	10	10	0	2%
2023	16	14	-3	-16%	10	10	0	2%
2024	16	13	-4	-22%	10	11	0	3%
2025	16	13	-4	-22%	10	11	1	5%
2026	16	13	-4	-22%	10	11	1	8%
2027	16	13	-4	-22%	10	11	1	11%
2028	16	13	-4	-22%	10	12	1	15%
2029	16	13	-4	-22%	10	12	2	18%
2030	16	13	-4	-22%	10	12	2	21%
2031	16	13	-4	-22%	10	13	3	25%
2032	16	13	-4	-23%	10	13	3	27%

Fuente: El Autor

4. Variaciones en el régimen de la recarga

El cálculo del volumen de recarga perdido en régimen natural para las áreas que serán removidas producto de la actividad minera arrojó los resultados presentados en la Tabla 15.

Tabla 15. Cálculo del volumen de recarga perdido por la remoción del área por actividad minera

Unidad	Área (m ²)	Recarga (mm/año)	Volumen de recarga (lts)	Volumen de recarga (m ³)
Aluviales	8526764	1	8526764	8527
Fm Cuervos Medio	7079401	1	3539701	3540
Fm Cuesta	2583098	1	2583098	2583
TOTAL VOLUMEN DE RECARGA PERDIDA			14649562	14650

Fuente: El Autor

En total, la recarga en régimen natural perdida es de 14.650 m³ al finalizar las actividades mineras.

Por otro lado, en las áreas de retrolenado el cálculo de volumen de recarga se presenta en la Tabla 16.

Tabla 16. Cálculo del volumen de recarga ganado por la presencia de las áreas de retrolenado

Unidad	Área (m ²)	Recarga (mm/año)	Volumen de recarga (lts)	Volumen de recarga (m ³)
Zonas de retrolenado	32220826	54	1739924594	1739925

Fuente: El Autor

Las áreas de retrolenado generan una recarga de 1.739.925 m³.

Conforme a los volúmenes calculados, la presencia de las áreas de retrolenado favorece la infiltración de aguas que llegarían a constituirse en recarga de los acuíferos subyacentes a estas. En términos absolutos, es decir, calculando la diferencia entre el volumen de recarga favorecida por las zonas de retrolenado y el volumen de recarga perdido por la remoción de material por la minería, la recarga aumenta en 1.725.275 m³, es decir, aproximadamente 119 veces más que la recarga producida en régimen natural. Cabe aclarar que este cálculo realizado constituye una recarga potencial de los acuíferos, pero la recarga real está limitada por la conductividad hidráulica de cada acuífero subyacente.

Conclusiones

- En el área de estudio sobre el basamento ígneo - metamórfico se encuentran depositadas rocas del Triásico - Jurásico representadas por la Formación La Quinta. Afloran las formaciones cretácicas de Río Negro, Lagunitas, Aguas Blancas, La Luna y Molino. El Paleógeno y el Neógeno están representados por las formaciones Los Cuervos, Barco, Mirador y Cuesta; también aparecen depósitos cuaternarios no consolidados de carácter reciente como son los cuaternarios de llanura y de terrazas.
- El área es cruzada por estructuras geológicas de tipo regional como son las fallas de Arenas Blancas y de Perijá. La principal característica de las estructuras es que conforman una serie de sinclinales y anticlinales con dirección NE-SW, las cuales forman un gran sinclinorio elongado con dirección N35°E, separadas por fallas inversas y anticlinales deformados, comprimidos y alargados, con igual tendencia regional, como producto de una fuerte compresión con sentido SE-NW.
- El sistema hidrogeológico ostenta, en general, acuíferos con productividades entre muy bajas a medias. Los acuíferos de mayor importancia corresponden a los conformados por la Formación Cuesta y los depósitos cuaternarios, los cuales son aprovechados por parte de la población por medio de aljibes (principalmente) y pozos. Las demás unidades tienen productividades muy limitadas y no se consideran que sean importantes a nivel hidrogeológico.
- La dirección de flujo de las aguas subterráneas sigue principalmente el sentido de la topografía del área, donde los niveles piezométricos más elevados se encuentran al este y disminuyen hacia el oeste; sin embargo, la minería ha generado cambios en esta dirección, ocasionando que localmente los flujos cambien de sentido y se redirijan hacia los tajos, afectado de esta manera el sistema hidrogeológico.
- Prodeco ha invertido recursos en la realización de pruebas de bombeo y otros ensayos hidráulicos que han permitido conocer las principales características de las

unidades hidrogeológicas de importancia y de la Formación Cuervos, en la cual se encuentran los mantos de carbón explotados.

- Los modelos numéricos desarrollados hasta el momento para las minas Calenturitas y PLJ muestran que los caudales de agua ingresada a los tajos como producto del corte de las unidades hidrogeológicas son mucho más importantes en el área de Calenturitas que en PLJ ya que para la primera los caudales oscilan entre 281 y 995 l/s, mientras que en PLJ oscilan entre 12 y 30 l/s.
- La actividad minera de las minas PLJ y Calenturitas genera impactos sobre las aguas subterráneas. Se identificaron principalmente 4 componentes sobre los cuales la operación minera genera impactos, tanto positivos como negativos: niveles piezométricos, volumen de acuíferos cuaternarios, dinámica río – acuífero y recarga.
- El impacto generado en los niveles piezométricos fue cuantificado por medio de la medición de los abatimientos. Se encontró que la disminución de niveles hacia el sector de PLJ se localiza al interior del polígono concesionado para la actividad minera, alcanzando un máximo de 160 m; al norte del proyecto minero, se alcanzan abatimientos máximos de 2,4 m, pero sin salirse del polígono concesionado.
- En el área de la mina Calenturitas se observaron descensos en cada tajo, pero restringidos específicamente a su contorno. Al final del tiempo de explotación se alcanzan abatimientos del orden de 400 m hacia el Sector A (norte); en el Sector C (oeste) los abatimientos alcanzan los 265 m y hacia el Sector B (sur) se alcanzan los 250 m de abatimiento. Los descensos que ocasiona la actividad de Calenturitas alcanzan a extenderse fuera del polígono concesionado, alrededor de 115 m al sur oeste de la mina; estos descensos llegan los 5 m, sin embargo, debido a que en esta zona se encuentra aflorando la Formación Cuervos, se consideran poco significativos.
- El volumen de agua contenida en los acuíferos cuaternarios que se perderá durante los 14 años de minería es de 1.557.526,74 m³.

