

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela de Ingeniería Geológica-Geotecnia

**“MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO
EN MEDIOS KÁRSTICOS PARA LA PREDICCIÓN DEL DESAGÜE
DEL TAJO 01 ACUÍFERO YUMAGUAL – CAJAMARCA”**

TESIS

Presentada por:

BACH. JESÚS HUMBERTO MEJÍA RUEDA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO GEÓLOGO-GEOTÉCNICO

TACNA-PERÚ

2014

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia

**“MODELAMIENTO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO
EN MEDIOS KÁRSTICOS PARA LA PREDICCIÓN DEL DESAGÜE
DEL TAJO 01 ACUÍFERO YUMAGUAL – CAJAMARCA”**

Tesis sustentada y aprobada el día 30 de octubre del 2014, estando integrado el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE


.....
MSc. Conrado Bedoya Jaén

**1er. MIEMBRO
SECRETARIO**


.....
Ing. Pío Coila Valdez

2do. MIEMBRO


.....
Ing. Carmen Román Arce

ASESOR


.....
Ph. D. Edwin Pino Vargas

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradezco a mi alma Mater y a cada uno de los docentes que me impartieron sus conocimientos, para el inicio de mi vida profesional.

En el transcurso de mi vida profesional, muchas personas fueron de vital importancia en mi formación ingenieril y a través de esta investigación quiero agradecer a cada una de ellas por compartir conmigo sus experiencias, conocimientos y amistad.

DEDICATORIA

Este logro se lo dedico en primer lugar a Dios, que siempre iluminó mi camino profesional y personal, ofreciéndome las gracias de la oración y el discernimiento.

A mis padres y hermano que siempre fueron y son un ejemplo de dedicación y amor, ellos me educaron en grandes valores como es la responsabilidad, el respeto, la ética y la humildad.

A mi esposa que siempre está motivándome con su entusiasmo, perseverancia y ante todo su fe en Dios.

A mi hijo Santiago, que con sólo su existencia, me motiva día a día a seguir superándome en ser mejor persona, esposo, padre, hijo y profesional.

SUMMARY

This study helps to understand the hydraulic behavior of groundwater in karst media Yumagual (Cajamarca) formation.

To this end, many activities took place in the generation of information, such as the hydrogeological mapping, drilling of piezometers, the tracer test, the inventory of springs, hydraulic testing of evidence, among others.

All these variables were used to understand the behavior of groundwater in karst media and develop a conceptual model of the overall functioning of the aquifer.

Once understood the conceptual hydrogeological model, the hydrogeological numerical model, which was developed calibration, simulates the actual conditions of the aquifer and is an important tool for the prediction of scenarios that simulate all conditions of its environment.

RESUMEN

El presente estudio permite entender el comportamiento hidráulico del agua subterránea, en los medios kársticos de la formación Yumagual (Cajamarca).

Para este fin, se realizó múltiples actividades en la generación de información, tales como el mapeo hidrogeológico, la perforación de piezómetros, el ensayo de trazadores, el inventario de manantiales, el ensayo de pruebas hidráulicas, entre otros.

Todas estas variables, sirvieron para entender el comportamiento del agua subterránea en los medios kársticos y elaborar un modelo conceptual del funcionamiento integral del acuífero.

Una vez entendido el modelo hidrogeológico conceptual, se elaboró el modelo numérico hidrogeológico, que calibrado, simula las condiciones actuales del acuífero y es una herramienta importante para la predicción de escenarios que simulen cualquier condición realizada en su entorno.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1.1 Planteamiento del Problema	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo General	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
1.3 Hipótesis Planteada	17
1.4 Justificación	17
MARCO TEÓRICO	19
2.1 Aspectos Generales	19
2.2 Revisión de investigaciones realizadas	20
2.3 Formulación Matemática	29
MATERIALES Y MÉTODOS	47
3.1 Ubicación	48
3.2 Características Geológicas y Estructurales	49
3.2.1 Geología Detallada	49
3.2.2 Geología estructural	57
3.3 Información hidrogeológica	59
3.3.1 Inventario de manantiales	59
3.3.2 Piezómetros	61
3.3.3 Pozos de bombeo	64
3.3.4 Pruebas hidráulicas en sondeos	65
3.3.5 Ensayos de trazadores	82
3.4 Meteorología	83

3.4.1 Cálculo de excedentes	84
3.5 Hidrometría	89
3.5.1 Aforos en los ríos Hualgayoc, Tingo y quebrada Mesa de Plata	89
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	92
4.1 Modelamiento Conceptual del Flujo Subterráneo	92
4.1.1 Unidades hidrogeológicas	92
4.1.2 Recarga y descarga	94
4.1.3 Régimen piezométrico y flujo subterráneo	97
4.1.4 Límites hidrogeológicos	97
4.2 Modelamiento Numérico de Flujo Subterráneo	98
4.2.1 Introducción	98
4.2.2 Límites y discretización del modelo	99
4.3 Simulación en régimen permanente	100
4.3.1 Condiciones de contorno	100
4.3.2 Recarga	103
4.3.3 Permeabilidad	103
4.3.4 Calibración en régimen permanente	105
4.3.5 Resultados obtenidos	106
4.4 Simulación en régimen transitorio	111
4.4.1 Condiciones de borde y de contorno	111
4.4.2 Recarga	112
4.4.3 Permeabilidad y almacenamiento	112
4.4.4 Calibración en Régimen Transitorio	114
4.5 Simulaciones transitorias predictivas	121
4.5.1 Drenaje del Tajo 2013	121

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	129
Conclusiones	129
Recomendaciones	132
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	134
ANEXOS	140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II-1 Valores asignados a la altitud por el método APLIS.....	44
Tabla II-2 Valores asignados a la pendiente por el método APLIS.....	44
Tabla II-3 Valores asignados a la variable litológica por el método APLIS	45
Tabla II-4: Valores asignados a las formas de infiltración por el método APLIS .	46
Tabla II-5 Valores asignados a la variable de suelo por el método APLIS	46
Tabla II-6 Categorías del porcentaje de recarga del acuífero.....	47
Tabla III-1 Resumen de las unidades geológicas.....	56
Tabla III-10 Evapotranspiración calculada por diferentes métodos	85
Tabla III-11 Tipos de Suelo en función de sus propiedades hidrológicas	86
Tabla III-12 Excedentes anuales de agua de lluvia (2007-2011).....	86
Tabla III-13 Ubicación de las estaciones de aforo.....	90
Tabla III-2 Manantiales destacados de Hualgayoc.....	60
Tabla III-3 Ubicación de estaciones piezométricas seleccionadas	63
Tabla III-4 Datos Generales de pozos de bombeo y estadística básica de caudales	64
Tabla III-5 Ensayos de permeabilidad - WMC – 2008	78
Tabla III-6 Ensayos de permeabilidad (MWH, 2012).....	79
Tabla III-7 Ensayo de bombeo PP-3 (WMC, 2006)	80
Tabla III-8 Ensayos de bombeo PP-16 y PP-10 (WMC, 2008).....	81
Tabla III-9 Precipitación media mensual (periodo 2006-2011)	83
Tabla IV-1 Permeabilidad modelada	104
Tabla IV-2 Permeabilidad modelada en las fallas	104
Tabla IV-3 Ubicación de manantiales simulados.....	105
Tabla IV-4 Balance del modelo	110
Tabla IV-5 Parámetros hidráulicos transitorios.....	113
Tabla IV-6 Pozos de bombeo considerados en las simulaciones a futuro.....	124

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO II- 1: Experiencia de Darcy.....	30
GRÁFICO II- 2: Flujo de un líquido a través de un medio poroso en un tubo inclinado	31
GRÁFICO II- 3: Aplicación del balance de masas sobre un volumen de control	34
GRÁFICO II- 4: Comportamiento del agua subterránea en un acuífero doble porosidad época de estiaje	40
GRÁFICO II- 5: Esquema típico de recarga en medios kársticos.....	42
GRÁFICO III- 1: Columna Estratigráfica Local	56
GRÁFICO III- 2: Precipitación media mensual media (periodo 2006-2011).....	84
GRÁFICO III- 3: Comportamiento hidrológico del balance de agua de lluvia (2007-2011)	87
GRÁFICO III- 4: Aforos diferenciales en el río Hualgayoc.....	91
GRÁFICO IV- 1: Calibración en Régimen Permanente	109
GRÁFICO IV- 2: Descenso generado por prueba de bombeo.....	116
GRÁFICO IV- 3: Niveles transitorios piezómetro HPI-4-I	118
GRÁFICO IV- 4: Niveles transitorios piezómetro HPI-8-I	119
GRÁFICO IV- 5: Niveles transitorios piezómetro PPT-9.....	120
GRÁFICO IV- 6: Niveles transitorios piezómetro HPI-7-I	121
GRÁFICO IV- 7: Evolución de niveles simulados en el tajo 1 - Escenario 1 bombeando 6-12 l/s y Máxima Recarga.....	125
GRÁFICO IV- 8: Evolución de niveles simulados en el tajo 1 - Escenario 2 bombeando 12-24 l/s y Máxima Recarga.....	126
GRÁFICO IV- 9: Evolución de niveles simulados en el tajo 1 - Escenario 2 bombeando 12-24 l/s y Recarga Nula.....	128

RELACION DE MAPAS

MAPA 01:	MAPA DE UBICACIÓN
MAPA 02:	INSTALACIONES MINERAS
MAPA 03:	MAPA GEOLÓGICO
MAPA 04:	SECCIONES GEOLÓGICAS A – A', B – B', C-C', D-D' y E-E'
MAPA 05:	SECCIONES GEOLOGICAS F-F', G-G', H-H', I-I', J-J' y K-K'
MAPA 06:	SECCIONES GEOLÓGICAS L-L', M-M', N-N', O-O' y P-P'
MAPA 07:	INVENTARIO DE MANANTIALES Y SURGENCIAS
MAPA 08:	INVENTARIO DE PIEZÓMETROS
MAPA 09:	INVENTARIO DE POZOS DE BOMBEO
MAPA 10:	ENSAYO DE TRAZADORES
MAPA 11:	MÉTODO APLIS – FACTORES DE ALTITUD Y PENDIENTE
MAPA 12:	MÉTODO APLIS – FACTORES DE LITOLOGÍA Y FORMAS DE INFILTRACIÓN
MAPA 13:	MÉTODO APLIS – COEFICIENTES DE INFILTRACIÓN
MAPA 14:	UBICACIÓN DE ESTACIONES DE AFOROS
MAPA 15:	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS
MAPA 16:	SECCIONES HIDROGEOLÓGICAS A–A', B–B',C-C', D-D' y E-E'
MAPA 17:	SECCIONES HIDROGEOLOGICAS F-F',G-G',H-H', I-I, J-J' y K-K'
MAPA 18:	SECCIONES HIDROGEOLÓGICAS L-L', M-M', N-N', O-O' y P-P'
MAPA 19:	MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO
MAPA 20:	DISCRETIZACIÓN DEL MODELO
MAPA 21:	CONDICIONES DE BORDE Y CONTORNO
MAPA 22:	FRACTURAS DEL MODELO
MAPA 23:	RECARGA SUBTERRÁNEA DEL MODELO
MAPA 24:	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA – 3D
MAPA 25:	RASTREO DE PARTÍCULAS- SIMULACIÓN DE TRAZADORES

- MAPA 26: ISONIVELES DE DESCENSOS SIMULADOS POR BOMBEO
DEL POZO PP-3
- MAPA 27: SIMULACIÓN DE NIVELES POR DRENAJE DEL TAJO 1 A
DICIEMBRE 2013

INTRODUCCIÓN

El comportamiento del agua subterránea en medios kársticos viene siendo una tarea compleja y laboriosa, ya que el agua subterránea obedece a dos tipos de flujo: laminar y turbulento. Esto se debe a la anisotropía y heterogeneidad del medio, causado por la disolución de las rocas calcáreas, medio físico por el cual circula el agua subterránea. Por esta razón el presente estudio tiene por objetivo realizar el estudio hidrogeológico conceptual en la Formación Yumagual, en la zona de Hualgayoc, lugar donde se emplazan grandes yacimientos mineros y por ende el desarrollo de los pueblos cercanos a estos.

Para el desarrollo del estudio se realizó una revisión exhaustiva de la información hidrológica, geológica, estructural e hidrogeológica de la zona, así como los ensayos de pruebas hidráulicas, trazadores e inventarios de manantiales y formas kársticas. Conformada la base de datos, se realizó el análisis de la información para definir las unidades hidrogeológicas, las zonas de recarga y descarga, el tipo de medio físico hidrogeológico, la evolución de niveles piezométricos, determinar el comportamiento hidrogeológico en estado estacionario y transitorio, etc.

Luego de establecer el modelo hidrogeológico conceptual, se construyó y calibró el modelo tridimensional del flujo de agua subterránea (modelo numérico), en régimen permanente (condiciones naturales) y régimen transitorio (para el plan de minado del tajo 01 a fines del 2013). Calibrado el modelo numérico se realizó la simulación, para determinar el caudal de desagüe que asegure que el nivel freático se encuentre 10 metros por debajo del avance del tajo, obteniendo un caudal global de 6 a 12 l/s.

Si bien se pudo entender el comportamiento del agua subterránea en la Formación Yumagual, para la zona de Hualgayoc, es recomendable que se realice más perforaciones y pruebas hidráulicas en las formaciones carbonatadas y en los stocks intrusivos, con el objetivo de conocer a detalle el comportamiento piezométrico en éstos últimos. Al generarse nueva información deberá actualizarse continuamente el modelo numérico para refinar los estimados de drenaje.

1.1 Planteamiento del Problema

En la actualidad, el modelamiento numérico es una herramienta que se viene aplicando cada vez más en el campo de la hidrogeología, su finalidad es la de predecir el comportamiento hidráulico del agua subterránea, en diferentes escenarios.

En la última década, la minería en el Perú ha venido creciendo y con ello la demanda de contar con una herramienta que simule el comportamiento del agua subterránea, en cualquier escenario y tiempo. El uso de esta herramienta es muy importante, en la industria de la minería, para la toma de decisiones operativas de desagüe y medio ambientales. A partir de ello es que viene el siguiente cuestionamiento ¿qué tan confiable y preciso pueden llegar a ser los resultados, obtenidos de un modelo numérico hidrogeológico?

En primer lugar, es necesario especificar que el modelamiento numérico dependerá mucho del modelo hidrogeológico conceptual y éste último, dependerá de la cantidad y calidad de información que se tenga de las unidades acuíferas. La información hidráulica del acuífero, la química del agua subterránea, la hidrología, la geología, las estructuras geológicas, las estructuras civiles, entre otros, son variables que el

hidrogeólogo debe considerar para entender el funcionamiento del acuífero y formular el modelo hidrogeológico conceptual.

Establecido el modelo hidrogeológico conceptual se procede a conformar el modelo numérico, para lo cual se deberá evaluar el método que mejor simule el comportamiento del flujo subterráneo.

El problema radica en que no se conoce el comportamiento del agua subterránea en los medios kársticos de la Formación Yumagual y por ende se carece de una herramienta numérica que permita simular el comportamiento hidráulico del drenaje en el tajo 1.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo general es desarrollar un estudio hidrogeológico conceptual y numérico para la predicción del desagüe del tajo 01 en el área de estudio.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar la caracterización hidrogeológica en la zona de estudio en donde se deberá establecer las unidades hidrogeológicas, zonas de recarga, zonas de descarga, nivel freático y permeabilidades de las

unidades acuíferas.

- ✓ Establecer los límites hidrogeológicos del modelo
- ✓ Construir y calibrar el modelo tridimensional de flujo de agua subterránea en régimen permanente y transitorio
- ✓ Conocer el caudal de desagüe necesario para asegurar que el nivel piezométrico se encuentre 10 metros por debajo del piso del tajo, según su plan de minado.

1.3 Hipótesis Planteada

El presente estudio hidrogeológico para el área estudiada permitirá entender el comportamiento hidráulico en medios kársticos de la Formación Yumagual.

1.4 Justificación

Los acuíferos kársticos presentan una serie de singularidades que los diferencian notablemente de los acuíferos de porosidad intergranular, aunque en realidad la tipología de los primeros puede ser bastante variada, en función de la importancia relativa de las discontinuidades, porosidad de la matriz, grado e intensidad de la karstificación, entre otros factores.

Aquellas singularidades mencionadas le asigna al medio físico propiedades hidráulicas que controlan el flujo subterráneo y su almacenamiento. Por esta razón es necesario que se ahonde en la investigación hidrogeológica en los medios carbonatados de los andes peruanos, ya que es en la cordillera donde se vienen emplazando grandes yacimientos mineros y con ello el desarrollo de los pueblos.

Los tipos de acuífero en medios kársticos tienen la particularidad de ser altamente difusivos y con ello nace la importancia de conocer el comportamiento hidrogeológico en medios carbonatados, actualmente la hidrogeología en el Perú es una disciplina que viene desarrollándose cada vez más, más no se cuenta aún con un procedimiento estándar para el estudio de acuíferos carbonatados.

Con este estudio se pretende conocer el comportamiento hidrogeológico en la formación Yumagual, para la zona de Hualgayoc, lugar donde se emplazan diversos yacimientos mineros, sobre formaciones carbonatadas. Conociendo el comportamiento hidrogeológico conceptual es posible ingresarlo en algún software especializado para la simulación de diferentes escenarios.

MARCO TEÓRICO

2.1 Aspectos Generales

Por lo general, el análisis de flujo en acuíferos kársticos resulta ser una tarea dificultosa, debido a la heterogeneidad que muestran estas formaciones carbonatadas. En efecto, la propia geometría y demás características de los sistemas fracturados comúnmente no son bien conocidas, por lo que no es posible modelar de un modo explícito y por separado las diferentes fracturas o la matriz. Para eludir esa dificultad, frecuentemente se suele abordar el problema bajo el enfoque del modelo de doble porosidad, ya que en dicho modelo, también llamado dual, no es esencial el conocimiento de las características geométricas e hidrológicas de la fracturación; en su lugar es necesario, sin embargo, el conocimiento de ciertas propiedades medias, tales como el espaciamiento de las propias fracturas. A pesar de esta simplificación, la simulación numérica de acuíferos fracturados mediante el enfoque de doble porosidad resulta bastante compleja y extremadamente laboriosa. Además, la modelación de un acuífero fracturado supone un mayor esfuerzo computacional, en comparación al que se requiere para un acuífero no fracturado de las mismas dimensiones.

2.2 Revisión de investigaciones realizadas

Llopis (1970) menciona que la circulación cárstica es extremadamente compleja. En los últimos años ha sucedido una visión mucho más clara, pero a pesar de todo existen numerosos casos en el karst que escapan a las leyes generalmente admitidas. Las características dinámicas de un karst dependerán ante todo, de los siguientes factores:

- De la estructura congénita y tectónica del macizo rocoso calcáreo.
- El estado de evolución del relieve regional.
- Del estado de desarrollo kárstico.
- De las características climáticas.
- De las circunstancias específicas locales.

Únicamente considerando todos estos factores, es posible tener una idea bastante concreta de un determinado karst.

Davis y De Wiest (1971) manifiestan que las rocas carbonatadas provistas de extensos canales o fracturas de disolución, desarrollados preferentemente en una sola dirección, poseen lógicamente, importantes permeabilidades que son altamente anisotrópicas; por esta razón, la dirección del flujo del agua subterránea no debe ser deducida de los

mapas hidrogeológicos a partir del simple trazado de líneas ortogonales a las isopiezas.

Yevjevich (1976) enfatiza que el avance hidrológico y particularmente hidrogeológico para estudiar los problemas de agua en medios kársticos, consiste en propuestas de aplicación de estadística matemática y optimización en estimación de parámetros, las cuales son una herramienta potencialmente más versátil en la obtención de nuevos resultados de investigaciones que los modelos físicos clásicos de acuíferos kársticos y sistemas de canales subterráneos.

Milanovic (1981) comenta que el sistema de drenaje subterráneo en un karst tiene algunas características del sistema de drenaje superficial, por ejemplo el volumen de drenaje depende de la estación húmeda, mucho del flujo de agua en un karst termina en manantiales kársticos y se puede concluir que el flujo sigue una cierta ruta privilegiada, determinada por el sistema de fracturamiento.

Lerner et al, (1990) establece que la recarga de los acuíferos viene siendo expresada como el volumen medio anual de agua que entra en el acuífero o bien en forma de porcentaje, respecto a la precipitación, ésta puede estimarse por diversos métodos y en distintas circunstancias

climáticas e hidrológicas. El método utilizado para un medio carbonatado es el método APLIS.

Rubén Juanes y Javier Samper (2000) clasifican los modelos conceptuales fracturados en los siguientes tipos:

- Modelo de medio continuo equivalente: En este modelo el medio fracturado se trata de un medio poroso equivalente. Su empleo se justifica en términos estadísticos y, ante la incertidumbre acerca de la geometría y los parámetros de medio fracturado, se intenta sustituir éste por un medio poroso cuyos parámetros promedien la situación real a gran escala. No es posible representar zonas fracturadas de extensión regional.
- Modelo de doble porosidad: Permite trabajar con sistemas compuestos por dos o más materiales, caracterizados por sus propios parámetros hidrodinámicos y de transporte. Existen distintas formulaciones para la evaluación del intercambio de soluto entre la fractura y la matriz porosa.
- Modelo de fracturas embebidas en el medio poroso. Resuelve las ecuaciones de flujo y transporte simultáneamente en el medio poroso y en las fracturas. La mayor dificultad radica en la correcta

localización de las fracturas. Estos modelos superan las limitaciones de los modelos de medio continuo equivalente y suelen emplearse para grandes fracturas y fallas.

- Modelo de fracturas individuales: Este modelo intenta describir el medio fracturado a partir de cada una de sus fracturas, lo cual representa dos problemas, la definición geométrica de las fracturas y la solución numérica de las ecuaciones de flujo y transporte a lo largo de dichas fracturas.
- Modelo de redes de canales: En este tipo de modelos hay dos enfoques, fracturas como canales independientes o formando una red entrelazada.

Garfias, J; Llanos, H; Herrera, I (2002), Manifiestan que es indudable que el modelo de doble porosidad introduce un alto grado de simplificación, a partir del momento que considera bloques prismáticos regulares, cuando en realidad la forma y variación de las fracturas y bloques es completamente irregular.

Antigüedad, Iñaki; Morales, Tomás y Uriarte, Jesús (2007), realizaron estudios en medios kársticos y resaltan la alta vulnerabilidad a la contaminación que presenta este tipo de medios, debido a su particular

estructura para el drenaje. El riesgo se hace potencialmente alto cuando sobre la superficie del terreno se realizan actividades contaminantes.

Álvarez, Lorena; Díaz – Noriega, Ramón y Fernández - Álvarez, José, realizaron un estudio comparativo de los simuladores del flujo subterráneo Visual Mod Flow y Fe Flow, cuyo objetivo es ayudar al hidrogeólogo o profesional calificado en la elección de un código de simulación.

La comparativa se fundamenta en un trabajo de modelización real y una problemática hidrogeológica en el ámbito minero.

Se concluyó que ambos códigos son adecuados para la modelización de flujos en acuíferos no confinados, donde se pretendan cuantificar los caudales de drenaje hacia huecos realizados a cielo abierto.

Como valoración final de los simuladores, se plantean las siguientes ventajas más relevantes de cada uno de ellos frente al otro:

VMOD

- Facilidad de manejo y aprendizaje rápido
- Documentación abundante y didáctica
- Coste de licencias bajo

- Tiempos de cómputo muy inferiores
- Posibilidad de ejecutar varias simulaciones simultáneamente

FEFLOW

- Mayor capacidad para reproducir geometrías tridimensionales complejas con gran precisión
- Posibilidad de utilizar las técnicas Free & Movable ó Phreatic en simulación de acuíferos no confinados
- Mejor aproximación para la simulación de las superficies de rezume

Andrachek, R. G.; Abadía, D.; James, S. C.; Zhang, B.; Gabriel, C.; Martin, P.; Arnold, W. B.; Woessner, W. W. (2009), Aplicaron técnicas de regularización y descomposición de valor Singular para la optimización de un modelo altamente parametrizado. Las predicciones de flujo de agua subterránea en ambientes geológicos complejos requieren el uso de modelos que representen todas las características físicas potencialmente importantes. En este caso se utilizó Fe Flow para desarrollar un modelo equivalente de medio poroso (medios fracturados) que representen todas las características principales del modelo conceptual del acuífero en estudio, situado en el sur de California, USA.

Kavouri, Konstantina; Karatzas, George; Plagnes, Valérie; Varouchakis, Emmanouil (2013), realizaron una metodología combinada de cartografía de la vulnerabilidad y modelos de flujo de agua subterránea para el manejo de acuíferos kársticos. Para ello examinaron la aplicación de un modelo de flujo en un medio kárstico mediterráneo típico. En el presente estudio, el sistema kárstico es representado por un acuífero poroso que también tiene un hacha de drenaje principal. El modelo fue desarrollado utilizando el código de elementos finitos Fe Flow, que permite la integración de elementos discretos como canales en una matriz porosa y el método de PaPRIKa como un método cartográfico multicriterio para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los sistemas cársticos. El objetivo general del presente estudio fue el de desarrollar una herramienta flexible para la gestión de los recursos hídricos en terrenos cársticos basados en modelamiento de flujo de aguas subterráneas.

Nocchi, M.; Salleolini, M. (2013), Aplicaron el software Fe Flow para la simulación del acuífero costero carbonatado en Ansedonia (sur de la Toscana, Italia), con la finalidad de pronosticar la evolución cuantitativa y cualitativa de los recursos en el tiempo. El acuífero se caracteriza por su alta permeabilidad debido a las fracturas y karstificación, y viene siendo explotado para el abastecimiento público y por los propietarios de las

granjas piscícolas, que bombean agua subterránea salina termal. Con la aplicación del modelamiento numérico Fe Flow pudieron planificar la explotación sostenible del acuífero y tomar medidas de remediación ante la intrusión marina acontecida en el acuífero.

Franklin, R. M.; Van Slobbe, E.; Fernandes, N. F.; Palma, J.; Van Dalen, D.; Santos, A. C.; Melo, V.; Reis, R. G.; Carmo, R.; Fernandes, H. M. Realizaron el estudio Monitoreo hidrológico y modelación ambiental para evaluar la calidad y sostenibilidad de los recursos hídricos en una zona de minas de uranio, Caetité – Brasil. El centro de producción consta de una mina a cielo abierto y una pila de lixiviación con ácido sulfúrico. El agua subterránea en esta zona es la única fuente de agua para consumo humano y uso industrial y por tanto fue necesario realizar el proyecto para el manejo del agua subterránea en las zonas mineras de uranio. La ocurrencia y el patrón de flujo de las aguas subterráneas en la cuenca Cetité, está condicionada principalmente por el grado de fallas/fracturamiento de las rocas (predominantemente Gneis y Granitos). Los resultados obtenidos con el modelamiento Fe Flow, en un medio fracturado fueron óptimos, pudiendo obtener buenos resultados predictivos y estableciendo directrices de cómo manejar adecuadamente el uso del agua subterránea y la evaluación de impactos en minas de uranio.

Ana Rolindes Eugercios Silva (2013), realizó la tesis doctoral “Interacciones acuífero-lago y biogeoquímica del nitrógeno en ambientes kársticas”. En el desarrollo de sus tesis resalta que para la modelización en medios fracturados, simulando el transporte de solutos en una red de fracturas discretas o en una única fractura concreta, son especialmente útiles los códigos FEFLOW, FRAC3DVS (Therrien et al., 1994) y FRACTRAN (Sudicky & McLaren, 1992) entre otros.

K.P. Kavouri, G. P. Karatzas (2012), realizaron el estudio “Simulation of the complex karstic hydrogeological system of Zakros Crete using the finite element code Fe Flow. El estudio en mención goza de particular interés ya que por el resultado de la acción tectónica, el terreno kárstico ha sido dividido en dos subsistemas acuíferos, uno en la parte norte y otro en el sur. El subsistema del norte es un proceso abierto al acuífero del mar mientras que en el sur está delimitado por formaciones impermeables. El enfoque de modelo es una combinación de flujo equivalente poroso continuo y discreto de elementos. Se utilizó el código de elementos finitos Fe Flow, el cual que permite la integración de fracturas en determinados espacios de la matriz. El flujo en la matriz se considera de Darcy, mientras que el de las leyes de Hagen-Poiseuille Manning - Strickler se aplican dentro de las fracturas, para lo cual obtuvieron buenos resultados a nivel regional.

2.3 Formulación Matemática

2.3.1 La Ley de Darcy

El francés Henry Darcy en el siglo XIX estudió en forma experimental el flujo del agua a través de un medio poroso, y estableció la ley que se conoce con el nombre de Ley de Darcy. Dicha ley se basa en las siguientes hipótesis que condicionan la validez de su ley.

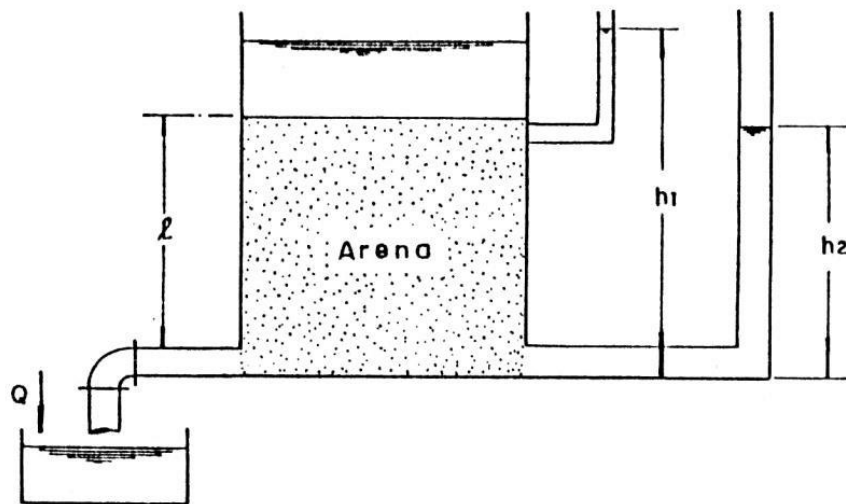
- Medio continuo, es decir que los poros vacíos estén intercomunicados.
En este sentido, los medios kársticos no se pueden considerar como continuos.
- Medio isotrópico
- Medio homogéneo
- Flujo del agua en régimen laminar

Darcy realizó su experiencia en cilindros verticales de 2.5 m de altura por 0.35 m de diámetro interior, llenos de arena con una porosidad total del 38% (ver Gráfico II – 1). Darcy demostró que el caudal Q es proporcional a la pérdida de carga e inversamente proporcional a la longitud del lecho de arena y proporcional al área de la sección y a un coeficiente que depende de las características del material. De esta manera estableció que:

$$Q = K (h_1 - h_2) / l$$

en donde K es un coeficiente que se ha denominado coeficiente de permeabilidad con unidades L/T.

GRÁFICO II- 1: Experiencia de Darcy



Q: caudal constante en m³/s.

h_1 y h_2 : carga hidráulica en m de gua.

A: área de la sección en m².

l: longitud del lecho de arena en metros.

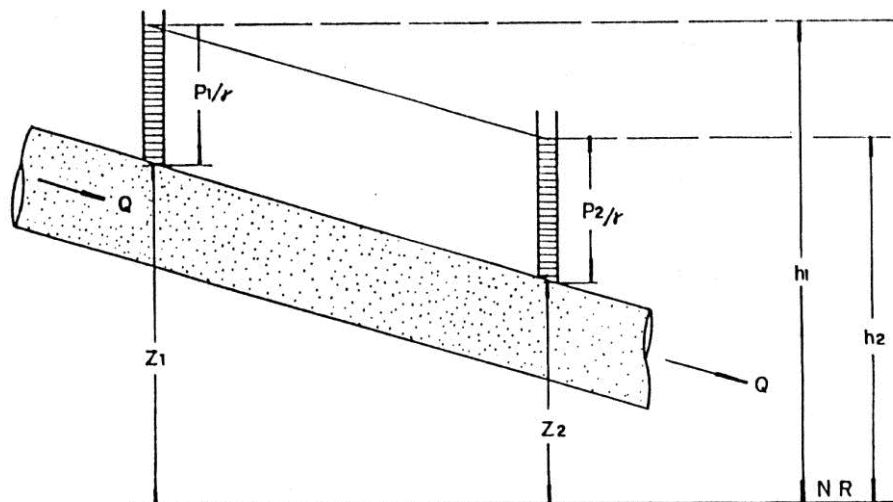
Si en lugar de considerar el tubo vertical, se le da una cierta inclinación, se tiene:

$$h_1 = Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} \quad h_2 = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \quad \Delta h = h_1 - h_2$$

Para este caso se continúa cumpliendo la ley de Darcy, de tal forma que puede escribirse:

$$Q = -KA \frac{\Delta h}{l}$$

GRÁFICO II- 2: Flujo de un líquido a través de un medio poroso en un tubo inclinado



Ahora $\Delta h/l$ no es otra cosa que la pendiente de la línea de carga, o sea la pérdida de carga por unidad de longitud del lecho

filtrante, la cual se llama gradiente hidráulico. Este gradiente se puede simbolizar mediante la letra i , entonces:

$$i = \frac{\Delta h}{l}$$

En este caso la expresión Q queda así:

$$Q = -KA \frac{\Delta h}{l} = -KA$$

y de la cual puede escribirse:

$$V = \frac{Q}{A} = Ki$$

La expresión Q/A recibe el nombre de velocidad de flujo o velocidad de Darcy, simbolizada por V .

Si se tiene en cuenta que el agua en un medio poroso se mueve a velocidades variables según el tamaño y orientación de los poros, es claro que esta velocidad de flujo no coincide, a una escala microscópica, con la velocidad real del agua a través de los poros del mismo. No obstante lo anterior, para el estudio de las características hidráulicas del flujo a través de un medio poroso se utiliza la velocidad de Darcy.

Puede concluirse entonces, que el movimiento del agua en un medio poroso se produce cuando hay diferencias de carga.

Si se analiza la ley de Darcy se ve entonces que ella comporta tres parámetros principales:

- La permeabilidad, K.
- El gradiente hidráulico, i.
- La velocidad del flujo, V.

2.3.2 Ecuación general del flujo

La ecuación de flujo es la clave de la hidrología subterránea, por tanto es la ecuación fundamental en lo que se refiere al flujo del agua subterránea.

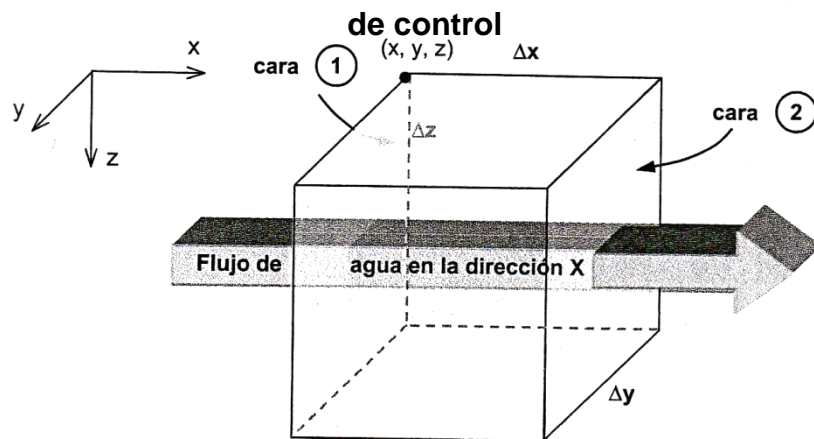
Esta ecuación se deriva de un simple balance de masa junto con la aplicación de la ley de Darcy.

Un balance de masas consiste en plantear una ecuación tan sencilla como la siguiente:

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

Se considera un volumen de control definido en un sistema de coordenadas rectangulares de ejes **X**, **Y** y **Z**, como un paralelepípedo de lados de dimensiones Δx , Δy y Δz , como se puede observar en el Gráfico II-3

GRÁFICO II- 3: Aplicación del balance de masas sobre un volumen



Sobre el volumen de control definido se aplica el balance de masas, es decir, se determina qué cantidad de masa de fluido entra, qué cantidad sale y cómo varía la cantidad almacenada.

Entradas y salidas

Dado que este volumen es un paralelepípedo de seis caras, es preciso estudiar el flujo de masa a través de cada una de ellas, tomadas de dos en dos según la dirección de los ejes.

Si se toma para empezar, el eje x , y las dos caras que le son perpendiculares, tendremos como resultado los términos que describen los flujos que circulan por ambas caras del Gráfico II-4, detallados a continuación:

- La masa de fluido que entra en la cara 1 será el caudal específico, por la densidad por el área de paso, es decir:

$$\rho q_{x|x} \Delta y \Delta z$$

Donde $q_{x|x}$ se refiere al caudal o flujo específico en la dirección x en el punto de coordenada x , ρ a la densidad y $\Delta y \Delta z$ el área transversal al flujo estudiado.

- La masa de fluido que saldría por la cara 2, opuesta a la cara 1, será:

$$\rho q_{x|x+\Delta x} \Delta y \Delta z$$

donde destaca que $q_{x|x+\Delta x}$ no es el mismo flujo específico de antes, en x , sino en la nueva coordenada de la cara 2 que es $x+\Delta x$.

Desarrollando esta última expresión mediante el Teorema de Taylor y despreciando los términos para $n > 1$, se escribe el término que representa la masa que sale por la cara 2 en función de la que entra por la cara 1:

$$\underbrace{\rho q_{x|x+\Delta x} \Delta y \Delta z}_{\text{entra}} = \underbrace{\rho q_{x|x} \Delta y \Delta z + \Delta x \frac{\partial}{\partial x} (\rho q_x) \Delta y \Delta z}_{\text{sale}}$$

Al efectuar el balance de masas entre las caras 1 y 2 se obtiene que, substrayendo lo que entra a o que sale, queda como:

$$\rho q_{x|x} \Delta y \Delta z - \rho q_{x|x+\Delta x} \Delta y \Delta z = -\frac{\partial}{\partial x} (\rho q_x) \Delta x \Delta y \Delta z$$

Si se opera análogamente según los ejes **Y** y **Z**, y se agrupan factores comunes, se obtiene que las entradas menos las salidas para las seis caras del volumen de control será igual a:

$$-\left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] \rho \Delta x \Delta y \Delta z$$

Variación del almacenamiento

Para ver qué sucede con el otro término del balance, es decir, con la variación del almacenamiento, es preciso efectuar una serie de consideraciones previas. Así se establece que:

- La masa del agua en el volumen de control está representada por el producto volumen por densidad, pero a su vez el volumen del agua no es más que el volumen total multiplicado por la porosidad, es decir:

$$V_w \rho = V_t m \rho$$

$$M = m \rho \Delta x \Delta y \Delta z$$

M = Masa de agua

m = porosidad

ρ = densidad

$$V_w = \text{Volumen de agua} = V_t m$$

$$V_t = \text{Volumen total} = \Delta x \Delta y \Delta z$$

- La variación temporal de la masa M respecto al tiempo viene cuantificada por la derivada respecto al tiempo de **M**:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (m \rho \Delta x \Delta y \Delta z) = \left(\underbrace{\rho m \frac{\partial(\Delta z)}{\partial t}}_1 + \rho \Delta z \underbrace{\frac{\partial m}{\partial t}}_2 + m \Delta z \underbrace{\frac{\partial \rho}{\partial t}}_3 \right) \Delta x \Delta y$$

Las expresiones 1, 2 y 3 corresponden a la relación de variación de z, la porosidad y la densidad respecto a la altura del agua.

Así pues, la ecuación que expresa la variación de almacenamiento es la siguiente:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = (\alpha\rho g + m\beta\rho g)\rho\Delta x\Delta y\Delta z \frac{\partial h}{\partial t}$$

Luego, agrupando todo lo expuesto, la expresión del balance general queda de la siguiente forma:

$$\underbrace{-\left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right]\rho\Delta x\Delta y\Delta z}_{\text{Entradas - salidas}} = \underbrace{(\alpha\rho g + m\beta\rho g)\rho\Delta x\Delta y\Delta z \frac{\partial h}{\partial t}}_{\text{Variación de almacenamiento}}$$

y simplificando:

$$-\left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right] = \underbrace{\rho g(\alpha + \beta m)}_{S_s} \frac{\partial h}{\partial t}$$

S_s =Coef. Almacenamiento
Específico

Si ahora utilizamos la ley de Darcy que define el caudal específico \mathbf{q} según las tres direcciones del espacio \mathbf{X} , \mathbf{Y} , y \mathbf{Z} , tendremos:

$$\boxed{\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial h}{\partial z}\right)\right] = S_s \frac{\partial h}{\partial t}}$$

ECUACIÓN GENERAL DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

2.3.3 Modelo continuo de doble porosidad

Cuando se considera que el fluido se almacena en el espacio de los poros entre los granos o matriz del medio, se tiene el flujo en medio poroso. Pero si además esa matriz posee discontinuidades que forman una red intrincada de conductores comunicados entre sí que poseen algún valor de conductividad hidráulica y permiten el flujo a través de ellos, se habla entonces del flujo en un medio poroso fracturado o flujo en un medio de doble porosidad.

Debido a que en la mayoría de los casos la conductividad hidráulica del sistema de fracturas es muchas veces mayor que la conductividad de la matriz porosa, se dice que el fluido es almacenado en los bloques porosos y luego transportado a través de las fracturas. Este hecho es importante de considerar cuando se estudian procesos transitorios debido al efecto del intercambio de flujo entre los dos medios.

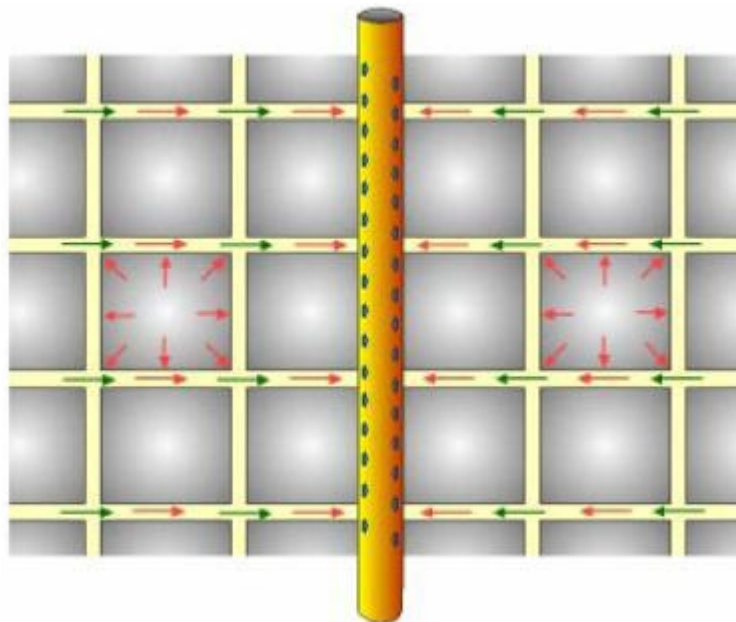
El acuífero kárstico está formado por una serie de bloques capacitivos de grandes dimensiones y baja permeabilidad separados por una red de discontinuidades de alta permeabilidad.