- Los efectos que la minería genera sobre la dinámica río-acuífero fueron contemplados en los ríos más importantes del área que corresponden al Tucuy, Sororia, Platanal, Maracas, Calenturitas y otros más pequeños que fueron modelados. Estos resultados muestran que en total el acuífero depósitos cuaternarios deja de entregar a los ríos aproximadamente 16 l/s, mientras que hace que la recarga que los ríos ejercen hacia el acuífero aumenta en aproximadamente 18 l/s.
- En cuanto a las variaciones en el régimen de recarga se observaron dos impactos, uno negativo, debido a la pérdida de recarga natural debido a la remoción de las unidades someras, y uno positivo, ocasionado por el posible aumento en la recarga producto de la presencia de las áreas de retrolenado, que al permanecer saturadas favorecen la infiltración de aguas hacia las unidades subyacentes.
- La recarga en régimen natural que se perdería por la pérdida de las unidades someras es de 14.650 m³ al finalizar las actividades mineras. Las áreas de retrolenado generan una recarga de 1.739.925 m³. En términos absolutos (diferencia entre el volumen de recarga favorecida por las zonas de retrolenado y el volumen de recarga perdido por la remoción de material por la minería) la recarga aumenta en 1.725.275 m³ (119 veces más que la recarga producida en régimen natural).

Bibliografía

- Antea Group. (2013). *Estudio Técnico. Respuesta al Auto No. 1327 del 3 de mayo de 2012, Modificado por el Auto No. 995 del 11 de abril de 2013 de la ANLA*. La Jagua. Operación Conjunta de CDJ, CMU y CET.
- Cáceres, H., Camacho, R., & Reyes, J. (1980). *The Geology of the Ranchería Basin*. Bogotá: Ecopetrol 19 th Field Conference.
- Castro Sánchez, E. (2009). *Aspectos geológicos y principales consideraciones de la evaluación ambiental estratégica - EAE - (diagnóstico ambiental) del Distrito Minero La Jagua, Departamento del Cesar*. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Recuperado en Abril de 2016, de <http://hdl.handle.net/123456789/7451>
- Consulcons. (2010). *Elaboración del modelo hidrogeológico y construcción de piezómetros en el sector norte del Tajo Tucuy*. Bogotá: Prodeco.
- CORPOCESAR - IDEAM. (2006). *Aprovechamiento y protección integral del agua subterránea en las ecorregiones de los valles de los ríos Cesar y Magdalena , departamento del Cesar*. Bogotá. Obtenido de <http://www.corpocesar.gov.co/files/Informe%20zona%20centro.pdf>
- Custodio Gimena, E., Llamas Madurga, M. R., & Sahuquillo Herráiz, A. (n.d). La investigación hidrogeológica española en el contexto mundial. En J. López - Geta, & J. Fornés Azcoiti, *10 Años de Hidrogeología en España, 1900 - 2000* (Vol. Capítulo II). Madrid, España: Instituto geológico y minero de España. Obtenido de <http://www.rac.es/ficheros/doc/00997.pdf>
- Gobierno de Chile. (2012). *GUÍA PARA EL USO DE MODELOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL SEIA. (ISBN: 978-956-9076-12-1)*, 108. (S. Servicio de Evaluación Ambiental, Ed.) Chile. Recuperado en Mayo de 2016, de

http://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/guias/Guia_uso_modelo_aguas_subterranas_seia.pdf

Hernández, M. (2003). *Memoria explicativa. Geología de la Plancha 48 La Jagua de Ibirico*. Bogotá: Ingeominas.

Hidrogeocol Ltda. (2009). *Asesoría hidrogeológica para el manejo de aguas subterráneas y superficiales en la mina La Jagua*. Carbones de la Jagua S.A.

IDEAM. (Julio de 2016). *Página web del IDEAM*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrogeologica>

Ingeominas. (1996). *Manejo de aguas en la minería, Mina piloto La Jagua (departamento del Cesar)*. Bogotá.

Ingeominas. (1997). *Geología del departamento del Cesar, Escala 1:100.00*. Bogotá.

Integral - Ingenieros Consultores. (2002). *MINA DE CARBÓN CALENTURITAS: Estudios Geotécnicos, Hidrogeológicos, Hidrológicos y de Manejo de Aguas*. Bogotá: Prodeco.

Rodríguez, C. (1995). *Estudio hidrogeológico. Pruebas de bombeo*. Bogotá: Carbones del Caribe.

SGL. (2008). *Actualización del modelo hidrogeológico matemático para el área de influencia del proyecto de explotación minera Calenturitas, dando cumplimiento a los requerimientos establecidos en el Auto 1805 del 6 de junio de 2008 emitido por el MAVDT*. Bogotá: SERVICIOS GEOLÓGICOS INTEGRADOS LTDA. Recuperado el 2016

SGL. (2008). *Modelo hidrogeológico conceptual para el complejo carbonífero Sinclinal de La Jagua*. Bogotá: SERVICIOS GEOLOGICOS INTEGRADOS Ltda.

Simco. (Abril de 2016). *Simco*. Obtenido de <http://www.simco.gov.co/>

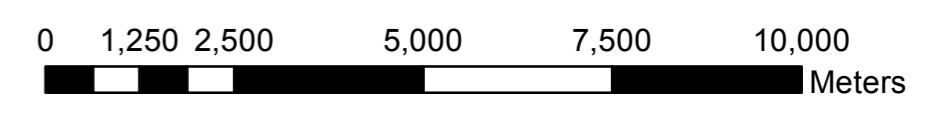
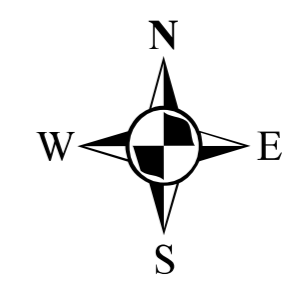
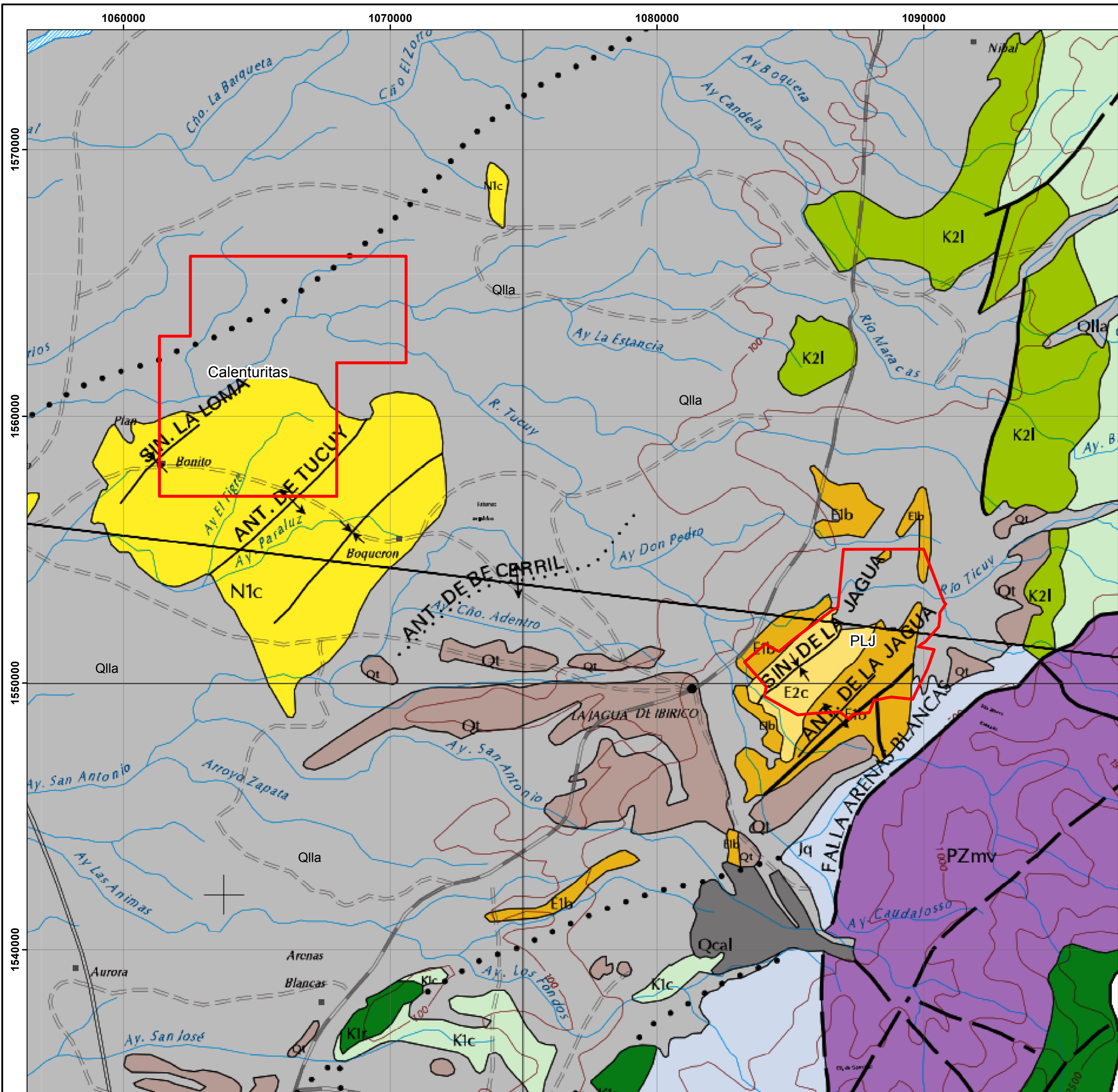
SWS. (2013). *Memorándum técnico "Análisis modelamiento presión de poros - mina La Jagua"*. Bogotá: Prodeco.

SWS. (2014). *Modelo Hidrogeológico Mina Calenturitas*. Bogotá: Prodeco.

SWS. (2016). *Modelamiento hidrogeológico operacional Mina Calenturitas*. Bogotá: Prodeco.

Tierra Minada. (s.f.). Obtenido de <https://sites.google.com/site/tierraminada/>

Vélez Otálvaro, M. V. (1999). *Hidráulica de Aguas Subterráneas*. Facultad de Minas. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.



LEYENDA

- Qlla** Llanuras aluviales
Arenas, limos, arcillas y gravas
- Qt** Terrazas
Bloques, cantos, gravas y arenas en matriz arcillosa
- N1c** Formación Cuesta
Cuarzo arenitas de grano medio a grueso color gris a blanco, con cantos de cuarzo ahumado
- E2c** Formación Cuervos
Arcillolitas de color negro, gris verdoso, micáceas con mantos de carbón
- E1b** Formación Barco
Areniscas de grano fino deleznales, algo arcillosas y micáceas. Se encuentran con bancos gruesos con delgadas intercalaciones de arcillolitas
- K21** Formación La Luna
Lutitas carbonosas, limolitas y arcillolitas, y calizas negras bituminosas
- K1c** Grupo Cogollo
Calizas grises azulosas oscuras con intercalaciones de lutitas carbonosas
- Jq** Formación La Quinta
Limolitas rojas silíceas, arenosas, macizas, de fractura coincidea. Intercalaciones de areniscas de grano fino
- PZmv** Unidad Metasedimentaria de La Virgen
Metarenitas grises, metalimolitas, filitas grises, metaconglomerados y metalodolitas grises