Los grandes volúmenes de agua almacenados en los acuíferos kársticos estarían esencialmente en los bloques. Por este motivo, en el medio kárstico aparecen sondeos de elevado rendimiento junto a otros

muy poco productivos. La evolución del nivel piezométrico en un sondeo dependerá de su localización. Si se encuentra en un bloque evolucionará de forma más amortiguada que si está en un conducto de alta permeabilidad.

En situación de aguas altas (recarga) hay un flujo desde los drenes hacia las microfisuras, mientras que en estiaje ocurre lo contrario (ver Gráfico II-4).

GRÁFICO II- 4: Comportamiento del agua subterránea en un acuífero doble porosidad - época de estiaje



En un modelo de doble porosidad hay dos continuos interactivos: fracturas y matriz de roca.

Las ecuaciones de flujo y transporte se escriben para cada continuo con un término de transferencia entre la fractura y la matriz tal como se muestra a continuación:

$$K_f \nabla^2 h_f = S_{sf} \frac{\partial h_f}{\partial t} + q_{m/f}$$

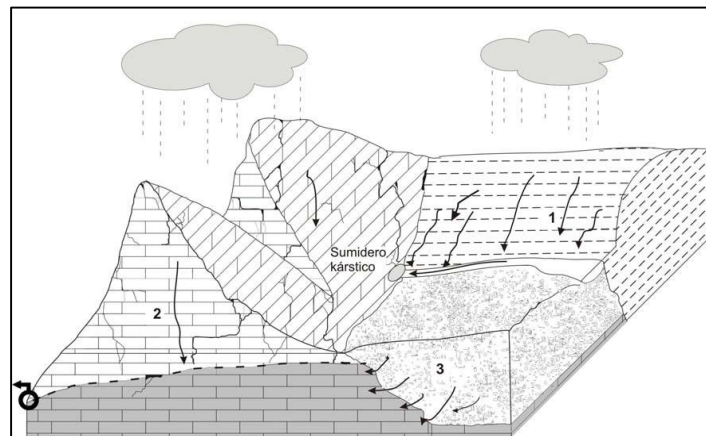
$$K_m \nabla^2 h_m = S_{sm} \frac{\partial h_m}{\partial t} - q_{m/f}$$

2.3.4 Cálculo de la recarga del acuífero - método APLIS:

La recarga a los acuíferos se define como el volumen medio de agua que entra en ellos, durante un periodo de tiempo. Se expresa como volumen medio anual (recursos medios anuales) o en forma de porcentaje de la precipitación (tasa de recarga o infiltración eficaz). Esta recarga se puede producir de forma difusa o concentrada. El agua que recarga a los acuíferos puede proceder de la lluvia (suele ser la más importante y la más habitual), de las aguas superficiales (ríos y lagos) o de otros acuíferos o acuitardos (Gráfico II-5). En los dos últimos casos puede ser recarga permanente o esporádica y depende de la posición del nivel freático y de la permeabilidad de los materiales que están en contacto.

Para el cálculo de la recarga por infiltración del agua de lluvia en las masas de agua subterránea de naturaleza carbonatada, como el caso de la presente tesis, se ha utilizado el método APLIS.

GRÁFICO II- 5: Esquema típico de recarga en medios kársticos



El objetivo de este método se centra en desarrollar un procedimiento sencillo que permita estimar la tasa de recarga en acuíferos carbonatados asociada a la infiltración del agua de lluvia (expresada como porcentaje de la infiltración), mediante la combinación de diferentes variables: geológicas y geográficas, y establecer el reparto zonal de la recarga en este tipo de acuíferos.

La estimación de la recarga tiene un marcado carácter cuantitativo. Sin embargo, parte de las variables que se utilizan en este método para su estimación, son de naturaleza cualitativa: litología, zona

preferencial de infiltración y suelo, por ello, deben transformarse en valores ordinales para su posterior tratamiento.

Las variables que contempla el método APLIS modificado son:

- ✓ Altitud (A)
- ✓ Pendiente (P)
- ✓ Litología (L)
- ✓ Formas de Infiltración preferencia (I)
- ✓ Suelo (S)

A cada variable se le asigna un valor comprendido entre 1 y 10, en donde 1 indica la mínima incidencia en la recarga del acuífero, mientras que el valor 10 expresa la máxima influencia en la recarga.

La puntuación de la variable Altitud sigue una progresión aritmética y considera que, conforme aumenta la altitud, aumenta la precipitación y la recarga del acuífero. En la tabla II-1 puede observarse la puntuación asignada a los valores de altitud en la zona de estudio.

Tabla II-1 Valores asignados a la altitud por el método APLIS

ALTITUD (A)	PUNTUACIÓN
> 2.700 m	10
2.400-2.700 m	9
2.100-2.400 m	8
1.800-2.100 m	7
1.500-1.800 m	6
1.200-1.500 m	5
900-1.200 m	4
600-900 m	3
300-600 m	2
≤300 m	1

La puntuaciones asignadas a la variable Pendiente disminuyen conforme aumenta la pendiente, es decir, a mayor pendiente, mayor escorrentía y menor recarga del acuífero. En la tabla II-2 se observa la puntuación asignada para la variable de la pendiente en la zona de estudio.

Tabla II-2 Valores asignados a la pendiente por el método APLIS

PENDIENTE (P)	PUNTUACIÓN
≤ 3 %	10
(3 - 5]	9
(5 - 10]	8
(10 - 15]	7
(15 - 20]	6
(20 - 30]	5
(30 - 45]	4
(45 - 65]	3
(65 - 100]	2
> 100	1

La asignación de puntuaciones a la variable litología se efectúa en función de criterios hidrogeológicos relacionados con la permeabilidad de los materiales: grado de fracturación y/o karstificación. En la tabla II-3 se observa la puntuación asignada a la variable litológica en la zona de estudio.

Tabla II-3 Valores asignados a la variable litológica por el método APLIS

LITOLOGÍA (L)	PUNTUACIÓN
Calizas y dolomías karstificadas	10 – 9
Calizas y dolomías fracturadas o ligeramente karstificadas	8 – 7
Calizas y dolomías fisuradas	6 – 5
Arenas y gravas, coluviones	4
Conglomerados	3
Rocas plutónicas y metamórficas	2
Esquistos, pizarras, limos, arcillas	1

La variable infiltración considera tres clases o tipologías y hace referencia a la existencia o no de formas de absorción y a la capacidad potencial de infiltración. En la tabla II-4 se observa la puntuación asignada a la variable de infiltración en la zona de estudio.

Tabla II-4: Valores asignados a las formas de infiltración por el método APLIS

FORMAS DE INFILTRACIÓN PREFERENCIAL (I)	PUNTUA
Alto desarrollo de las formas de infiltración preferencial	10
Desarrollo moderado de las formas de infiltración preferencial	5
Escaso desarrollo o ausencia de las formas de infiltración preferencial	1

En el caso de la variable Suelo las distintas clases se agrupan en función de las características de espesor y textura de sus horizontes, que a su vez, están relacionadas con la permeabilidad del mismo. En la tabla II-5 se observa la puntuación asignada a la variable de suelo en la zona de estudio.

Tabla II-5 Valores asignados a la variable de suelo por el método APLIS

SUELOS (S)	PUNTUACIÓN
Leptosoles	10
Arenosoles y Xerosoles	9
Regosoles calcáreos y Fluvisoles	8
Regosoles eútricos, dístricos y Solonchaks	7
Cambisoles	6
Cambisoles eútricos	5
Histosoles y Luvisoles	4
Luvisoles crómicos	3
Planosoles	2
Vertisoles	1

Finalmente, el algoritmo utilizado para estimar el porcentaje de recarga es el siguiente:

$$R=[(A+P+3L+2I+S)/0.9]$$

Una vez estimada la recarga, ésta se presenta agrupada en cinco intervalos regulares, a cada uno de los cuales se le asigna una categoría según el porcentaje de lluvia que recarga el acuífero.

Tabla II-6 Categorías del porcentaje de recarga del acuífero

INTERVALO	CLASE DE RECARGA
≤ 20 %	Muy Baja
20 - 40 %	Baja
40 - 60 %	Moderada
60 - 80 %	Alta
> 80 %	Muy Alta

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación

La zona de estudio está ubicada en la provincia de Hualgayoc, en el distrito de Cajamarca, al Noroeste de Perú a 2 km del pueblo de Hualgayoc y 50 km al Norte de Cajamarca, (Mapa 1).

Topográficamente, se encuentra en una zona montañosa con cotas comprendidas entre 3,500 a 4,000 msnm. Hidrográficamente el área se encuentra en la vertiente occidental de la Cordillera Occidental peruana.

Específicamente la zona de estudio se encuentra ubicada entre los ríos Tingo al Norte y Hualgayoc al Sur y la Quebrada Mesa de Plata al Este.

En la zona de estudio se encuentra operando un proyecto minero para la extracción de cobre, mediante la modalidad de cielo abierto. Sus instalaciones se muestran en el Mapa 2.

3.2 Características Geológicas y Estructurales

3.2.1 Geología Detallada

Con el apoyo de la información geológica existentes y una campaña de cartografiado se realizó la elaboración de un bloque geológico tridimensional para la zona de estudio.

Para obtener como resultado el bloque geológico se realizó diferentes actividades como:

- Elaborar una columna lito-estratigráfica tipo para la zona de estudio
- Obtener una cartografía geológica de la zona de estudio que incluya un mapa de afloramientos, estructuras principales y detalles sobre geometría de los estratos (buzamientos).
- Realizar perfiles geológicos interpretativos que permitan construir el bloque geológico 3D.
- Generar un bloque geológico tridimensional mediante un software especializado.

En el área de estudio se aprecian afloramientos de rocas sedimentarias del Cretácico inferior, medio, Cuaternario y por rocas intrusivas terciarias presentes en forma de stocks, sills, diques y pórfidos que intruyen las formaciones cretácicas a favor de zonas de debilidad.

Estructuralmente, existe gran complejidad asociada al intenso fallamiento que afecta a las diferentes formaciones, aunque pueden diferenciarse dos direcciones principales de falla: NO – SE y NE – SO. El mapa geológico y estructural se muestra en el Mapa 3.

A continuación se describe la estratigrafía en orden cronológico.

➤ **Cretácico inferior**

Grupo Goyllarisquizga

La columna estratigráfica en el área de Hualgayoc se inicia con rocas detríticas- siliciclásticas de las formaciones de este grupo, con 800 m de espesor aproximadamente. Litológicamente predominan las cuarcitas, areniscas y lutitas oscuras que afloran hacia el Este- Noreste del poblado de Hualgayoc.

Formación Inca

Calizas arenosas y ferruginosas de color gris parduzco, interestratificadas con lutitas pardo amarillentas, verdosas y con areniscas, localmente contiene restos de equinoideas, espantagideos, trigonias y exóginas superior.

➤ **Cretácico medio**

Formación Chulec

Esta formación se sitúa en contacto concordante sobre la formación subyacente (Formación Goyllarisquizga) del Cretácico Inferior. La formación Chulec, tiene aproximadamente 370 m de espesor y está formada por calizas grises y margas arcillosas, pudiendo distinguir hasta dos miembros: el inferior con areniscas calcáreas y margas y el superior con predominancia de calizas y margas con abundantes nódulos de chert. Se le asigna la edad de Albiano inferior.

Formación Pariatambo

Situada de forma concordante sobre la Fm. Chulec tiene una potencia que oscila entre 110 y 150 m. Está caracterizada por una estratificación delgada tabular de bancos de calizas, lutitas y ocasionalmente dolomitas, de color oscuro debido al contenido bituminoso. Presenta fósiles amonoideos (*Oxytropidoceras carbonarium*) y nódulos. Se le asigna edad Albiano inferior - medio.

Formación Yumagual

Se trata de una potente unidad que puede alcanzar más de 500 m de espesor, siendo la formación que más aflora en el entorno de la zona

de estudio. Se caracteriza por bancos gruesos de calizas bituminosas laminares con intercalaciones de margas, lutitas y niveles delgados de areniscas cuarcíticas y limolitas. Se distinguen tres unidades: inferior, medio y superior. Se le asigna una edad comprendida entre el Albiano medio al superior hasta el Cenomaniano inferior.

Una característica de la Fm. Yumagual en la zona de estudio es que los bancos calcáreos intercalados forman escarpes notorios en el paisaje.

- Yumagual inferior:

Se sitúa de forma transicional sobre la Fm Pariatambo y tiene unos 90 m de potencia aproximadamente. Esta unidad, está constituida por bancos delgados de calizas packstone – grainstone con contenido en materia orgánica e intercalaciones de paquetes de margas gris oscuras de hasta 3 m de espesor. Se encuentran abundantes fósiles (bivalvos, ostreas y pelecípodos) y niveles de chert en su parte superior.

- Yumagual medio:

Es la unidad más potente de la formación, con 250 m de espesor aproximadamente. Comienza con grandes secuencias de caliza (packstone) con niveles de areniscas y limolitas que a techo se hacen

más frecuentes y con bancos de calizas de entre 3 y 5 m de espesor (mudstone), los bancos son ondulados de aspecto noduloso y las secuencias estrato-decrecientes. En la parte media es posible diferenciar un intervalo margoso que en su franja superior presenta niveles bioclásticos formados por fragmentos de fósiles (ostrea scyphax, bivalvos, gasterópodos, turrítelas, equinodermos, pelecípodos y amonites del género *Glottoceras* sp., y *Parengonoceras* sp.), este nivel presenta un espesor de 45 m. En el paso a la unidad superior abundan las intercalaciones de bancos de areniscas cuarcíticas que representan la influencia detrítica de la progradación de un delta proveniente de la zona oriental.

- Yumagual superior:

Alcanza 180 m de potencia. En la parte inferior se observan niveles de areniscas con granos finos a medios de cuarzo, estratificación cruzada y bioturbación, típica de ambientes de playa con influencia de mareas y sistemas de "lagoon". Según Jaillard (1987) estos afloramientos con influencia de mareas corresponderían al tope de la unidad media. En la parte media y superior de esta unidad, las calizas son de tono gris marrón a beige, los bancos aumentan su potencia presentando aspecto

noduloso y límites anastomosados, en la parte superior los niveles margosos disminuyen de espesor hasta desaparecer

Por tanto, la formación Yumagual se trata de una formación muy heterogénea donde se intercalan paquetes de calizas con niveles margosos detríticos y areniscas.

Formación Mujarrum

Esta unidad aflora en la parte sur de la zona de estudio con un espesor aproximado de 260 m. Posee dos miembros: el inferior denominado “Chorro” con bancos gruesos de calizas nodulares; y el superior llamado “Culebra”, con margas y lutitas delgadas.

➤ **Terciario**

Durante el Terciario (Eoceno-Mioceno), las rocas sedimentarias cretácicas fueron intruidas por una serie de cuerpos ígneos de diferente naturaleza.

Concretamente, el tajo objeto de estudio se sitúa sobre un pórfido-diorítico de forma sub vertical y diámetro de 600 a 700 m. Además se pueden encontrar otras rocas tales como mármoles y corneanas producto del metamorfismo y metasomatismo de contacto.

Como consecuencia de un sistema de vetillas de cuarzo (stockwork) provocado por la gran fracturación del pórfido existe una gran mineralización.

En la zona Sur del área se puede encontrar pórfidos granodioríticos. Y riolitas en la parte norte de la presa de relaves.

➤ **Cuaternario**

Materiales coluviales

Materiales detríticos de naturaleza variada asociados a las laderas. Corresponde con fragmentos gruesos (tamaño grava y bloques) en una matriz limo arcillosa.

Materiales aluviales

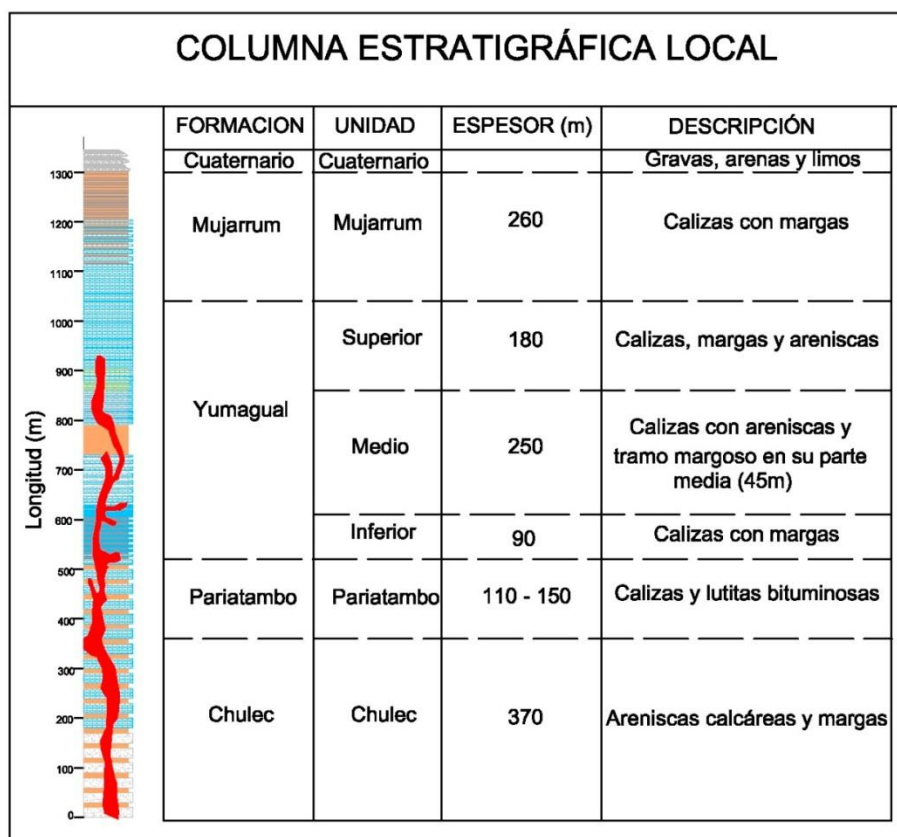
Materiales detríticos asociados a la dinámica de los ríos principales de la zona (Hualgayoc y Tingo). Corresponde con arenas y gravas en una matriz limo-arenosa y limo-arcillosa.

En la Tabla y Gráfico III-1 se presentan en resumen las diferentes formaciones y litologías aflorantes en el entorno de la zona de estudio.

Tabla III-1 Resumen de las unidades geológicas

Formación geológica	Unidad Geología	Espesor (m)	Litología
Chulec	Chulec	370	<i>Areniscas calcáreas y margas</i>
Pariatambo	Pariatambo	110-150	<i>Calizas y lutitas bituminosas</i>
Yumagual	Inferior	90	<i>Calizas con margas</i>
	Medio	250	<i>Calizas con areniscas y un tramo margoso en su parte media (45m)</i>
	Superior	180	<i>Calizas, margas y areniscas</i>
Rocas intrusivas y volcánicas	Rocas intrusivas		<i>Dacitas, dioritas, granodioritas y riolitas</i>
Mujarrum	Mujarrum	260	<i>Calizas con margas</i>
Aluvial Coluvial	Aluvial Coluvial		<i>Gravas y arenas con matrices limo arcillosa y limo arenosa</i>

GRÁFICO III- 1: Columna Estratigráfica Local



3.2.2. Geología estructural

El entorno estructural del área de estudio, está dominado por fallas sub verticales con direcciones NO - SE, característico de la tectónica Andina, y por estructuras posteriores (transandina) con direcciones NE – SO, que conforman una intrincada red de estructuras resultado de la acción de esfuerzos asociados a varias fases tectónicas, predominando el carácter distensivo (fallas normales).

Las fallas principales “Hualgayoc” y “El Tingo”, de orientación SO – NE (N40°), que enmarcan la zona de estudio de Norte a Sur, muestran un movimiento transcurrente de tipo senestral.

La falla “El Tingo”, al Norte, controla un valle de dirección SO – NE a partir de la intersección con la falla “El Sinchao” (N 150°), donde antiguamente se han explotado numerosos depósitos metálicos de leyes muy altas. Esta falla, en su tramo inicial corta afloramiento de rocas intrusivas y tufos riolíticos volcánicos.

La falla “Hualgayoc”, de dirección N55°, al sur de la zona de estudio, sigue el valle del río del mismo nombre, esta falla, tiene una componente vertical (normal) y un posterior movimiento sinestral, poniendo en contacto a la Fm. Mujarrún con la Fm. Yumagual.

Los límites al Oeste y Este de la zona, son fallas de orientación N150° y movimiento distensivo: “Las Tomas” y la falla “Mesa de Plata”.

En la parte central de la zona de estudio, se encuentran numerosas fallas NO - SE (N140°- 150°) que son cortadas a su vez por fallas Noreste- Suroeste y hacia el Sur pasan a ser N70° y mostrando componentes de tipo normal.

Hidrogeológicamente, las fracturas de la zona de estudio juegan un importante papel ya que pueden formar zonas preferentes de flujo así como barreras impermeables provocadas por el relleno por minerales de las mismas.

Establecida la geología detallada de la zona de estudio y con el respaldo de las columnas geológicas de los sondeos, se trazaron numerosas secciones geológicas (ver Mapa 4, 5 y 6), con la finalidad de obtener un bloque geológico 3D de la zona de estudio

En estas secciones puede observarse claramente que el movimiento de las fallas es distensivo (normal) con saltos de escasa importancia, excepto casos puntuales como es el caso de la falla Tomas y la falla de Hualgayoc, estas fallas, juegan un papel importante poniendo en contacto la formación Yumagual superior con Yumagual medio e incluso la formación Pariatambo con Yumagual medio.

3.3 Información hidrogeológica

3.3.1 Inventario de manantiales

En la zona se cuenta con varias campañas de inventario de manantiales y fuentes de agua, contenidos en los diferentes estudios previos. Estas fueron evaluadas y consolidadas en una base de datos, llegándose a recopilar un total de 271 puntos relacionados con manantiales y surgencias en toda la zona de estudio (Mapa 7).

El conjunto de manantiales y surgencias presentes en la zona de estudio presentan caudales promedios de surgencias que oscilan entre 0 y 47.09 l/s.

Se identificaron manantiales vinculados con la descarga de formaciones permeables por fisuración / karstificación, ya que presentan un régimen de descarga marcadamente estacional, como respuesta a un sistema de elevada difusividad (escasa inercia hidrodinámica).

Una vez estructurada la base de datos de manantiales y surgencias, se realizó un análisis de la naturaleza de éstas. La finalidad del análisis obedece a que es necesario establecer y diferenciar los puntos de descarga natural del flujo subterráneo (manantiales) y los puntos de drenaje asociados a flujos sub superficiales (surgencias), y por

ende no vinculados al sistema subterráneo de agua. Para establecer esta clasificación, se realizó un contraste con los datos geológicos (geología 3D) y piezométricos (mapa de isopiezas) elaborados.

Las estaciones calificadas como surgencias (170 puntos) presentan caudales promedios que oscilan entre 0 y 38.72 l/s.

Por otro lado, se identificó 95 estaciones calificadas como manantiales, cuyos caudales promedios oscilan entre 1.00 y 53.00 l/s. Aparecen 10 manantiales con caudales superiores a 10 l/s de promedio y 6 manantiales con caudales superiores a los 25 l/s.

De las estaciones identificadas como manantiales cabe destacar los situados en la quebrada de Hualgayoc: HME-1, HME-7, HME-11, HME-13, HME-14, HME-15, HME-6 y HME-9 (Tabla III-2).

Tabla III-2 Manantiales destacados de Hualgayoc

Manantiales	Caudales (l/s)							
	HME-1	HME-7	HME-11	HME-13	HME-14	HME-15	HME-6	HME-9
Mínimo	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Promedio	1,32	1,82	1,53	23,36	10,43	2,51	1,44	0,39
Máximo	6,57	14,20	4,10	160,20	69,70	7,96	9,80	1,74

De la tabla III-2, cabe resaltar los manantiales HME-13 y HME-14, ya que son los manantiales más importantes que descargan hacia el río Hualgayoc con caudales significativos del orden superior a 10 l/s

3.3.2 Piezómetros

En la zona de estudio se recopiló información de un total de 180 piezómetros (Mapa 8), que sirvieron para generar 417,510 datos de nivel piezométrico, tomados entre octubre de 2007 y junio de 2012.

Con la finalidad de realizar un mejor manejo de la información piezométrica, los datos fueron agrupados en siete grupos, según su ubicación geográfica dentro del entorno minero (tajo, tajo Norte, la planta, Sur, las tomas, presa de relaves y Norte).

De los 180 piezómetros se seleccionaron 74 piezómetros con un amplio número de registros piezométricos en el tiempo.

En la tabla III-3 se muestra la ubicación geográfica de las estaciones piezométricas seleccionadas.

Tabla III-3 Ubicación de estaciones piezométricas seleccionadas

Código	Este (m)	Norte (m)	Profundidad del pozo (m)	Fecha de referencia	Nivel agua (m.s.n.m.)	Zona
TCB-12-I	759 986,00	9 251 021,00	168,00	2012-05-29	3 822,00	Las Tomas
TCB-03-II	760 120,00	9 250 981,00	150,00	2012-05-29	3 830,00	Las Tomas
TCB-02-II	759 952,00	9 251 317,00	148,00	2012-05-29	3 820,00	Las Tomas
TCB-04-II	760 352,00	9 251 220,00	153,00	2012-05-29	3 822,00	Las Tomas
TCB-05-II	760 394,00	9 251 316,00	155,00	2012-05-29	3 839,00	Las Tomas
TCB-14-II	760 988,00	9 251 391,00	174,00	2012-05-29	3 810,00	Las Tomas
TCB-11-II	759 622,00	9 251 826,00	167,00	2012-05-29	3 803,00	Las Tomas
TCB-23A-II	759 604,00	9 251 787,00	189,00	2012-05-29	3 806,00	Las Tomas
TCB-23A-I	759 604,00	9 251 787,00	188,00	2012-05-29	3 804,00	Las Tomas
TCB-16-I	759 889,00	9 251 722,00	176,00	2012-05-29	3 763,00	Las Tomas
TCB-01-I	759 861,00	9 251 540,00	145,00	2012-05-08	3 803,00	Las Tomas
TCB-19-II	760 017,00	9 251 632,00	182,00	2012-05-29	3 782,00	Las Tomas
TCB-21-II	760 293,00	9 251 653,00	186,00	2012-05-29	3 805,00	Las Tomas
TCB-20A-II	760 163,00	9 251 640,00	184,00	2012-05-29	3 795,00	Las Tomas
TCB-13-II	759 963,00	9 251 773,00	172,00	2012-05-29	3 751,00	Las Tomas
PPT-1-I	759 835,00	9 251 344,00	108,00	2012-05-29	3 803,00	Las Tomas
PPT-8-I	761 052,00	9 251 510,00	110,00	2012-05-25	3 789,00	Las Tomas
GFG-53-I	760 742,00	9 251 722,00	21,00	2012-05-05	3 779,00	Las Tomas
TCB-06-II	760 753,00	9 251 025,00	157,00	2012-05-29	3 842,00	Sur
TCB-07-II	760 695,00	9 250 934,00	159,00	2012-05-29	3 846,00	Sur
TCB-07-I	760 695,00	9 250 934,00	158,00	2012-05-29	3 846,00	Sur
TCB-06-I	760 753,00	9 251 025,00	156,00	2012-05-29	3 843,00	Sur
TCB-09-II	761 264,00	9 250 913,00	163,00	2012-05-29	3 900,00	Sur
TCB-10-II	761 297,00	9 251 252,00	165,00	2012-05-23	3 862,00	Sur
TCB-08-I	761 042,00	9 251 201,00	160,00	2012-05-29	3 843,00	Sur
GWI-22-II	760 442,00	9 250 908,00	72,00	2012-05-25	3 862,00	Sur
GWI-16-I	761 679,00	9 251 665,00	65,00	2012-04-17	3 832,00	Sur
GWI-16-II	761 679,00	9 251 665,00	66,00	2012-04-17	3 832,00	Sur
HPI-7-I	761 763,00	9 251 056,00	94,00	2012-05-06	3 827,00	Sur
GWI-24-I	761 853,00	9 250 928,00	73,00	2012-05-25	3 829,00	Sur
GFG-84-II	760 146,00	9 252 126,00	25,00	2012-04-08	3 759,00	Presa
GFG-95-I	760 060,00	9 252 240,00	28,00	2012-04-08	3 675,00	Presa
GFG-90-I	760 076,00	9 252 324,00	26,00	2012-04-08	3 705,00	Presa
TPI-1-II	760 093,00	9 252 370,00	191,00	2012-04-01	3 696,00	Presa
RQ-01-II	761 172,00	9 252 588,00	125,00	2012-05-29	3 780,00	Presa
RQ-02-II	761 295,00	9 252 616,00	127,00	2012-05-29	3 758,00	Presa
RQ-03-II	761 402,00	9 252 608,00	129,00	2012-05-29	3 773,00	Presa

Código	Este (m)	Norte (m)	Profundidad del pozo (m)	Fecha de referencia	Nivel agua (m.s.n.m.)	Zona
RQ-04-I	761 500,00	9 252 580,00	131,00	2012-05-29	3 749,00	Presa
GWI-07-I	761 672,00	9 252 627,00	49,00	2012-05-05	3 750,00	Presa
BHF-12-II	762 229,00	9 253 013,00	8,00	2012-05-29	3 745,00	Presa
GFG-97-II	760 205,00	9 252 654,00	31,00	2012-04-14	3 624,00	Norte
TPI-2A-I	760 476,00	9 252 731,00	192,00	2012-05-25	3 601,00	Norte
TPI-3-I	760 805,00	9 252 907,00	193,00	2012-05-25	3 590,00	Norte
PVW-1-I	760 823,00	9 252 860,00	112,00	2012-05-20	3 590,00	Norte
PVW-2-I	760 820,00	9 252 859,00	113,00	2012-05-20	3 591,00	Norte
RQ-09-I	760 939,00	9 252 851,00	139,00	2012-05-29	3 629,00	Norte
RQ-11-I	760 990,00	9 252 966,00	143,00	2012-05-29	3 596,00	Norte
PPT-4-I	761 018,00	9 253 025,00	109,00	2012-05-25	3 586,00	Norte
RQ-08-II	761 275,00	9 252 965,00	138,00	2012-05-29	3 647,00	Norte
GWI-18-I	761 915,00	9 251 264,00	67,00	2012-05-25	3778.1	La planta
GWI-27-I	762 032,00	9 251 332,00	80,00	2012-05-06	3778.7	La planta
GWI-27-II	762 032,00	9 251 332,00	81,00	2012-05-06	3778.8	La planta
GWI-14-I	762 072,00	9 251 394,00	60,00	2012-05-25	3781.5	La planta
GWI-13-I	761 945,00	9 251 602,00	56,00	2012-05-05	3782.7	La planta
GWI-13-II	761 945,00	9 251 602,00	57,00	2012-05-05	3782.7	La planta
GWI-15-I	762 115,00	9 251 562,00	63,00	2012-05-05	3 785,00	La planta
GWI-03-II	762 238,00	9 251 701,00	40,00	2012-05-25	3794.3	La planta
GWI-06-II	762 482,00	9 251 631,00	48,00	2012-05-25	3828.7	La planta
H-1-I	762 192,00	9 250 439,00	82,00	2012-05-25	3 781,00	La planta
PPT-9-I	761 766,00	9 251 468,00	111,00	2012-05-05	3820.7	La planta
GWI-05-II	762 271,00	9 251 579,00	45,00	2012-05-25	3814.2	La planta
HPI-17-I	762 858,00	9 252 410,00	89,00	2012-05-25	3778.6	Tajo Norte
HPI-15-I	763 121,00	9 252 504,00	87,00	2012-05-25	3804.9	Tajo Norte
HPI-4-I	763 215,00	9 252 442,00	92,00	2012-05-25	3808.6	Tajo Norte
HPI-9-I	763 225,00	9 252 445,00	96,00	2012-05-25	3807.7	Tajo Norte
HPI-14-I	763 495,00	9 252 849,00	86,00	2012-05-06	3640.2	Tajo Norte
PzRu-17-II	763 060,00	9 252 452,00	118,00	2012-05-31	3803.3	Tajo Norte
PzRu-20-I	763 572,00	9 252 422,00	121,00	2012-05-31	3793.4	Tajo Norte
HPI-8-I	763 503,00	9 252 303,00	95,00	2012-05-06	3 811,00	Tajo
HPI-11-I	763 367,00	9 251 790,00	84,00	2012-05-25	3 825,00	Tajo
HPI-1-I	763 376,00	9 251 798,00	90,00	2012-05-25	3 825,00	Tajo
PzRu-21-I	763 663,00	9 252 136,00	122,00	2012-05-31	3 806,00	Tajo
PzAk-16-I	763 088,00	9 251 742,00	116,00	2012-05-31	3 831,00	Tajo
PzAK-10-I	763 280,00	9 251 945,00	115,00	2012-05-31	3 826,00	Tajo

3.3.3 Pozos de bombeo

En la zona se identificó 10 pozos de bombeos, 9 de drenaje del tajo y 1 para el abastecimiento de los campamentos y la planta (PPC-1) (Mapa 9).

En total se dispuso de 7 284 datos de caudales bombeados con series de datos mensuales desde enero de 2008, hasta septiembre de 2012. En la tala III-4 se puede observar los datos generales y caudales medios, máximos y mínimos de los pozos de bombeo.

Además de los datos de caudales, en los pozos de bombeo se ha tomado un total 8 649 medidas piezométricas, entre enero de 2008 y septiembre de 2012.

Tabla III-4 Datos generales de pozos de bombeo y estadística básica de caudales

Código	Este (m)	Norte (m)	Profundidad del pozo (m)	Caudal de extracción (l/s)		
				Min	Promedio	Max
PP-11	763 310,50	9 251 959,00	184,00	0,50	4,70	10,00
PP-12	763 647,50	9 252 144,00	185,00	0,50	1,60	5,50
PP-13	763 608,50	9 252 304,00	150,00	0,50	1,10	7,00
PP-15	762 990,70	9 251 774,00	170,00	0,10	2,00	7,50
PP-16	763 118,60	9 251 737,00	226,00	1,00	5,90	13,90
PP-3	763 465,60	9 252 338,00	218,00	0,70	3,80	11,90
PP-4	763 372,20	9 251 787,00		0,40	1,40	9,80
PP-5	762 915,20	9 251 937,00	200,00	0,40	1,50	3,00
PP-6	763 564,70	9 251 979,00	201,00	0,10	0,50	3,30
PPC-1	761 048,50	9 250 851,00		1,00	2,10	7,30

3.3.4 Pruebas hidráulicas en sondeos

En la zona se realizó un total de 286 pruebas de air-lift, 228 pruebas Lefranc y 388 pruebas Lugeón, además de 4 pruebas de bombeo. En la Tabla III-5 se observa los siguientes datos de permeabilidad:

- Aglomerados de Tobas Volcánicas: $5,00 \times 10^{-9}$ m/s a $9,40 \times 10^{-6}$ m/s, con un valor promedio de $1,34 \cdot 10^{-6}$ m/s.
- Dioritas: $2,40 \times 10^{-10}$ m/s a $2,36 \times 10^{-6}$ m/s, con un valor promedio de $3,26 \times 10^{-7}$ m/s.
- Brechas en fallas: $8,10 \times 10^{-10}$ m/s a $2,02 \times 10^{-6}$ m/s, con un valor promedio de $4,12 \times 10^{-7}$ m/s.
- Calizas: $3,50 \times 10^{-10}$ m/s a $1,02 \times 10^{-5}$ m/s, con un valor promedio de $1,72 \times 10^{-6}$ m/s.
- Pórfidos dioríticos: $1,60 \times 10^{-10}$ m/s a $3,36 \times 10^{-5}$ m/s, con un valor promedio de $9,78 \times 10^{-7}$ m/s.
- Riolitas: $3,40 \cdot 10^{-9}$ m/s a $1,20 \cdot 10^{-6}$ m/s, con un valor promedio de $4,24 \cdot 10^{-7}$ m/s.

- Brechas riolíticas: $5,00 \times 10^{-9}$ m/s a $5,70 \times 10^{-7}$ m/s, con un valor promedio de $2,35 \times 10^{-7}$ m/s.
- Tobas riolíticas: $3,10 \times 10^{-9}$ m/s a $1,76 \times 10^{-6}$ m/s, con un valor promedio de $4,46 \times 10^{-7}$ m/s.
- Arenas y gravas: $2,61 \times 10^{-5}$ m/s a $9,83 \times 10^{-5}$ m/s, con un valor promedio de $6,22 \times 10^{-5}$ m/s.
- Suelo: $1,00 \times 10^{-6}$ m/s.