CONTACTOS Y FALLAS

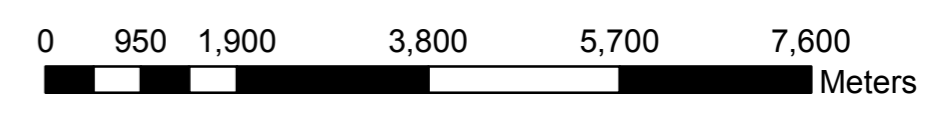
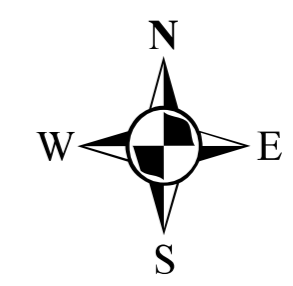
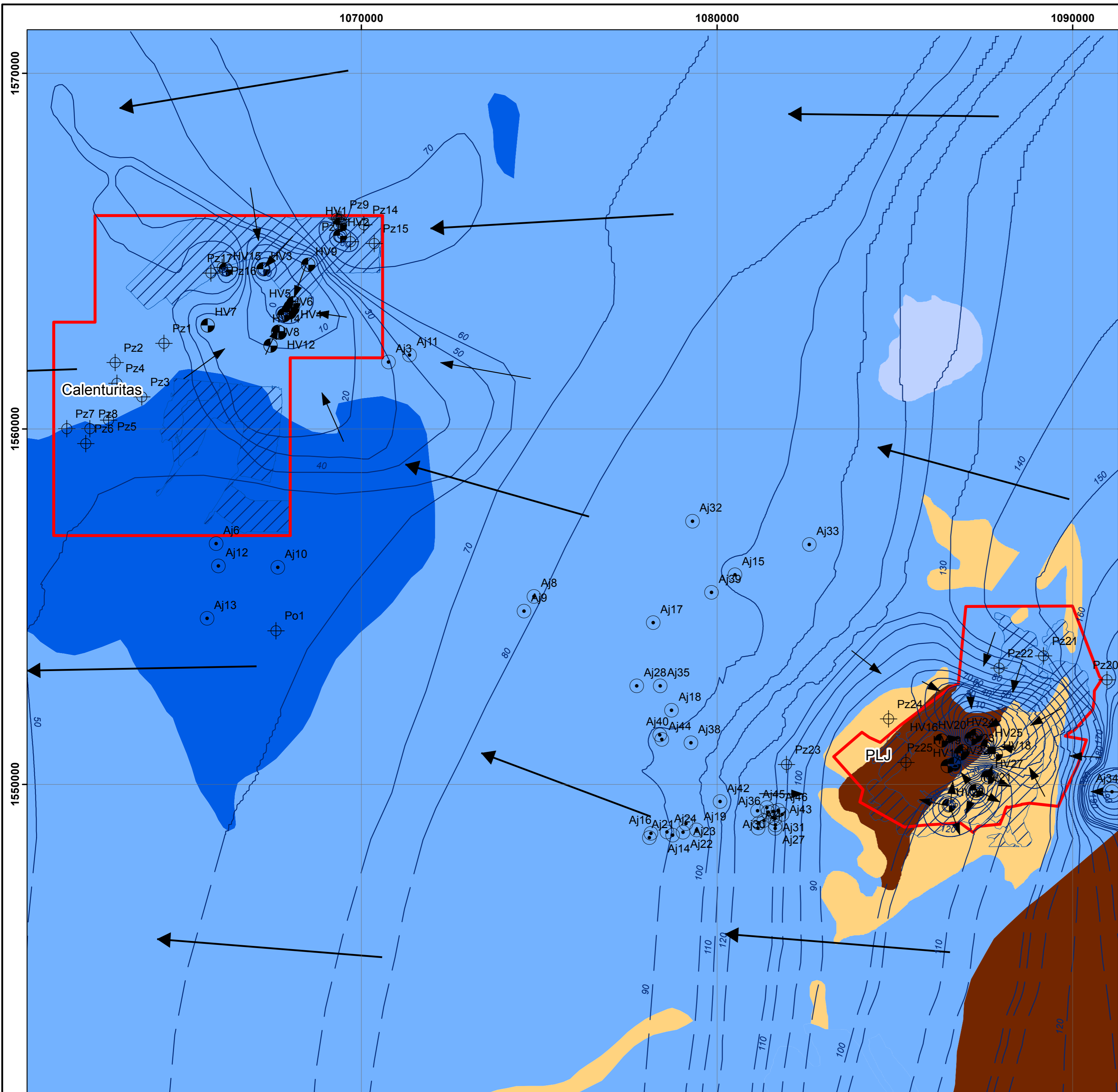
- Contacto definido
- Falla definida
- Falla inferida
- Falla cubierta
- Falla inversa o de cabalgamiento definida
- Sinclinal definido
- Anticinal definido
- Anticinal cubierto
- Polígonos minas

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

Elaboró:
Ing. Camila Nieto Clavijo
(Basada en Igeominas, 1997)

Revisó:
Geol. Emiro Robles

MAPA 1. GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO



LEYENDA		
SISTEMA ACUÍFERO	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS
A Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular		
Acuífero de mediana productividad. Capacidad específica entre 1 y 2	Acuífero continuo, de extensión regional, conformado por intercalaciones de cuarzoareniscas y conglomerados. Es un acuífero semiconfinado multicapa, con aguas aptas para el consumo doméstico.	UH I Formación Cuesta
Acuífero de muy baja a baja productividad. Capacidad específica entre 0.05 y 1	Acuífero discontinuo, de extensión local, conformado por intercalaciones de gravas, arenas y arcillas en proceso de consolidación. Es un acuífero de libre a semiconfinado, con aguas aptas para el consumo doméstico.	UH II Cuaternario llanura aluvial Terrazas
B Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas		
Acuífero de muy baja a baja productividad. Capacidad específica entre 0.05 a 1	Acuífero confinado discontinuo, de extensión local a regional, conformado por lutitas carbonosas, limolitas, arcillolitas, calizas y litoarenitas.	UH III Formación La Luna Grupo Cogollo Formación Quinta
C Rocas con limitados recursos de aguas subterráneas		
Acuitardo de muy baja productividad, capacidad específica menor a 0.05	Acuitardo de extensión regional, continuo, conformado por arcillolitas y areniscas de grano fino a muy fino	UH IV Formación Barco
Acuitardo - acuífugo de muy baja a nula productividad, capacidad específica menor a 0.05	Unidades de extensión regional, continuas, conformada por areniscas intercaladas con arcillolitas y mantos de carbón de la Formación Cuervos y rocas sedimentarias con bajo grado de metamorfismo, metarenitas, metalodolitas y metalimolitas de la Formación La Virgen. El agua contenida en esta unidad se considera de baja calidad	UH V Formación Cuervos Formación la Virgen
Inventario ● Ajibbe ⊕ Hilo vibrátil ⊕ Piezómetro abierto		Direcciones de flujo → Flujo Local → Flujo Regional □ Polígonos minas ▨ Zonas de retrolenado
Piezometría — Isopiezas medidas - - Isopiezas Inferidas		Elaboró: Ing. Camila Nieto Clavijo (con base en información secundaria de Prodeco) Revisó: Geol. Emiro Robles

MAPA 2. HIDROGEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

**Anexo 1. Datos pruebas de bombeo realizadas en
el área de estudio**

ID	Nombre	Este	Norte	Unidad	Tipo Prueba	Transmisividad	Conductividad	S	Caudal PB	NE	ND	Abatimiento	Capacidad específica
		m	m			(m ² /d)	(m/d)		l/s	m	m	m	l/s/m
1	Pozo Finca Si Nos Dejan	1089695	1554251	Aluvial	Bombeo	1.69E+02	1.21E+01	7.08E-02					
2	Pozo Finca Si Nos Dejan	1089695	1554251	Aluvial	Recuperación	1.61E+02	1.15E+01						
3	Pozo Finc Los Cocos	1088766	1554470	Aluvial	Bombeo	3.73E+02	3.39E+00	7.32E-04					
4	Pozo Finc Los Cocos	1088766	1554470	Aluvial	Recuperación	4.07E+01	3.70E+00						
5	Pozo Villa Faida	1088128	1558516	Aluvial	Bombeo	4.20E+00	5.25E+01	7.34E-03					
6	Pozo Villa Faida	1088128	1558516	Aluvial	Recuperación	4.47E+00	5.58E-01						
7	Aljibe Finca El Encanto	1082628	1545186	Aluvial	Bombeo	1.35E+01	1.13E+00	6.51E-02					
8	Aljibe Finca El Encanto	1082628	1545186	Aluvial	Recuperación	1.30E+01	1.18E+00						
9	Aljibe Finca La Cabaña	1079850	1555397	Aluvial	Bombeo	1.90E+01	6.02E-02	5.50E-02					
10	Aljibe Finca La Cabaña	1079850	1555397	Aluvial	Recuperación	1.89E+01	5.99E-02						
11	Aljibe Finca Los Mangos	1078724	1552083	Aluvial	Bombeo	1.19E+01	9.54E-02	1.35E-01					
12	Aljibe Finca Los Mangos	1078724	1552083	Aluvial	Recuperación	1.24E+01	9.91E-02						
13	Aljibe Andrés Vergara	1081257	1549412	Aluvial	Bombeo	1.71E+01	4.88E-01	1.11E-01					
14	Aljibe Andrés Vergara	1081257	1549412	Aluvial	Recuperación	1.76E+01	5.02E-01						
15	Aljibe Municipio - Finca Toscana	1081177	1548920	Aluvial	Bombeo	4.29E+01	1.71E+01	1.01E-01					
16	Aljibe Municipio - Finca Toscana	1081177	1548920	Aluvial	Recuperación	4.15E+01	1.66E+00						
17	Aljibe Finca Las Pavitas	1087389	1551393	Aluvial	Bombeo	1.49E+01	9.92E-01	7.86E-02					
18	Aljibe Finca Las Pavitas	1087389	1551393	Aluvial	Recuperación	1.98E+01	1.32E+00						
19	Aljibe Finca Compañía	1083437	1550789	Aluvial	Bombeo	9.94E+00	1.10E+00	3.24E-02					
20	Aljibe Finca Compañía	1083437	1550789	Aluvial	Recuperación	1.31E+01	1.46E+00						
21	Pozo Mina	1089014	1553443	Aluvial	Bombeo	2.06E+00	1.47E-01	2.18E-03					
22	Pozo Mina	1089014	1553443	Aluvial	Recuperación	2.52E+00	1.80E-01						
23	Pozo de observación 1	1088391	15511171	Aluvial	Bombeo	5.25E+00	3.35E-01	4.36E-03					
24	Pozo de observación 1	1088391	15511171	Aluvial	Recuperación	7.80E-01							
25	Pozo de observación 2	1088270	1551320	Aluvial	Bombeo	8.37E+00	9.30E-01	1.97E-03					
26	Pozo de observación 3	1088214	1551200	Aluvial	Bombeo	5.70E+00	6.30E-01	1.07E-03					
27	JR5030	1089015.59	1553425.2	Aluvial	Bombeo	8.65E-01			0.37			5.33	0.07
28	JR5030	1089015.59	1553425.2	Aluvial	Recuperación	1.04E-05							
29	jr5030 pb1(2)	1089015.59	1553425.2	Aluvial	Bombeo	3.08E-01	2.67E-02		0.64	18.54	41.26	22.72	0.03
30	JR5031	1089235.28	1553390.94	Mantos	Bombeo	1.68E-05			1.02			45.16	0.02