Tabla III-5 Ensayos de permeabilidad - WMC – 2008

Código	Roca	Tramo de Ensayo (m)	Nivel Freático (m)	Caudal Máximo (l/min)	Presión Máxima (bar)	K cm/s	Tipo de Flujo	Observaciones
GFG-003	Limestone	30,30 - 40,55	39,19	121,60	0,90	4,40E-04	Tramo muy permeable	<i>No se llega a alcanzar las presiones de prueba</i>
GFG-004	Limestone	30,80 - 36,30	34,25	46,60	3,45	5,90E-05	Dilatación	
GFG-005	Limestone	22,70 - 30,65	28,13	1,80	2,41	2,50E-06	Laminar	
GFG-006a	Limestone	25,60 - 35,20	28,30	0,00	3,10	3,50E-08	Tramo impermeable	
GFG-006b	Limestone	20,70 - 30,60	27,65	14,60	2,03	2,70E-05	Relleno	
GFG-008	Limestone	3,60 - 12,10	2,34	3,80	0,69	3,60E-05	Relleno	
GFG-008	Limestone	13,70 - 25,75	2,34	1,40	2,07	3,60E-06	Laminar	
GFG-009	Limestone	12,20 - 22,10	12,58	3,90	2,07	1,10E-05	Laminar	
GFG-010	Limestone	5,50 - 11,80	6,34	5,00	1,03	4,20E-05	Erosión	
GFG-010	Limestone	17,40 - 23,65	6,34	10,00	3,45	2,50E-05	Dilatación	<i>Antes de iniciar la prueba el manómetro una presión máxima de 1,034 bar estabilizándose en 0,69 bar</i>
GFG-011	Limestone	10,35 - 15,00	9,21	18,00	1,38	1,30E-04	Relleno	
GFG-011	Limestone	15,00 - 17,90	9,21	9,20	1,38	7,00E-05	Relleno	
GFG-011	Limestone	18,70 - 21,40	9,21	3,50	1,72	4,00E-05	Dilatación	
GFG-011	Shale	22,60 - 25,05	9,21	0,01	2,07	4,40E-08	Laminar	
GFG-011	Shale	25,00 - 28,35	9,21	0,60	2,76	2,70E-06	Laminar	
GFG-011	Shale	28,30 - 31,15	9,21	0,50	2,76	2,40E-06	Laminar	
GFG-011	Shale	30,00 - 36,20	9,21	0,50	2,76	1,20E-06	Laminar	

Código	Roca	Tramo de Ensayo (m)	Nivel Freático (m)	Caudal Máximo (l/min)	Presión Máxima (bar)	K cm/s	Tipo de Flujo	Observaciones
GFG-011	Shale	36,70 - 40,60	9,21	3,50	3,79	1,30E-05	Dilatación	
GFG-011	Shale	41,30 - 46,50	9,21	1,40	4,48	7,00E-06	Erosión	
GFG-011	Shale	46,20 - 51,00	9,21	1,60	5,17	2,50E-06	Dilatación	
GFG-011	Shale	51,15 - 56,35	9,21	1,00	5,52	1,50E-06	Laminar	
GFG-011	Rhyolite Breccia	56,85 - 61,55	9,21	8,80	6,21	1,30E-05	Dilatación	
GFG-011	Rhyolite Breccia	61,80 - 67,30	9,21	28,60	6,55	5,70E-05	Relleno	
GFG-011	Shale	67,30 - 77,30	9,21	29,80	4,55	7,00E-05	-	<i>U.L. calculado con 2 estadio, por by pass en el 3er estadio</i>
GFG-011	Shale	77,55 - 87,55	9,21	11,00	-	1,45E-04	-	<i>Lefranc de carga constante</i>
GFG-011	Fault Breccia	87,55 - 98,55	9,21	0,68	9,31	1,00E-06	Laminar	
GFG-011	Rhyolite Breccia	99,40 - 108,40	9,21	1,20	10,00	5,00E-07	Laminar	
GFG-011	Rhyolite Breccia	108,40 - 119,05	9,21	0,00	5,58	-	-	<i>En el 1er. y 2do. estadio no hay consumo de agua y en el 3er. estadio se observa by pass</i>
GFG-011	Rhyolite Tuff	119,45 - 129,45	9,21	0,68	10,00	8,00E-07	Laminar	
GFG-011	Rhyolite Tuff	130,10 - 140,35	9,21	6,80	10,00	1,20E-06	Laminar	
GFG-011	Rhyolite Tuff	143,80 - 150,95	9,21	0,20	9,31	3,10E-07	Laminar	
GFG-012	Rhyolite Tuff	3,10 - 7,05	1,65	1,50	-	1,76E-04	-	<i>Lefranc de carga constante</i>
GFG-012	Fault Breccia	7,60 - 9,95	1,65	3,50	-	1,85E-04	-	<i>Lefranc de carga variable</i>
GFG-012	Fault Breccia	10,70 - 13,20	1,65	5,50	-	2,02E-04	-	<i>Lefranc de carga variable</i>
GFG-012	Fault Breccia	10,70 - 16,50	1,65	0,80	-	5,91E-05	-	<i>Lefranc de carga constante</i>

Código	Roca	Tramo de Ensayo (m)	Nivel Freático (m)	Caudal Máximo (l/min)	Presión Máxima (bar)	K cm/s	Tipo de Flujo	Observaciones
GFG-012	Fault Breccia	10,70 - 19,80	1,65	2,50	-	2,29E-05	-	<i>Lefranc de carga constante</i>
GFG-012	Fault Breccia	10,70 - 23,10	1,65	1,50	-	4,09E-05	-	<i>Lefranc de carga constante</i>
GFG-012	Fault Breccia	10,70 - 26,30	1,65	1,50	-	3,39E-05	-	<i>Lefranc de carga constante</i>
GFG-012	Fault Breccia	10,70 - 31,50	1,65	0,00	-	-	-	<i>Tramo impermeable - Lefranc de carga constante, no hay toma de agua.</i>
GFG-012	Fault Breccia	10,70 - 35,00	1,65	6,00	-	3,50E-06	-	<i>Lefranc de carga variable</i>
GFG-012	Fault Breccia	35,80 - 40,80	1,65	0,10	3,79	7,90E-07	Laminar	
GFG-012	Fault Breccia	42,20 - 47,25	1,65	1,00	2,90	6,20E-06	-	<i>U.L. calculado con 2 estadio, por by pass en el 3er estadio</i>
GFG-012	Fault Breccia	48,00 - 52,80	1,65	3,30	3,31	1,90E-05	-	<i>U.L. calculado con 2 estadio, por by pass en el 3er estadio</i>
GFG-012	Fault Breccia	58,40 - 63,90	1,65	0,00	6,21	-	-	<i>Tramo impermeable, no hay toma agua</i>
GFG-012	Fault Breccia	64,00 - 69,80	1,65	0,20	6,89	4,80E-07	Laminar	
GFG-012	Fault Breccia	69,50 - 79,25	1,65	0,06	7,24	8,10E-08	Laminar	
GFG-012	Fault Breccia	78,80 - 89,75	1,65	0,52	8,27	1,70E-06	Laminar	
GFG-012	Fault Breccia	89,80 - 100,10	1,65	0,00	9,65	-	-	<i>Tramo impermeable, no hay toma de agua</i>
GFG-012	Porphy Diorite	100,30 - 111,20	1,65	0,56	10,34	6,50E-07	Laminar	
GFG-012	Porphy Diorite	112,80 - 124,90	1,65	3,20	10,34	3,00E-06	Laminar	
GFG-013	Soil	10,70 - 13,95	8,70	3,00	-	1,00E-04	-	<i>Lefranc de carga constante</i>
GFG-013	Porphy Diorite	16,50 - 19,55	8,70	16,80	1,03	2,30E-04	Erosión	
GFG-013	Porphy Diorite	19,50 - 24,60	8,70	0,30	1,72	3,10E-06	Relleno	
GFG-013	Porphy Diorite	24,20 - 27,10	8,70	0,34	2,41	5,40E-06	Relleno	

Código	Roca	Tramo de Ensayo (m)	Nivel Freático (m)	Caudal Máximo (l/min)	Presión Máxima (bar)	K cm/s	Tipo de Flujo	Observaciones
GFG-013	Porphy Diorite	27,10 - 30,20	8,70	28,80	3,17	2,30E-04	Turbulento	
GFG-013	Porphy Diorite	31,00 - 35,00	8,70	0,50	3,79	1,40E-06	Laminar	
GFG-013	Porphy Diorite	35,00 - 39,80	8,70	5,40	3,79	3,40E-05	Erosión	
GFG-013	Porphy Diorite	41,35 - 45,30	8,70	0,26	4,48	2,40E-07	Laminar	
GFG-013	Porphy Diorite	45,30 - 51,60	8,70	0,10	4,83	1,40E-07	Laminar	
GFG-013	Porphy Diorite	51,80 - 57,40	8,70	0,20	5,52	2,80E-07	Laminar	
GFG-013	Porphy Diorite	57,80 - 62,00	8,70	0,10	6,21	1,00E-07	Laminar	
GFG-013	Porphy Diorite	62,80 - 68,05	8,70	0,02	6,55	1,60E-08	Laminar	
GFG-013	Porphy Diorite	68,30 - 78,00	8,70	0,32	7,24	1,80E-07	Laminar	
GFG-013	Porphy Diorite	78,15 - 88,65	8,70	0,60	9,31	6,00E-07	Laminar	
GFG-013	Porphy Diorite	89,05 - 99,25	8,70	0,24	10,00	3,80E-07	Laminar	
GFG-013	Porphy Diorite	99,80 - 109,70	8,70	0,20	8,96	6,60E-07	Erosión	<i>U.L. calculado con 2 estadios por by pass en el 3er. estadio</i>
GFG-013	Porphy Diorite	109,80 - 120,45	8,70	47,20	10,00	6,40E-05	Erosión	<i>U.L. calculado con 2 estadios por by pass en el 3er. estadio</i>
GFG-013	Porphy Diorite	120,80 - 129,60	8,70	3,60	10,34	8,20E-07	Laminar	
GFG-013	Porphy Diorite	130,10 - 140,30	8,70	1,60	10,34	5,90E-07	Laminar	
GFG-014	Porphy Diorite	8,30 - 22,70	6,79	34,00	-	3,70E-05	-	<i>Ensayo Lefranc.</i>
GFG-014	Porphy Diorite	24,00 - 34,45	7,04	15,20	1,72	3,70E-05	Relleno	
GFG-014	Porphy Diorite	45,30 - 52,00	7,04	0,40	3,45	1,40E-06	Relleno	
GFG-014	Porphy Diorite	53,05 - 59,35	7,04	0,58	4,14	2,00E-06	Laminar	
GFG-014	Porphy Diorite	59,50 - 66,90	7,04	0,56	5,52	1,50E-06	Laminar	

Código	Roca	Tramo de Ensayo (m)	Nivel Freático (m)	Caudal Máximo (l/min)	Presión Máxima (bar)	K cm/s	Tipo de Flujo	Observaciones
GFG-014	Porphy Diorite	71,40 - 76,20	7,04	0,52	4,48	1,70E-06	Laminar	
GFG-014	Porphy Diorite	75,90 - 83,80	7,04	0,88	6,89	1,20E-06	-	
GFG-014	Porphy Diorite	85,30 - 89,50	7,04	-	-		-	<i>Por by pass en el tramo de ensayo, no se tiene datos.</i>
GFG-014	Porphy Diorite	89,10 - 93,60	7,04	62,00	4,14	3,00E-04	-	<i>U.L. calculado con 2 estadios por by pass en el 3er. estadio</i>
GFG-015	Rhyolite	11,56 - 22,03	10,53	1,00	1,72	8,90E-07	Laminar - relleno	
GFG-015	Rhyolite	17,08 - 26,74	10,53	0,20	1,79	3,40E-07	Laminar	
GFG-015	Rhyolite	27,88 - 33,95	10,53	29,00	3,10	1,20E-04	Relleno - laminar	<i>Ensayo no representativo por retorno de agua en la perforación</i>
GFG-015	Rhyolite	33,50 - 41,19	10,53	-	-		-	<i>Se realizaron 3 intentos para la prueba, obturando en 32,10, 31,46 y 33,5 m, no se obtiene resultado por by pass.</i>
GFG-015	Rhyolite	26,34 - 41,19	10,53	7,58	-	7,37E-05	-	<i>Ensayo Lefranc.</i>
GFG-015	Rhyolite	44,50 - 48,37	10,53	-	-		-	<i>Se realizaron 2 intentos para la prueba, se produce retorno de agua en la perforación (by pass).</i>
GFG-015	Rhyolite	26,34 - 48,37	10,53	12,00	-	7,50E-05	-	<i>Ensayo Lefranc.</i>
GFG-015	Rhyolite	48,00 - 54,32	10,53	7,80	2,76	1,90E-05	Turbulento	<i>Durante el ensayo se produce retorno de agua por comunicación de fracturas (by pass).</i>
GFG-015	Rhyolite	26,34 - 60,02	10,53	8,93	-	4,24E-05	-	<i>Ensayo Lefranc.</i>

Código	Roca	Tramo de Ensayo (m)	Nivel Freático (m)	Caudal Máximo (l/min)	Presión Máxima (bar)	K cm/s	Tipo de Flujo	Observaciones
GFG-015	Rhyolite	61,20 - 66,72	10,53	0,90	0,69	7,70E-06	Laminar	-
GFG-015	Diorite	65,50 - 72,36	10,53	0,60	5,52	7,50E-07	Laminar	A las presiones de 54 y 27 psi, no se observa consumo de agua
GFG-015	Diorite	75,50 - 80,19	10,53	0,64	6,89	2,50E-06	-	A la presión de 100 psi 3er estadio, se produce fuga de agua por comunicación de fracturas, se calcula U.L. con 2 estadios
GFG-015	Diorite	79,50 - 85,13	10,53	1,00	6,21	2,30E-06	Laminar	
GFG-015	Diorite	86,00 - 91,93	10,53	4,18	8,27	1,90E-05	Erosión	
GFG-016	Porphy Diorite	4,00 - 10,50	2,77	1,00	0,41	1,90E - 05	Laminar	
GFG-016	Porphy Diorite	10,80 - 14,30	2,77	-	-	-	No determinado	Retorno de agua de ensayo por by pass en el 1er. estadio, se suspende el ensayo.
GFG-016	Porphy Diorite	14,00 - 18,50	2,77	1,60	0,48	4,70E-05	Flujo relleno	
GFG-016	Porphy Diorite	19,00 - 23,00	2,77	0,18	0,69	3,00E-06	Laminar	
GFG-016	Porphy Diorite	23,50 - 26,45	2,77	1,70	2,07	1,60E - 05	Flujo relleno	
GFG-016	Porphy Diorite	26,00 - 29,25	2,77	1,92	2,41	1,90E-05	Laminar	
GFG-016	Porphy Diorite	29,00 - 35,50	2,77	12,60	1,72	1,70E-04	-	Se produce retorno de agua del a la presión de 25 psi, U.L. se calcula con el 1er. estadio por by pass del 2do. estadio
GFG-016	Porphy Diorite	31,90 - 36,50	2,77	0,10	2,76	2,80E-07	Laminar	
GFG-016	Porphy Diorite	36,30 - 41,75	2,77	0,80	3,45	2,40E- 06	Dilatación	

Código	Roca	Tramo de Ensayo (m)	Nivel Freático (m)	Caudal Máximo (l/min)	Presión Máxima (bar)	K cm/s	Tipo de Flujo	Observaciones
GFG-016	Porphy Diorite	41,30 - 47,90	2,77	4,20	4,14	1,70E-05	Erosión	
GFG-016	Porphy Diorite	48,30 - 53,80	2,77	1,70	4,83	5,50E-06	Dilatación	
GFG-016	Porphy Diorite	54,80 - 58,40	2,77	9,50	5,52	4,40E - 05	Turbulento	
GFG-016	Porphy Diorite	58,30 - 64,75	2,77	17,40	3,52	1,30E-04	-	<i>Se produce retorno de agua del ensayo a la presión de 3,52 bar U.L. calculado con el 1er. estadio por by pass en el 2do. Est.</i>
GFG-016	Porphy Diorite	65,50 - 70,70	2,77	1,40	5,86	4,70E-06	Relleno	
GFG-016	Porphy Diorite	71,50 - 83,60	2,77	10,50	6,55	1,10E-05	Relleno	
GFG-016	Porphy Diorite	83,30 - 95,50	2,77	10,60	6,89	1,20E-05	Turbulento	
GFG-017	Aglomerate Tuff	4,50 - 7,65	1,00	21,40	0,34	7,60E -05	Relleno	
GFG-017	Aglomerate Tuff	8,30 - 11,90	1,00	8,40	0,28	7,60E - 04	-	<i>U.L. calculado con 2 estadios por by pass en el 3er. estadio</i>
GFG-017	Aglomerate Tuff	13,00 - 16,10	1,00	-	-		-	<i>Con la presión de 4 psi se produce retorno de agua en la perforación. No se tiene datos por by pass</i>
GFG-017	Aglomerate Tuff	4,90 - 16,10	1,00	1,00	-	9,22E-05	-	<i>Ensayo Lefranc</i>
GFG-017	Aglomerate Tuff	17,30 - 19,30	1,00	0,02	0,41	1,70E-06	Laminar	
GFG-017	Aglomerate Tuff	21,00 - 23,50	1,00	2,10	1,72	3,90E-05	Relleno	<i>No se logra obtener de 20,00 a 23,50 mt, por retorno de agua, se baja el packer hasta 21 m</i>

Código	Roca	Tramo de Ensayo (m)	Nivel Freático (m)	Caudal Máximo (l/min)	Presión Máxima (bar)	K cm/s	Tipo de Flujo	Observaciones
GFG-017	Aglomerate Tuff	24,00 -28,10	1,00	0,12	2,41	1,80E-06	Erosión	
GFG-017	Aglomerate Tuff	28,00 - 31,00	1,00	34,00	1,03	9,40E-04		<i>Se produce by pass 1er estadio en la sexta lectura a la presión de 30 psi</i>
GFG-017	Aglomerate Tuff	31,50 - 35,70	1,00	-	-	-	No determinado	<i>Con cero de presión se produce by pass. (inicio de ensayo)</i>
GFG-017	Aglomerate Tuff	31,80 - 35,70	1,00	0,39	-	9,14E-07	-	<i>Ensayo lefranc</i>
GFG-017	Aglomerate Tuff	38,40 - 40,30	1,00	-	-		-	<i>De 37,40 a 40,30 m con presión de 0,28 bar se produce by pass (inicio de ensayo).</i>
GFG-017	Aglomerate Tuff	40,00 - 46,15	1,00	-	-		-	<i>De 40,00 a 46,10 con presión de 0,69 bar se produce by pass (inicio de ensayo).</i>
GFG-017	Aglomerate Tuff	23,00 - 46,15	1,00	35,80	2,76	1,30E-04	-	<i>Por by pass en diversos tramos anteriores donde no se pudo obturar, se levanta el padker a 23, 00 m para realizar una prueba de comprobación hasta los 46,15 m. continua by pass en el 2do. Estadio, U.L. calculado con el 1er. estadio.</i>
GFG-017	Aglomerate Tuff	46,00 - 50,85	1,00	0,02	1,03	8,00E-07	Erosión	
GFG-017	Aglomerate Tuff	51,00 - 55,65	1,00	0,02	2,07	5,00E-07	Erosión	

Código	Roca	Tramo de Ensayo (m)	Nivel Freático (m)	Caudal Máximo (l/min)	Presión Máxima (bar)	K cm/s	Tipo de Flujo	Observaciones
GFG-017	Aglomerate Tuff	55,00 - 60,15	1,00	0,48	5,52	1,90E - 06	Laminar	
GFG-018	Sandy Gravels	14,75 - 15,15	14,95	112,00	-	9,83E-03	-	<i>Ensayo Lefranc.</i>
GFG-018	Sand y Gravels	23,10 - 24,10	16,96	64,00	-	2,61E-03	-	<i>Ensayo Lefranc.</i>
GFG-018	Porphy Diorite	31,00 - 36,45	16,96	1,90	2,07	1,60E - 05	Relleno	<i>En los estadios 2,3,4 y 5 no se tiene consumo de agua.</i>
GFG-018	Porphy Diorite	40,50 - 45,90	16,96	1,10	2,41	2,70E-06	Relleno	
GFG-018	Porphy Diorite	45,50 - 50,20	16,96	1,84	3,45	7,20E-06	Relleno	
GFG-018	Porphy Diorite	51,00 - 58,75	16,96	1,40	4,83	1,60E-06	Dilatación	
GFG-018	Porphy Diorite	59,50 - 65,10	16,96	8,64	5,86	1,70E-05	-	
GFG-018	Porphy Diorite	69,50 - 75,50	16,96	1,30	5,86	5,60E-06	Relleno	
GFG-018	Porphy Diorite	75,50 - 86,50	16,96	2,30	6,21	2,60E - 06	Laminar	
GFG-018	Porphy Diorite	86,95 - 96,45	16,96	5,00	9,65	4,00E-06	Turbulento	
GFG-018	Porphy Diorite	97,00 - 106,35	16,96	11,00	6,21	1,40E-05	Laminar	
GFG-018	Porphy Diorite	107,00 - 116,20	16,96	48,20	10,34	1,30E- 05	Dilatación	
GFG-018	Porphy Diorite	116,50 - 126,95	16,96	21,00	5,52	2,80E - 05	-	<i>U.L. calculado con 2 estadios por by pass en el 3er. estadio</i>
GFG-018	Porphy Diorite	125,50 -136,55	16,96	67,60	2,76	1,40E - 04	-	<i>U.L. calculado con 1 estadio por by pass en el 2do. estadio</i>
GFG-018	Porphy Diorite	127,30 - 136,55	16,96	0,70	6,89	1,00E - 06	Dilatación	
GFG-022	Limestone	65,00 - 73,50	66,22	87,00	2,07	1,83E-04		<i>No se llega a alcanzar las presiones de prueba</i>
GFG-022	Limestone	74,50 - 83,00	66,22	95,00	2,62	1,92E-04		<i>No se llega a alcanzar las presiones de prueba</i>

Código	Roca	Tramo de Ensayo (m)	Nivel Freático (m)	Caudal Máximo (l/min)	Presión Máxima (bar)	K cm/s	Tipo de Flujo	Observaciones
GFG-024	Limestone	54,00 - 62,70	50,38	85,00	2,07	1,62E-04		No se llega a alcanzar las presiones de prueba
GFG-024	Limestone	64,00 - 73,50	50,38	90,00	1,03	2,12E-04		No se llega a alcanzar las presiones de prueba
GFG-024	Limestone	74,00 - 83,00	50,38	99,00	1,72	2,86E-04		No se llega a alcanzar las presiones de prueba
GFG-024	Limestone	84,00 - 99,90	50,38	87,00	6,89	1,46E-04	Flujo Erosión	
GFG-026	Porphy Diorite	6,00 - 12,90	1,24	0,40	0,41	2,60E-06		Casi nulo consumo de agua.
GFG-026	Porphy Diorite	13,00 - 22,00	1,24	0,20	1,38	9,10E-07	Flujo Relleno	
GFG-027	Porphy Diorite	10,50 - 20,50	1,04	98,00	0,41	3,36E-03		No se llega a alcanzar las presiones de prueba
GFG-028	Porphy Diorite	10,50 - 20,50	1,21	0,00	1,72	0,00E+00		No se llega a alcanzar las presiones de prueba
GFG-029	Limestone	5,50 - 14,50	6,05	83,00	1,03	9,40E-04		No se llega a alcanzar las presiones de prueba
GFG-029	Limestone	9,50 - 14,50	6,05	83,00	1,10	1,02E-03	Flujo Relleno	
GFG-029	Limestone	13,50 - 23,50	6,05	13,00	2,41	4,94E-05	Flujo Relleno	
GFG-030	Limestone	75,00 - 85,65	75,93	97,00	1,52	1,55E-04		No se llega a alcanzar las presiones de prueba
GFG-031	Limestone	54,30 - 64,30	48,11	13,00	6,89	5,98E-06	Flujo Dilatación	
GFG-031	Limestone	70,00 - 80,00	48,11	1,00	8,62	2,60E-07	Flujo Dilatación	Consumo casi nulo.
GFG-035	Limestone	44,00 - 53,70	45,24	90,00	1,93	2,44E-04	Flujo Erosión.	
GFG-035	Limestone	53,00 - 62,70	45,24	0,00	7,24	0,00E+00		No hubo consumo.

Código	Roca	Tramo de Ensayo (m)	Nivel Freático (m)	Caudal Máximo (l/min)	Presión Máxima (bar)	K cm/s	Tipo de Flujo	Observaciones
GFG-036	Diorite	10,00 - 13,60	5,65	5,00	-	2,36E-04	-	<i>Ensayo Lefranc.</i>
GFG-036	Diorite	12,50 - 17,10	5,65	14,30	0,62	2,5E -04	Relleno	<i>No se logra alcanzar la presión del 2do. estadio, se considera tomar los valores de UL con el caudal y presión máximo.</i>
GFG-036	Diorite	18,80 - 24,20	5,65	1,90	1,03	1,60E-05	Relleno	
GFG-036	Diorite	25,70 - 29,75	5,65	6,40	1,93	6,00E-05	Relleno	
GFG-036	Diorite	30,50 - 34,90	5,65	4,00	3,59	2,10E-06	Turbulento	
GFG-036	Diorite	34,90 - 42,70	5,65	3,10	3,10	8,40E-06	Relleno	
GFG-036	Diorite	44,30 - 50,65	5,65	-	-		-	<i>Por by pass en el 1er. Estadio no se realiza ensayo.</i>
GFG-036	Diorite	46,30 - 50,65	5,65	0,70	4,14	3,3E - 06	Laminar	
GFG-037	Diorite	10,70 - 13,95	5,65	4,00	-	2,09E-04	-	<i>Lefranc de carga constante</i>
GFG-037	Diorite	15,20 - 18,60	5,65	5,00	-	2,12E-04	-	<i>Lefranc de carga constante</i>
GFG-037	Diorite	19,40 - 24,10	5,65	0,70	0,69	1,20E-05	Laminar	
GFG-037	Diorite	24,10 - 27,05	5,65	1,00	1,38	3,50E-06	Relleno	
GFG-037	Diorite	27,35 - 30,15	5,65	1,00	2,07	1,20E-05	Relleno	
GFG-037	Diorite	30,80 - 35,95	5,65	1,24	3,45	7,30E-06	Relleno	
GFG-037	Diorite	35,35 - 40,00	5,65	0,62	4,14	7,30E-06	Relleno	
GFG-037	Diorite	40,00 - 45,60	5,65	0,02	4,14	3,90E-08	Laminar	
GFG-037	Diorite	45,60 - 50,40	5,65	0,01	4,48	2,10E-07	Laminar	
GFG-037	Diorite	52,00 - 56,20	5,65	0,02	5,17	2,60E-07	Laminar	
GFG-037	Diorite	55,80 - 61,25	5,65	0,10	5,52	1,30E-07	Laminar	

Código	Roca	Tramo de Ensayo (m)	Nivel Freático (m)	Caudal Máximo (l/min)	Presión Máxima (bar)	K cm/s	Tipo de Flujo	Observaciones
GFG-037	Diorite	60,80 - 66,25	5,65	0,18	6,55	3,40E-07	Laminar	
GFG-037	Diorite	65,80 - 71,30	5,65	0,70	7,24	9,10E-07	Laminar	
GFG-037	Diorite	71,30 -82,30	5,65	0,04	7,93	2,40E-08	Laminar	
GFG-037	Diorite	82,80 - 92,50	5,65	0,42	8,96	8,90E-08	Laminar	
GFG-037	Diorite	91,90 - 103,15	5,65	0,74	8,27	1,80E-06	-	<i>U.L. calculado con 2 estadios por by pass en el 3er. Estadio</i>

Tabla III-6 Ensayos de permeabilidad (MWH, 2012)

Área	Formación	Profundidad	K (cm/s)			Tipo de ensayo	
			Mín.	Máx.	Media Geométrica	Lugeon	Lefranc
Presa - La Hierba	Intrusivo	0-50	2,03E-07	2,02E-04	8,95E-06	4	3
		50-100	7,77E-08	1,07E-05	6,87E-07	0	5
	Volcánico	50-100	2,11E-07	1,07E-06	4,86E-07	0	3
Cantera Riolita río Tingo	Intrusivo	0-50	3,98E-07	1,04E-02	2,56E-05	5	10
		50-100	8,87E-07	2,08E-03	2,42E-05	5	6
	Volcánico	0-50	8,68E-07	1,93E-04	9,58E-06	1	6
Valle Tomas	Yumagual	0-50	1,55E-06	3,80E-03	8,08E-05	11	8
		50-100	2,29E-06	1,23E-04	1,66E-05	13	0
		>100	2,92E-06	6,16E-04	2,16E-05	16	3
	Pariatambo	0-50	5,47E-08	1,73E-02	1,55E-04	13	19
		50-100	2,50E-07	8,19E-03	2,21E-05	10	19
		>100	4,01E-06	1,07E-04	2,72E-05	5	3
	Volcánico	0-50	6,45E-06	1,76E-03	6,26E-05	3	3
		50-100	7,30E-05	7,30E-05	7,30E-05	1	0
		>100	---	---	---	---	---
	Volcánico Diatreme	0-50	1,13E-05	4,62E-05	2,87E-05	2	1
		50-100	3,87E-05	1,09E-04	8,23E-05	3	2
		>100	7,71E-07	4,63E-05	6,61E-06	7	5
Valle Chorro Blanco	Yumagual	0-50	3,38E-08	5,01E-03	1,12E-04	18	25
		50-100	2,39E-07	2,37E-03	4,50E-05	25	11
		>100	4,18E-07	1,27E-02	2,41E-05	23	13
	Pariatambo	50-100	---	---	---	---	---
		>100	1,20E-06	5,87E-05	1,59E-05	8	0
	Intrusivo	50-100	1,71E-06	4,15E-05	5,78E-06	1	2
>100		2,15E-06	2,15E-06	2,15E-06	1	0	
Cantera Escombrera	Yumagual	0-50	5,61E-06	8,80E-02	6,99E-04	13	31
		50-100	3,03E-06	2,50E-02	3,69E-04	26	23
		>100	4,01E-06	1,35E-02	5,48E-04	18	5

Se realizó un ensayo de bombeo de larga duración en el sondeo PP-03, ofreciendo valores de permeabilidad que oscilaron entre $6,40 \times 10^{-7}$ m/s a $2,50 \times 10^{-6}$ m/s, con un valor promedio de $1,40 \times 10^{-6}$ m/s. (Tabla III-7)

La transmisividad del cuerpo intrusivo oscilaría entre 9 a 33 m²/d, con un valor promedio de 19 m²/d. Para el coeficiente de almacenamiento se fijó un valor de 0,002 4 a 0,01, con un valor promedio de 0,005 3. Estos valores de almacenamiento obtenidos responden a un medio con régimen piezométrico libre a semi-confinado.

Tabla III-7 Ensayo de bombeo PP-3 (WMC, 2006)

Piezómetro	Distancia al pozo de bombeo (m)	Espesor saturado (m)	Cooper-Jacob		Theis		Theis recuperación		Valores		
			T (m ² /d)	S	T (m ² /d)	S	T (m ² /d)	K (cm/s)	T (m ² /d)	S	K (cm/s)
GF-WG-9	321,00	160,00	44,00	6,25E-03	35,00	8,50E-03			40,00	7,40E-03	2,90E-04
GF-WG-10	238,00										
GF-WG-1a	263,00	160,00	20,00	2,82E-03	20,00	3,52E-03			20,00	3,20E-03	1,50E-04
GF-WG-1b	271,00	160,00	15,00	2,00E-03	16,00	2,70E-03			16,00	2,40E-03	1,20E-04
GF-WG-2a	503,00										
GF-WG-2b	493,00										
GF-WG-3a (PE3prod)	0,00	160,00	4,00				13,00	0,00	9,00		6,40E-05
GF-WG-3b	51,00	160,00	13,00	1,14E-02	15,00	9,20E-03	72,00	0,00	33,00	1,00E-02	2,50E-04
GF-WG-4a	557,00										
GF-WG-4b	548,00										
GF-WG-5a	333,00										
GF-WG-6 (pumping)	2840,00	160,00	65,00	2,64E-04	8,00	1,89E-04			36,00	2,30E-04	2,70E-04
Min									9,00	2,40E-03	6,40E-05
Max									33,00	1,00E-02	2,50E-04
Media									19,00	5,30E-03	1,40E-04

Los resultados de las pruebas de bombeo realizados en los sondeos PP-10 y PP-16, consignados en la Tabla III-8, ofrecen valores

de 1,6 a $10,5 \times 10^{-7}$ m/s para las calizas (valor promedio de $6,1 \times 10^{-7}$ m/s) y de 0,30 a $23,8 \times 10^{-6}$ m/s, para el cuerpo intrusivo del tajo (valor promedio de $1,00 \times 10^{-5}$ m/s).

No obstante, se obtienen valores de permeabilidad significativamente elevados para las zonas intermedias (rocas metamórficas –mármoles-) ($1,30 - 3,80 \times 10^{-4}$ m/s, con un valor promedio de $2,6 \times 10^{-4}$ m/s).

Los datos para el parámetro de almacenamiento en los mármoles ($0,0008$ a $0,0034$, valor promedio $0,0018$) y en el cuerpo intrusivo ($0,0013$ a $0,0084$, valor promedio $0,0043$) apuntan a un medio con régimen piezométrico libre (baja capacidad de almacenamiento) o con régimen piezométricos semi-confinado.

Tabla III-8 Ensayos de bombeo PP-16 y PP-10 (WMC, 2008)

Pozo	Litología	Rango de k (cm/s)	k promedio (cm/s)	Rango de S	S promedio
PP-16	Carbonatos	$1,6 - 10,5 \times 10^{-5}$	$6,1 \times 10^{-5}$		
	Zona intermedia	$1,3 - 3,8 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-2}$	$0,8 - 3,4 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-3}$
PP-10	Cuerpo intrusivo	$0,3 - 23,8 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,3 - 8,4 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-3}$

3.3.5 Ensayos de trazadores

Con el objetivo de conocer la conexión hidráulica de algunas zonas kársticas con los manantiales, se realizaron ensayos de trazadores.

Estos ensayos consistieron en inyectar soluciones de Rhodamina, Fluoresceína y Sulfurhodamina en diferentes zonas kársticas del área de estudio, detalladas a continuación. (Ver Mapa 10):

- Se inyectó fluoresceína en las formas kársticas K11 y K19, sobre la zona de la falla de Garita.

El trazador, fue detectado en dos manantiales situados en la quebrada Hualgayoc (SP-7 o HME-13 y SP-11 o HME-14), se estimó que el tiempo de tránsito del trazador fue de 12-13 horas, lo que implica una velocidad de flujo de 5 cm/s.

- Se inyectó Rhodamina en las formas kársticas K17 y K3 sobre la zona de la planta.

Este trazador, salió por los mismos manantiales que el anteriormente descrito (SP-7 o HME-13 y SP-11 o HME-14), se estima el tiempo de tránsito fue de 11 horas, es decir, la velocidad de flujo se fijó en 5 cm/s.

- Se inyectó Sulforhodamina en la forma kárstica K25, situada en la zona del valle de las Gordas.

Este trazador fue detectado en tan sólo 1 hora, en un manantial muy cercano.

3.4 Meteorología

En la zona se contó con data meteorológica procedente de las estaciones Hualgayoc y Tajo 01.

La información meteorológica existente se utilizó como referencia para calcular la recarga del sistema hidrogeológico, a partir de la precipitación

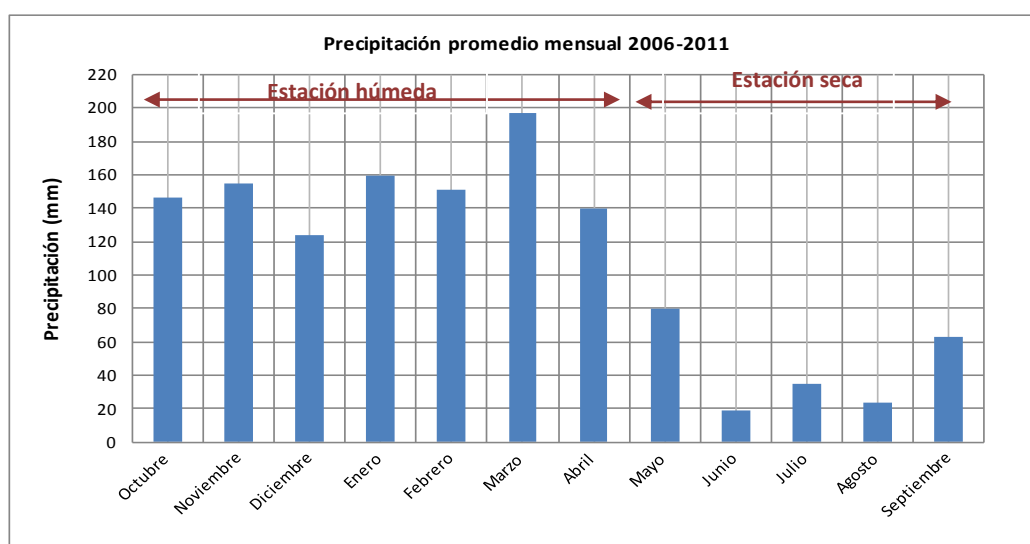
La data meteorológica constó de precipitaciones diarias, desde mayo de 2009 hasta enero de 2012 y precipitaciones mensuales, desde septiembre de 2006 a mayo de 2009 (Tabla III-9).

Tabla III-9 Precipitación media mensual (periodo 2006-2011)

Periodo	Oct.	Nov.	Dic.	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Suma
2006/2007	81	182	217	185	51.8	240	187	102	3.5	36	29.3	34.3	1 349,00
2007/2008	229	172	57.9	131	191	151	122	66.3	21.6	31	36.8	90.9	1 299,00
2008/2009	210	138	69.3	269	171	231	80.8	23.6	36.8	31	36.8	39.4	1 338,00
2009/2010	109	173	110	92.5	167	183	122	84.6	22.6	26	12.4	46	1 148,00
2010/2011	103	111	167	120	177	179	189	54.6	11.7	52	7.9	89.4	1 261,00
Promedio	146	155	124	160	152	197	140	66.3	19.2	35	24.6	60	1 279,00
Máximo	229	173	167	269	191	231	189	84.6	36.8	52	36.8	90.9	1 750,00
Mínimo	103	111	69.3	92.5	152	179	80.8	23.6	11.7	26	7.9	39.4	895.40

En el Gráfico III-2 se observa claramente la existencia de dos estaciones climáticas, una húmeda desde octubre hasta abril y otra seca desde mayo hasta septiembre.

GRÁFICO III- 2: Precipitación media mensual (periodo 2006-2011)



Se realizó un balance mensual de agua en el suelo, a partir de la precipitación, temperatura radiación solar, humedad relativa. La finalidad de realizar un balance hídrico es de conocer los excedentes de agua en el suelo, susceptibles a infiltrarse y recargar las aguas subterráneas.

3.4.1 Cálculo de excedentes

Para realizar el cálculo de excedentes, debemos conocer las diferentes variables que participan en este cálculo:

- ETP (Evapo Transpiración Potencial), el cual ha sido calculada mes a mes mediante varios métodos, observando que los resultados varían de media entre 342 y 726 mm/año (Tabla III-10).

Tabla III-10 Evapotranspiración calculada por diferentes métodos

Método	ETP (mm/año)
Thornwhaite	544
Penman	342
Blaney-Cridle	401
Turc	726
Christiansen	370

Se seleccionó el método de Thornwhaite, el cual se determina en función de la temperatura media y número de horas de luz al día.

- La capacidad de retención del agua en la franja no saturada (suelo) depende de la textura y espesor del suelo. Para ello se establece 4 (cuatro) tipos de suelos en función de sus propiedades hidrológicas (Tabla III-11).

Tabla III-11 Tipos de Suelo en función de sus propiedades hidrológicas

Suelo	Descripción	Capacidad de infiltración	Capacidad de escorrentía	Tasa de infiltración (mm/hora)
A	Arena, arena arcillosa, franco arenoso	Elevada	Baja	>7,62
B	Franco limoso, marga	Moderada	Moderada	3,81-7,62
C	Arena arcillosa	Baja	Alta	1,27-3,81
D	Franco arcilloso, franco arcillo limoso, arcilla arenosa, arcilla limosa o arcilla	Baja	Muy alta	<1,27

La zona de estudio tiene ciertas particularidades, lo cual nos hace concluir que la capacidad de retención de agua en el suelo no es un factor relevante en la generación de excedentes, esto debido a que la zona presenta una alta humedad y un bajo valor de evapotranspiración, aún en la época seca.

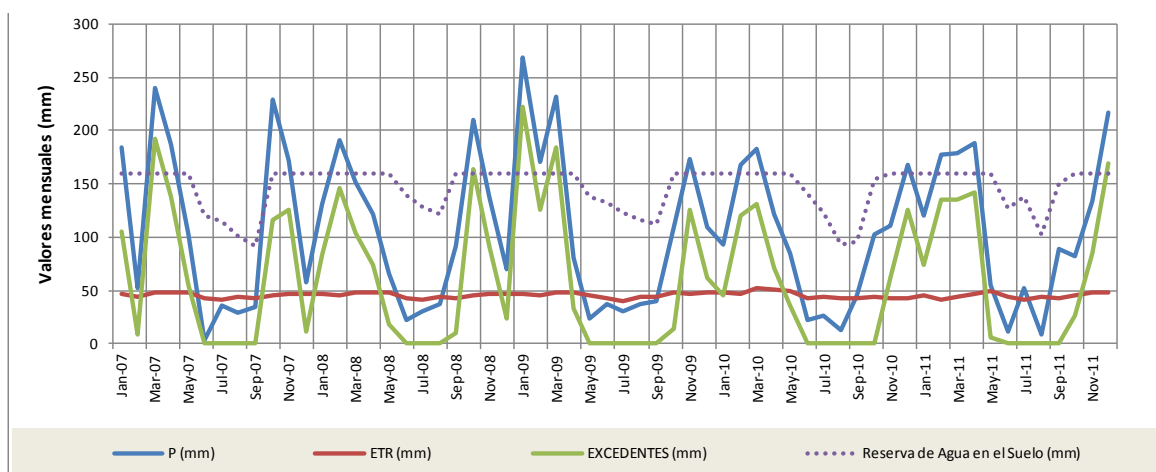
Conjugando las variables de precipitación, ETP y reserva de agua en el suelo, se calculó los excedentes de agua mensuales desde Enero 2007 hasta diciembre del 2011, en la tabla III-12 se presentan los valores anuales medios, máximos y mínimos obtenidos

Tabla III-12 Excedentes anuales de agua de lluvia (2007-2011)

	P (mm)	P anual (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	Reserva Agua en el Suelo (mm)	ΔR (mm)	ETR (mm)	EXCEDENTES (mm)	EXCEDENTES ANUALES (mm)
<i>Mínimo</i>	3,5	1137,2	40,3	-39,5	92,1	0	40,3	0	590,5
Promedio	105,8	1269,2	45,3	60,4	146,7	5,4	45,3	59,9	718,9
<i>Máximo</i>	269,2	1326,8	51,5	222,3	160	67,9	51,5	222,3	772,3

En el gráfico III-3 se muestra el comportamiento hidrológico del balance del agua de lluvia en el tiempo y es claro notar la influencia estacional en la generación de excedentes de agua de lluvia, de forma que en los meses de estiaje (junio a septiembre) la recarga es nula.

GRÁFICO III- 3: Comportamiento hidrológico del balance de agua de lluvia (periodo 2007-2011)



3.3.1 Cálculo de los coeficientes de infiltración.

Para la estimación del coeficiente de infiltración se aplicó el método APLIS, método que conjuga las características típicas de la zona de estudio.

Este método, calcula dicho coeficiente en función de cinco variables: altitud (A), pendiente (P), litología (L), tipo de suelo (S) y formas

favorables para la infiltración (I). Para cada variable se han establecido diferentes categorías entre el 0 y el 10, a través de un sistema de información geográfica (GIS), siendo 0 el valor mínimo y 10 el máximo.

El coeficiente se calcula mediante la superposición de dichas variables en capas, permitiendo obtener su distribución espacial.

Debido a la ausencia de datos detallados de suelos en la zona de estudio, se ha utilizado el Mapa de suelos del Perú, escala 1:5 000 000, elaborado por el Instituto Nacional de Recursos Naturales INRENA. En este mapa caracterizan la zona de estudio con un suelo tipo Cambisol eútrico, al cual se le asigna un valor de 5 puntos a toda la zona de estudio.

En cuanto a las formas de absorción / infiltración (parámetro I), se le ha dado un valor mayor a las zonas de falla, zonas con una mayor karstificación y formas geomorfológicas típicas de los karts, tales como cuevas, dolinas y sumideros. De esta forma, se ha dado un valor entre 6 y 8 a la zona más karstificada y fracturada, situada entre el sector de La Planta y Cerro Candela y un valor de 1 a las zonas menos fracturadas y karstificadas.

Finalmente, se obtiene un mapa de distribución del coeficiente de infiltración que hay que aplicar al excedente de lluvia calculado (ver Mapa 11, 12 y 13).

Una vez calculado el excedente de precipitación susceptible de infiltrarse (coeficiente de infiltración), se ha calculado la cantidad de agua que recarga el sistema hidrogeológico mes a mes desde enero de 2007 a diciembre de 2011 y la recarga media anual que han sido utilizados para los modelos matemáticos de flujo transitorio y permanente respectivamente.

3.5 Hidrometría

3.5.1 Aforos en los ríos Hualgayoc, Tingo y quebrada Mesa de Plata

En la zona de estudio se cuenta con 15 estaciones de aforo superficial, 9 de las cuales corresponden al río Tingo, 3 al río Hualgayoc y 3 a la quebrada Mesa de Plata (Tabla III-13 y Mapa 14).

Tabla III-13 Ubicación de las estaciones de aforo

Código	Este (m)	Norte (m)	Caudales (l/s)		
			Mín.	Promedio	Máx.
HSE-2	764 855,50	9 252 126,00	5,20	45,70	276,30
HSE-3	764 938,00	9 252 161,00	23,40	328,60	1774,20
HSE-4	764 838,00	9 252 055,00	6,40	279,10	1310,00
HSE-5	764 179,00	9 251 135,00	1,90	165,40	936,70
HSE-6	764 098,00	9 251 094,00	2,00	151,40	888,30
HSE-8	763 435,00	9 250 570,00	0,00	91,10	684,70
TSE-10	760 225,60	9 252 681,00	0,00	2,90	105,10
TSE-11	760 221,70	9 252 691,00	20,10	166,10	1232,80
TSE-12	760 592,20	9 252 773,00	0,00	241,10	1498,10
TSE-13	759 821,10	9 252 606,00	0,00	3,10	23,40
TSE-14	759 526,00	9 252 704,00	21,20	111,30	280,30
TSE-15	761 020,00	9 253 215,00	11,30	115,50	342,20
TSE-4	762 020,80	9 253 985,00	50,80	418,20	2355,50
TSE-5	761 963,40	9 253 928,00	44,70	368,20	2220,00
TSI-18	761 790,80	9 253 042,00	0,00	6,10	47,50

Se obtuvo información interesante en el análisis de los aforos diferenciales de las estaciones HSE-6 y HSE-8 del río Hualgayoc (Gráfico III-4).

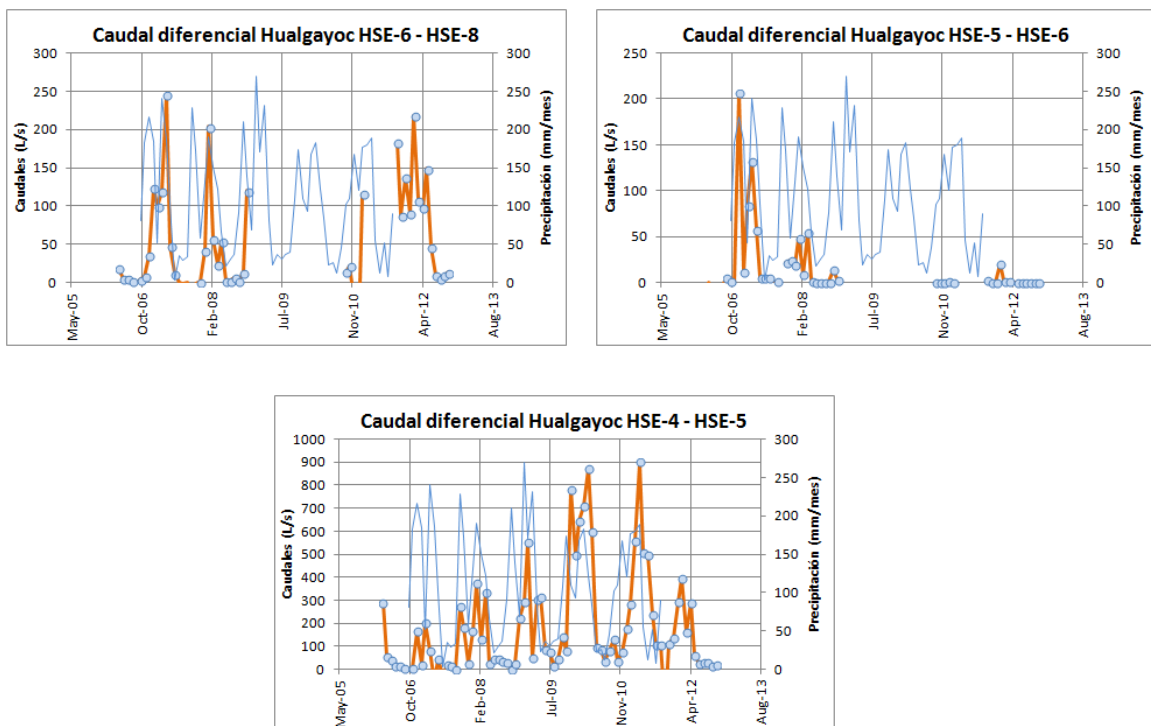
El análisis de estos aforos diferenciales permite obtener las siguientes conclusiones:

- El sistema hidrogeológico que descarga hacia el río Hualgayoc corresponde a un medio de elevada difusividad (mayor transmisividad que capacidad de almacenamiento) lo que se traduce en una muy

escasa capacidad de regulación (predomina la función transmisiva respecto a la capacitiva).