ID	Nombre	Este	Norte	Unidad	Tipo Prueba	Transmisividad	Conductividad	S	Caudal PB	NE	ND	Abatimiento	Capacidad específica
		m	m			(m ² /d)	(m/d)		l/s	m	m	m	l/s/m
31	JR5031	1089235.28	1553390.94	Mantos	Recuperación	6.24E-06							
32	Manto 28-30	1089019	1553451	Mantos	Observación	9.35E+00	4.29E-03	3.05E-03					
33	Manto 28-30	1089019	1553451	Mantos	Slug		4.39E-02						
34	Manto 35-40	1089197	1553355	Mantos	Observación	9.84E-04	1.61E-05	4.35E-04					
35	Piezómetro M45			Mantos	Observación	7.97E+01	1.67E-01	2.06E-04					
36	Piezómetro M46			Mantos	Slug		7.80E-01						
37	Manto 35-40	1089197	1553355	Mantos	Slug	3.08E-03	1.61E-05	1.50E-04					
38	Piezómetro # 6	1089035	1553518	Aluvial	Slug		4.10E-02						
39	Piezómetro # 13	1089035	1553518	Aluvial	Slug		1.02E-01						
40	Piezómetro # 8	1089262	1553375	Aluvial	Slug		9.85E-02						
41	Piezómetro # 17	1089215	1553403	Aluvial	Slug		7.39E-03						
42	Multipiezómetro #1	1089021	1553452	Mantos	Slug		4.39E-02						
43	Multipiezómetro #1	1089021	1553452	Mantos	Slug		1.69E-01						
44	Multipiezómetro #1	1089021	1553452	Mantos	Slug		3.16E-01						
45	Multipiezómetro #1	1089021	1553452	Mantos	Slug		7.80E-01						
46	Multipiezómetro #2	1089197	1553355	Mantos	Slug		5.68E-01						
47	JC4057A	1086662	1550574	IB Arcillolitas	LeFranc		8.04E-03						
48	JC4059	1087279	1551371	IB Arcillolitas	Lugeon		4.64E-02						
49	JC4056	1087156	1551291	IB Arcillolitas	Lugeon		4.71E-03						
50	JC4055C	1086857	1550871	IB Arcillolitas	Lefranc		1.47E-05						
51	JC4057A	1086662	1550574	IB Arcillolitas	Lugeon		1.04E-05						
52	JC4057A	1086662	1550574	IB Arcillolitas	LeFranc		1.38E-01						
53	JC4056	1087156	1551291	IB Arcillolitas	Lugeon		5.70E-02						
54	JC4055C	1086857	1550871	IB Arcillolitas	Lefranc		7.86E-02						
55	JC4057A	1086662	1550574	IB Arcillolitas	Lugeon		4.15E-02						
56	JC4057A	1086662	1550574	IB Arcillolitas	Lugeon		1.12E-03						
57	JC4055C	1086857	1550871	IB Arcillolitas	Lugeon		3.02E-04						
58	JC4057A	1086662	1550574	IB Arcillolitas	LeFranc		6.13E-03						
59	JC4055C	1086857	1550871	IB Arcillolitas	Lefranc		2.51E-02						
60	JC4057A	1086662	1550574	IB Arcillolitas	Lugeon		1.38E-03						

ID	Nombre	Este	Norte	Unidad	Tipo Prueba	Transmisividad	Conductividad	S	Caudal PB	NE	ND	Abatimiento	Capacidad especifica
		m	m			(m ² /d)	(m/d)		l/s	m	m	m	l/s/m
61	JC4055C	1086857	1550871	IB Arcillolitas	Lugeon		2.51E-03						
62	JC4055C	1086857	1550871	IB Areniscas	Lugeon		3.80E+00						
63	JC4055C	1086857	1550871	IB Areniscas	Lefranc		3.54E-01						
64	JC4055C	1086857	1550871	IB Areniscas	Lefranc		7.34E-04						
65	JC4055C	1086857	1550871	IB Areniscas	Lefranc		1.04E-01						
66	JC4056	1087156	1551291	IB Areniscas	Lugeon		2.37E-01						
67	JC4056	1087156	1551291	IB Areniscas	Lugeon		3.48E-02						
68	JC4056	1087156	1551291	IB Areniscas	Lugeon		4.70E-01						
69	JC4057A	1086662	1550574	IB Areniscas	Lugeon		9.50E-05						
70	JC4057A	1086662	1550574	IB Areniscas	LeFranc		4.23E-04						
71	JC4057A	1086662	1550574	IB Areniscas	Lugeon		1.73E-02						
72	JC4057A	1086662	1550574	IB Areniscas	Lugeon		7.52E-05						
73	JC4057A	1086662	1550574	IB Areniscas	LeFranc		4.41E-02						
74	JC4057A	1086662	1550574	IB Areniscas	Lugeon		5.62E-05						
75	JC4057A	1086662	1550574	IB Areniscas	LeFranc		1.21E-01						
76	JC4057A	1086662	1550574	IB Areniscas	LeFranc		3.02E-02						
77	JC4057A	1086662	1550574	IB Areniscas	LeFranc		2.33E-01						
78	JC4055C	1086857	1550871	Mantos	Lugeon		6.77E-04						
79	JC4055C	1086857	1550871	Mantos	Lugeon		2.29E-01						
80	JC4055C	1086857	1550871	Mantos	Lefranc		3.89E-02						
81	JC4055C	1086857	1550871	Mantos	Lefranc		3.11E-02						
82	JC4055C	1086857	1550871	Mantos	Lefranc		1.99E-01						
83	JC4055C	1086857	1550871	Mantos	Lefranc		8.04E-02						
84	JC4055C	1086857	1550871	Mantos	Lefranc		4.23E-02						
85	JC4055C	1086857	1550871	Mantos	Lefranc		8.64E-02						
86	JC4056	1087156	1551291	Mantos	Lefranc		2.42E-03						
87	JC4056	1087156	1551291	Mantos	Lefranc		1.02E-01						
88	JC4056	1087156	1551291	Mantos	Lefranc		4.99E-02						
89	JC4056	1087156	1551291	Mantos	Lefranc		1.18E-01						
90	JC4057A	1086662	1550574	Mantos	Lugeon		2.76E-02						