- Las descargas a favor de manantiales y directamente al cauce presentan una elevada estacionalidad y los caudales base son prácticamente nulos.
- El análisis de las curvas de agotamiento correspondiente a estos aforos diferenciales, permite establecer valores para el parámetro de agotamiento de 0,034 8 1/día.

GRÁFICO III- 4: Aforos diferenciales en el río Hualgayoc



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Modelamiento Conceptual del Flujo Subterráneo

Una vez realizado el análisis geológico e hidrogeológico de la zona de estudio, se procedió a establecer el modelo conceptual del funcionamiento del sistema hidrogeológico descrito a continuación:

4.1.1 Unidades hidrogeológicas

El medio físico se trata de un medio complejo heterogéneo y anisótropo, conformado por 4 unidades hidrogeológicas, en función de su comportamiento y parámetros hidrogeológicos (ver Mapa 15 a 18).

- Unidad hidrogeológica 1: rocas permeables por fisuración y karstificación.
- Unidad hidrogeológica 2: materiales permeables por porosidad intergranular.
- Unidad hidrogeológica 3: rocas con baja permeabilidad por fracturación.
- Unidad hidrogeológica 4: rocas de baja permeabilidad.

En general, estas unidades geológicas (rocas intrusivas y calizas) por su génesis, presentan una permeabilidad primaria baja, sin embargo

debido a los procesos de fracturación y karstificación, originaron que se desarrolle una permeabilidad secundaria elevada en determinadas zonas favorables.

Las formaciones permeables son representadas por las calizas cretácicas con karstificación (Fms Yumagual y Mujarrún) y las formaciones superficiales permeables del cuaternario (coluviones y aluviales), las mismas que conforman acuíferos locales de importancia restringida.

Las estructuras geológicas (fracturas) de la zona, tienen una gran importancia debido a que permiten la conectividad hidráulica entre las diferentes unidades hidrogeológicas descritas. Por ello, a efectos prácticos, se consideró que estas unidades hidrogeológicas conforman un único sistema hidrogeológico para el entorno de estudio.

Las rocas intrusivas del tajo (incluidas en la UH 3: rocas con baja permeabilidad por fracturación) responde a un medio anisótropo en el que los flujos de aguas subterráneas están vinculados a las zonas de fracturas que vienen siendo limitadas por los rellenos contenidos en ellas.

En general tajo 1 se establece como un medio de baja permeabilidad primaria y que presenta numerosas discontinuidades

(fracturas) y franjas de alteración que condicionan las propiedades hidráulicas, como una limitada permeabilidad secundaria.

El acuífero cretácico calcáreo está condicionado por el dominio de fracturas y que posteriormente fueron desarrolladas por karstificación. Este proceso de karstificación no se desarrolló de forma semejante por todo el macizo, ya que se observa zonas donde la karstificación es más notable y por tanto la roca adquiere una mayor permeabilidad, específicamente esto puede notarse en el sector situado entre la planta y la garita.

4.1.2 Recarga y descarga

Las formaciones geológicas presentes en el área se recargan esencialmente por infiltración de agua de lluvia.

Existen diferentes factores que condicionan la tasa de recarga por infiltración como son: tipo de suelo, permeabilidad vertical de la roca subyacente, pendiente del terreno y existencia de exoformas como sumideros, dolinas, etc.

Como se mencionó en otro apartado se ingresó los factores que condicionan la infiltración en un sistema de información geográfica para calcular el valor del coeficiente de infiltración aplicando la técnica APLIS.

Con esta información se generó un mapa continuo de infiltraciones a partir del cálculo de los excedentes asociados a la precipitación.

Se debe notar que los resultados del coeficiente de infiltración muestran dos tendencias opuestas, muy claras. Una vinculada a los materiales de baja capacidad de infiltración y por otro lado las zonas con desarrollo de epikarst.

Los epikarst observados se vinculan con afloramientos de roca caliza cretácica karstificada que actúan como un regulador del proceso de recarga, sobre esta formación. Al graficar los datos piezométricos versus precipitación se puede observar un retraso entre la precipitación y la infiltración efectiva en la zona saturada más profunda del acuífero cretácico. Es aquí que se puede observar el efecto regulador de los epikarst.

Resumiendo, las zonas donde afloran formaciones de baja a muy baja permeabilidad, los coeficientes de infiltración toman valores inferiores al 15%, mientras que en las zonas de epikarst se han fijado valores de entre un 45-54%.

En general, la zona de recarga del sistema hidrogeológico se sitúa en el Cerro Candela y hacia el SO de la planta concentradora (área donde se encuentra una zona altamente karstificada).

La descarga natural del sistema hidrogeológico de la zona de estudio se produce hacia los cauces de los ríos Hualgayoc, Tingo y por los manantiales asociados a estos cauces y a la Qda. Mesa de Plata.

Los manantiales más representativos muestran un régimen estacional en respuesta a la zona más superficial de la franja saturada, relacionada a la formación cretácica de caliza karstificada, es decir que su caudal se incrementa rápidamente tras episodios de precipitación y agotamiento rápido, típico en un sistema de alta difusividad y escasa inercia.

Una condición actual al sistema hidrogeológico de la zona, es que se encuentra influenciado por las labores mineras subterráneas existentes en la zona, previas al tajo 1. Esta red de galerías y túneles provocan el drenaje de las formaciones geológicas, dando lugar a descargas hacia los cauces a favor de los túneles de salida.

Asimismo, las labores de drenaje minero que se están realizando en el tajo minero 1 están provocando una alteración en el sistema hidrogeológico, para cuya caracterización ha sido desarrollado un modelo numérico de flujo.

Otro elemento que condiciona la descarga del sistema hidrogeológico está asociado a los sistemas de drenes situados en la zona sur-oriental de la presa de relaves (UCB).

El Mapa 19 presenta las principales características del modelo conceptual.

4.1.3 Régimen piezométrico y flujo subterráneo

El régimen piezométrico es principalmente libre, sin embargo, existen niveles localmente confinados y semi-confinados provocados por la presencia de capas de menor permeabilidad en profundidad.

4.1.4 Límites hidrogeológicos

Los límites del sistema hidrogeológico fueron asignados a los siguientes elementos:

- Los ríos Hualgayoc y Tingo como efluentes, conforman los límites meridional y septentrional del sistema hidrogeológico. Estos límites constituyen ejes de drenaje, debido a que la mayoría de los manantiales están vinculados a las riberas de estos cauces y los propios cauces reciben una descarga directa de las unidades hidrogeológicas.

- Divisoria hidrológica de la Qda. Mesa de Plata al este. Este límite ha sido fijado como un límite de NO flujo ya que está asociado a formaciones de muy baja permeabilidad de la Fm Chulec.
- Zona de fractura de Coymolache al oeste. Este límite se ha considerado como un límite abierto.

4.2 Modelamiento Numérico de Flujo Subterráneo

4.2.1 Introducción

Con la finalidad de conocer el funcionamiento hidrogeológico del sistema se realizó la modelación matemática utilizando el software FEFLOW, el mismo que utiliza el método de elementos finitos para la resolución de la ecuación de flujo.

La primera simulación realizada fue la de reproducir el modelo de flujo en régimen permanente, previo a la operación minera. Es decir que se simuló el funcionamiento del sistema hidrogeológico en condiciones naturales.

Calibrado el modelo anterior se procedió a generar el modelo en régimen transitorio, tomando como base el primer modelo. El modelo en régimen transitorio nos permitirá realizar simulaciones futuras según las necesidades futuras.

4.2.2 Límites y discretización del modelo

Se asignaron los siguientes límites para el modelo hidrogeológico:

- Límite Norte: corresponde con el cauce del río Tingo, se simuló como eje de drenaje.
- Límite Sur: corresponde con el cauce del río Hualgayoc, se simuló como eje de drenaje.
- Límite Este: corresponde con la divisoria hidrológica situada al Este del tajo, se simuló como un borde de no flujo.
- Límite Oeste: corresponde con la falla de Coymolache, se simuló como un límite abierto.

La zona de estudio en total abarca un área de 13,32 km², la cual fue discretizada en una malla conformada por 1'020,177 elementos prismáticos y un total de 574 350 nodos

La malla se refinó en las zonas de mayor interés, con la finalidad de obtener una mayor definición. Las zonas refinadas corresponden a quebradas y ríos principales, manantiales, pozos de bombeo del tajo, túnel de la antigua mina Carolina, las principales fallas y el drenaje horizontal de la presa de relaves (UCB).

En la dirección vertical, el modelo se dividió en 9 capas y 10 horizontes (Mapa 20). El primer horizonte se vincula al MDT del terreno generado a partir de la topografía detallada con curvas de nivel cada 5 m, el resto de los horizontes, se han generaron de tal forma que garanticen el nivel piezométrico en cada celda de la primera capa durante la simulación en régimen transitorio.

4.3 Simulación en régimen permanente

4.3.1 Condiciones de contorno

Tal como se definió en el modelo conceptual, los ríos se comportan como ganadores, es decir como drenes el sistema subterráneo. Por ello, éstos fueron simulados mediante la condición de contorno tipo transfer o condición de Cauchy. Dicha condición permite la salida de agua del sistema cuando la cota del nivel piezométrico supera la cota impuesta en cada nodo del cauce.

El límite Norte y Sur del modelo corresponden con este tipo de condición de borde, ya que coinciden con los ríos Tingo y Hualgayoc.

Adicionalmente, se han incluido quebradas menores que descargan agua a la superficie en la parte norte del modelo, ver Mapa 21.

Manantiales

En relación a los manantiales se simuló 90 de ellos, los mismos que se localizan principalmente en la zona Sureste y Norte del tajo. Estos manantiales se simularon usando la condición de contorno de potencial constante o condición de Dirichlet impuesta a cota de terreno, lo que implica un valor constante de presión igual a 0 (nodos tipo “seepage”). Por tanto, cuando el nivel piezométrico simulado, supera la cota de los nodos, el modelo numérico simula una salida del sistema.

Drenaje horizontal de la presa de relaves (UCB)

Entre los componentes de la operación minera, en la zona de estudio, se encuentra una presa de relaves en donde realizaron unos drenes horizontales a la cota de 3 695 m. Actualmente estos drenes vienen extrayendo agua del sistema, razón por la cual se simularon como drenes mediante la condición de borde tipo transfer o condición Cauchy, asignándole la cota de la profundidad del dren.

Fallas

El límite Oeste de la zona corresponde con el trazado de la falla Coymolache. El sistema hidrogeológico al oeste de la falla muestra una continuidad, por tanto se simuló como un límite abierto mediante la

condición de borde tipo transfer o condición de Cauchy, imponiendo una cota en cada nodo del límite igual al de la isopieza interpretada que lo atraviesa.

Adicionalmente, al haber un gran número de fallas en la zona de estudio, se seleccionó las fallas que influyen de forma importante en el comportamiento hidrogeológico, modelándolas como elementos discretos (módulo que dispone el software FEFLOW, creado especialmente para este tipo de estructuras).

Este módulo, permite asignar unos parámetros de permeabilidad diferente y ancho a cada falla.

En la zona de estudio se aprecian dos grupos de fallas que muestran características similares, una al oeste de la zona de estudio sobre la formación Yumagual medio y superior y la otra situada en la zona del tajo, la situación y parámetros de estas fallas se puede observar en el Mapa 22.

Se obtuvo valores de permeabilidad, mediante calibración, del orden de $5 \cdot 10^{-5}$ y $5 \cdot 10^{-7}$ m/s, así mismo se introdujeron los anchos de fallas entre 3 y 10 m. Asimismo se simuló una franja de alteración, contorneando las fallas, con una permeabilidad intermedia entre la falla y el macizo que la contiene.

4.3.2 Recarga

Como se detalló en apartados anteriores se estimó la recarga con el método APLIS. Para la recarga en transitorio se consideró las variaciones mensuales disponibles de las variables Precipitación y Tiempo. Por otro lado para el modelo en régimen permanente se consideró los valores más probables (Mapa 23).

Así, para el régimen transitorio se ha considerado una serie variable en el tiempo que permite simular la estacionalidad de la recarga.

4.3.3 Permeabilidad

La permeabilidad se ha considerado isótropa, es decir se ha estimado una permeabilidad igual en todas las direcciones. En la tabla IV-1 se incluyen los valores de permeabilidad obtenidos tras el proceso de calibración para cada una de las formaciones (Mapa 24).

Tabla IV-1 Permeabilidad modelada

Formación Geológica	Unidad Geología	Espesor (m)	Litología	Unidad hidrogeológica	Kxx (m/s)	Kyy (m/s)	Kzz (m/s)
Chulec	Chulec	370	Areniscas calcáreas y margas	4: rocas de baja media permeabilidad	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Pariatambo	Pariatambo	110-150	Calizas y lutitas bituminosas	4: rocas de baja media permeabilidad	5,00E-09	5,00E-09	5,00E-09
Yumagual	Inferior	90	Calizas con margas	4: rocas de baja media permeabilidad	1,20E-08	1,20E-08	1,20E-08
	Medio	250	Calizas con areniscas y un tramo margoso en su parte media	1: rocas permeables por fracturación/karstificación	2,00E-07	2,00E-07	2,00E-07
			Margas	4: rocas de baja media permeabilidad	4,00E-08	4,00E-08	4,00E-08
	Superior	180	Areniscas, margas y calizas	1: rocas permeables por fracturación/karstificación	7,00E-08	7,00E-08	7,00E-08
Rocas intrusivas y volcánicas	Rocas intrusivas y volcánicas		Pórfido diorítico del tajo	3: rocas de baja permeabilidad por fracturación	2,60E-08	2,60E-08	1,30E-07
			Dioritas	3: rocas de baja permeabilidad por fracturación	8,00E-08	8,00E-08	8,00E-08
			Riolitas	3: rocas de baja permeabilidad por fracturación	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Mujarrum	Mujarrum	260	Calizas con margas	1: rocas permeables por fracturación/karstificación	-	-	-
Aluvial Coluvial	Aluvial Coluvial		Gravas y arenas con matrices limo arcillosa y limo arenosa	2: materiales permeables por porosidad intergranular	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06

Además, tal y como se ha comentado anteriormente, se ha asignado un valor de permeabilidad tanto las fallas como a las franjas de alteración alrededor de las mismas.

Tabla IV-2 Permeabilidad modelada en las fallas

	Kxx (m/s)	Kyy (m/s)	Kzz (m/s)
Fracturas intrusivo tajo	5,0E-06	5,0E-06	5,0E-06
Fracturas Yumagual calizo	5,0E-05	5,0E-05	5,0E-05
Franja fracturación intrusivo tajo	5,0E-07	5,0E-07	5,0E-07
Franja fracturación Yumagual calizo	5,0E-06	5,0E-06	5,0E-06

4.3.4 Calibración en régimen permanente

Para la calibración del modelo matemático en régimen permanente, han sido utilizados los siguientes datos.

- Caudales de salida de los manantiales: de los 90 manantiales seleccionados en apartados anteriores, de entre estos, 83 se encuentran dentro de los límites del modelo, los cuales se detallan en la tabla IV-3.

Tabla IV-3 Ubicación de manantiales simulados

Código	X	Y	Z
C-SP-02	763 286.00	9 250 846.00	3 655.01
C-SP-04	763 306.00	9 250 900.00	3 651.23
C-SP-05	763 306.00	9 250 900.00	3 651.23
C-SP-07	763 411.00	9 250 852.00	3 614.69
C-SP-08	763 425.00	9 250 890.00	3 615.60
C-SP-13	763 548.00	9 251 074.00	3 632.07
C-SP-14	763 621.00	9 251 030.00	3 609.84
C-SP-16	763 738.00	9 251 088.00	3 605.30
C-SP-18	763 832.00	9 251 162.00	3 620.69
C-SP-19	764 200.00	9 251 288.00	3 585.92
C-SP-20	764 201.00	9 251 308.00	3 586.76
C-SP-21	764 209.00	9 251 290.00	3 581.19
C-SP-22	764 240.00	9 251 330.00	3 570.86
C-SP-23	764 312.00	9 251 368.00	3 551.49
C-SP-24	764 393.00	9 251 556.00	3 560.89
C-SP-28	764 463.00	9 251 854.00	3 571.98
C-SP-29	764 394.00	9 251 792.00	3 588.26
C-SP-32	764 115.00	9 251 890.00	3 712.54
C-SP-36	764 540.00	9 252 152.00	3 533.68
C-SP-38	763 691.00	9 252 430.00	3 786.78
C-SP-39	763 828.00	9 252 496.00	3 751.36
C-SP-40	763 872.00	9 252 536.00	3 724.96
C-SP-41	763 878.00	9 252 532.00	3 725.48
HME-1	764 439.00	9 252 345.00	3 565.77
HME-10	762 525.00	9 251 313.00	3 870.00
HME-11	764 193.00	9 251 281.00	3 589.94
HME-12	763 027.00	9 250 862.00	3 748.59
HME-13	763 240.00	9 250 816.00	3 668.66
HME-14	763 282.00	9 250 838.00	3 655.08
HME-15	763 296.00	9 250 898.00	3 654.98
HME-4	763 380.00	9 250 241.00	3 689.91
HME-5	763 421.00	9 250 314.00	3 680.00
HME-6	763 585.00	9 250 722.00	3 641.02
HME-7	764 195.00	9 251 300.00	3 589.67
HME-8	765 251.00	9 252 001.00	3 539.11
HME-9	763 552.00	9 251 495.00	3 793.66
OA-P3-15	763 410.00	9 253 401.00	3 795.10
OA-P3-35	763 802.00	9 253 562.00	3 737.25
P1	761 697.00	9 252 055.00	3 763.12
P7	762 267.00	9 254 107.00	3 492.76

Código	X	Y	Z
SP-C2-01	762 150.00	9 250 391.00	3 799.39
SP-C2-04	763 468.00	9 251 846.00	3 823.17
SP-C2-08	759 572.00	9 252 137.00	3 764.60
SP-C2-17	759 958.00	9 251 791.00	3 755.19
SP-C2-18	760 127.00	9 251 825.00	3 735.22
SP-C2-29	763 370.00	9 250 774.00	3 626.61
SP-C2-30	763 386.00	9 250 811.00	3 620.00
SP-C2-31	763 415.00	9 250 853.00	3 614.04
SP-C2-32	763 358.00	9 250 865.00	3 628.55
SP-C2-34	763 326.00	9 250 897.00	3 640.76
SP-C2-35	763 428.00	9 250 889.00	3 615.03
SP-C2-36	763 495.00	9 250 994.00	3 617.37
SP-C2-41	763 917.00	9 252 060.00	3 807.94
SP-C2-45	764 390.00	9 251 794.00	3 590.30
SP-C2-46	763 839.00	9 251 615.00	3 768.62
SP-P1-01	762 228.00	9 252 854.00	3 800.08
SP-P1-03	762 898.00	9 254 147.00	3 624.14
SP-P1-04	762 859.00	9 254 153.00	3 622.32
SP-P1-07	763 297.00	9 254 203.00	3 562.33
SP-P1-08	763 257.00	9 254 136.00	3 580.10
SP-P1-09	763 217.00	9 253 927.00	3 631.60
SP-P1-10	764 227.00	9 252 970.00	3 734.24
SP-P1-17	761 578.00	9 252 370.00	3 742.11
SP-P1-18	761 588.00	9 252 376.00	3 745.98
SP-P1-23	761 089.00	9 252 702.00	3 715.38
SP-P2-02	763 659.00	9 254 098.00	3 623.44
SP-P2-03	763 594.00	9 254 058.00	3 620.00
SP-P2-04	763 542.00	9 254 024.00	3 612.39
SP-P2-05	763 448.00	9 254 034.00	3 612.66
SP-P2-11	763 388.00	9 254 014.00	3 614.03
SP-P2-12	763 643.00	9 253 729.00	3 685.96
SP-P2-13	763 787.00	9 254 002.00	3 661.38
SP-P2-14	763 738.00	9 254 152.00	3 620.70
SP-P2-15	763 750.00	9 254 160.00	3 620.00
SP-P3-12	763 090.00	9 253 782.00	3 674.06
SP-P3-31	764 067.00	9 253 567.00	3 737.05
SP-Q2-01	761 839.00	9 250 346.00	3 839.88
TSP-02	762 325.00	9 252 884.00	3 808.38
TSP-03	762 238.00	9 252 838.00	3 802.53
TSP-06	761 902.00	9 253 030.00	3 745.96

Código	X	Y	Z
PSP03	763 798.00	9 253 568.00	3 735.56
PSP04	763 646.00	9 253 730.00	3 685.90
PSP05	763 543.00	9 254 020.00	3 613.53
PSP07	763 370.00	9 253 994.00	3 615.80
PSP09	763 203.00	9 253 968.00	3 626.65
PSP11	763 781.00	9 254 006.00	3 660.00
SP-C1-114	763 367.00	9 250 892.00	3 626.64
SP-C1-117	763 411.00	9 250 971.00	3 632.30

Código	X	Y	Z
TSP-07	761 829.00	9 252 078.00	3 809.65
TSP-4	762 175.00	9 252 796.00	3 800.00
SP-C1-118	763 505.00	9 251 045.00	3 629.55
SP-C1-124	764 046.00	9 251 970.00	3 744.90
SP-C1-125	764 044.00	9 251 964.00	3 744.41
SP-C1-126	764 119.00	9 251 892.00	3 712.04
SP-C1-19	763 296.00	9 250 904.00	3 656.27

- Los manantiales de mayor importancia corresponden a HM-13 y HM-14 debido a sus significativos caudales. Estos puntos fueron considerados en la calibración, como la descarga de gran parte de la recarga aplicada en las unidades de Yumagual medio y superior.
- Medidas de aforos del río Hualgayoc.
- Drenaje del túnel de la mina Carolina, se estimó un caudal medio de drenaje de 21 l/s.
- Puntos de observación, se han utilizado los niveles de los piezómetros seleccionados.
- Resultados de la prueba de trazadores (MWH, 2012).

4.3.5 Resultados obtenidos

Piezometría

La piezometría resultante se observa en el Mapa 25, en la que observan dos circunstancias:

- El impacto de las estructuras kársticas en la zona de Yumagual superior y media, que funcionan como un drenaje favoreciendo que aparezca una zona deprimida en la piezometría próxima a la planta. Esta zona está asociada con un grupo de fracturas (La Garita-Gran Cañón) que facilitan el flujo subterráneo saturado y el desarrollo del epikrast superficial, condicionando que el flujo y drenaje de la recarga en su parte superficial a través de las estructuras kársticas hacia los manantiales del río Hualgayoc.
- El drenaje subterráneo ejercido por las galerías y minados de la Mina Carolina. Esta salida del modelo ha sido aproximado en base a información proporcionada por la operación minera. Se observa gradientes muy fuertes debido a la profunda excavación y la baja permeabilidad de la roca adyacente.

Calibración

La calibración del modelo en régimen permanente se realizó considerando la superficie piezométrica en el periodo abril-mayo 2012, ya que se consideró dos aspectos:

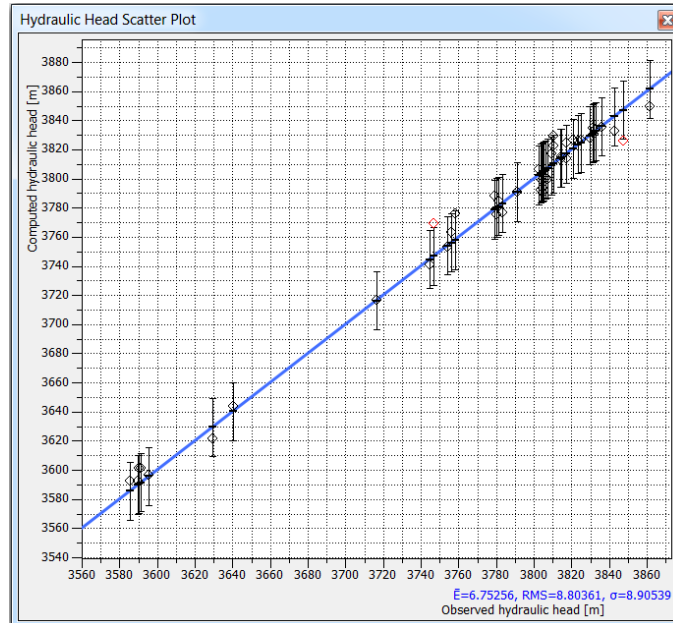
- La piezometría al final del período de lluvias del año 2011 – 2012, el cual se presentó muy húmedo y, por tanto, se considera que esta

condición permitió que el sistema hidrogeológico alcance una situación de llenado, que es la simulada en régimen estacionario o permanente.

- La elevación piezométrica registrada en los piezómetros no muestra una influencia en el sistema hidrogeológico como consecuencia de la actividad minera.

En el gráfico IV-1 se observa como la mayoría de los piezómetros se encuentran dentro del intervalo de confianza, habiendo obtenido un porcentaje de error en la modelización del 6%, error considerado aceptable en este tipo de medios tan heterogéneos (sistema hidrogeológico fracturado y karstificado).

GRÁFICO IV- 1: Calibración en Régimen Permanente



Balance

El modelo numérico no sólo se calibra considerando la piezometría del sistema hidrogeológico simulado, sino que también se considera como elemento de calibración las descargas (salidas del modelo).

Para esto, se analiza el balance del modelo. Las salidas más importantes del modelo de las que se dispone de medidas corresponden con la descarga a los ríos Hualgayoc y Tingo, la descarga por el túnel de la Mina Carolina y los manantiales HM-13 y HM-14. En la Tabla IV-4 se presentan los resultados.

Tabla IV-4 Balance del modelo

Condición de Borde	Caudal Promedio Real		Caudal Modelo	
	m3/s	l/s	m3/s	l/s
Mina Carolina	1 814,4	21	2 584,6	29
Rio Hualgayoc (HS-4)	2 479,7	28,7	2 223,4	26
Manantiales HM-13 y HM-14	2 919,5	33,8	2 585,1	30

Se representó los valores promedios reales versus los valores promedios simulados para poder compararlos. Se utilizó valores promedio debido a que la calibración en régimen permanente es una condición media, de un sistema en equilibrio. Por lo general se observa una buena calibración en el balance de las descargas.

Trazadores

Se simuló las direcciones de flujo generando un campo de vectores. Los vectores representan la velocidad y dirección del flujo del agua.

Utilizando esta herramienta se recreó la prueba de trazadores descrita en el reporte MWH 2012. Se representó la inyección de trazadores mediante partículas no-reactivas en los puntos reales de inyección en los valles de Las Gordas.

Las fallas de mayor permeabilidad y apertura direccionan el flujo hacia los manantiales cercanos al río Hualgayoc. Los resultados se observan en el Mapa 25. Este resultado se compara favorablemente a los resultados descritos en el reporte MWH 2012, que indican puntos de descarga en este grupo de manantiales a velocidades muy elevadas.

4.4 Simulación en régimen transitorio

Calibrado el modelo anterior se construyó el modelo en régimen transitorio.

Se simuló un paso de tiempo mensual para un período de tiempo que va desde el 1 de enero de 2010 hasta el 1 de mayo de 2012.

Se utilizó la piezometría resultante del modelo numérico en régimen permanente como punto de partida.

4.4.1 Condiciones de borde y de contorno

Las condiciones de borde utilizadas para el modelo en transitorio son esencialmente las mismas que en permanente añadiéndose los pozos de bombeo.

Pozos de bombeo

Se consideró todos los pozos de bombeo para el drenaje del tajo, desde el inicio del minado.

Para la simulación de los pozos de bombeo se utilizó de la condición de contorno tipo pozo (well) asignado funciones tiempo y caudal de bombeo variable con un paso de tiempo diario.

4.4.2 Recarga

La recarga ha sido calculada previamente en fases anteriores del estudio, mediante el método APLIS. Esta distribución de infiltración, en base a estos coeficientes, fue aplicada mensualmente en base a la precipitación real durante el periodo simulado.

4.4.3 Permeabilidad y almacenamiento

Respecto a las propiedades hidráulicas asignadas en la simulación del régimen transitorio, únicamente se incluye el valor de almacenamiento de los materiales, porosidad efectiva y elasticidad, ya que los valores de permeabilidad no varían.

Tabla IV-5 Parámetros hidráulicos transitorios

Formación Geológica	Unidad Geología	Unidad hidrogeológica	Kxx=Kyy (m/s)	Kzz (m/s)	Sy	Ss (1/m)
Chulec	Chulec	<i>rocas de baja media permeabilidad</i>	1E-08	1E-08	1,0E-03	1,0E-07
Pariatambo	Pariatambo	<i>rocas de baja media permeabilidad</i>	5E-09	5E-09	1,0E-03	1,0E-07
Yumagual	Inferior	<i>rocas de baja media permeabilidad</i>	1,2E-08	1,2E-08	1,0E-03	1,0E-07
	Medio	<i>rocas permeables por fracturación/karstificación</i>	2E-07	2E-07	1,0E-03	2,5E-07
		<i>rocas de baja media permeabilidad</i>	4E-08	4E-08	1,0E-03	1,0E-07
	Superior	<i>rocas permeables por fracturación/karstificación</i>	7E-08	7E-08	2,0E-03	2,5E-07
Rocas intrusivas y volcánicas	Rocas intrusivas y volcánicas	<i>rocas de baja permeabilidad por fracturación</i>	2,6E-08	1,3E-07	1,0E-03	2,5E-07
		<i>rocas de baja permeabilidad por fracturación</i>	8E-08	8E-08	2,0E-03	1,0E-07
		<i>rocas de baja permeabilidad por fracturación</i>	1E-08	1E-08	1,0E-03	1,0E-07
Mujarrum	Mujarrum	<i>rocas permeables por fracturación/karstificación</i>	-	-	-	-
Aluvial Coluvial	Aluvial Coluvial	<i>materiales permeables por porosidad intergranular</i>	1,0E-06	1,0E-06	5,0E-02	5,0E-04

En la zona del tajo se simuló las fracturas del intrusivo, mediante elementos discretos con anchura que oscila entre 1 y 3 m y permeabilidad de 5E-6 m/s.

En las zonas de fracturamiento y karstificación de la capa superior de calizas cretácicas se asignó a éstos, como elementos discretos de 3 a 10 m de anchura y permeabilidad de $5E-5$ m/s.

En el modelo numérico desarrollado se representa el flujo subterráneo a través de la franja saturada, ya que el flujo a favor de conductos principales en el epikarst es un flujo estacional y en la zona NO saturada.

4.4.4 Calibración en Régimen Transitorio

Para la calibración del modelo en régimen transitorio se utilizó la evolución piezométrica de los puntos de observación.

Como una práctica para el control de la sensibilidad en las franjas y fracturas, se recreó el efecto de la prueba de bombeo de 30 días realizada en el pozo PP-03.

Niveles piezométricos

A continuación se muestran los resultados de la calibración en régimen transitorio para la prueba de bombeo realizada entre el 2005-08-11a 2005-09-10 en el pozo de bombeo PP-03 y para el periodo enero 2008-mayo a 2012.

La calibración en régimen transitorio sobre el ensayo de larga duración ejecutado en el PP-03 tiene como objetivo validar el modelo de fracturación asignado al tajo.

Prueba de bombeo PP-03

Se realizó una simulación transitoria corta con la finalidad de recrear la prueba de bombeo en el pozo PP-03.

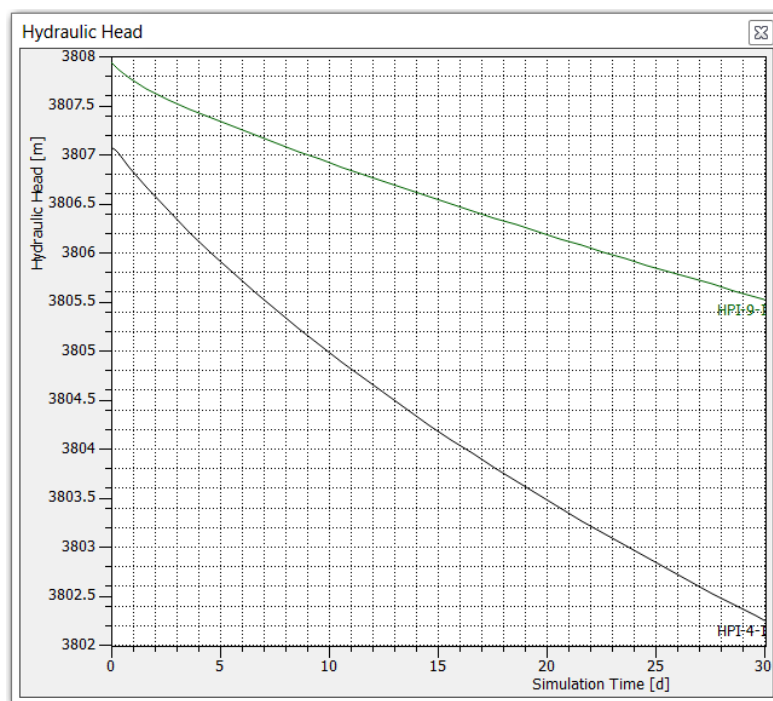
La prueba se analizó en base lo documentado en el reporte Modelo de flujo de agua subterránea del área del proyecto minero (SWS, 2006). La prueba fue de 30 días de duración a un bombeo constante de 7,5 l/s en el pozo PP-03. El descenso generado se monitoreo en varios puntos pero la mayor afección se observó en los pozos GF-WG-1a (HPI-9-I) y GF-WG-1b (HPI-4-I) en la zona norte del tajo.

El Mapa 26 muestra los contornos del descenso generado por la prueba, además se puede ver las curvas de niveles el Gráfico IV-2. La prueba real generó descensos de 5,6 metros en el piezómetro HPI-4-I y 4.9 metros en la simulación. El piezómetro HPI-9-I descendió 2,5 metros, comparado con 4,2 metros presentado en el informe.

Los resultados incrementan nuestra confianza en el modelo como herramienta predictiva al poder recrear este tipo de prueba hidráulicas,

sirviendo como un tipo de análisis de sensibilidad del modelo, aún en medio con tanta heterogeneidad.

GRÁFICO IV- 2: Descenso generado por prueba de bombeo



Análisis piezométrico en el Tajo 1

Se ingresó al modelo las series de tiempo versus caudal de todos los bombeos realizado entre el periodo de Enero 2008 a Mayo 2012, para visualizar sus efectos transitorios en los niveles de los puntos de control.

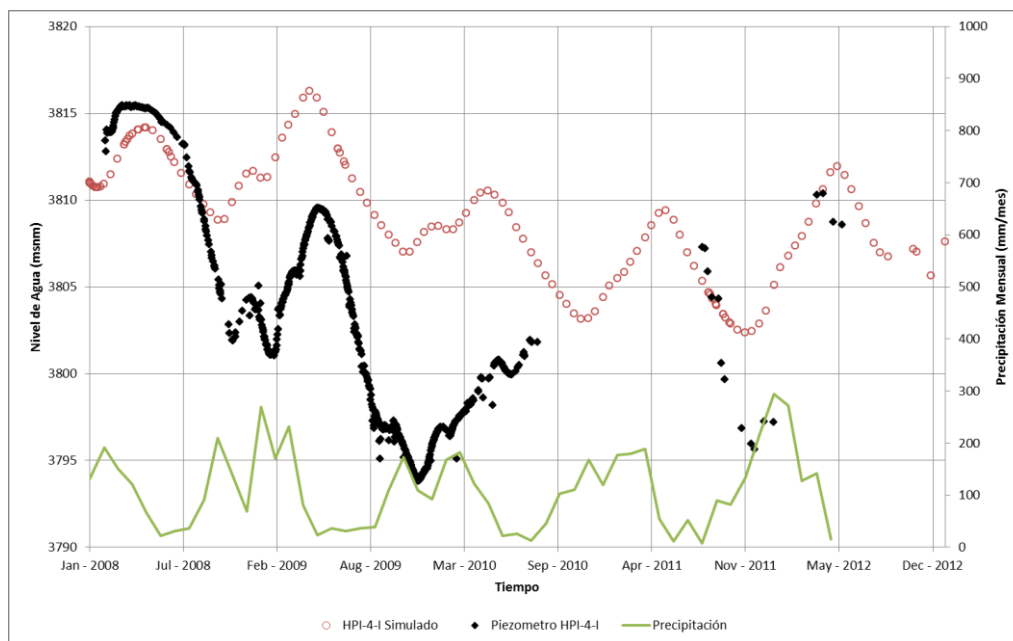
Debido al alto grado de heterogeneidad en el medio fracturado del tajo, se considera que lo importante en una calibración de este tipo es

poder representar de forma general las tendencias en los niveles de agua. Los gráficos IV-3 a IV-6 muestran niveles de agua reales versus los simulados en el eje izquierdo, además de la precipitación en el derecho.

El Gráfico IV-3 muestra los niveles simulados del piezómetro HPI-4-I. El medio fracturado muestra una oscilación de niveles bastante significativa, que el modelo numérico amortigua. Estas oscilaciones están vinculadas con los efectos combinados del bombeo en el tajo y la estacionalidad de la recarga.

En la segunda mitad de la simulación no existe data para comparar, sin embargo el resultado parece razonable siguiendo la estacionalidad.

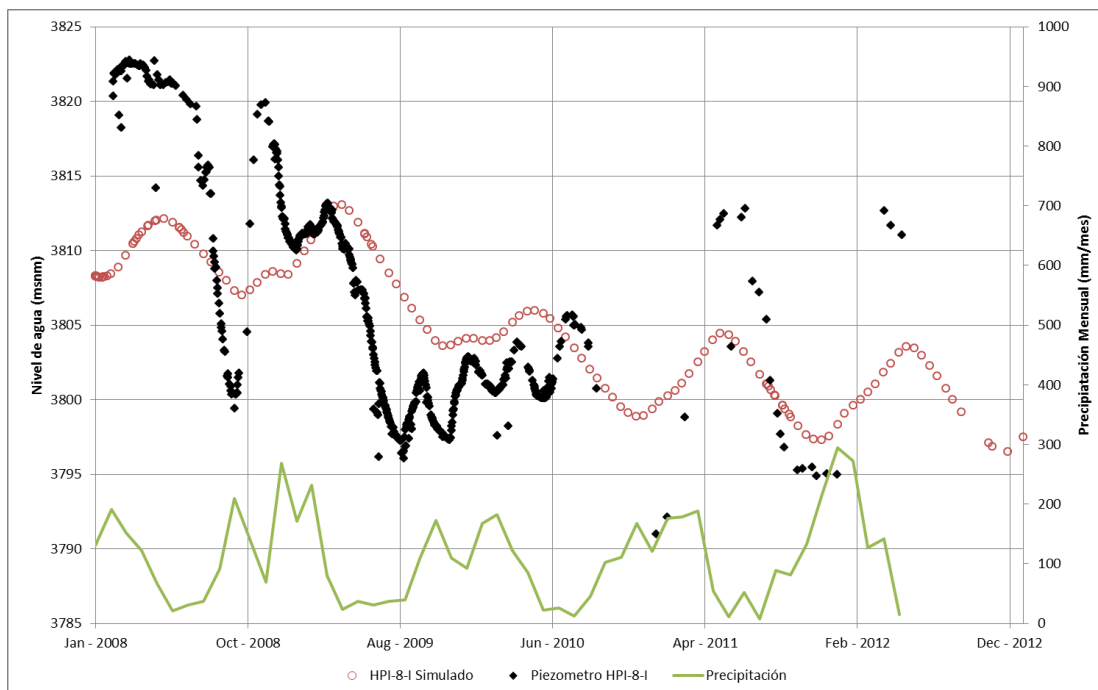
GRÁFICO IV- 3: Niveles transitorios piezómetro HPI-4-I



Se comparó los niveles del piezómetro HPI-8-I con sus respectivos resultados del modelo (Gráfico IV-4), debido que viene siendo mayormente afectado por el bombeo del pozo PP-03 y esto por una probable interconexión en las fracturas.

De forma similar al piezómetro HPI-4-I, la tendencia del descenso está adecuadamente representada. Pero se observa, al igual que en el resultado anterior, cómo el modelo genera un cierto amortiguamiento de los niveles piezométricos, respecto a las medidas piezométricas realmente registradas.

GRÁFICO IV- 4: Niveles transitorios piezómetro HPI-8-I



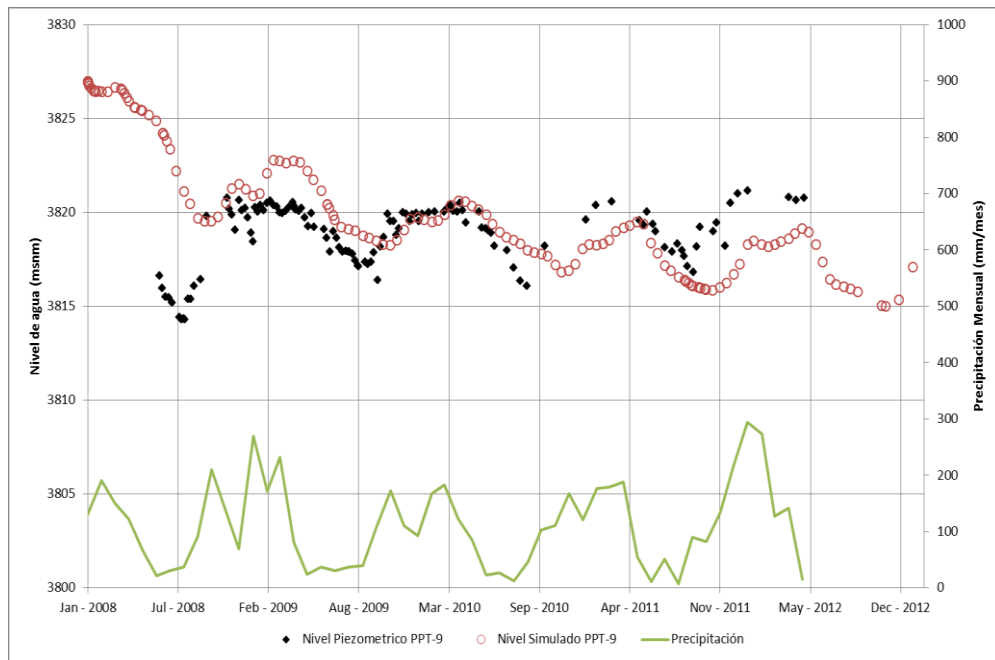
Niveles en la formación Yumagual

Debido a la importancia en el control de los flujos de los manantiales Hualgayoc, se comparó los niveles de las calizas de la formación Yumagual media y superior.

El piezómetro PPT-9 (Gráfico IV-5) tiene una de las series más completas, cubriendo casi cuatro años de monitoreo. Debido a que el nivel está solamente influenciado por la recarga por infiltración, exhibe las características oscilaciones de la estacionalidad que se ven claramente en

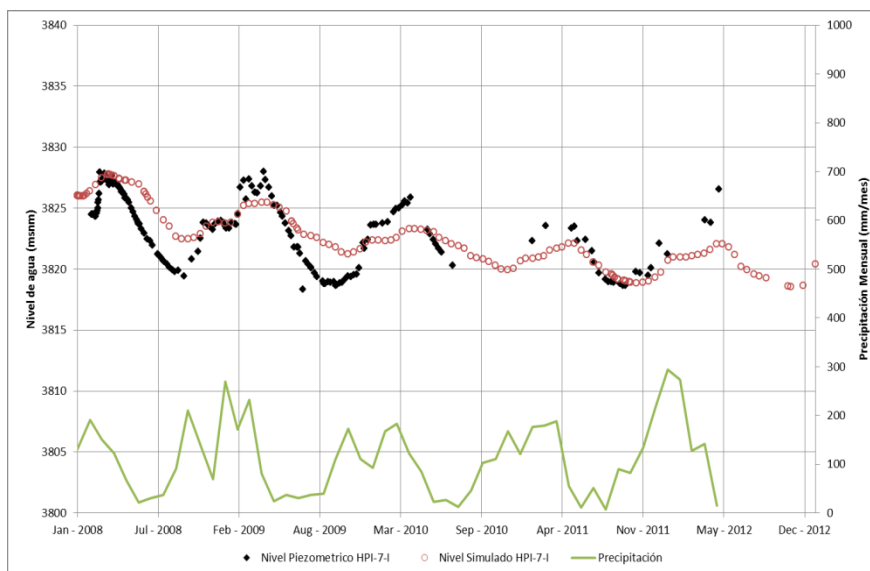
las mediciones realizadas. El modelo presenta una muy buena calibración transitoria.

GRÁFICO IV- 5: Niveles transitorios piezómetro PPT-9



Finalmente el punto HPI-7-I ubicado en el Yumagual superior cercano a la planta de procesos presenta una calibración casi óptima, solo ligeramente sub-dimensionando la amplitud de las oscilaciones (Gráfico IV-6).

GRÁFICO IV- 6: Niveles transitorios piezómetro HPI-7-I



4.5 Simulaciones transitorias predictivas

4.5.1 Drenaje del Tajo 2013

La unidad minera proporcionó información acerca de su plan de minado, con la finalidad que se simule el drenaje del tajo para el año 2013. El objetivo en el 2013 es reducir el nivel piezométrico hasta la cota 3 750 msnm para fin de año.

Se construyó una simulación preliminar, como primera aproximación de los caudales necesario para drenar el tajo, imponiendo al modelo una condición de borde de carga constante al ritmo del minado. La condición fue aplicada 10 metros por debajo del nivel del tajo.

En el Mapa 27 se puede observar la piezometría simulada al final del año 2013, simulando el drenaje de la mina.

Se estimó que los caudales requeridos para lograr un descenso en la piezometría, al ritmo del minado, son del orden 6 – 12 l/s, dependiendo de la estacionalidad de la recarga. Como es claro, el modelo aplica los mayores caudales del rango en la época húmeda y los menores en la seca.

Para esta estimación se aplicó la solución numérica con cargas constante, la cual representa una simplificación del drenaje como un valor global, tomando valores promedios. A pesar de ello, es necesario que este resultado se pueda recrear utilizando condiciones de borde puntuales en los nodos, representando los pozos de bombeo.

Con la finalidad de recrear el drenaje en condiciones puntuales de borde, se generaron simulaciones transitorias adicionales, distribuyendo los caudales aproximados por la solución de carga constante (6-12 l/s) en los pozos existentes. Es decir se utilizó el resultado de la simulación de potencial constante 10 m por debajo de la cota de excavación, como patrón de bombeo estacional, para fijar los caudales de bombeo en los pozos de drenaje del tajo, con el objetivo de analizar los efectos sobre el nivel piezométrico.

Es así que se simuló dos escenarios diferentes para el período de un año y aplicando la recarga correspondiente al año más húmedo de los datos recolectados, para representar el escenario más desfavorable, y uno tercero con el escenario más favorable de recarga nula:

- Escenario 1: Los pozos de bombeo existentes en el tajo (Tabla IV-6) bombean un caudal similar al calculado mediante la simulación con potenciales constantes (6 a 12 l/s).
- Escenario 2: Los pozos de bombeo existentes en el tajo (Tabla IV-6) bombean un caudal igual al doble que el calculado mediante la simulación con potenciales constantes (12 a 24 l/s).
- Escenario 3: Los pozos de bombeo existentes en el tajo (Tabla IV-6) bombean un caudal igual al doble que el calculado mediante la simulación con potenciales constantes (12 a 24 l/s) y la recarga se considera nula.

Tabla IV-6 Pozos de bombeo considerados en las simulaciones a futuro

Pozo de Drenaje en el Tajo considerado en las simulaciones	Este (m)	Norte (m)	Caudal de bombeo promedio 2008-2012 (l/s)	Caudal de Bombeo Máximo 2008-2012 (l/s)	Caudal de extracción	
					Escenario 1	
					(l/s)	
					Promedio	Max
PP-11	763 310,50	9 251 959,00	4,70	10,00	1,00	2,10
PP-12	763 647,50	9 252 144,00	1,60	5,50	0,50	1,20
PP-13	763 608,50	9 252 304,00	0,50	7,00	0,70	1,50
PP-3	763 465,60	9 252 338,00	3,80	11,90	1,10	2,50
PP-17	763 041,00	9 252 080,00	-	6,50 *	0,60	1,50
PP-18	763 208,00	9 252 061,00	-	4,00 *	0,40	0,90
PP-19	763 188,00	9 252 312,00	-	10,00 *	1,00	2,10

• Caudales referenciales obtenidos de los ensayos air-lift

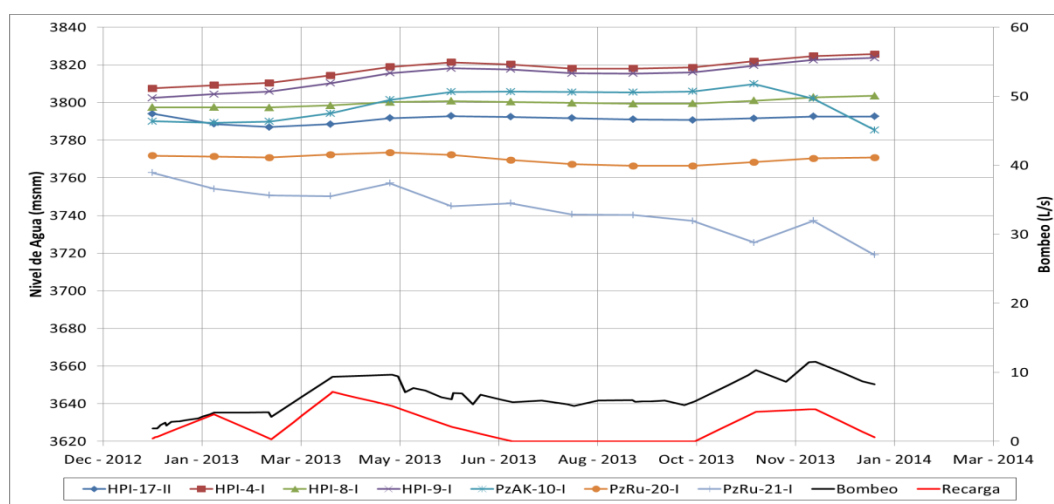
Resultados del Escenario 1: Pozos de Bombeo 6-12 l/s y Máxima Recarga

En el escenario 1, tras la simulación, se observa que se generó los típicos conos de bombeo, en las zonas más próxima a los pozos. Sin embargo, lateralmente los descensos producidos son bastante reducidos, esto obedece a que el macizo rocoso (diorita no fracturada) presenta baja permeabilidad, ingresado en el modelo (10^{-8} - 10^{-9} m/s).

En correspondencia a lo descrito la piezometría, en este año simulado extremadamente húmedo, tiende a subir en las zonas de baja permeabilidad y bajar en las zonas de fracturas, ingresadas en el modelo

numérico (Gráfico IV-7). Es decir, los bombeos ingresados al modelo en los pozos de drenaje existentes, no consiguen rebajar el nivel piezométrico en el tajo, a pesar que supone un vaciamiento igual al simulado con los potenciales constantes.

GRÁFICO IV- 7: Evolución de niveles simulados en el tajo 1- Escenario 1 bombeando 6-12 l/s y Máxima Recarga



Resultados del Escenario 2: Pozos de Bombeo 12-24 l/s y Máxima Recarga

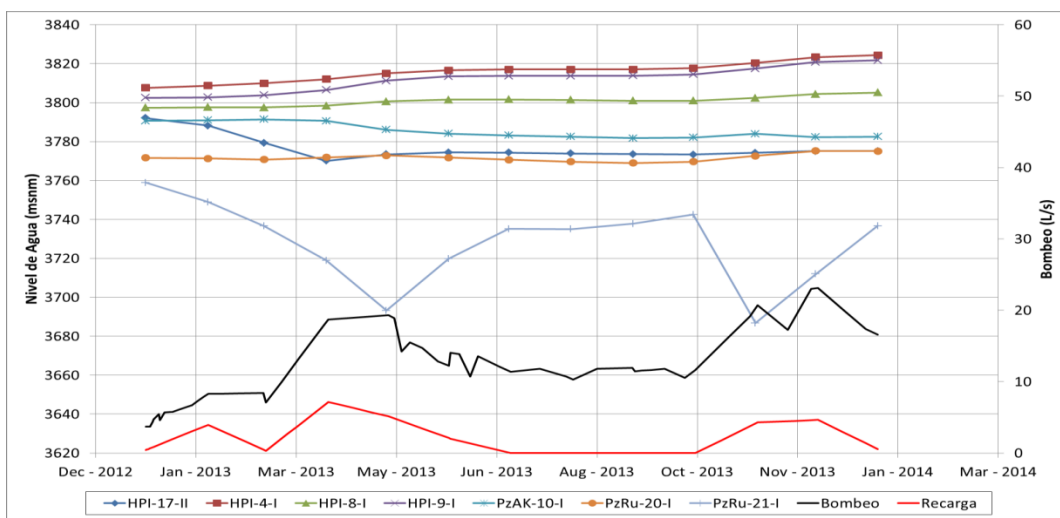
Al igual que la simulación correspondiente al Escenario 1 se generó conos de bombeo muy acusados en la zona alrededor de los pozos de drenaje y una extensión lateral de los descensos bastante

reducida, debido a la baja permeabilidad del macizo (diorita no fracturada) ingresado en el modelo (10^{-8} - 10^{-9} m/s).

A pesar de los bombeos considerados en el modelo, siendo el doble a los fijados por la simulación de potencial constante, la piezometría, en este año simulado extremadamente húmedo, tiende a subir en las zonas de baja permeabilidad y bajar en las zonas de fracturas ingresadas en el modelo numérico (Gráfico IV-8).

El modelo simula un vaciamiento en las zonas fracturadas, pero no en las zonas de intrusivo menos fracturado y, por tanto, menos permeable ($k \leq 10^{-8}$ m/s).

GRÁFICO IV- 8: Evolución de niveles simulados en el tajo 1 - Escenario 2 bombeando 12-24 l/s y Máxima Recarga



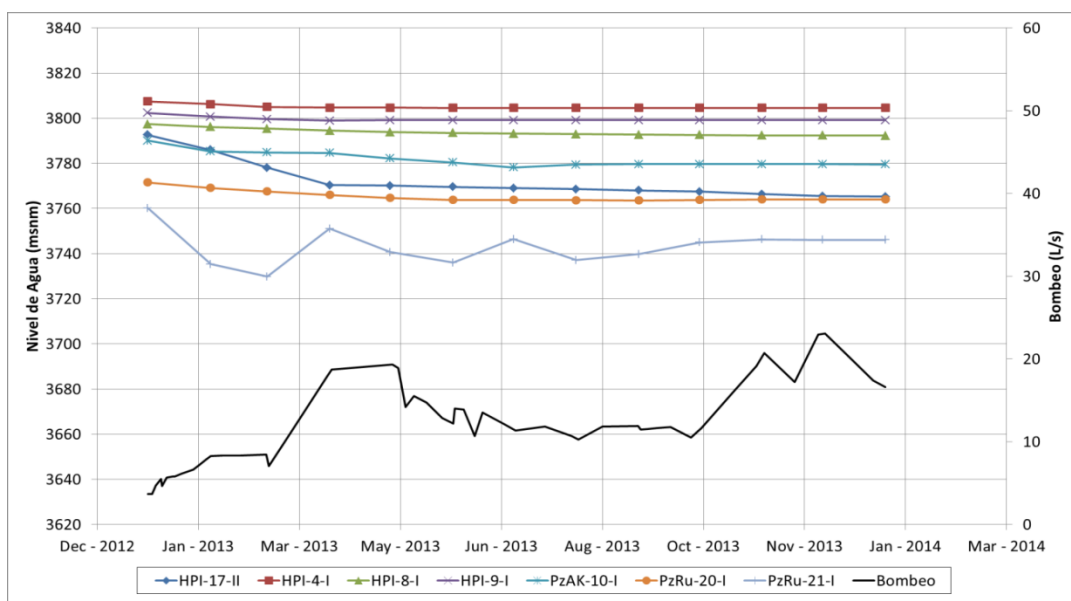
Resultados del Escenario 3: Pozos de Bombeo 12-24 l/s y Recarga Nula

En esta simulación se ha considerado unas condiciones ideales de recarga nula en el tajo. A pesar de que los bombeos considerados son elevados no se consigue deprimir el tajo a los niveles requeridos (Gráfico IV-9).

El modelo numérico ofrece la imagen de un cuerpo intrusivo con bloques poco fracturados ($k=10^{-8}$ - 10^{-9} m/s) cuya respuesta atenuada a los efectos de los drenajes dificulta la desaturación de estas zonas.

Es evidente que los pozos de drenaje deben ser ubicados en zonas fracturadas y es preciso analizar si entre los bloques menos fracturados existen diferencias de permeabilidad, ya que esto es crítico para evaluar las técnicas para la desaturación de las rocas del tajo y su influencia sobre la respuesta geomecánica durante la excavación de los taludes.

**GRÁFICO IV- 9: Evolución de niveles simulados en el tajo 1 -
Escenario 3 bombeando 12-24 l/s y Recarga Nula**



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se definió el modelo conceptual en la zona de estudio, estableciendo como zonas principales de recarga al Cerro Candela y al SO de la planta concentradora, debido a su alta karstificación.
 - ✓ En relación a la descarga del agua subterránea, se identificó los cauces de los ríos Hualgayoc y Tingo como drenes naturales que descargan el sistema, como también los manantiales asociados a estos cauces y a la quebrada Mesa de Plata. Por otro lado se identificó una zona de descarga no natural, influenciada por las labores mineras subterráneas existentes previas al tajo 1 (ver Mapa 15).
- En la zona se identificó 4 unidades hidrogeológicas, determinadas a partir de su comportamiento y sus parámetros hidrogeológicos (ver Mapa 15).
- Se asignó los siguiente límites hidrogeológicos (ver Mapa 21):
 - ✓ Los ríos Hualgayoc y Tingo como ejes de drenaje, debido a que la mayoría de los manantiales están vinculados a la ribera de estos cauces.

- ✓ La divisoria hidrológica de la quebrada Mesa de Plata al este, debido a que se comporta como un límite de NO flujo ya que está asociado a formaciones de muy baja permeabilidad de la Fm Chulec
- ✓ La zona de fractura de Coymolache al oeste, considerado como un límite abierto.
- Se construyó y calibró el modelo tridimensional de flujo de agua del área de estudio para régimen permanente (condiciones naturales, ver Gráfico IV-1) y régimen transitorio (para un plan de minado a fines del 2013).
- Una vez calibrado el modelo se estableció, mediante la solución numérica de cargas constantes, un caudal global de drenaje de 6-12 l/s, lo cual nos asegurará un nivel piezométrico 10 m por debajo del plan de minado (ver Mapa 27).
- A pesar de establecer un caudal global de drenaje, se tuvo que simular esta condición utilizando condiciones de borde puntuales, a través de los pozos de bombeo.
- Se simularon tres escenarios para un período de un año, los dos primeros escenarios corresponden a una condición de recarga,

correspondiente al año más húmedo registrado, como escenarios más desfavorables (ver Gráficos IV-7 y IV-8). El tercer escenario se representó con una condición de recarga nula (ver Gráfico IV-9).

- En el primer escenario se simuló un caudal de extracción de 6-12 (el caudal establecido mediante carga constante) l/s, en el segundo escenario se simuló caudales de extracción de 12-24 l/s (el doble de caudal establecido mediante carga constante) y el tercer escenario se simuló caudales de extracción de 12-24 l/s (este escenario consideró recarga nula)
- Para los tres escenarios se observa que no se puede deprimir el nivel freático por debajo de los niveles del tajo.
- El modelo numérico refleja la realidad de un cuerpo intrusivo con zonas de muy baja permeabilidad y por tanto muy difícil de drenar.
- El modelo en los escenarios, simula el vaciamiento en las zonas fracturadas pero no en las zonas de intrusivo menos fracturado.

Recomendaciones

- Se recomienda la perforación de más pozos de bombeo para mejorar el drenaje del tajo a corto plazo, drenando zonas locales permeables por fracturación.
- Se debe investigar con mayor exactitud el macizo intrusivo del tajo 1 ,para definir de manera más exacta las permeabilidades de los bloques intrusivos, a través de ensayos de permeabilidad
- Establecer una relación de los parámetros de resistencia mecánica de roca versus la permeabilidad, de igual forma establecer una relación entre la permeabilidad y las alteraciones geológicas.
- Evaluar la posibilidad de drenes horizontales para despresurizar una vez se profundice con la excavación, en los bloques de roca con permeabilidad igual o inferior a 10^{-8} m/s (zona no drenables mediante pozos verticales).
- Aumentar el número de piezómetros de control piezométrico tanto en el tajo como en ciertas zonas del entorno del tajo 1 donde se carece de datos piezométricos.
- Se deberá continuar con el programa de medidas piezométricas.

- Realizar perforaciones y pruebas hidráulicas para obtener más información geológica e hidrogeológica. Es importante mejorar los estimados de permeabilidad dentro del tajo.
- Ingresar la data de pruebas hidráulicas al modelo, y continuamente actualizar la calibración para refinar los estimados de drenaje.
- El descenso generado, por la prueba de bombeo, se monitoreo en varios puntos pero la mayor afección se observó en los pozos GF-WG-1a (HPI-9-I) y GF-WG-1b (HPI-4-I) en la zona norte del tajo.
- Es evidente que los pozos de drenaje deben ser ubicados en zonas fracturadas.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Llopis, LI, 1970, Fundamentos de Hidrogeología Cárstica.
- Davis, S.N. y R. De Wiest, 1971, Hidrogeología.
- Yevjevich, V. 1976, Advanced approaches to karst hydrology and water resources systems.
- Milanovic, P.T., 1981, Karst hydrogeology. Water Resources Publications, USA.
- Boletín Geológico y Minero Español Vol. 112A., Pulido Bosch, 2001, Investigaciones y exploración de acuíferos kársticos.
- Rubén Juanes y Javier Samper, 2000, Una formulación general y eficiente de la fracturas en el MEF, Revista internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería.
- Jaime Garfías, Hilario Llanos e Ismael Herrera; 2001, La doble porosidad y el análisis de flujo en medios kársticos: Aplicación al acuífero Ixtina.
- Séptima Asamblea Hispano – Portuguesa de Geodesia y Geofísica; Ramón Díaz, José Fernández y Lorena Álvarez; 2012; Estudio

comparativo de los simuladores de flujo subterráneo Visual MODFLOW y FEFLOW.

- Séptima Asamblea Hispano – Portuguesa de Geodesia y Geofísica; Ramón Díaz, José Fernández y Lorena Álvarez; 2012; Simulación numérica del flujo subterráneo en una explotación minera a cielo abierto sobre una formación carbonatada utilizando MODFLOW y FEFLOW.
- Iñaki Arrate, Iñaki Antigüedad, Hilario Llanos, María Laresgoiti y Rosa Alonso; 1992; Aporte metodológico de trazados en sistemas kársticos del País Vasco.
- C. Galán, C. García, K. Sansinenea, Ñ. Añibarro y R. Muñoz; 1994; Estudio hidrogeológico del macizo kárstico de Uzturre.
- J. López-Geta, B. Andreo, J. Vías, J. Durán, F. Carrasco y P. Jiménez, Aproximación metodológica para evaluar la recarga en acuíferos carbonáticos.
- Unión Europea, Demarcación hidrográfica de las cuencas mediterráneas andaluzas, Descripción de los modelos de simulación de aportaciones y recarga de acuíferos.

- Kavouri, Konstantina; Karatzas, George; Plagnes, Valérie; Varouchakis, Emmanouil, Una metodología combinada de cartografía de la vulnerabilidad y modelos de flujo de agua subterránea para el manejo de acuíferos kársticos.
- Andrachek, R. G.; Abadía, D.; James, S. C.; Zhang, B.; Gabriel, C.; Martin, P.; Arnold, W. B.; Woessner, W. W., Aplicación de técnicas de regularización y descomposición de valor singular para la optimización de un modelo altamente parametrizado Fe Flow
- Franklin, R. M.; Van Slobbe, E.; Fernandes, N. F.; Palma, J.; Van Dalen, D.; Santos, A. C.; Melo, V.; Reis, R. G.; Carmo, R.; Fernandes, H. M., Monitoreo hidrológico y modelación ambiental para evaluar la calidad y sostenibilidad de los recursos hídricos en una zona de minas de uranio, Caetité – Brasil.
- Ana Rolindes ; Eugenio Silva, Tesis Doctoral “Interacciones acuífero – lago y biogeoquímica del nitrógeno en ambientes kársticos.
- Nocchi, M; Salleolini, M., Modelo 3D del dependiente de la densidad para la evaluación y optimización de la política de gestión del agua en un acuífero costero carbonato explotada para el abastecimiento de agua y el cultivo de peces.

- WMC, 2005-2007: “Monitoreo de manantiales”.
- WMC, 2005: “Investigación de factibilidad del desagüe”.
- KPC 2005: “Investigación de filtraciones y manantiales afectados por el tajo”.
- WMC, 2006: “Solicitud de derechos de agua para el pozo de producción pp-3”.
- WMC, 2006. “Modelo de flujo de agua subterránea del área del proyecto minero”.
- WMC, 2006: “Investigaciones hidrológicas e hidrogeológicas del área del proyecto minero”.
- GFLC 2006: “Monitoreo de manantiales con problemas”
- GWI 2007: “Estudio Hidrogeológico de Karst”.
- WMC 2005-2007: “Monitoreo de manantiales”.
- WMC 2007: “Documentación de sustento para la solicitud de uso de aguas superficiales para la operación del proyecto minero”.
- WMC 2007: “Solicitud de derechos de agua para pozos de producción pp-16 y pp-10”.

- WMC 2007: “Documentación de apoyo para las solicitudes de derechos de agua para el sistema de desagüe del tajo abierto”.
- WMC 2007: “Alternativas de abastecimiento de agua para Hualgayoc y Coymolache”.
- WMC 2007: “Surface water quality”
- WMC 2008: “Cumulative impact assessment”.
- WMC 2008: “Estudio de disponibilidad hídrica para extracción de agua desde el río tingo aguas abajo de confluencia con quebrada Las Gordas”.
- WMC 2008: “Modelo Numérico de Flujo de Agua Subterránea para el área del Proyecto minero”.
- Javier Jacay 2008: “Características Estratigráficas y Sedimentológicas de la Formación Yumagual en el Sector de Estudio - Hualgayoc”.
- Geoandina 2011: “Informe de Perforación Task Team”.
- SWS 2011: “Asesoría hidrogeológica para el drenaje del tajo 1”.
- GWI 2011: “Investigaciones Hidrogeológicas PIT”.

- SWS 2012: “Supervisión de perforación e instalación de pozos y piezómetros para el drenaje del tajo 1”.
- MWH PERU S.A.2012: “Site-Wide Hydrogeological Study”.
- Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Conceptos básicos de hidrología subterránea, 2000.

ANEXOS

FOTOGRAFÍAS



Foto1.- Formación Chulec con sus características secuencias estratocrecientes, que se presentan aguas debajo de la localidad el Tingo.



Foto2.- Vista de la Formación Pariatambo, donde se puede observar gruesos bancos de calizas que caracterizan a la parte media de esta unidad litoestratigráfica.



Foto3.- Formación Pariatambo cerca al contacto con el intrusivo riolítico, donde se puede observar delgados bancos de calizas de coloración gris marrón por efecto del metasomatismo e hidrotermalización.



Foto4.- Parte inferior de la ruta 501, en donde se puede observar la unidad inferior de la Formación Yumagual caracterizado por bancos delgados de calizas.



Foto 5.- Interbancos de arcillas margosas que alcanzan hasta 3metros de espesor, característico para esta unidad inferior del Yumagual.



Figura 6.- Vista de gruesos bancos carbonatados que es lo que caracteriza a la parte media de la Formación Yumagual, ruta 501.



Foto 7.- sobre la topografía clásicos afloramientos de la parte media de la Formación Yumagual, en donde se puede distinguir los gruesos bancos carbonatados.

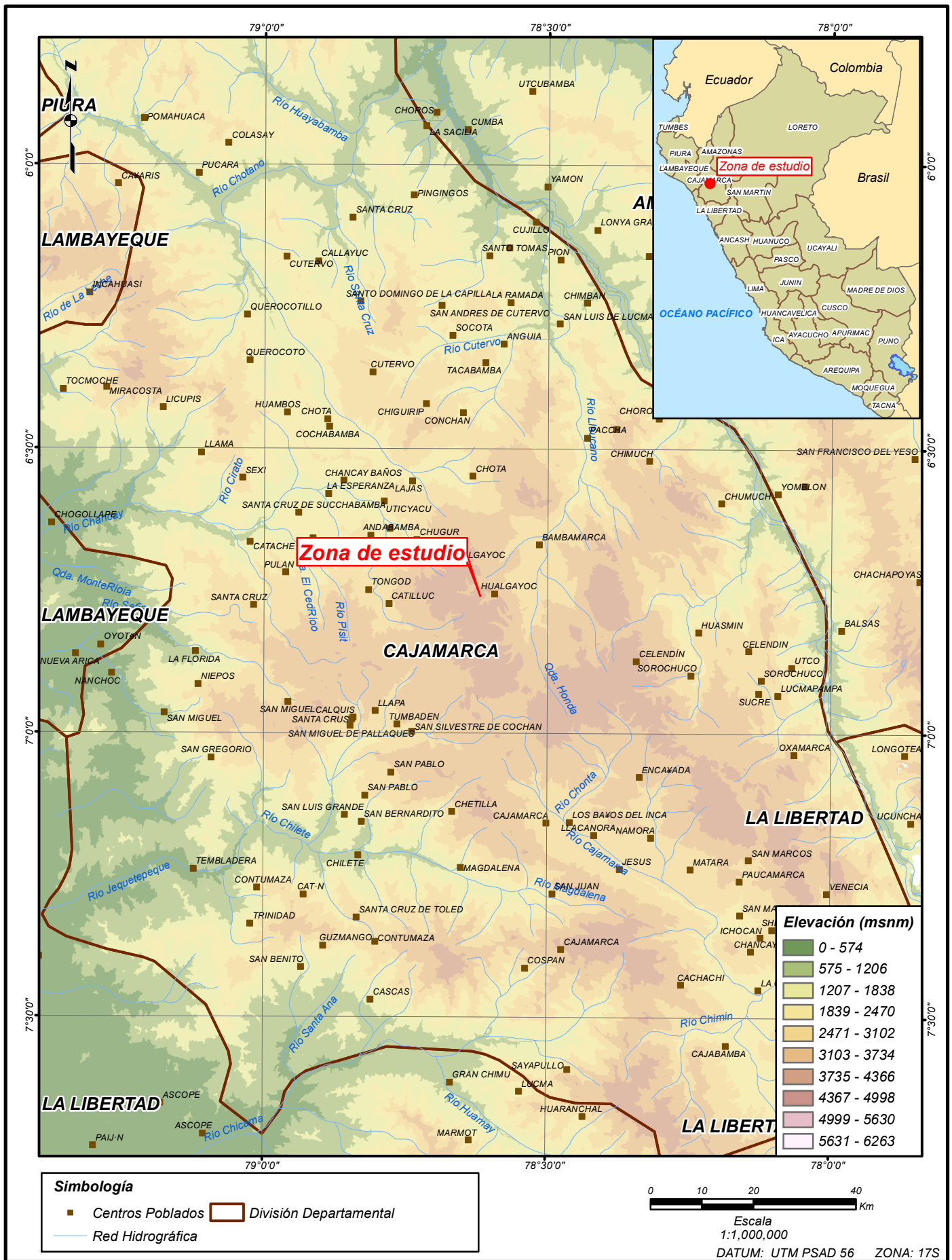


Foto 8.- Afloramiento muy característico de la parte superior de la Formación Yumagual, en donde se puede apreciar los gruesos niveles de arcillas margosas.



Foto 9.- se observa una depresión topográfica asociado a delgados niveles de areniscas, se trata de un nivel de arcillas intercalado con delgados niveles de areniscas de grano fino.

MAPAS



**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA**



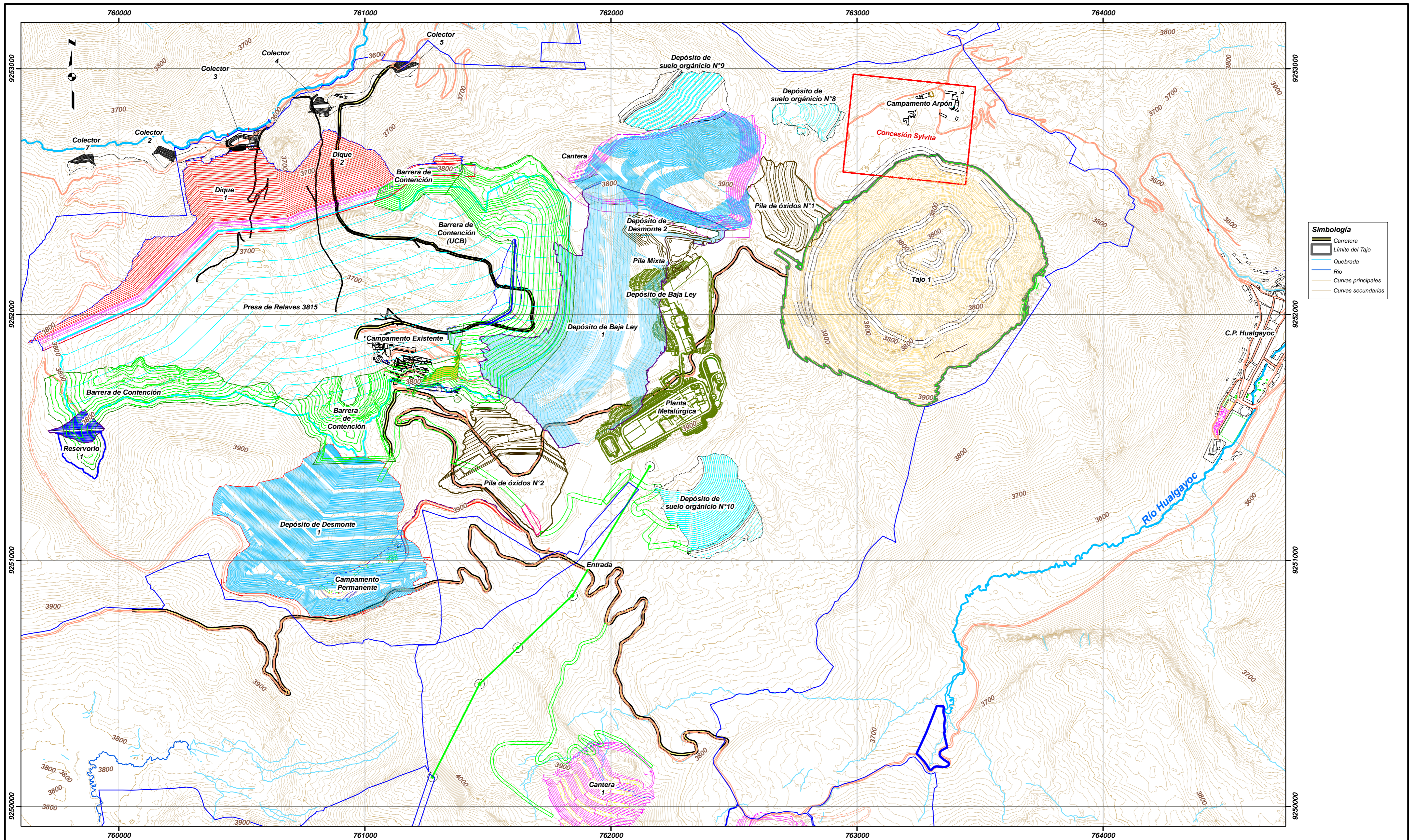
TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01 Acuífero Yumaguay - Cajamarca

ELABORADO: Bachiller Jesús Mejía Rueda

FECHA: 2014

MAPA DE UBICACIÓN


MAPA
1

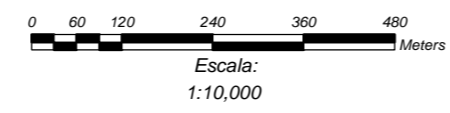


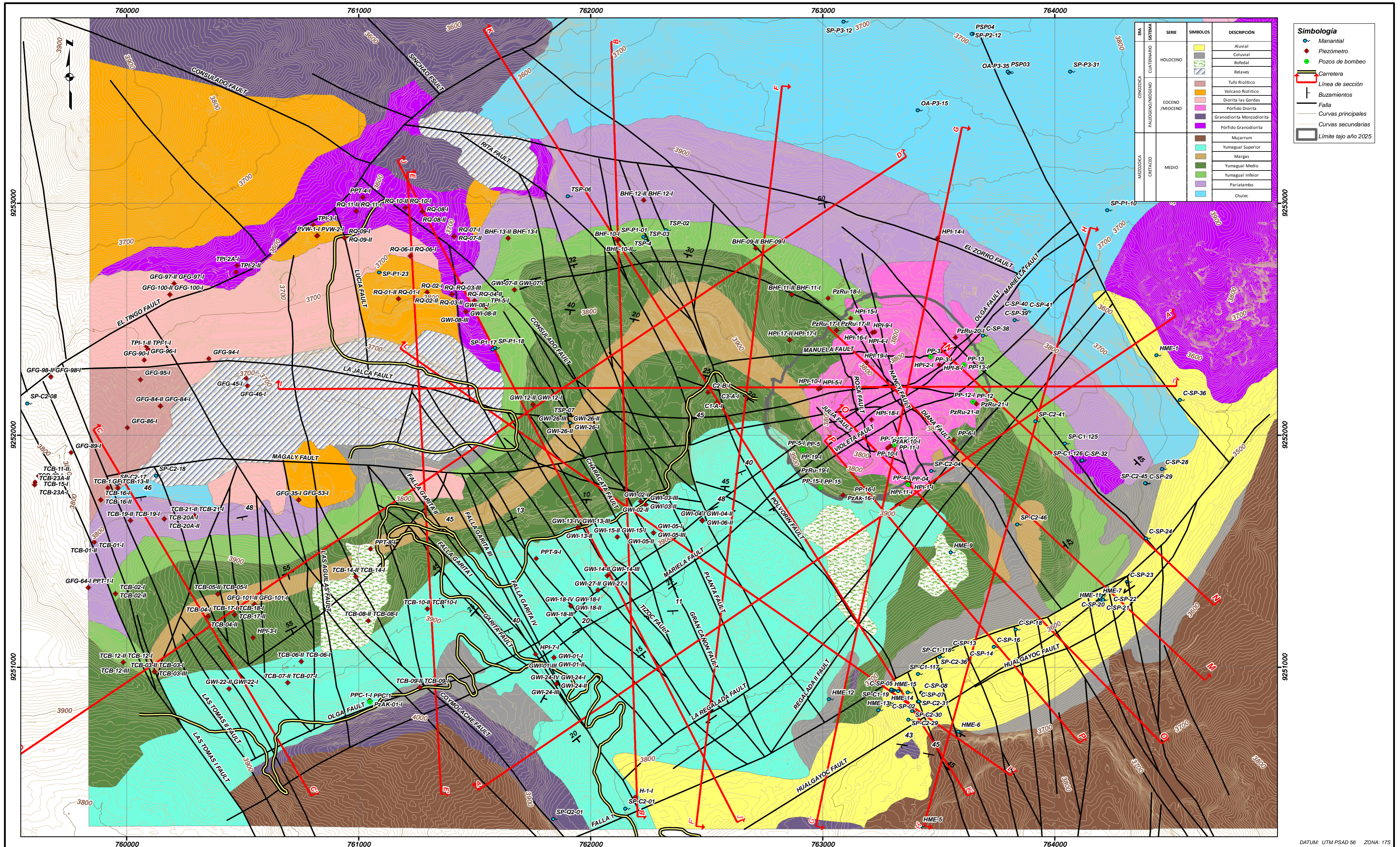
Simbología

- Carretera
- Límite del Tajo
- Quebrada
- Río
- Curvas principales
- Curvas secundarias


DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S

	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA		
	TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desagüe del Tajo 01 Acuífero Yumagual - Cajamarca		
ELABORADO:	Bachiller Jesús Mejía Rueda	FECHA:	2014
			INSTALACIONES MINERAS
			MAPA 2



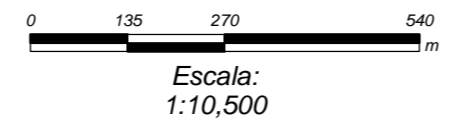


DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S


UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA

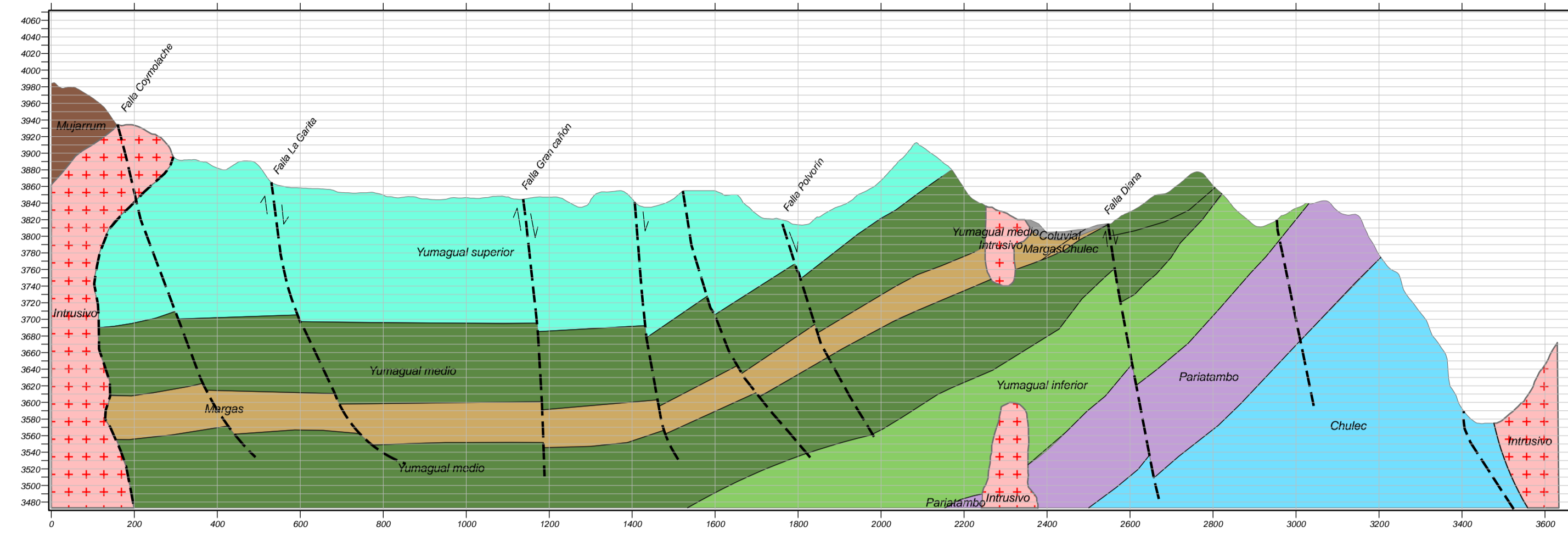
TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desagüe del Tajo 01 Acuífero del Desagüe del Tajo 01 Acuífero Yumagal - Cajamarca