ID	Nombre	Este	Norte	Unidad	Tipo Prueba	Transmisividad	Conductividad	S	Caudal PB	NE	ND	Abatimiento	Capacidad especifica
		m	m			(m ² /d)	(m/d)		l/s	m	m	m	l/s/m
91	JC4057A	1086662	1550574	Mantos	Lugeon		4.23E-02						
92	JR-5219	1087285	1549830	Mantos	Lefranc		4.91E-01						
93	JC4057A	1086662	1550574	Mantos	Lugeon		2.59E-02						
94	JC4057A	1086662	1550574	Mantos	Lugeon		2.76E-03						
95	JC4057A	1086662	1550574	Mantos	LeFranc		3.20E-03						
96	JC4059	1087279	1551371	Mantos	Lugeon		2.76E-03						
97	JC4059	1087279	1551371	Mantos	Lugeon		3.20E-03						
98	PHB 01	1064448	1562402	Aluvial	Lefranc variable	8.19E-03	8.19E-03						
99	PHB 04	1063830	1560899	Aluvial	Lefranc Constante	2.80E+00	2.98E+00						
100	PHB 04	1063830	1560899	Aluvial	Lefranc Variable	1.18E-01	1.18E-01						
101	PHB 04	1063830	1560899	Aluvial	Lefranc Constante	9.71E-01	9.24E-01						
102	PHB 04	1063830	1560899	Aluvial	Lefranc Variable	4.52E-02	4.30E-02						
103	PHB 05	1063130	1561277	Aluvial	Lefranc constante	3.50E+02	2.06E+02						
104	El Boquerón	1071801	1556745	Fm. Cuesta	Bombeo	8.56E+01	2.04E+00		10.00	3.02	8.15	5.13	1.95
105	El Boquerón	1071801	1556745	Fm. Cuesta	Recuperación	6.92E+01	1.65E+00						
106	El Florito	1058765	1560905	Fm. Cuesta	Bombeo	5.06E+01	4.02E+00		9.90	3.41	10.54	7.13	1.39
107	El Florito	1058765	1560905	Fm. Cuesta	Recuperación	3.51E+01	2.79E+01						
108	Corral Grande	1055147	1552448	Fm. Cuesta	Bombeo				11.60	2.21	3.80	1.59	7.30
109	PHB-06	1062891	1560243	Fm. Cuesta		6.68E-01	7.34E-02						
110	PHB-06	1062891	1560243	Fm. Cuesta		2.66E-01	6.65E-02						
111	PHB-06	1062891	1560243	Fm. Cuesta		7.13E-02	9.50E-03						
112	PHB-07	1062252	1559583	Fm. Cuesta		1.13E-03	7.52E-04						
113	PHB-07	1062252	1559583	Fm. Cuesta		1.40E-03	4.99E-05						
114	PHB-07	1062252	1559583	Fm. Cuesta		1.24E-02	6.18E-03						
115	PHB-09	1062364	1560003	Fm. Cuesta		1.74E+00	4.23E-01						
116	PHB-09	1062364	1560003	Fm. Cuesta		8.81E-01	1.47E-01						
117	PHB-09	1062364	1560003	Fm. Cuesta		8.81E-01	1.47E-01						
118	PHB-09	1062364	1560003	Fm. Cuesta		3.53E-01	6.91E-02						
119	PHB-09	1062364	1560003	Fm. Cuesta		4.75E-01	9.50E-02						
120	PHB 01	1064448	1562402	Mantos	Lugeon Doble	5.18E-01	1.73E-01						

ID	Nombre	Este	Norte	Unidad	Tipo Prueba	Transmisividad	Conductividad	S	Caudal PB	NE	ND	Abatimiento	Capacidad especifica
		m	m			(m ² /d)	(m/d)		l/s	m	m	m	l/s/m
121	PHB 01	1064448	1562402	IB Arcillolitas	Lugeon Simple	8.64E-02	8.64E-03						
122	PHB 05	1063130	1561277	IB Arcillolitas	Lugeon Simple	4.20E-01	5.18E-02						
123	PHB 05	1063130	1561277	Suelo	Lefranc constante	5.51E+02	4.24E+02						
124	X1	1067250	1554088	Suelo	Infiltración		6.90E-01						
125	X2	1062439	1556646	Suelo	Infiltración		3.19E-01						
126	Finca La Esperanza	1057004	1568977	Suelo	Infiltración		2.99E-01						
127	Vereda El Prado	1068572	1557394	Suelo	Infiltración		2.19E-01						
128	X3	1067250	1554088	Suelo	Infiltración		2.05E-01						
129	PHB 01	1064448	1562402	Aluvial	Lefranc variable	8.19E-03	8.19E-03						
130	PHB 04	1063830	1560899	Aluvial	Lefranc Constante	2.80E+00	2.98E+00						
131	PHB 04	1063830	1560899	Aluvial	Lefranc Variable	1.18E-01	1.18E-01						
132	PHB 04	1063830	1560899	Aluvial	Lefranc Constante	9.71E-01	9.24E-01						
133	PHB 04	1063830	1560899	Aluvial	Lefranc Variable	4.52E-02	4.30E-02						
134	PHB 05	1063130	1561277	Aluvial	Lefranc constante	3.50E+02	2.06E+02						
135	PHB-06	1062891	1560243	Fm. Cuesta		6.68E-01	7.34E-02						
136	PHB-06	1062891	1560243	Fm. Cuesta		2.66E-01	6.65E-02						
137	PHB-06	1062891	1560243	Fm. Cuesta		7.13E-02	9.50E-03						
138	PHB-07	1062252	1559583	Fm. Cuesta		1.13E-03	7.52E-04						
139	PHB-07	1062252	1559583	Fm. Cuesta		1.40E-03	4.99E-05						
140	PHB-07	1062252	1559583	Fm. Cuesta		1.24E-02	6.18E-03						
141	PHB-09	1062364	1560003	Fm. Cuesta		1.74E+00	4.23E-01						
142	PHB-09	1062364	1560003	Fm. Cuesta		8.81E-01	1.47E-01						
143	PHB-09	1062364	1560003	Fm. Cuesta		8.81E-01	1.47E-01						
144	PHB-09	1062364	1560003	Fm. Cuesta		3.53E-01	6.91E-02						
145	PHB-09	1062364	1560003	Fm. Cuesta		4.75E-01	9.50E-02						
146	PHB 01	1064448	1562402	Mantos	Lugeon Doble	5.18E-01	1.73E-01						
147	PHB 01	1064448	1562402	IB Areniscas	Lugeon Simple	8.64E-02	8.64E-03						
148	PHB 05	1063130	1561277	IB Arcillolitas	Lugeon Simple	4.20E-01	5.18E-02						
149	PHB 03	1063080	1561868	IB Areniscas		5.29E-01	1.04E-01						
150	PHB 03	1063080	1561868	Mantos		1.62E-02	4.06E-03						