ELABORADO: Bachiller Jesús Mejía Rueda FECHA: 2014 MAPA 3

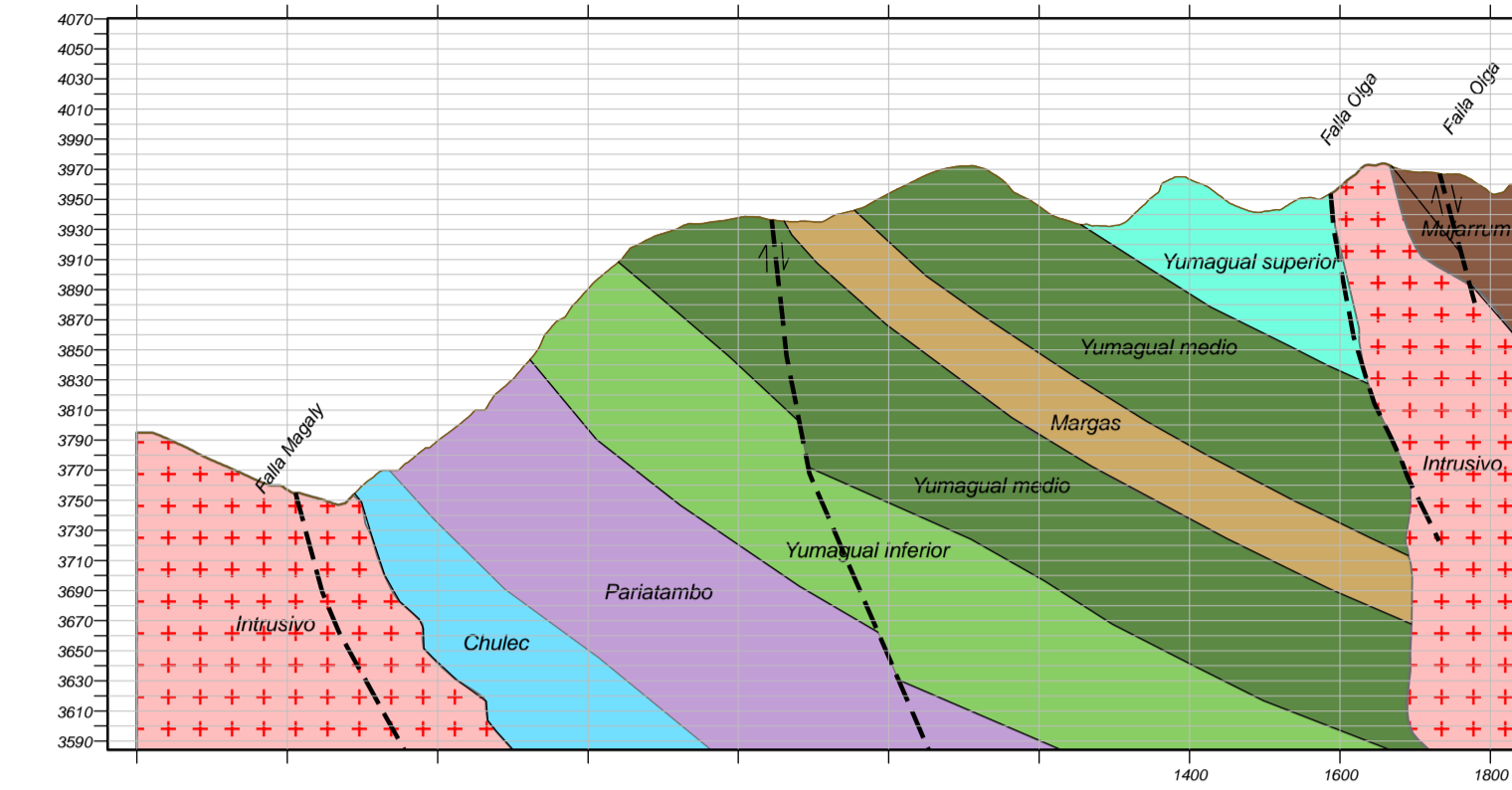


SECCIONES GEOLÓGICAS

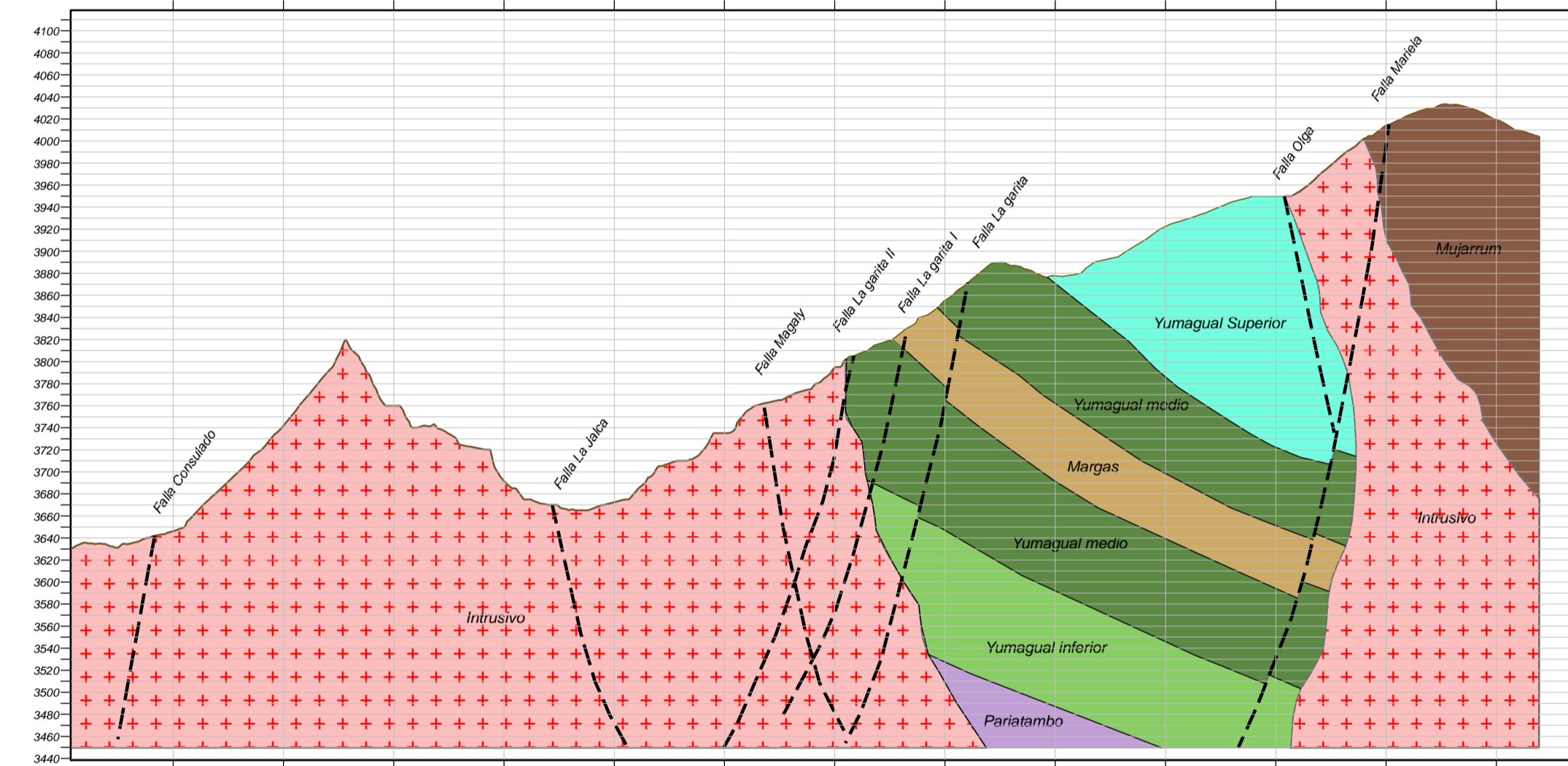
SECC A-A'



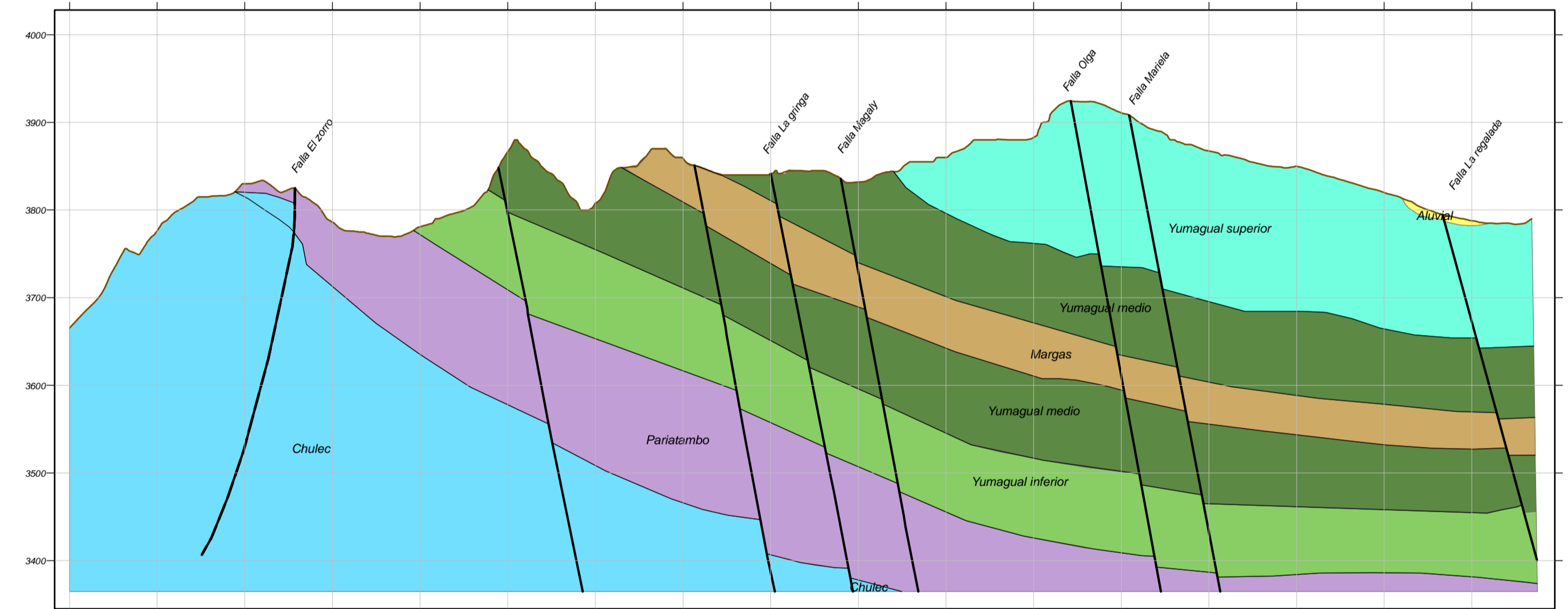
SECCION C-C'



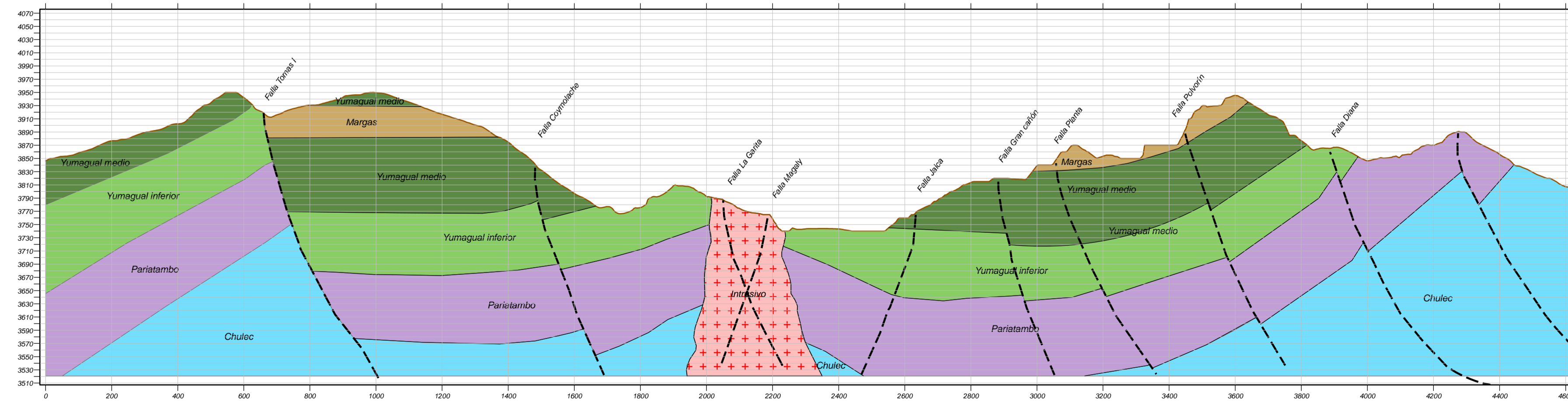
SECCION E-E'



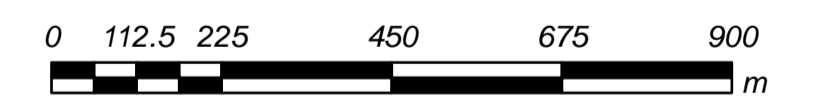
SECC B-B'



SECCION D-D'



ERA	SISTEMA	SERIE	SIMBOLOS	DESCRIPCIÓN
CUATERNARIO	HOLOCENO		[Yellow box]	Aluvial
			[Grey box]	Coluvial
			[Diagonal lines box]	Bofedal
PALEOGENO/NEOGENO	EOCENO /MIOCENO		[Red box]	Tufo Riolitico
			[Orange box]	Volcano Riolitico
			[Pink box]	Diorita las Gordas
			[Purple box]	Pórfido Diorita
			[Dark purple box]	Granodiorita Monzodiorita
			[Light purple box]	Pórfido Granodiorita
MEZOSOICA	CRETACEO	MEDIO	[Brown box]	Mujarrum
			[Cyan box]	Yumagual Superior
			[Orange box]	Margas
			[Green box]	Yumagual Medio
			[Light green box]	Yumagual Inferior
	[Purple box]	Pariatambo		
	[Blue box]	Chulec		



H:2V
Escala
1:10,000



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA



TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desagüe del Tajo 01 Acuífero del Desagüe del Tajo 01 Acuífero Yumagual - Cajamarca

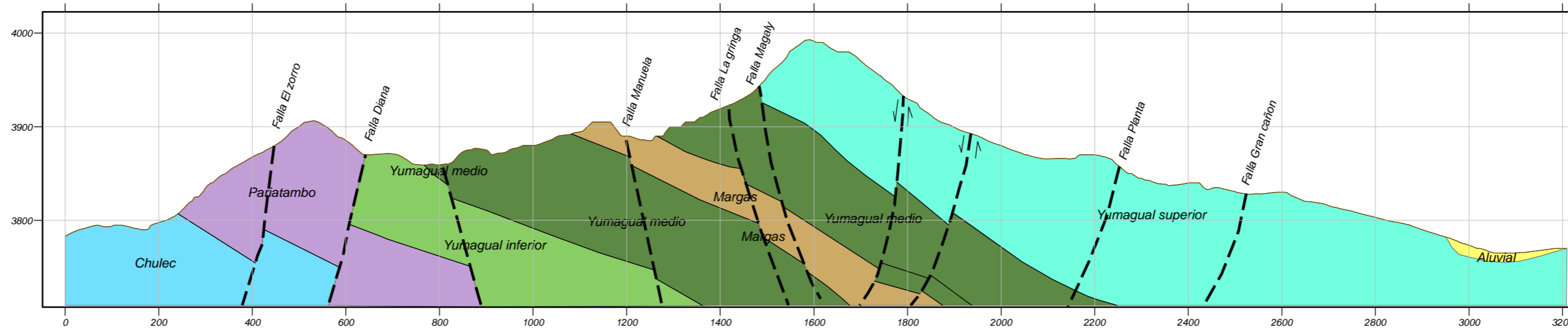
ELABORADO: Bachiller Jesús Mejía Rueda

FECHA: 2014

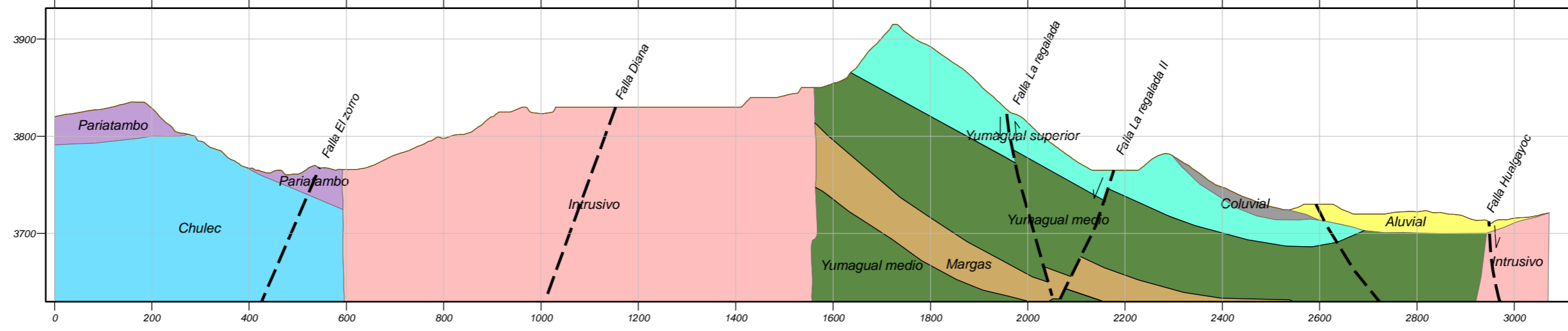
SECCIONES GEOLÓGICAS A - E

SECCIONES GEOLÓGICAS

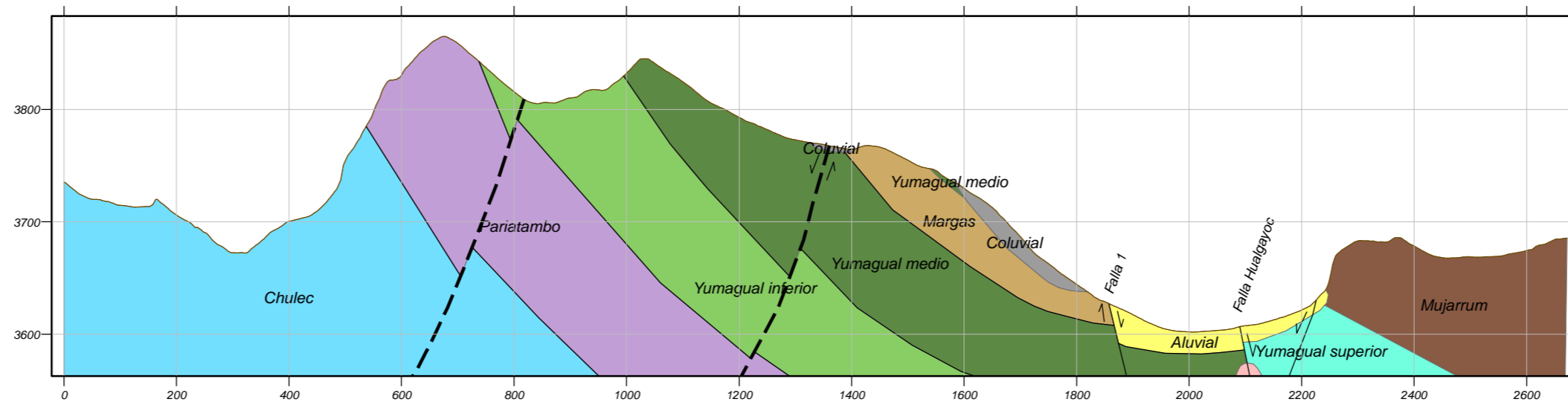
SECC F-F'



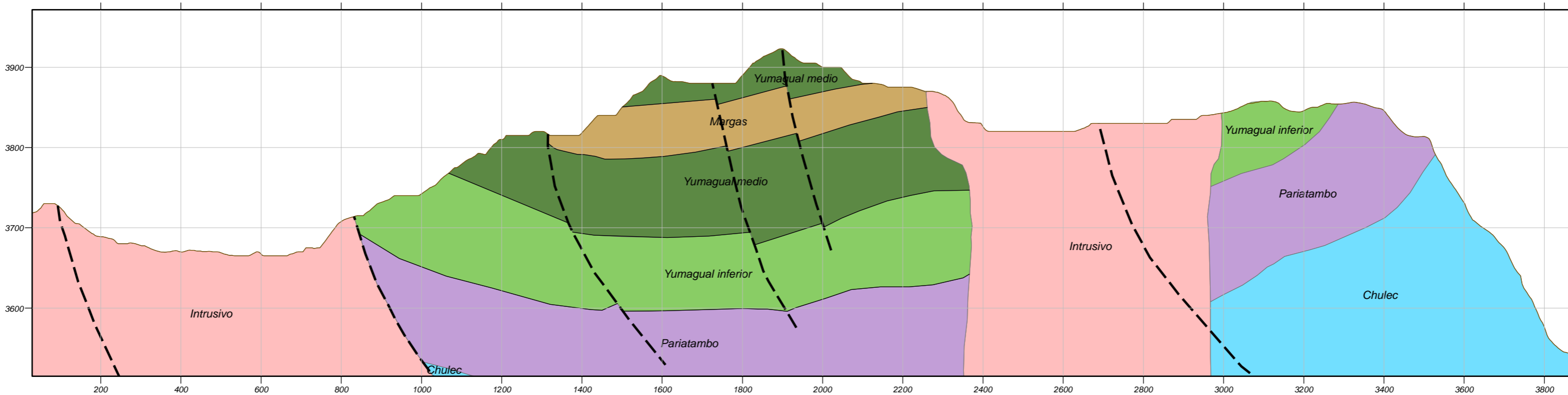
SECC G-G'



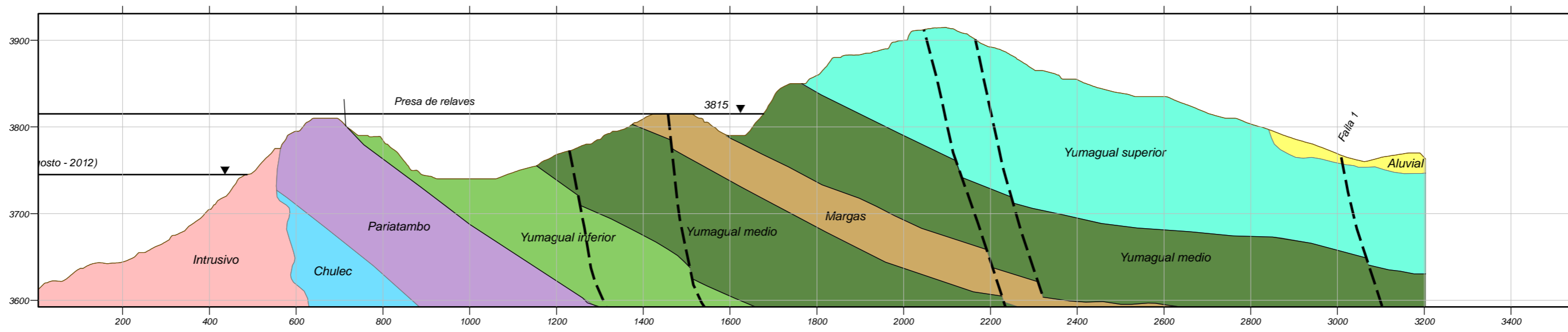
SECC H-H'



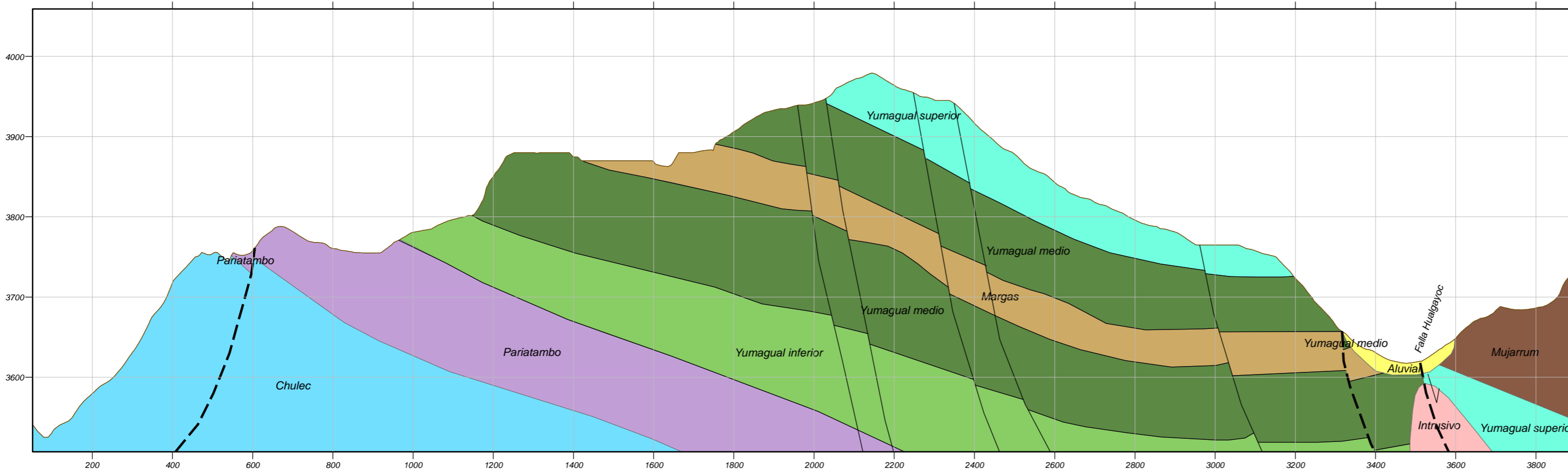
SECC I-I'



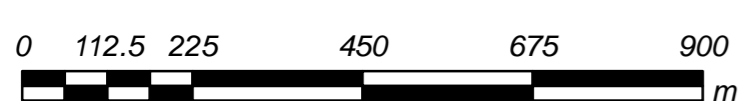
SECC J-J'



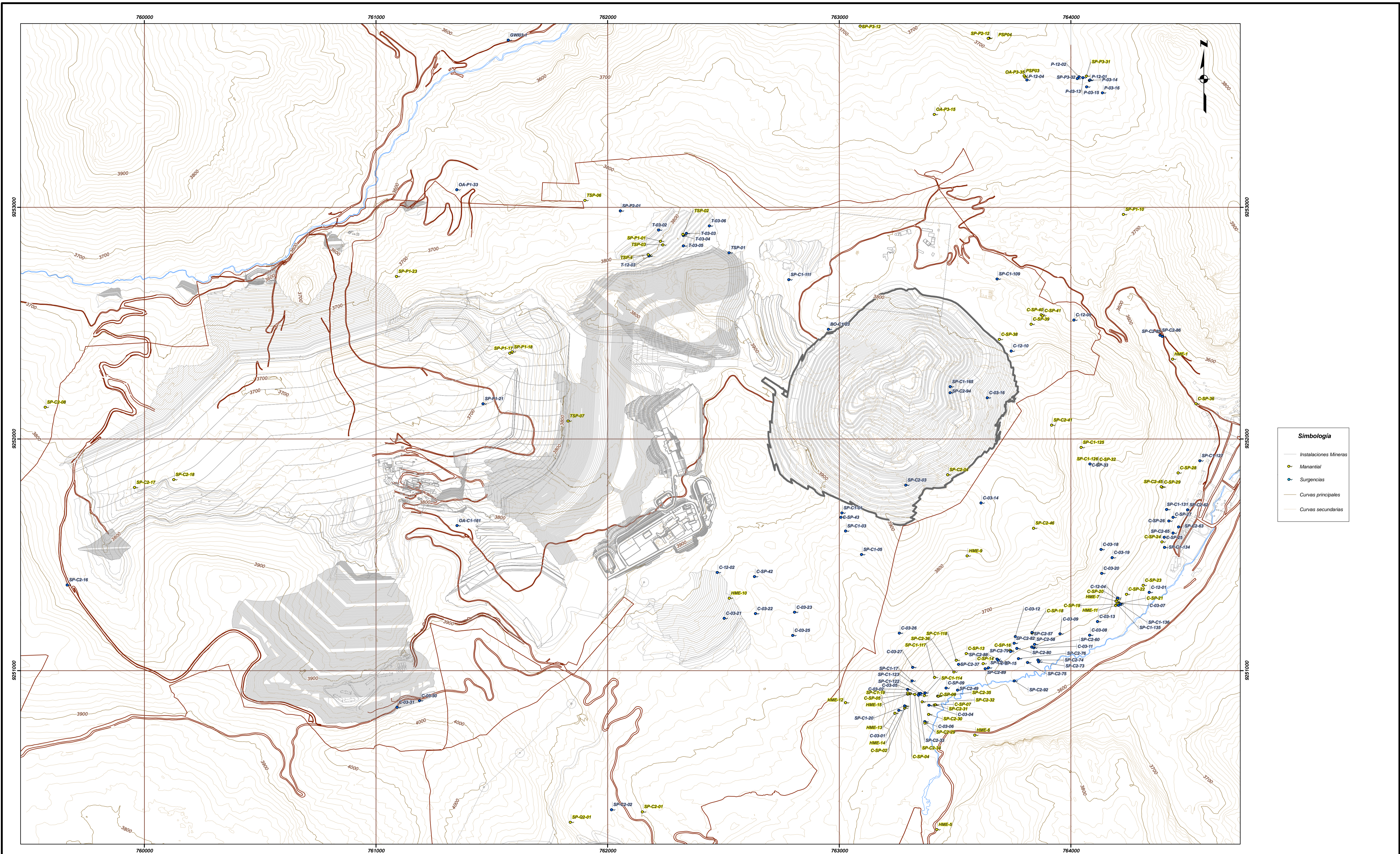
SECC K-K'



EPA	SERIE	SÍMBOLOS	DESCRIPCIÓN
CUATERNARIO	HOLOCENO		Aluvial
			Coluvial
			Bofedal
			Relaves
CENOZOICA	EOCENO / MIOCENO		Tufo Riolítico
			Volcano Riolítico
			Diorita las Gordas
			Pórfido Diorita
			Granodiorita Monzodiorita
			Pórfido Granodiorita
MEZOZOICA	MEDIO		Mujarrum
			Yumagual Superior
			Margas
			Yumagual Medio
			Yumagual Inferior
			Pariatambo
			Chulec



H=2V
Escala
1:10,000




Simbología

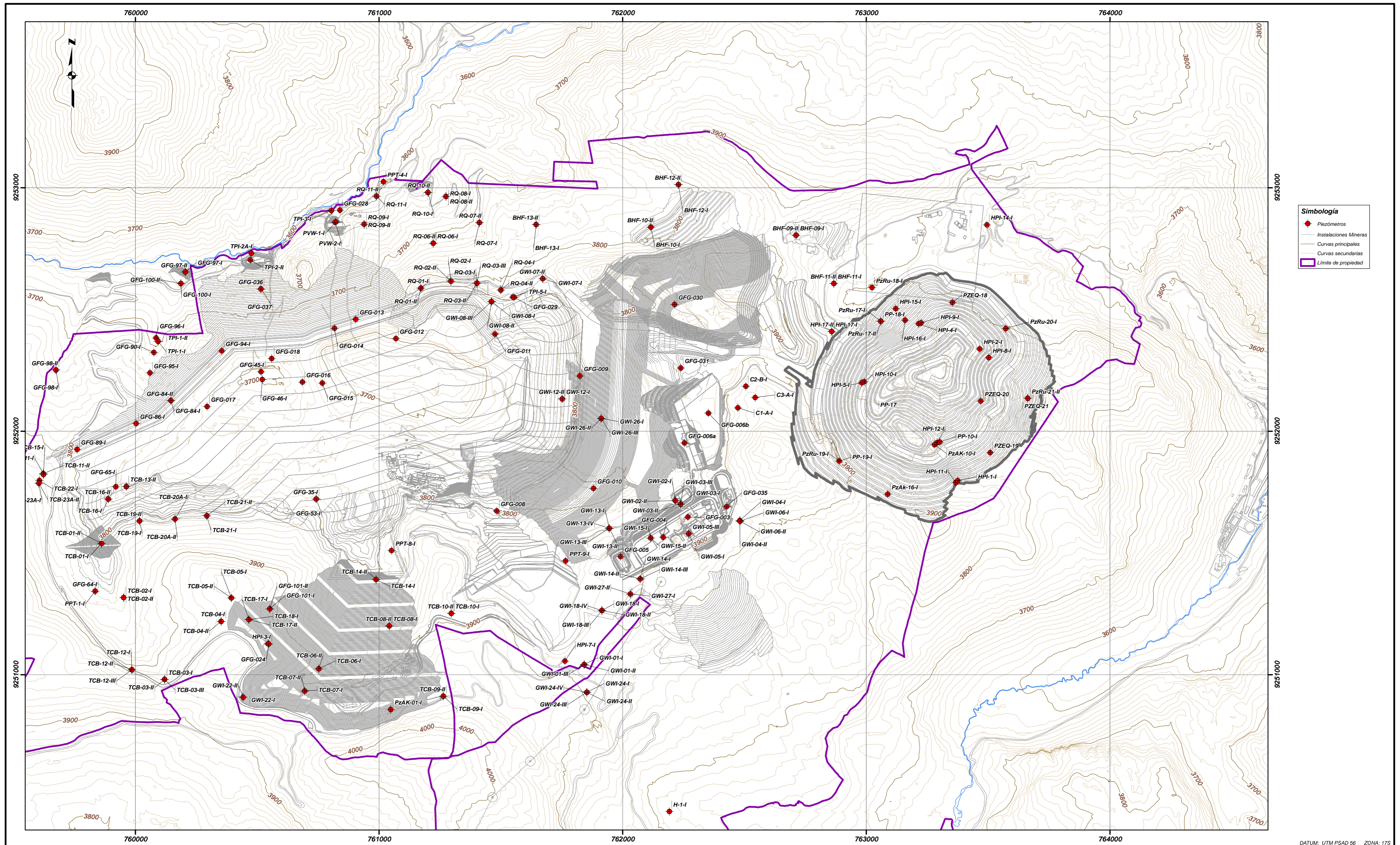
- Instalaciones Mineras
- Manantial
- Surgencias
- Curvas principales
- Curvas secundarias



DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S

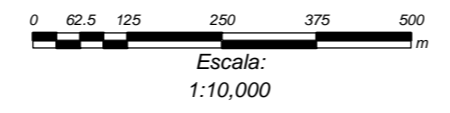
	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA	
TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desagüe del Tajo 01 Acuífero Yumagual - Cajamarca		
ELABORADO:	FECHA:	MAPA:
Bachiller Jesús Mejía Rueda	2014	7

Schlumberger Private




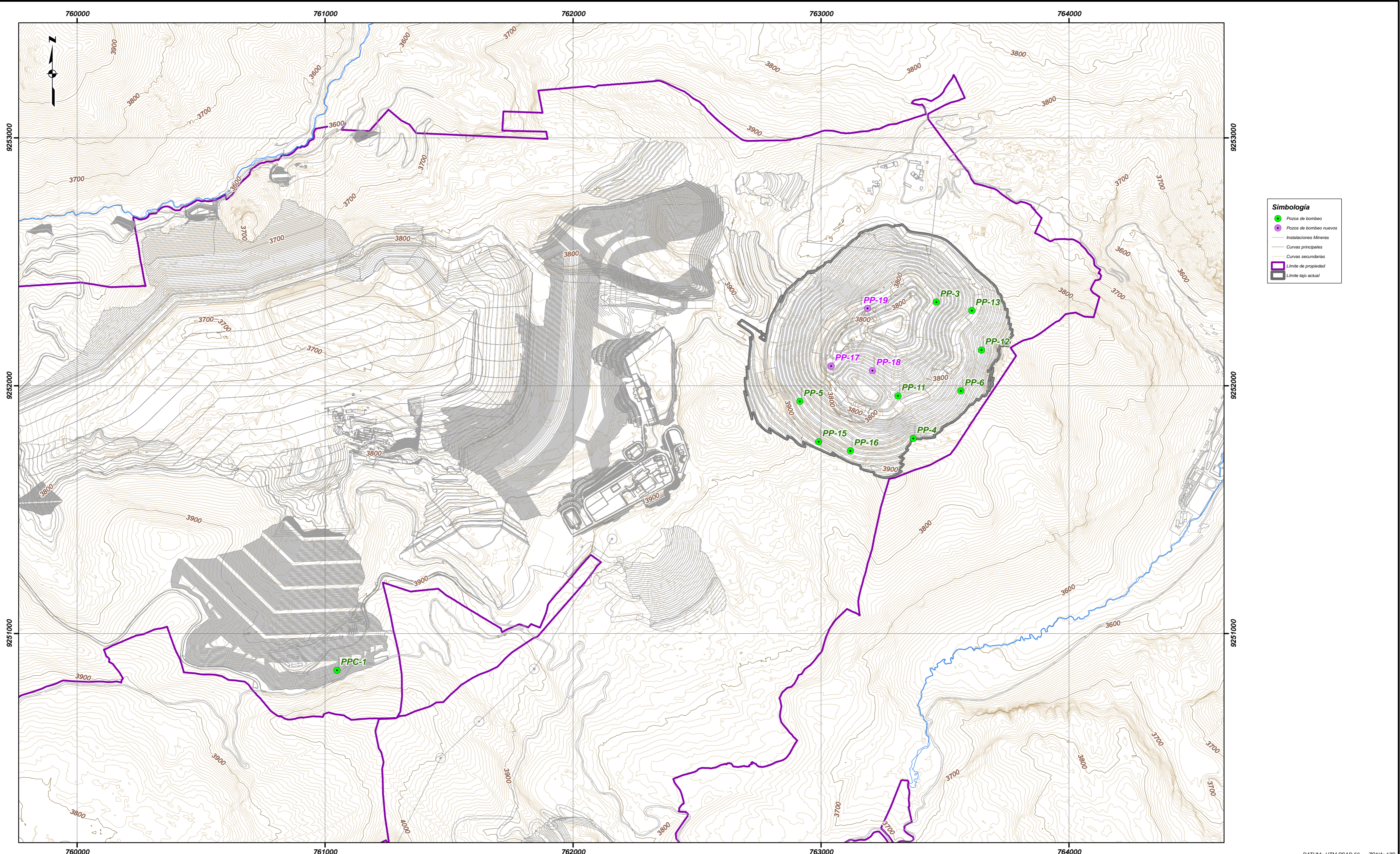
Simbología

- Piezómetros
- Instalaciones Mineras
- Curvas principales
- Curvas secundarias
- ▭ Limite de propiedad



DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA</p>	
<p>TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01 Acuífero Yumagual - Cajamarca</p>	
ELABORADO:	FECHA:
Bachiller Jesús Mejía Rueda	2014
INVENTARIO DE PIEZÓMETROS	
MAPA	
8	

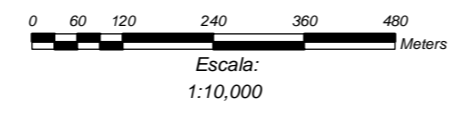


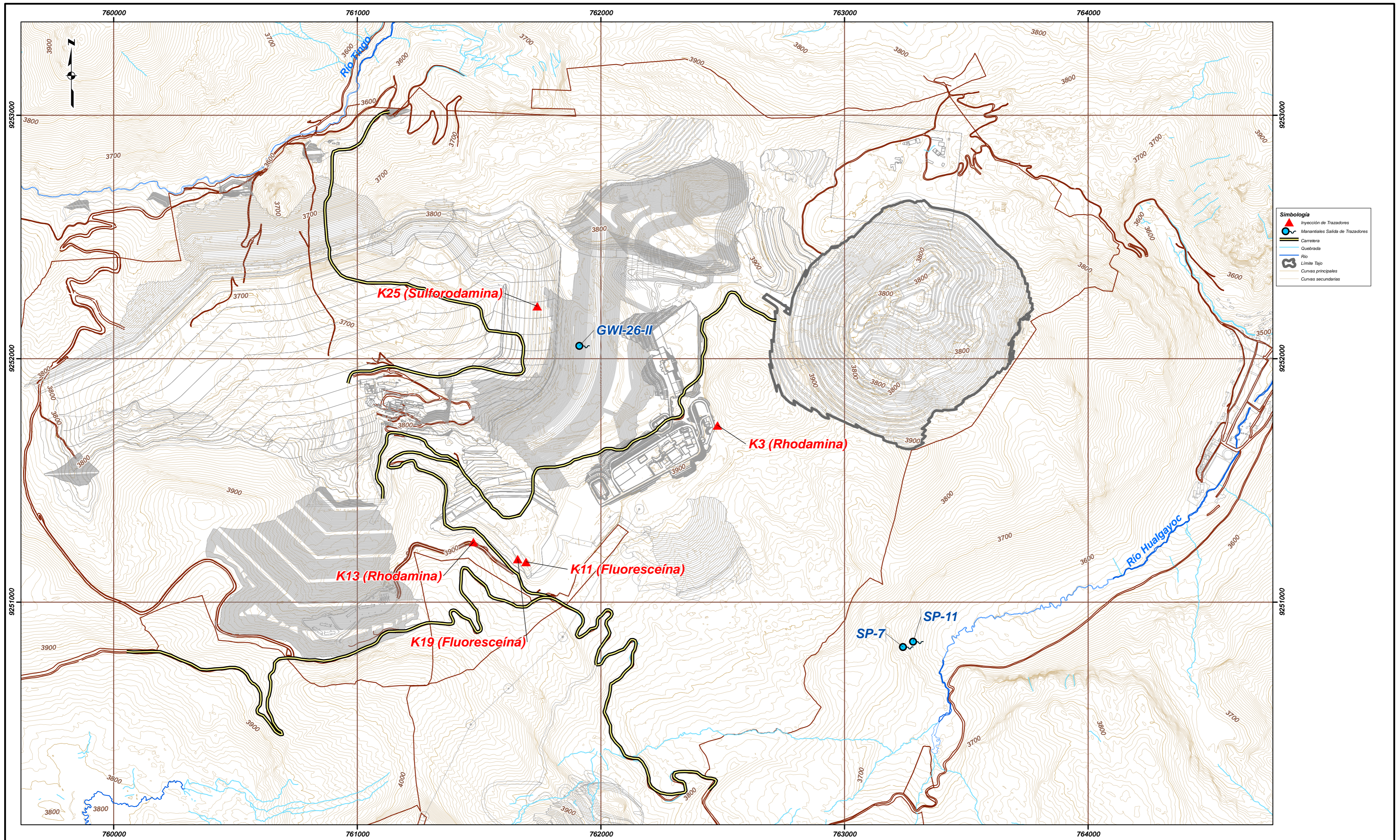
Simbología

- Pozos de bombeo
- Pozos de bombeo nuevos
- Instalaciones Mineras
- Curvas principales
- Curvas secundarias
- Límite de propiedad
- ▭ Límite tajó actual

DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA</p>		
<p>TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01 Acuífero Yumagal - Cajamarca</p>		
ELABORADO: Bachiller Jesús Mejía Rueda	FECHA: 2014	INVENTARIO DE POZOS DE BOMBEO
		MAPA 9

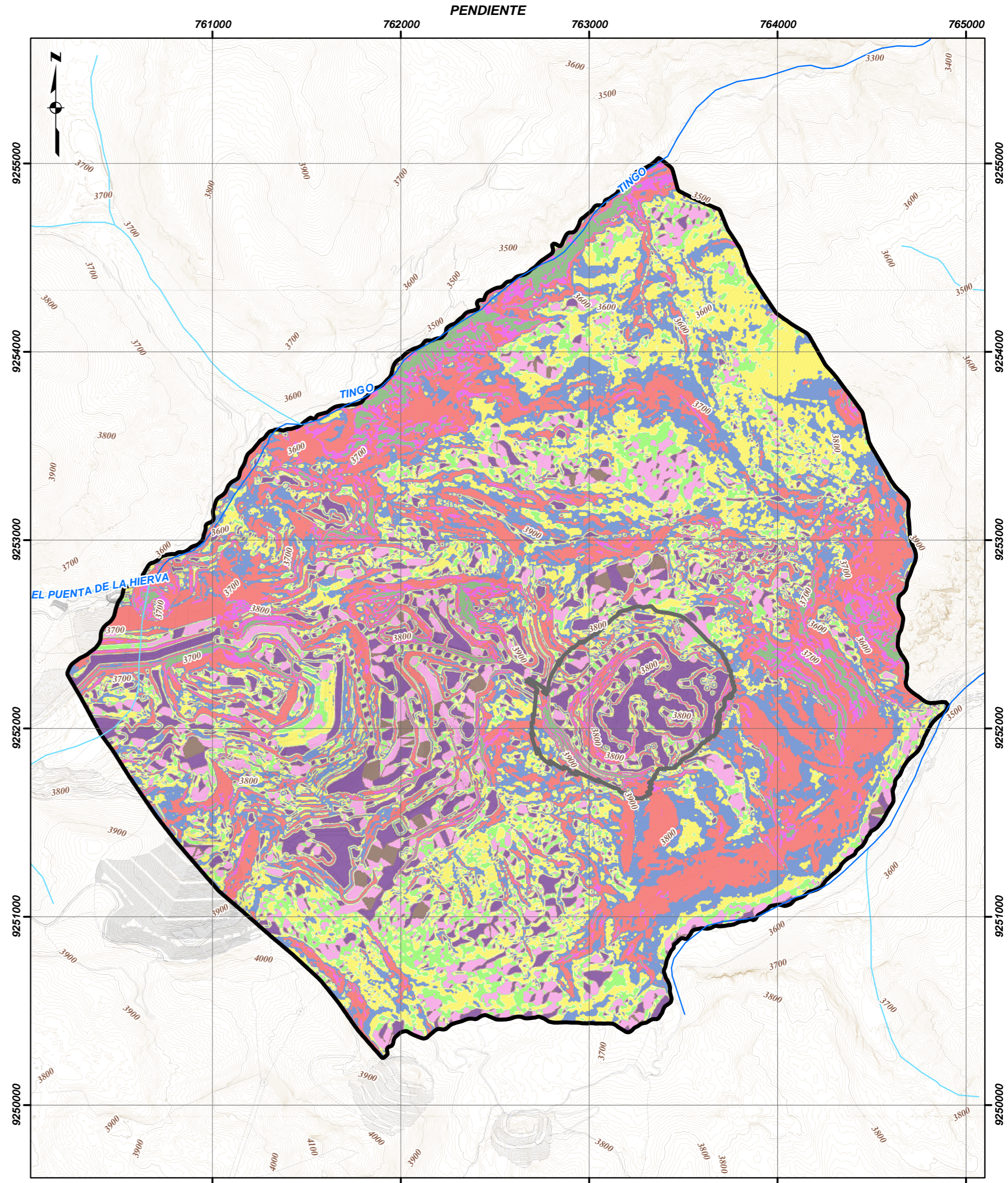
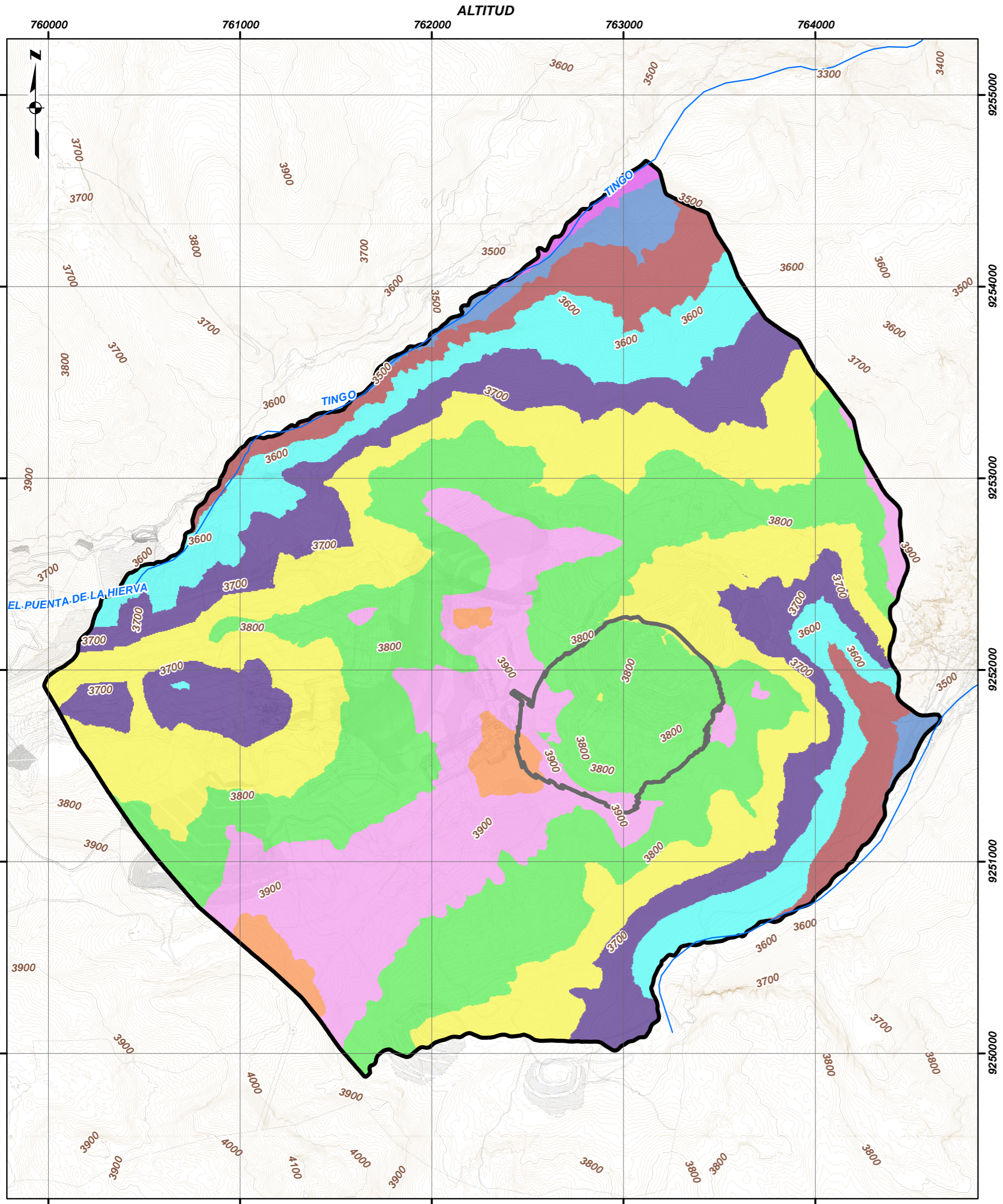




DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S

	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNIA			
	TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01 Acuífero Yumagal - Cajamarca			
ELABORADO:	Bachiller Jesús Mejía Rueda	FECHA:	2014	MAPA
			ENSAYO DE TRAZADORES	10



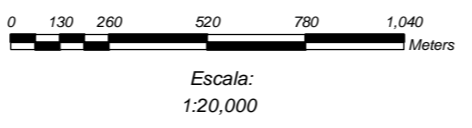


Altitud (msnm)

3300-3370
3370-3440
3440-3510
3510-3580
3580-3650
3650-3720
3720-3790
3790-3860
3860-3930
3930-4000

Simbología

	Quebrada		Zona de influencia hidrogeológica
	Río		Curvas principales
	Límite Tajo		Curvas secundarias

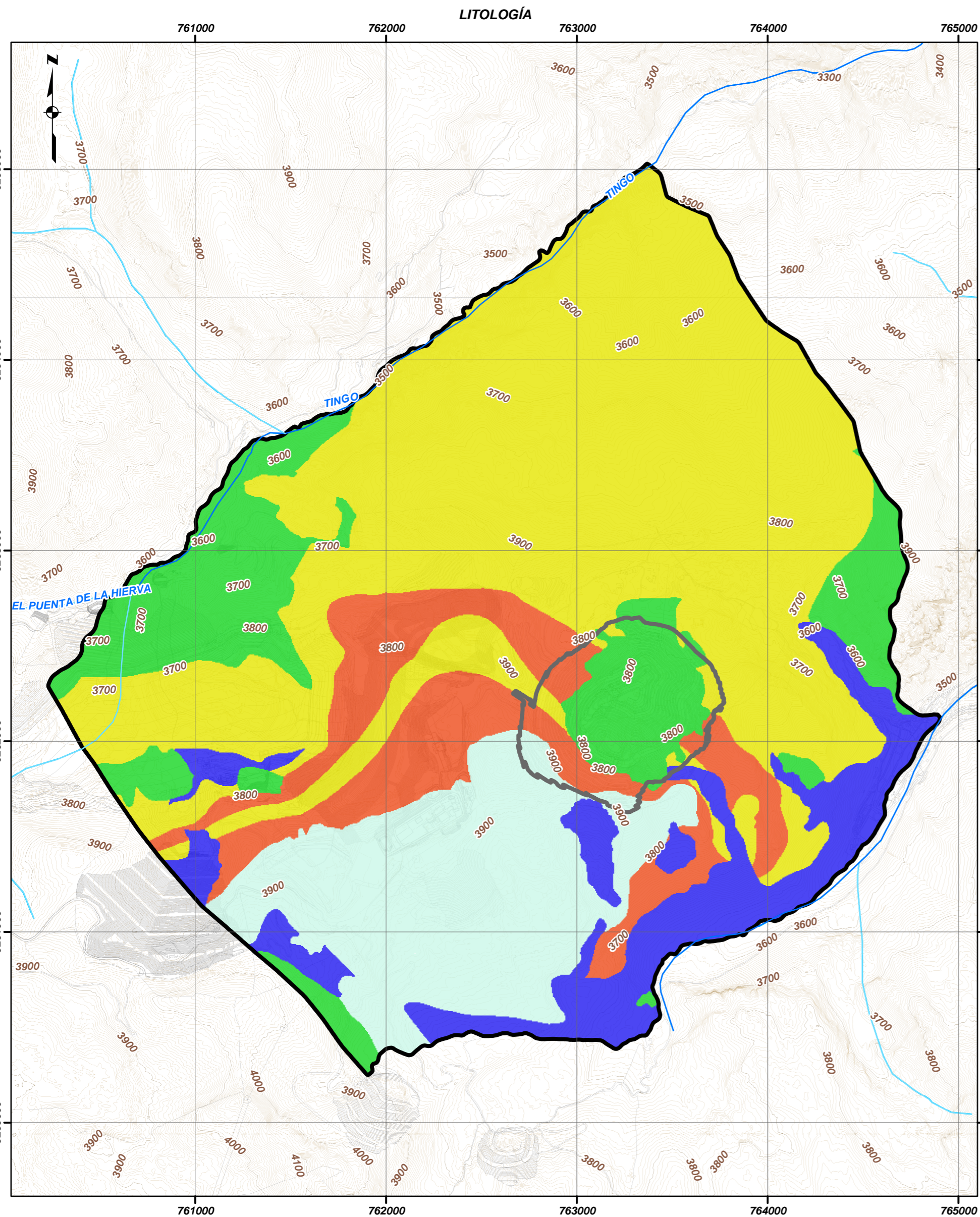


Pendiente (%)

≤ 3
(3-8]
(8-16]
(16-21]
(21-31]
(31-46]
(46-76]
(76-100]
> 100

DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA</p>			
<p>TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01 Acuífero Yumagual - Cajamarca</p>			
ELABORADO: Bachiller Jesús Mejía Rueda	FECHA: 2014	MÉTODO APLIS - FACTORES DE ALTITUD Y PENDIENTE	MAPA 11

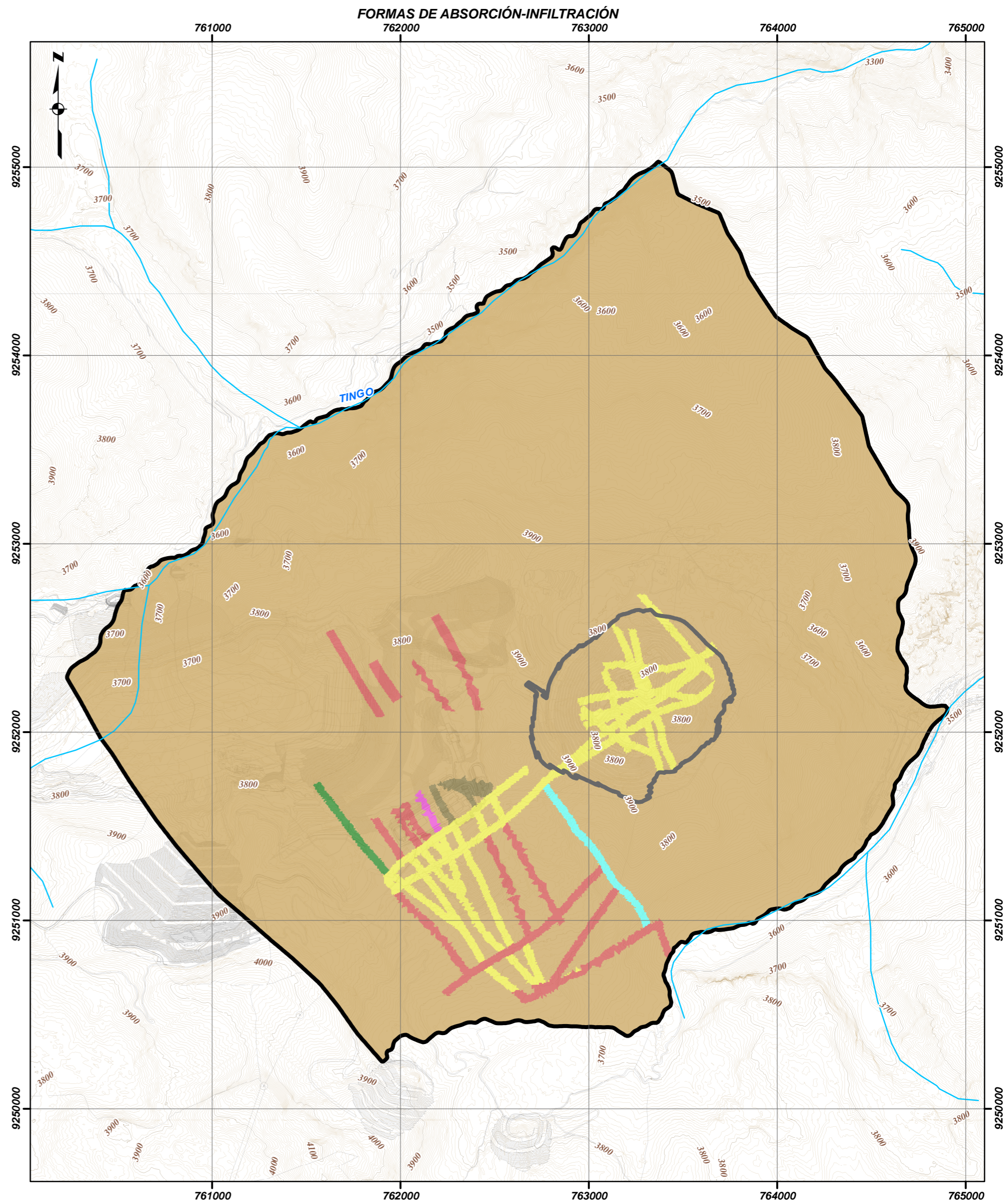


LITOLOGÍA

Yellow	1
Green	2
Blue	4
Red	7
Light Blue	8

Simbología

Blue line	Quebrada	Thick black line	Zona de influencia hidrogeológica
Blue line	Río	Black line	Curvas principales
Grey line	Límite Tajo	Black line	Curvas secundarias



FORMAS DE ABSORCIÓN/INFILTRACIÓN

Brown	1
Yellow	2
Red	4
Pink	5
Green	6
Purple	7
Olive	8

DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S



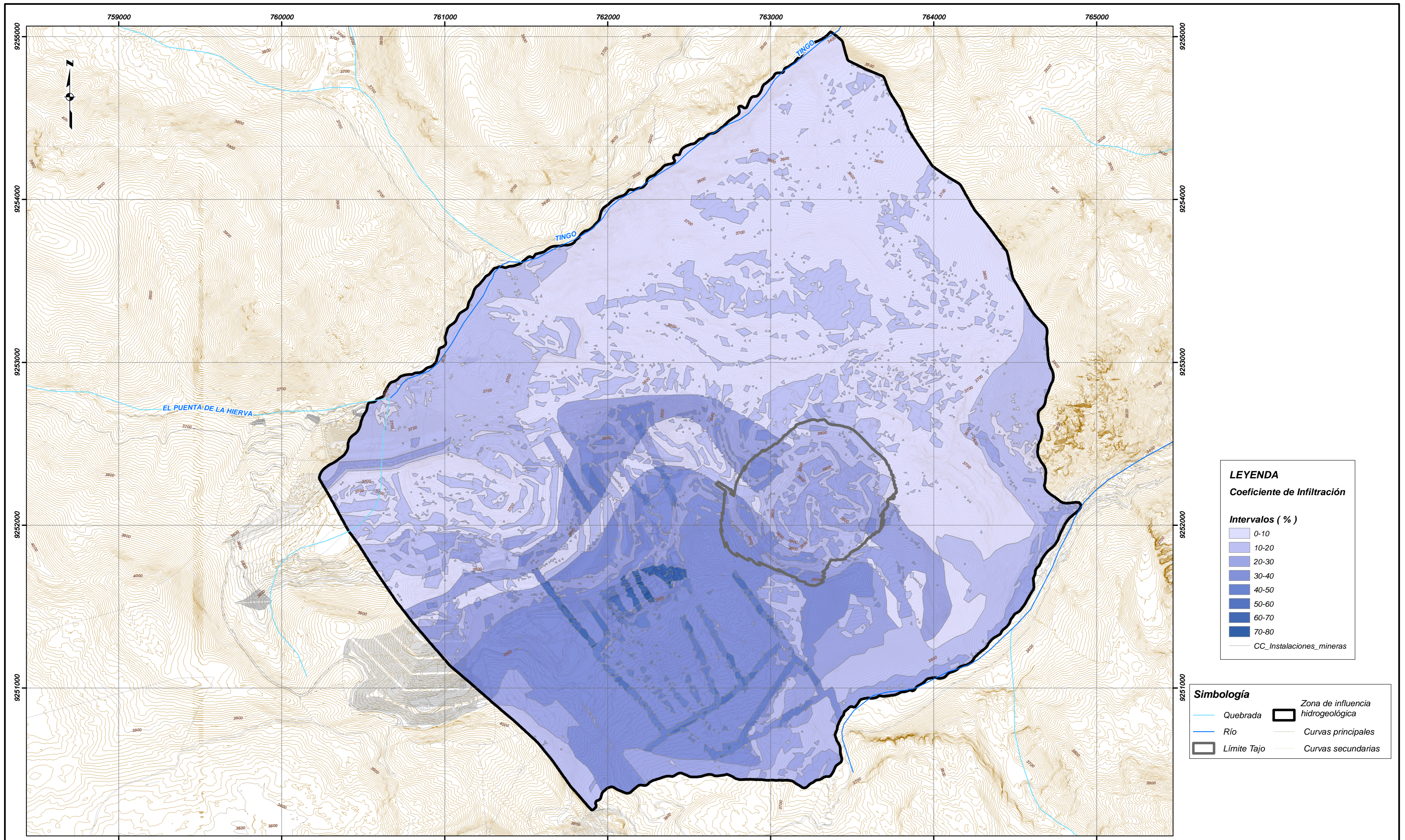
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA



TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01
 Acuífero Yumagual - Cajamarca

ELABORADO: Bachiller Jesús Mejía Rueda	FECHA: 2014	MÉTODO APLS - FACTORES DE LITOLOGÍA Y FORMAS DE INFILTRACION
---	----------------	--

MAPA
12



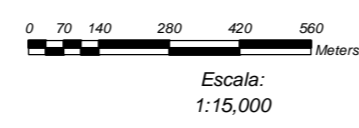
LEYENDA
Coeficiente de Infiltración

Intervalos (%)

0-10
10-20
20-30
30-40
40-50
50-60
60-70
70-80
CC_Instalaciones_mineras

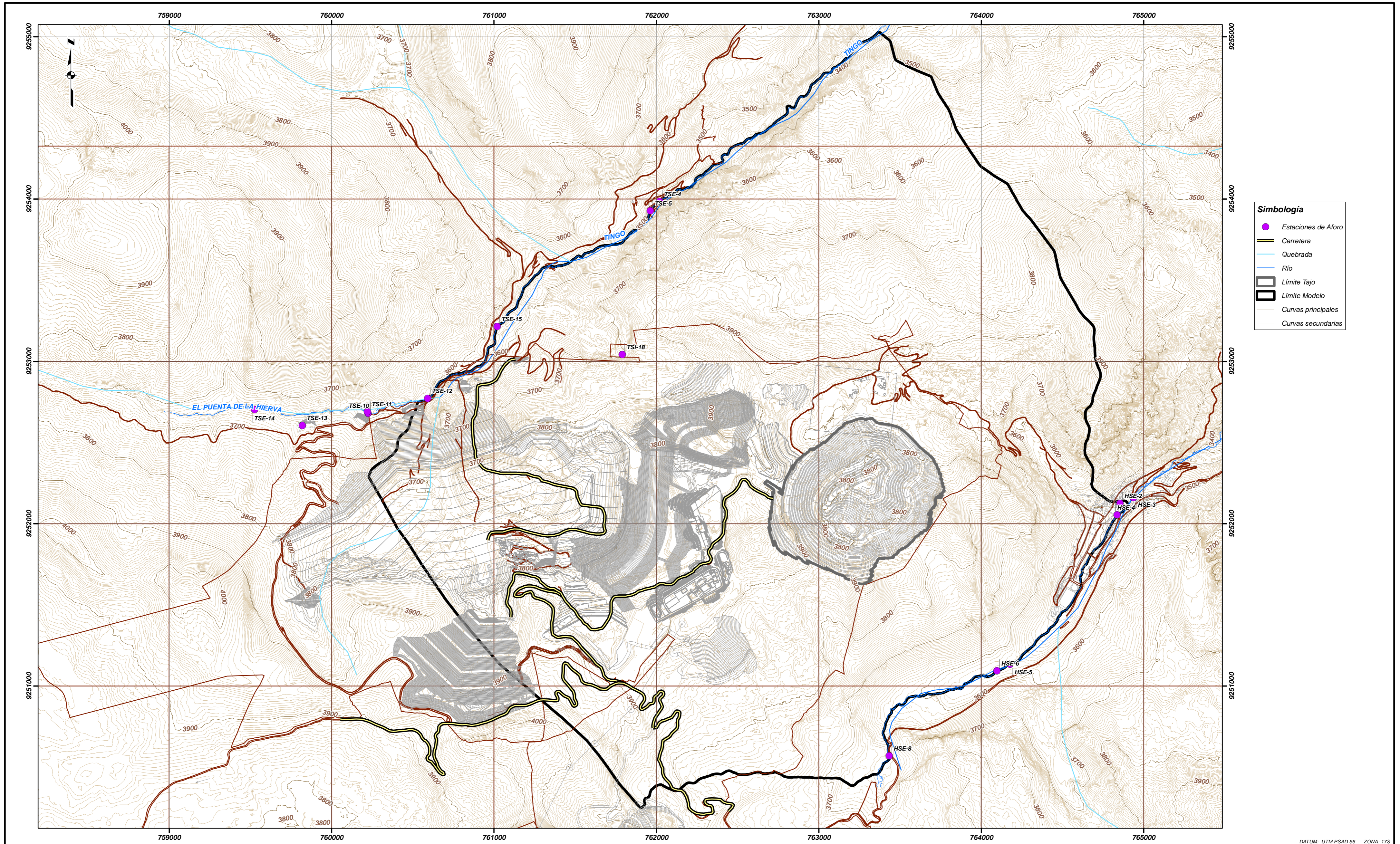
Simbología

	Quebrada		Zona de influencia hidrogeológica
	Río		Curvas principales
	Límite Tajo		Curvas secundarias



DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S

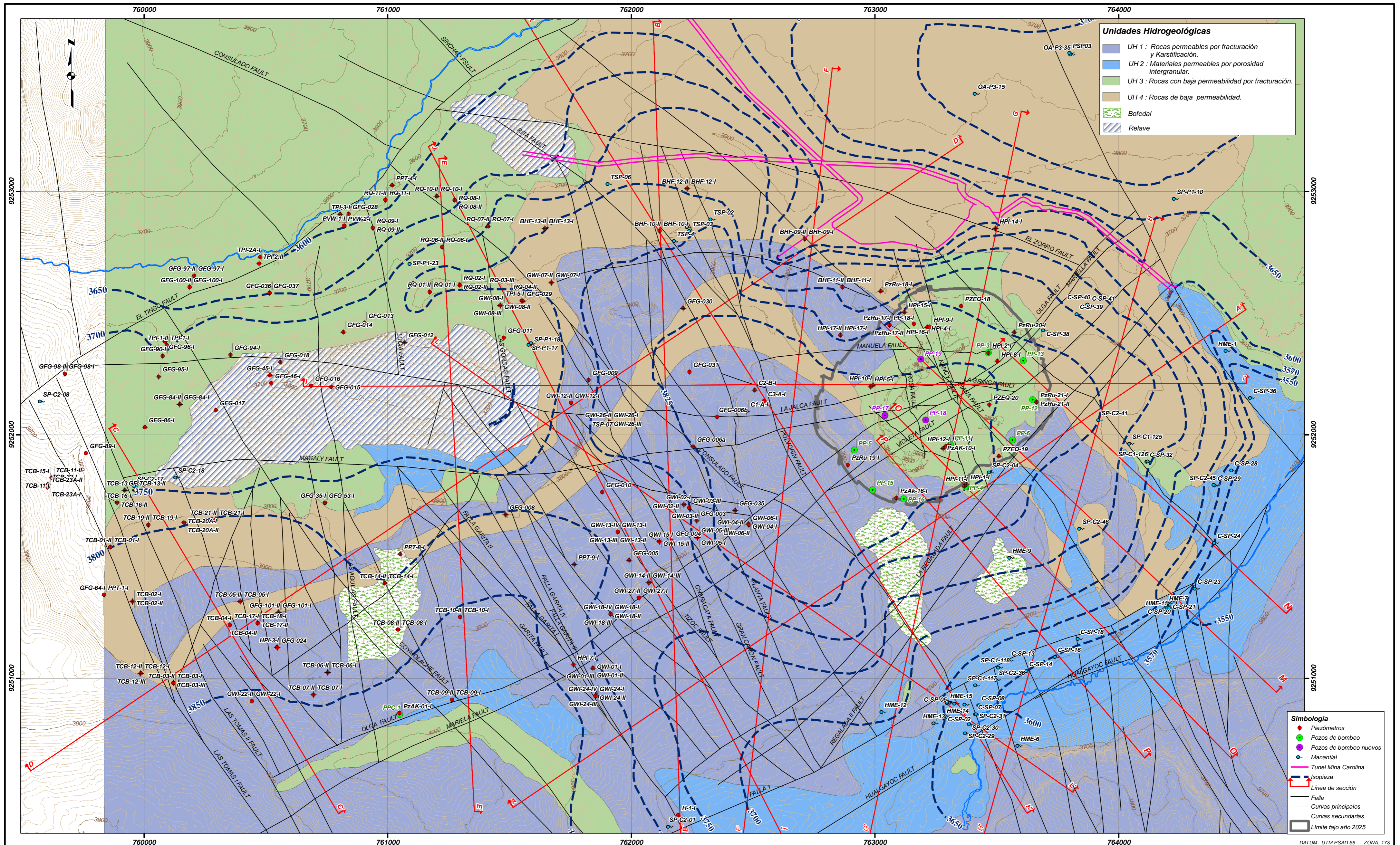
	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA		
	TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01 Acuífero Yumagual - Cajamarca		
ELABORADO:	Bachiller Jesús Mejía Rueda	FECHA:	2014
MÉTODO APLIS - COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN			MAPA 13



DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S

	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA	
TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01 Acuífero Yumagual - Cajamarca		
ELABORADO: Bachiller Jesús Mejía Rueda	FECHA: 2014	UBICACIÓN DE ESTACIONES DE AFORO
		MAPA 14





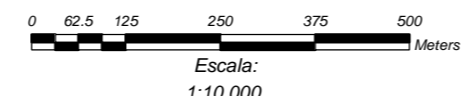
Unidades Hidrogeológicas


- UH 1 : Rocas permeables por fracturación y Karstificación.
- UH 2 : Materiales permeables por porosidad intergranular.
- UH 3 : Rocas con baja permeabilidad por fracturación.
- UH 4 : Rocas de baja permeabilidad.
- Bofedal
- Relave

Simbología

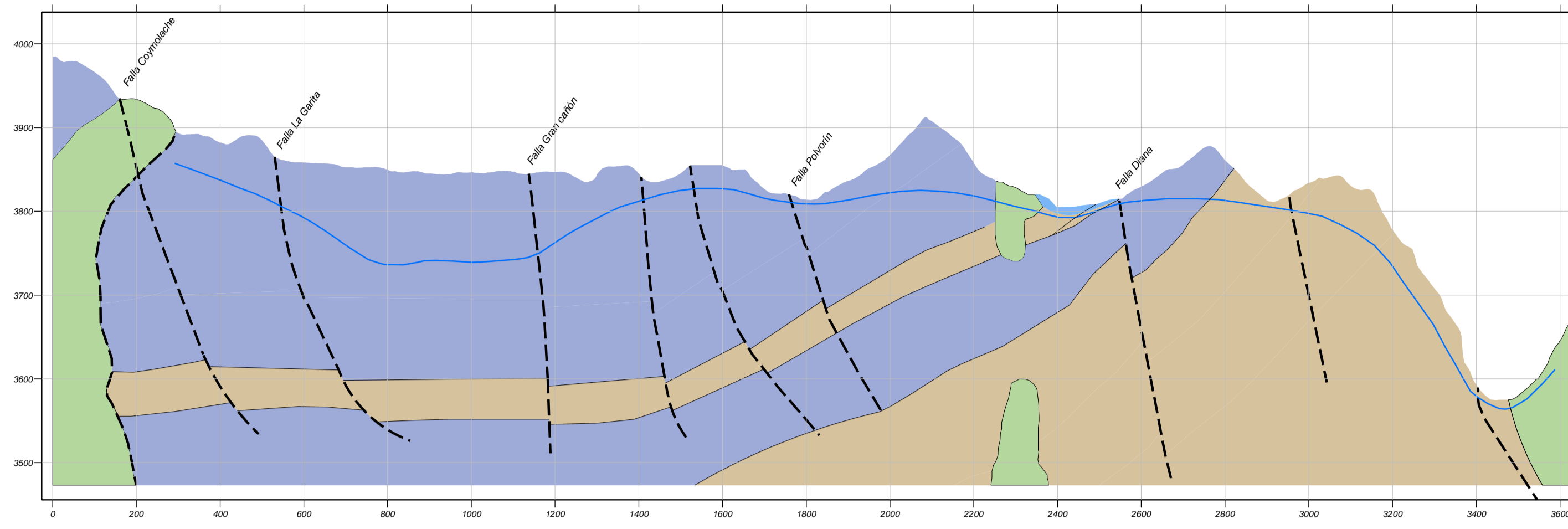
- Piezómetros
- Pozos de bombeo
- Pozos de bombeo nuevos
- Manantial
- Túnel Mina Carolina
- Isoplezia
- Línea de sección
- Falla
- Curvas principales
- Curvas secundarias
- Límite tajo año 2025

DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S

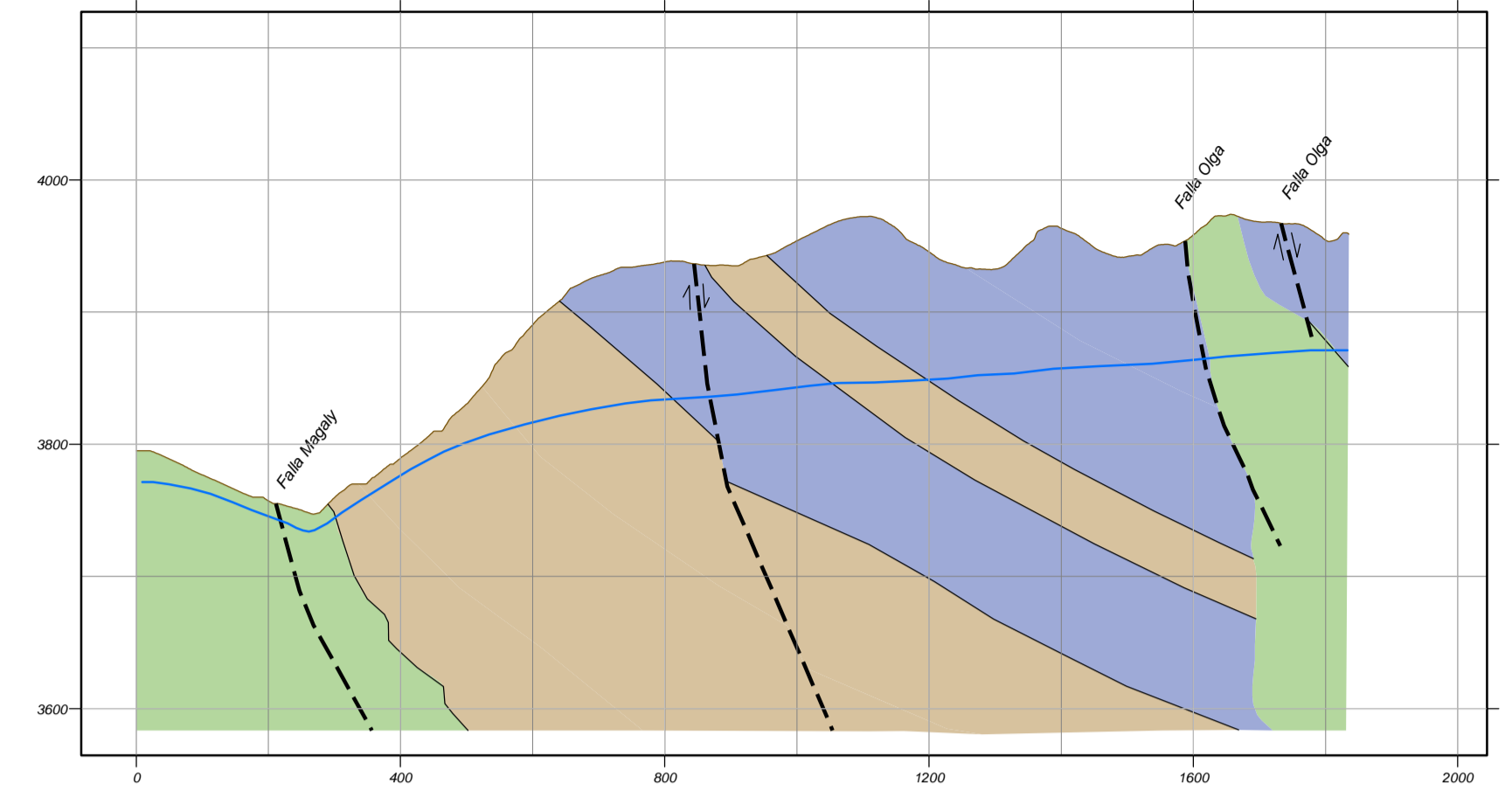


 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA</p>	<p>TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01 Acuífero Yumagal - Cajamarca</p>			
ELABORADO:	Bachiller Jesús Mejía Rueda	FECHA:	2014	UNIDADES HIDROGEOLOGICAS
				MAPA
				15

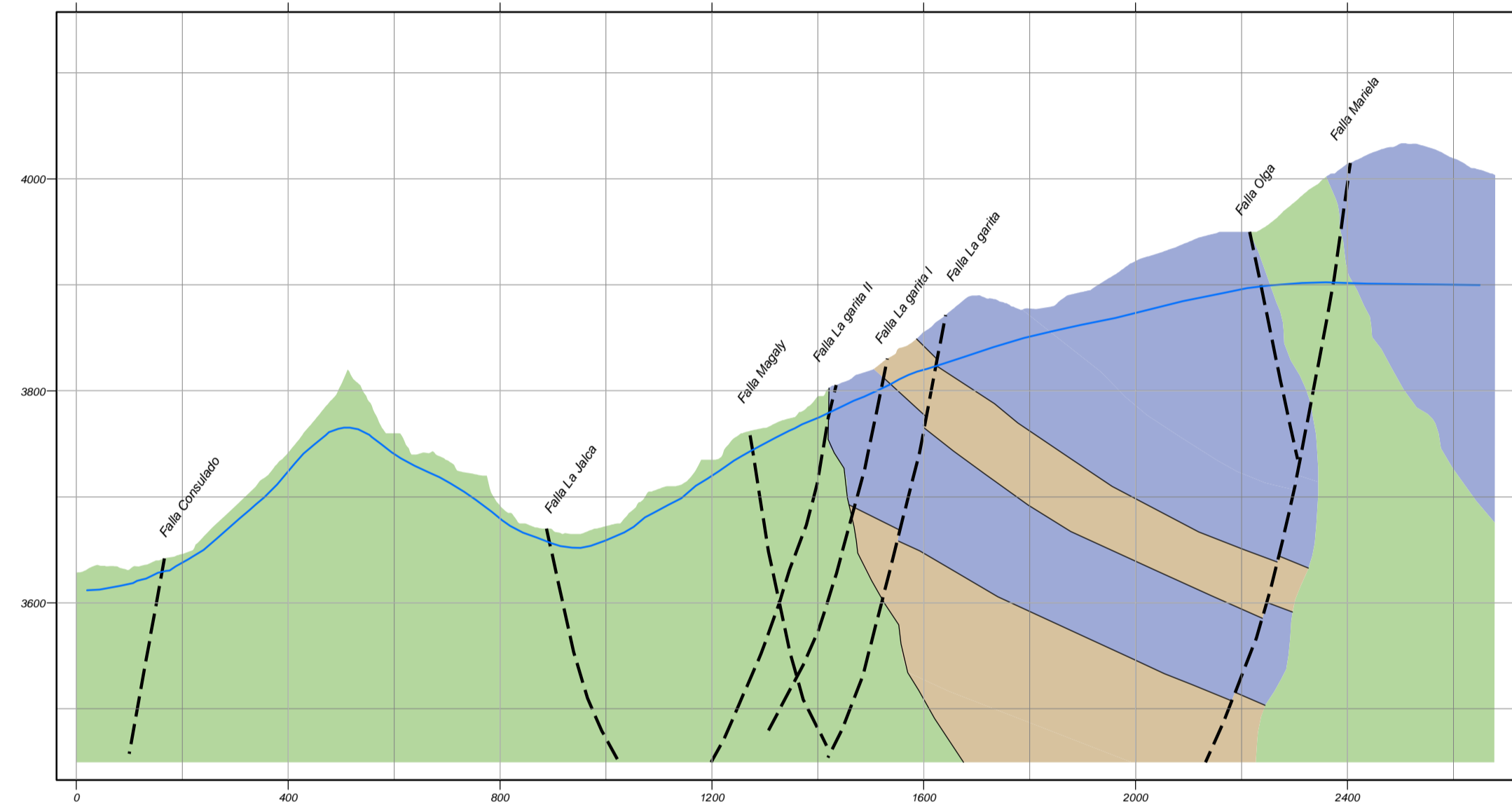
SECCIÓN A-A'



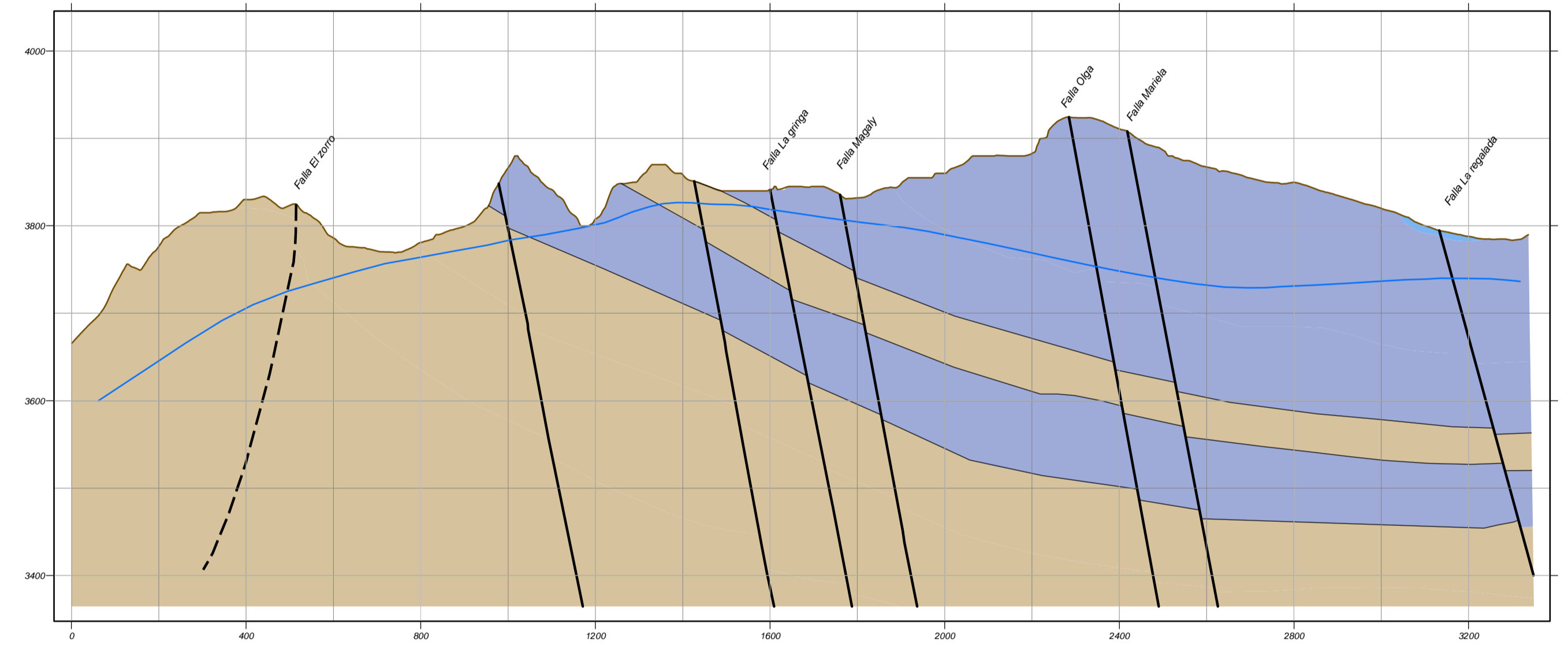
SECCIÓN C-C'