ID	Nombre	Este	Norte	Unidad	Tipo Prueba	Transmisividad	Conductividad	S	Caudal PB	NE	ND	Abatimiento	Capacidad específica
		m	m			(m ² /d)	(m/d)		l/s	m	m	m	l/s/m
151	PHB 03	1063080	1561868	IB Areniscas		6.92E-04	1.54E-04						
152	PHB 08	1061720	1560002	IB Arcillolitas		3.69E-02	4.92E-03						
153	Pozo Principal	1089089	1553444	Aluvial	Bombeo	5.20E+01	3.34E+00	2.00E-02					
154	Pozo Principal	1089089	1553444	Aluvial	Recuperación	8.20E+00	3.50E-01						
155	Pozo Principal	1089089	1553444	Aluvial	Infiltración Gil-Gavard		2.95E+00						
156	P2	1089081	1553451	Aluvial	Infiltración Gil-Gavard		7.00E-01						
157	P3	1089005	1553452	Aluvial	Infiltración Gil-Gavard		3.10E+00						
158	P4	1089088	1553455	Aluvial	Infiltración Gil-Gavard		9.30E+00						
159	J191H	1087705.171	1553684.752	Aluvial	Infiltración Gil-Gavard		2.60E-01						
160	J192H	1088633.579	1553838.214	Aluvial	Infiltración Gil-Gavard		4.00E-02						
161	J193H	1090535.333	1553363.814	Aluvial	Infiltración Gil-Gavard		6.12E+00						
162	J195H	1089822.014	1552829.765	Aluvial	Infiltración Gil-Gavard		1.30E-01						
163	J198H	1089395.41	1553358.66	Aluvial	Infiltración Gil-Gavard		2.00E-01						
164	PO-Danies	1086162.302	1554149.973	Aluvial	Infiltración Gil-Gavard		3.72E+00						
165	PO-02 (M3)	1087241.352	1551676.929	Mantos	Infiltración Gil-Gavard		9.00E-02						
166	PO-02 (M5)	1087241.353	1551676.929	Mantos	Infiltración Gil-Gavard		2.50E-01						
167	PO-02 (M10)	1087241.354	1551676.929	Mantos	Infiltración Gil-Gavard		3.92E-01						
168	PO-02 (M15)	1087241.355	1551676.929	Mantos	Infiltración Gil-Gavard		1.22E-01						
169	Pozo Bombeo Fumarola	1088293	1551437	IB Arcillolitas	Bombeo	2.28E+00	2.25E-01		0.57	1.38	13.33	11.95	0.05
170	PZHV5	1088313	1551431	IB Arcillolitas	Observación	5.25E+00	2.20E-02						
171	PZHV6	1088298	1551448	IB Arcillolitas	Observación	8.37E+00	3.50E-02						
172	PZHV7	1088290	1551431	IB Arcillolitas	Observación	5.70E+00	2.40E-02						
173	Rod1	1087241	1551676	Aluvial	Bombeo	5.38E+00		2.00E-02	2.40	1.95	12.59	10.64	0.23
174	Rod2 M2	1087241	1551676	Mantos	Bombeo	1.33E+01	5.62E+00	6.44E-03	1.20	24.22	26.52	2.30	0.52
175	Rod2 M3	1087241	1551676	Mantos	Bombeo	1.46E+01	1.09E+01	3.03E-03	1.20	24.30	26.53	2.23	0.54
176	Rod2 M5	1087241	1551676	Mantos	Bombeo	5.45E+00	2.57E+00	1.31E-03	1.20	60.24	65.22	4.98	0.24
177	Tucuy			Fm. Cuesta	Bombeo	4.68E+00	5.51E+00		0.91			5.65	0.16
178	PZ 29			Fm. Cuesta	Observación	2.06E+01	2.30E+01						
179	PZ 28			Fm. Cuesta	Observación	7.19E+01	4.64E+01						
180	PB ingeominas	1087241	1551676	Mantos	Bombeo	5.20E+01	5.60E+00	2.00E-02					

ID	Nombre	Este	Norte	Unidad	Tipo Prueba	Transmisividad	Conductividad	S	Caudal PB	NE	ND	Abatimiento	Capacidad específica
		m	m			(m ² /d)	(m/d)		l/s	m	m	m	l/s/m
181	Ing M5	1087241	1551676	Mantos	Observación		2.50E-01	2.00E-03					
182	Ing M10	1087241	1551676	Mantos	Observación		3.90E-01	4.00E-02					
183	Ing M15	1087241	1551676	Mantos	Observación		1.20E-01						