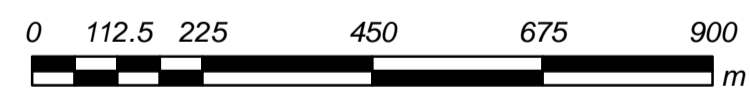
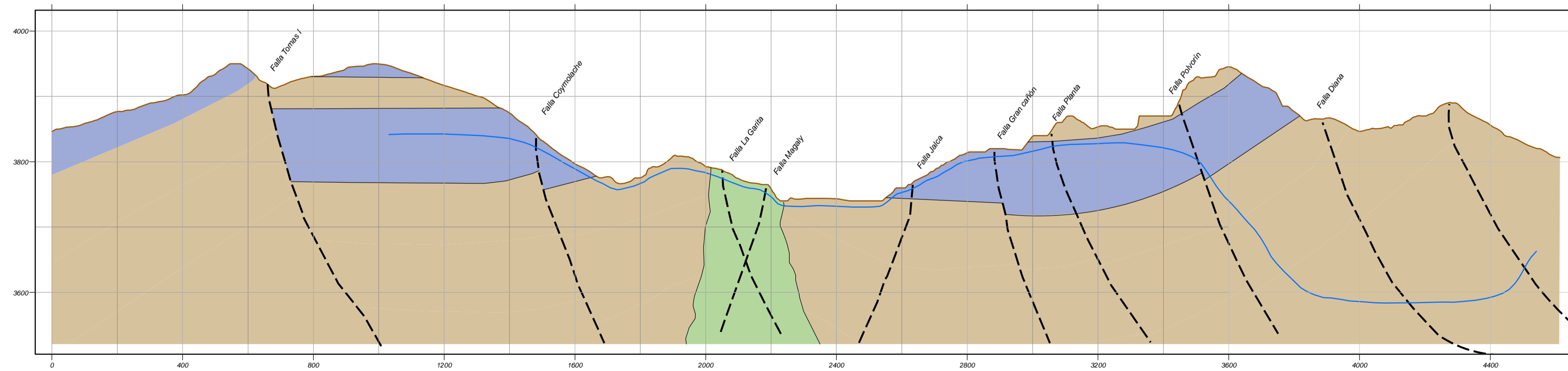
SECCIÓN E-E'



SECCIÓN B-B'



SECCIÓN D-D'



H:2V
Escala
1:10,000

Unidades Hidrogeológicas	
	UH 1 : Rocas permeables por fracturación y Karstificación.
	UH 2 : Materiales permeables por porosidad intergranular.
	UH 3 : Rocas con baja permeabilidad por fracturación.
	UH 4 : Rocas de baja permeabilidad.
	Bofedal
	Relieve

DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA



TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desagüe del Tajo 01 Acuífero del Desagüe del Tajo 01 Acuífero Yumagual - Cajamarca

ELABORADO:
Bachiller Jesús Mejía Rueda

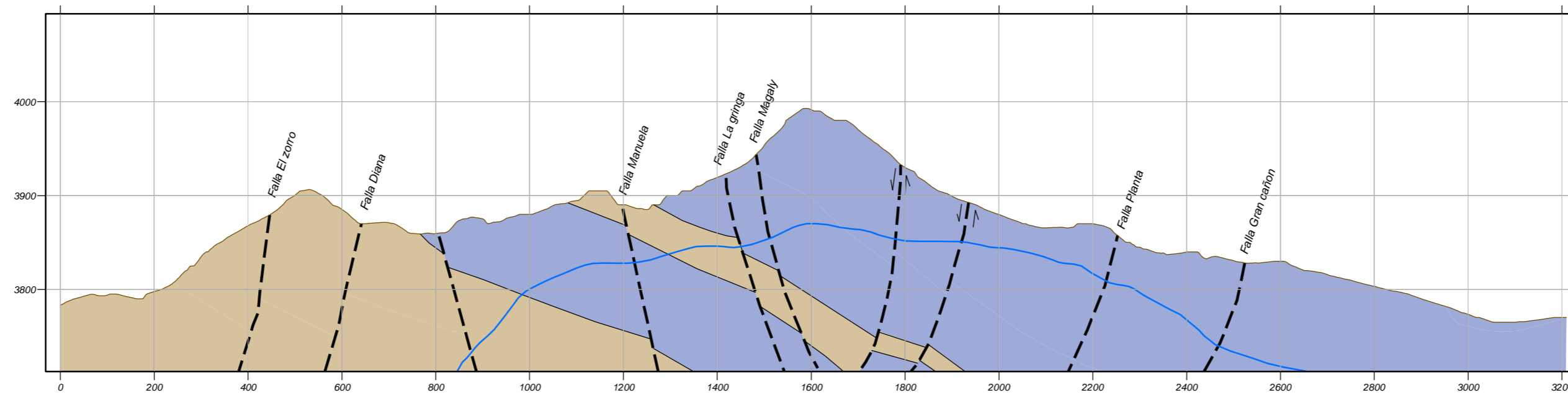
FECHA:
2014

SECCIONES GEOLÓGICAS A - E

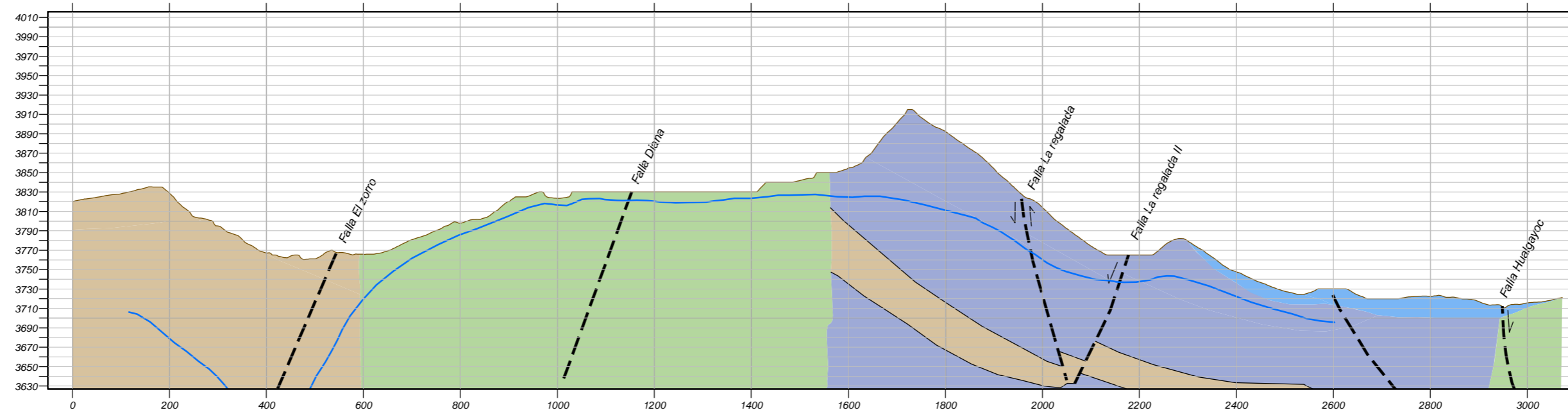
MAPA

16

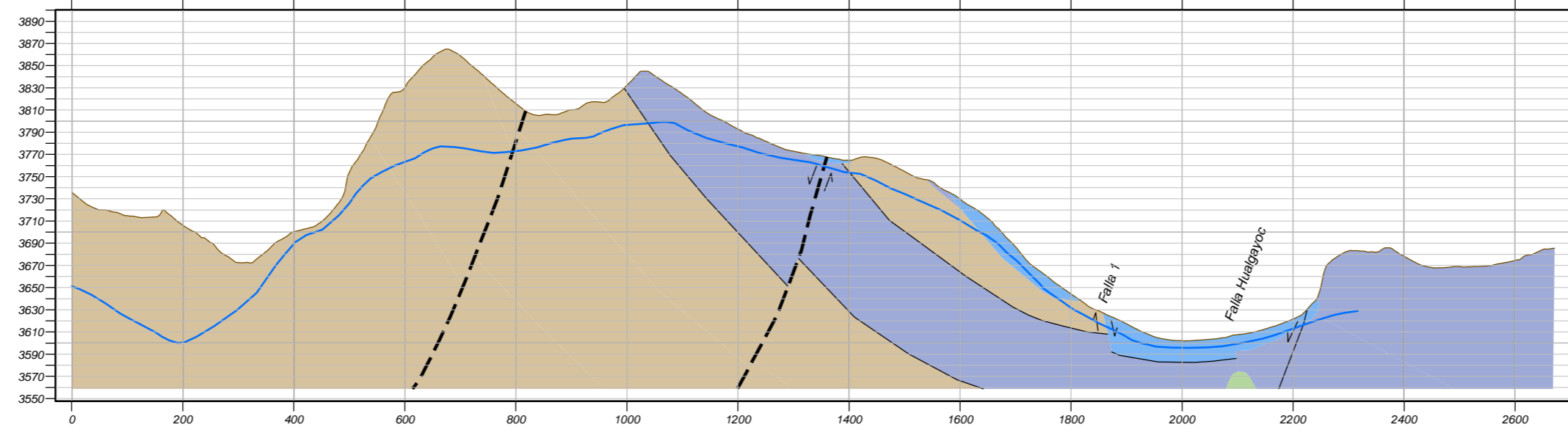
SECCIÓN F-F'



SECCIÓN G-G'

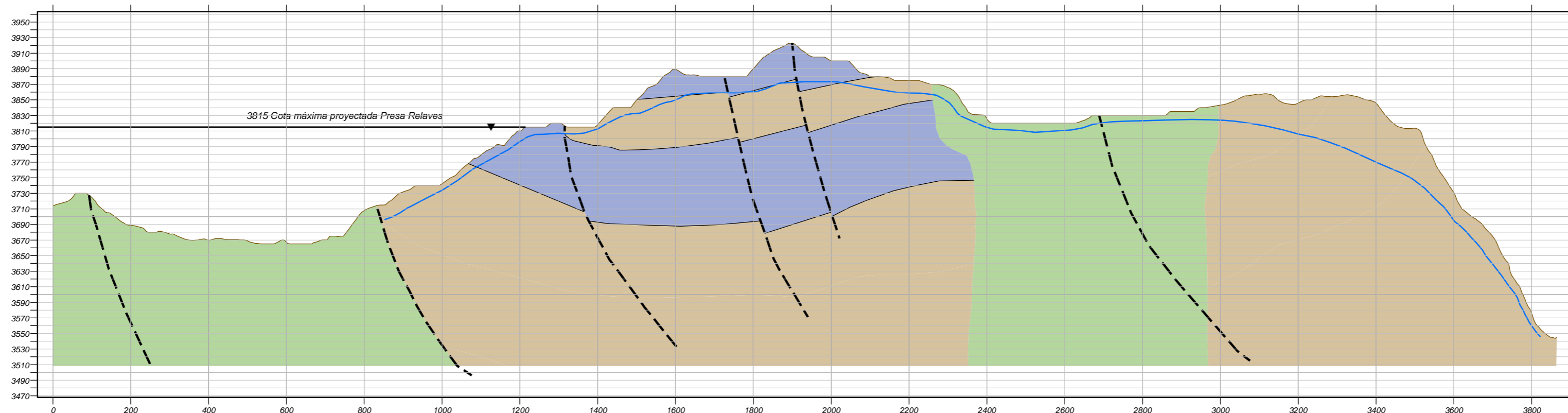


SECCIÓN H-H'

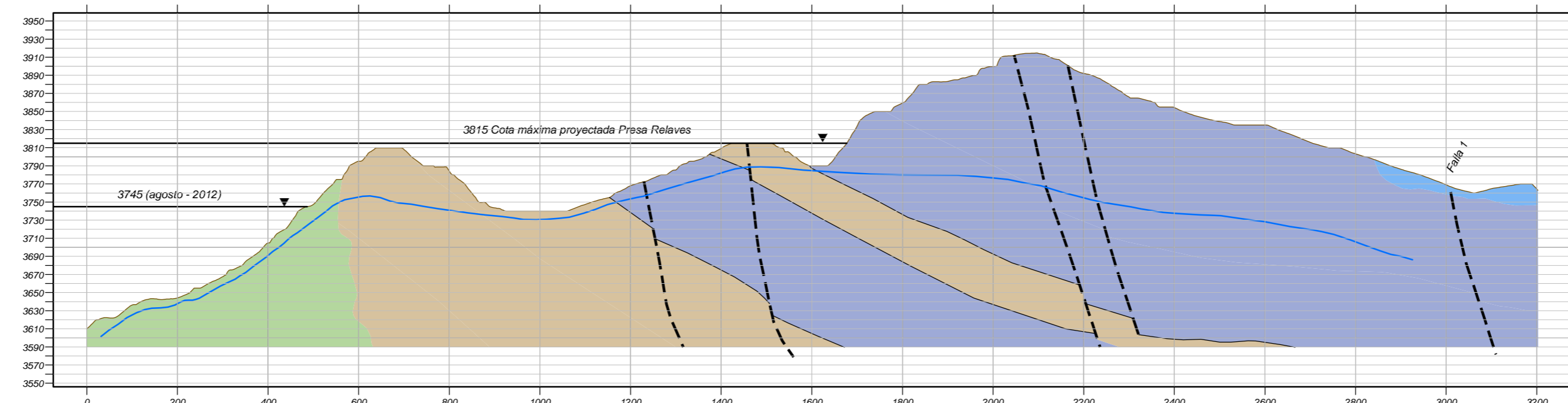


Unidades Hidrogeológicas	
	UH 1 : Rocas permeables por fracturación y Karstificación.
	UH 2 : Materiales permeables por porosidad intergranular.
	UH 3 : Rocas con baja permeabilidad por fracturación.
	UH 4 : Rocas de baja permeabilidad.
	Bofedal
	Relave

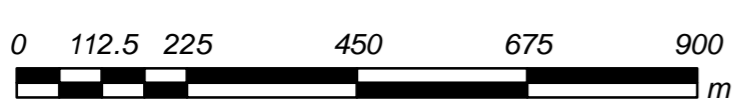
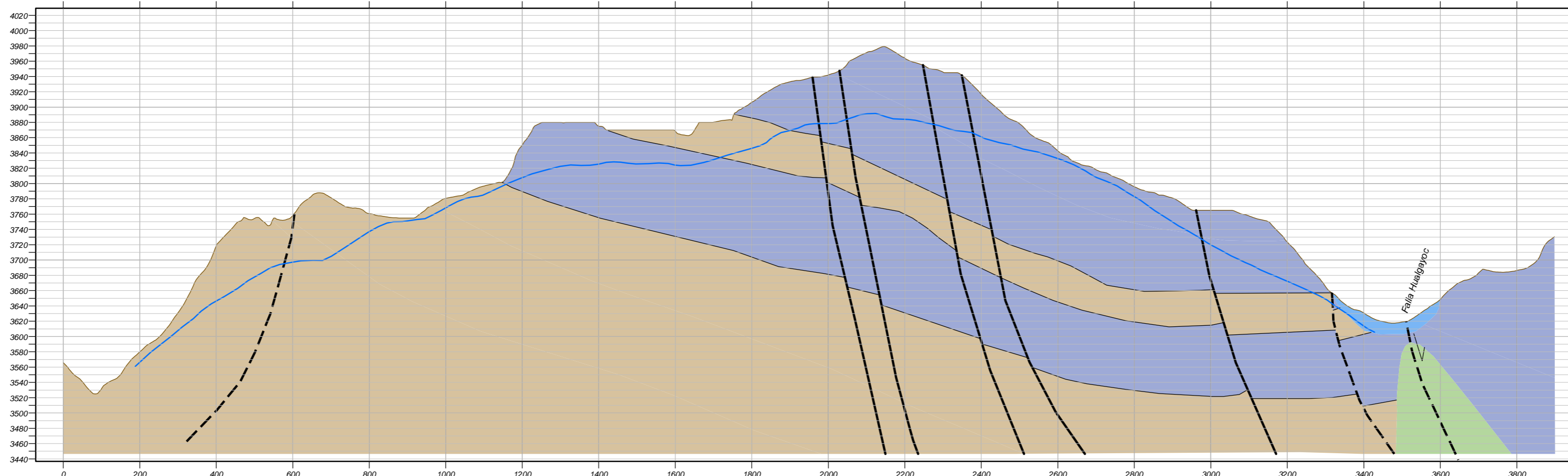
SECCIÓN I-I'



SECCIÓN J-J'



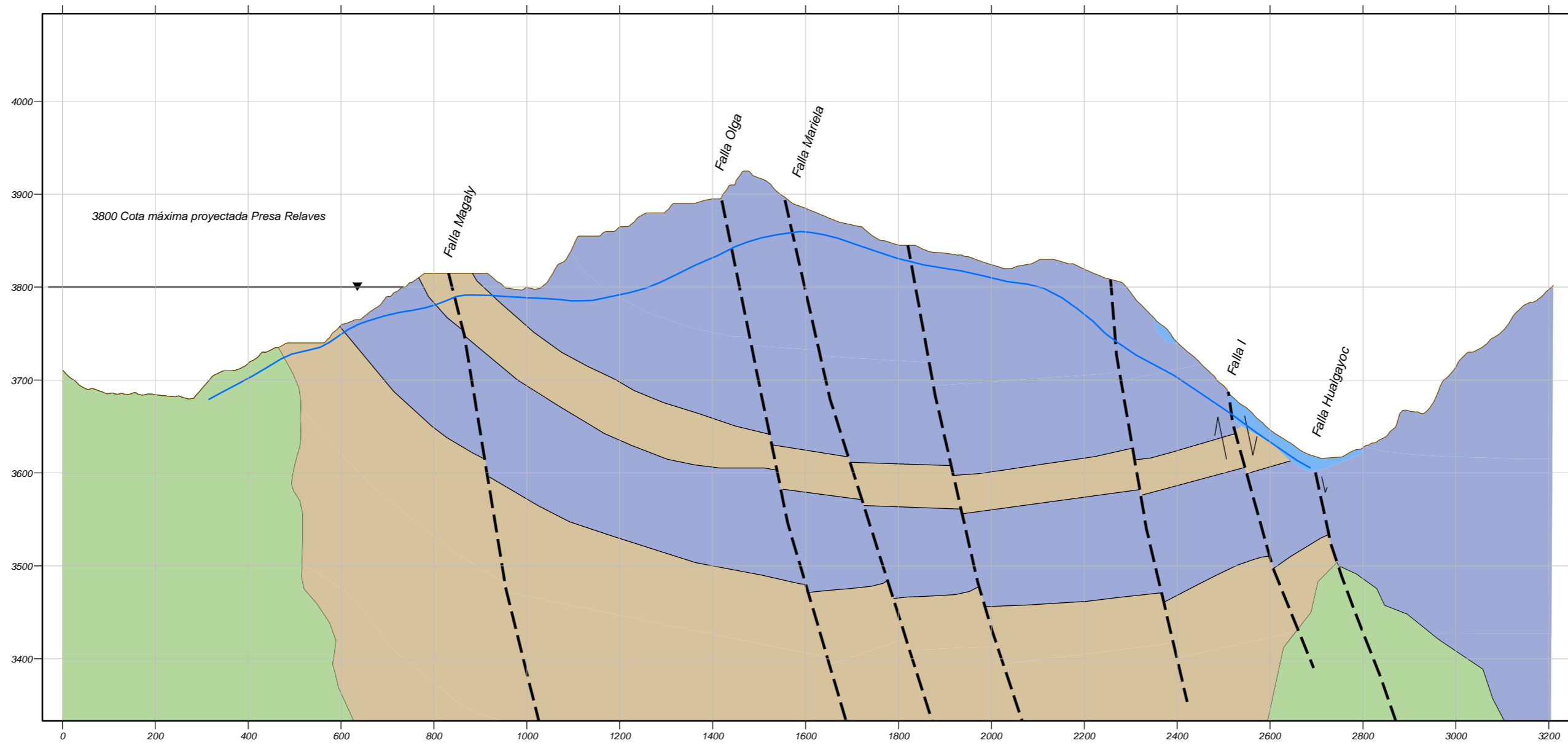
SECCIÓN K-K'



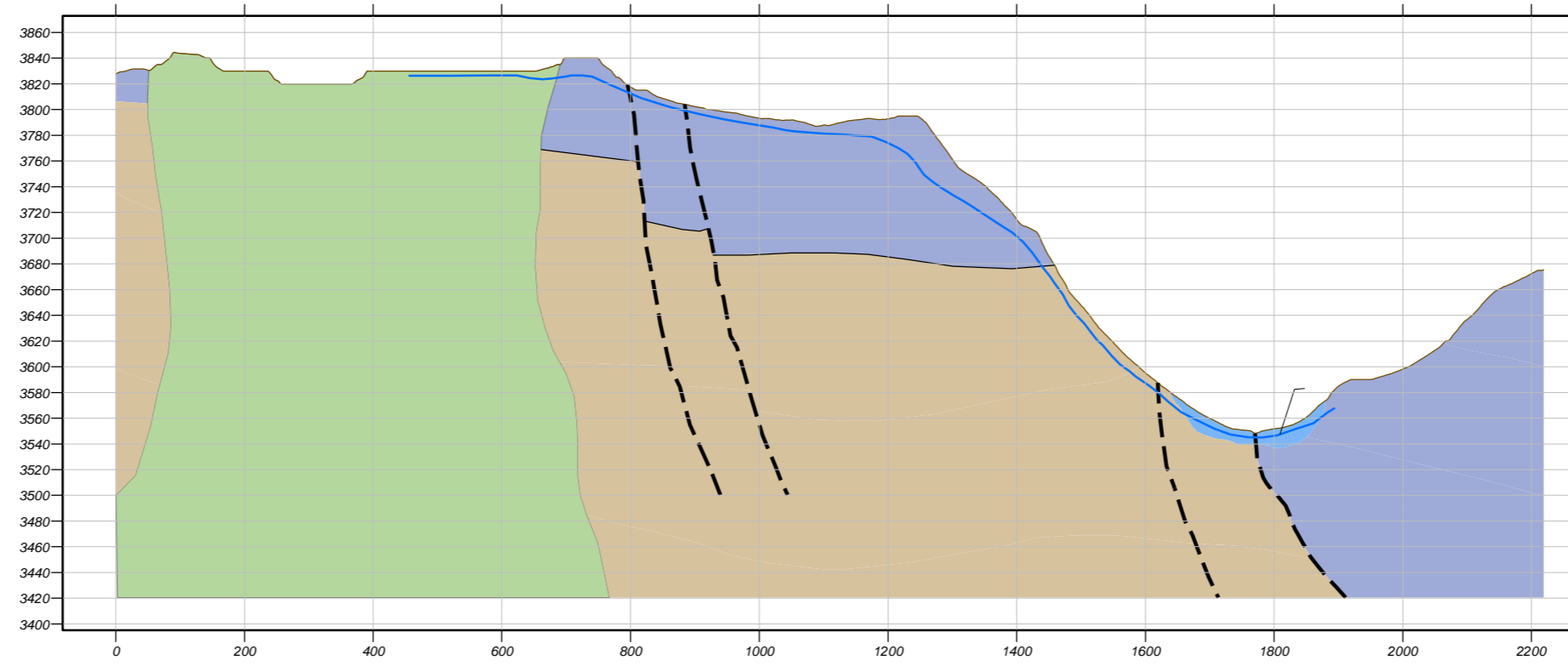
H:2V
Escala
1:10,000

DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S

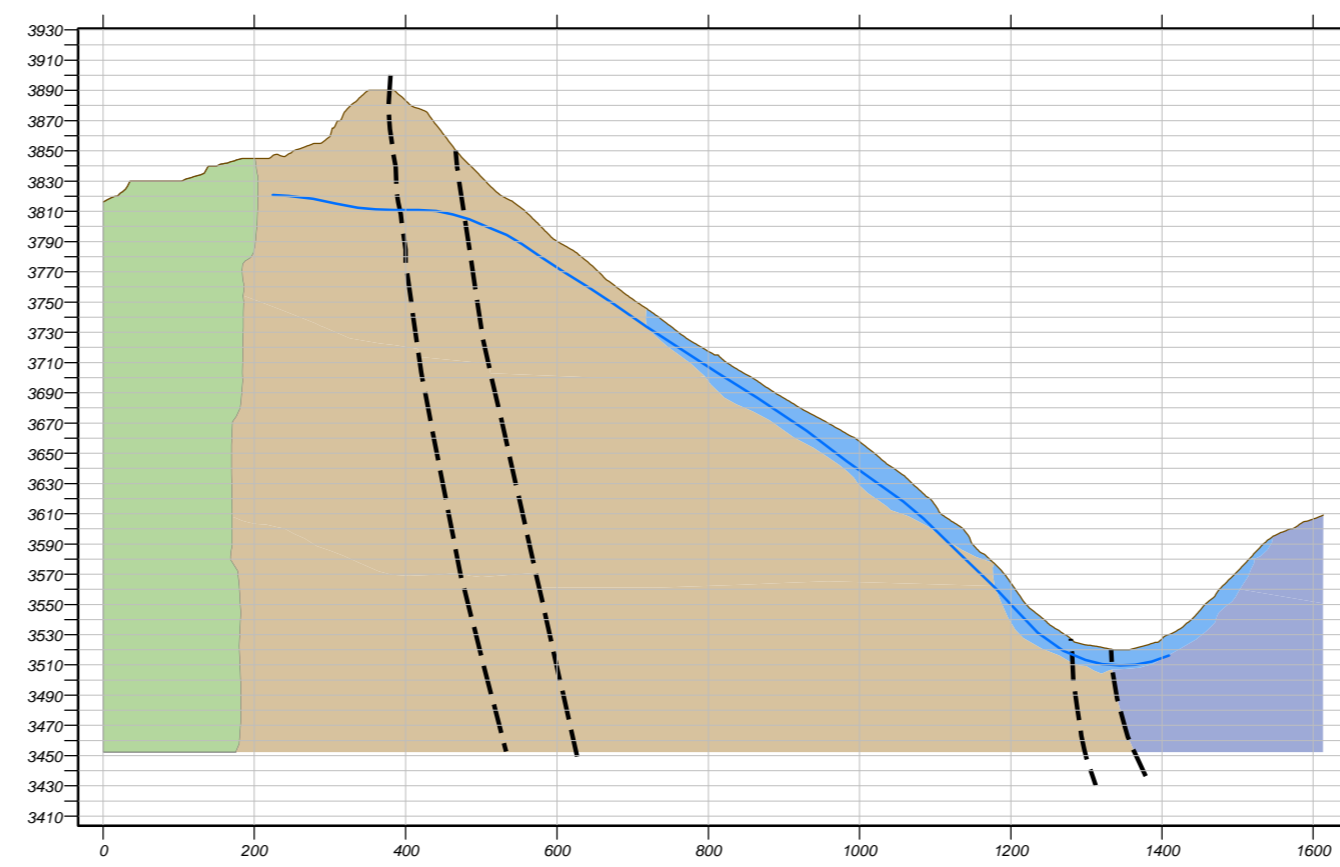
SECCIÓN L - L'



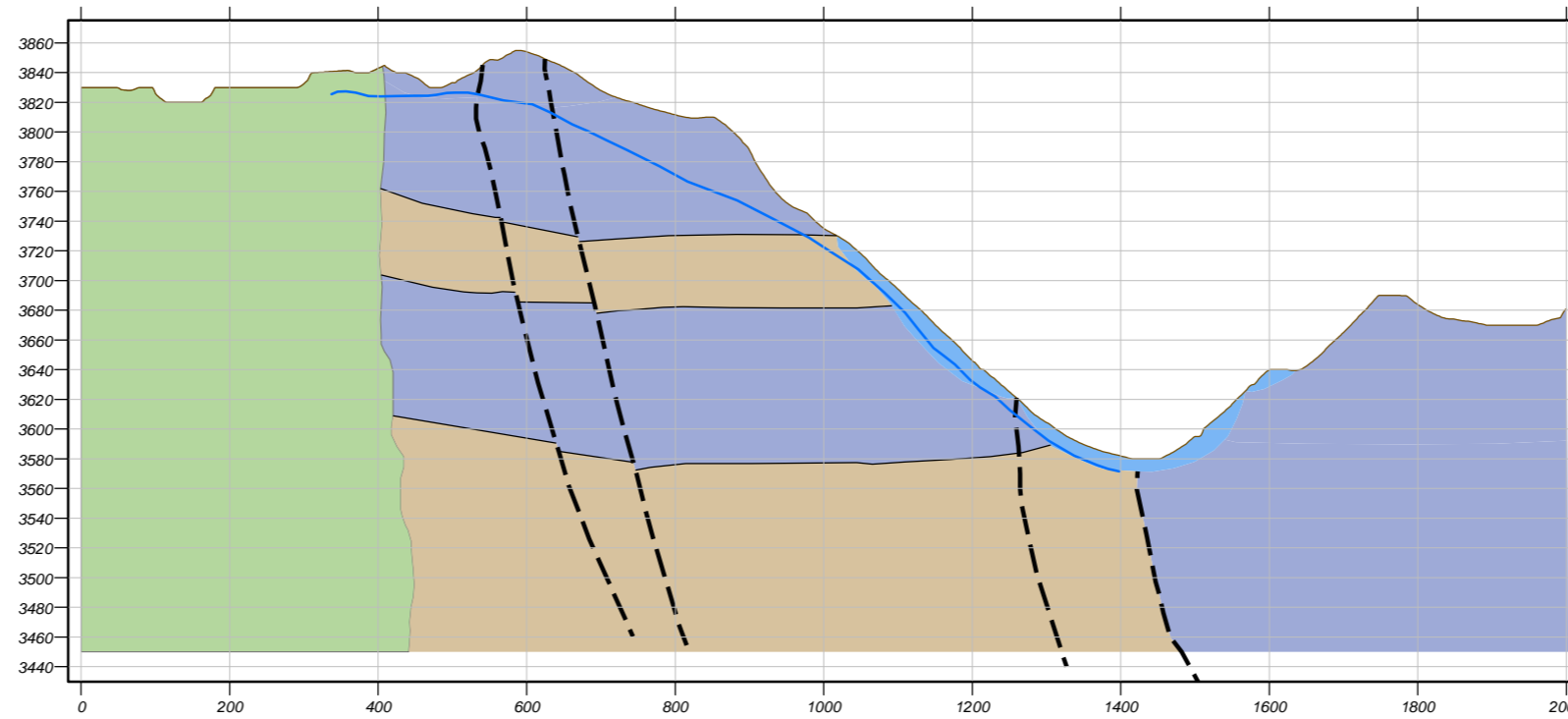
SECCIÓN M - M'



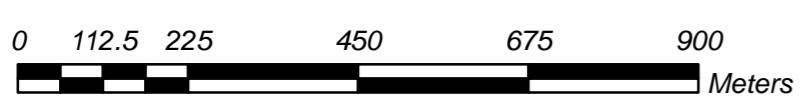
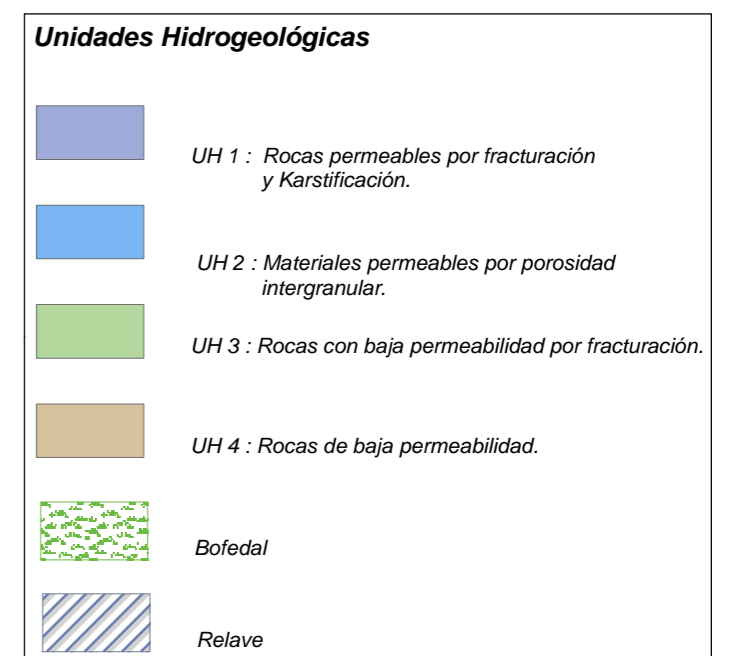
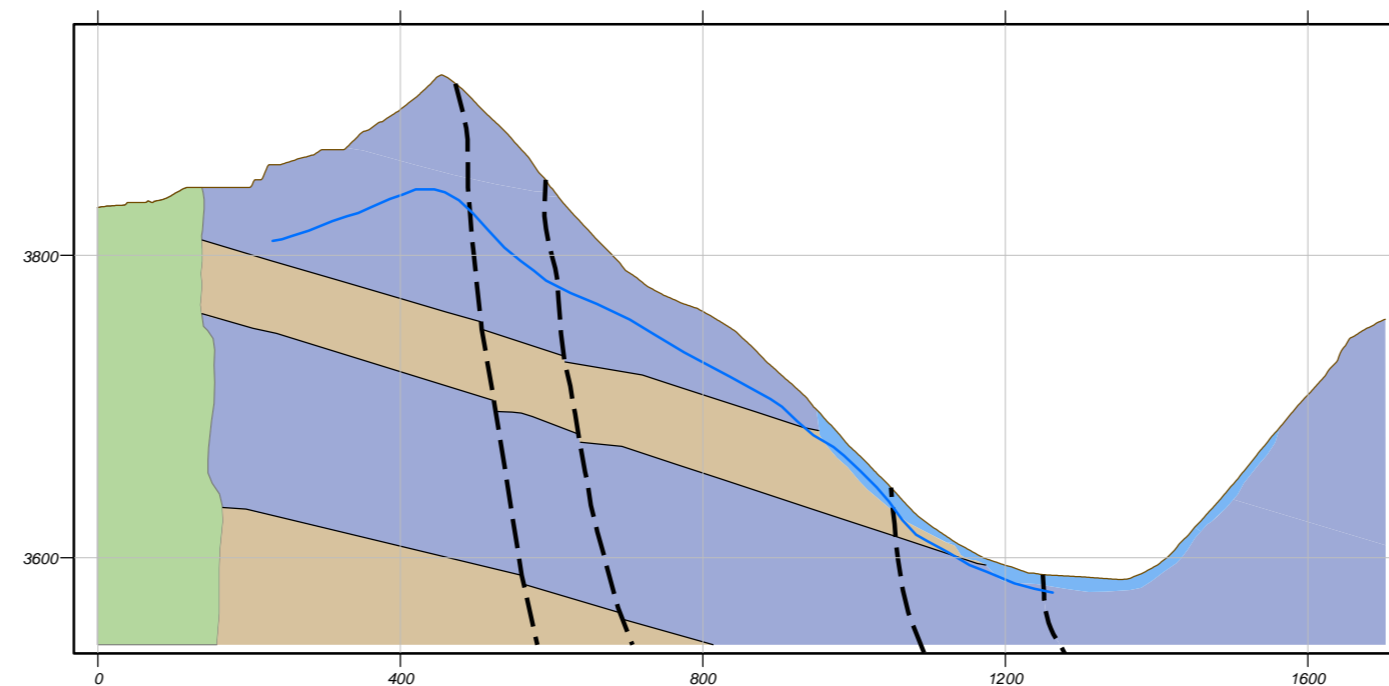
SECCIÓN N - N'



SECCIÓN O - O'

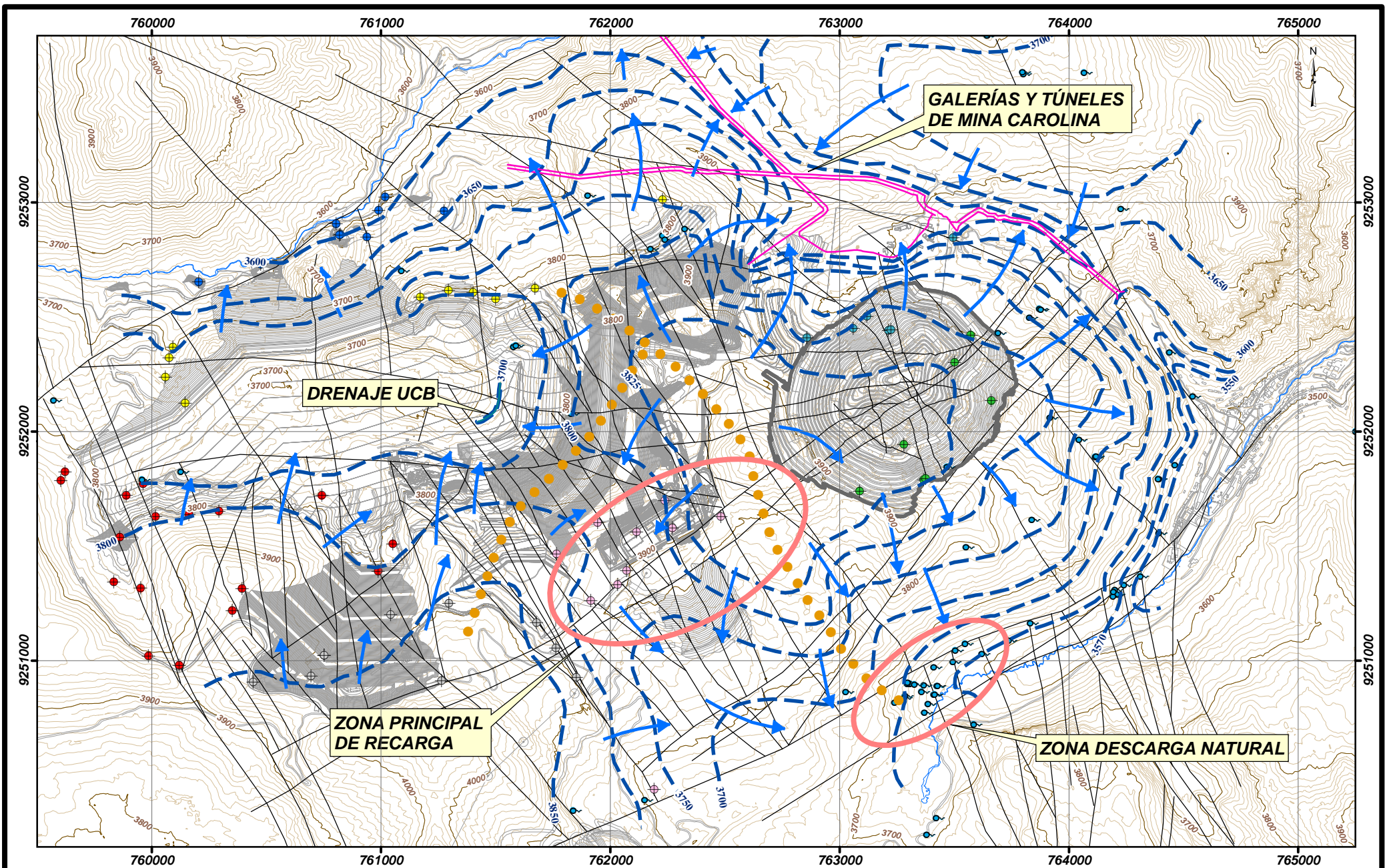


SECCIÓN P - P'



H=2V
Escala
1:10,000

DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S



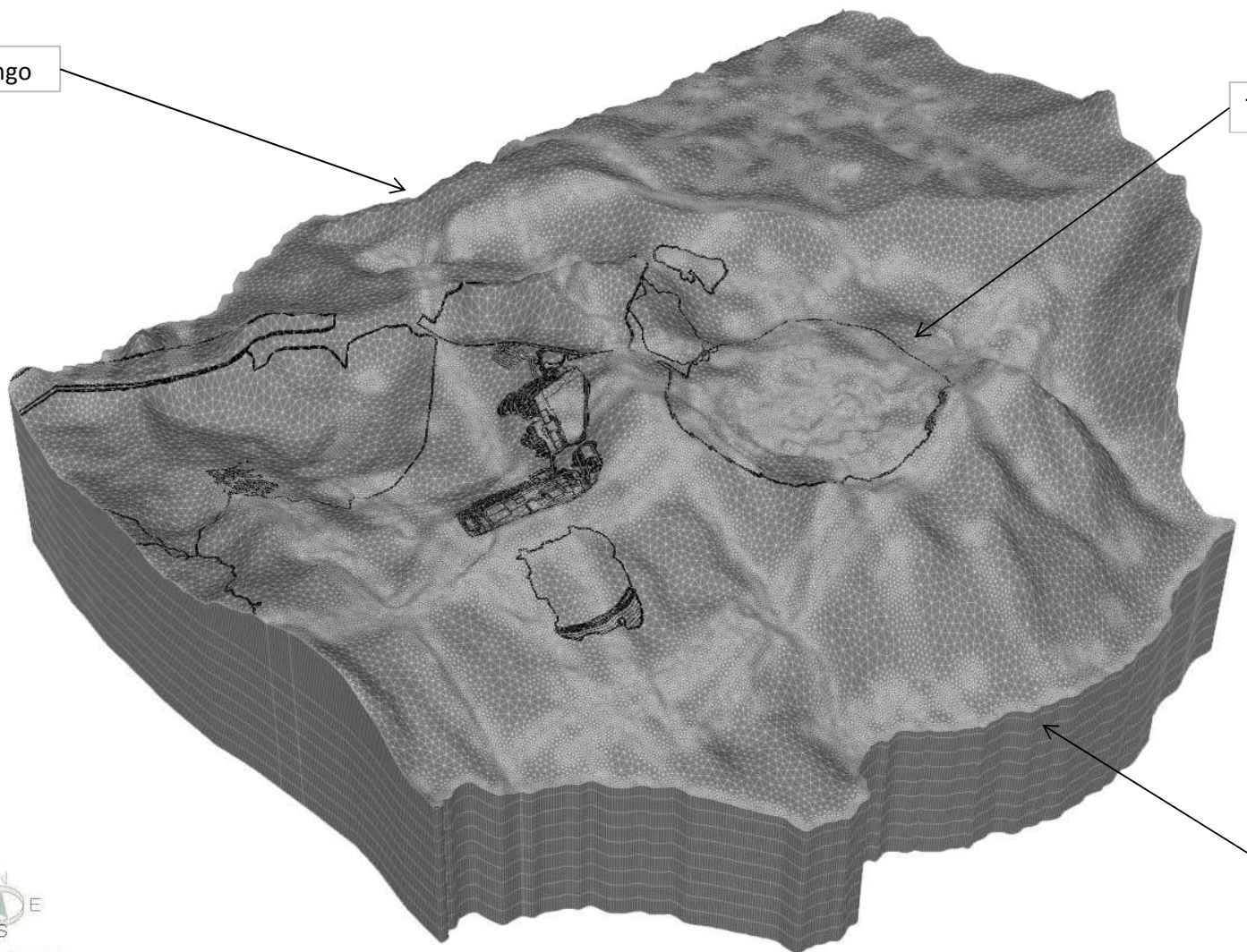
DATUM: UTM PSAD 56 ZONA: 17S

	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA		
	TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desagüe del Tajo 01 Acuífero Yumagual - Cajamarca		
ELABORADO: Bachiller Jesús Mejía Rueda	FECHA: 2014	MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLOGICO	
			MAPA 19

Río Tingo

Tajo 1

Río Hualgayoc



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
 ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA



TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01
 Acuífero Yumagual - Cajamarca

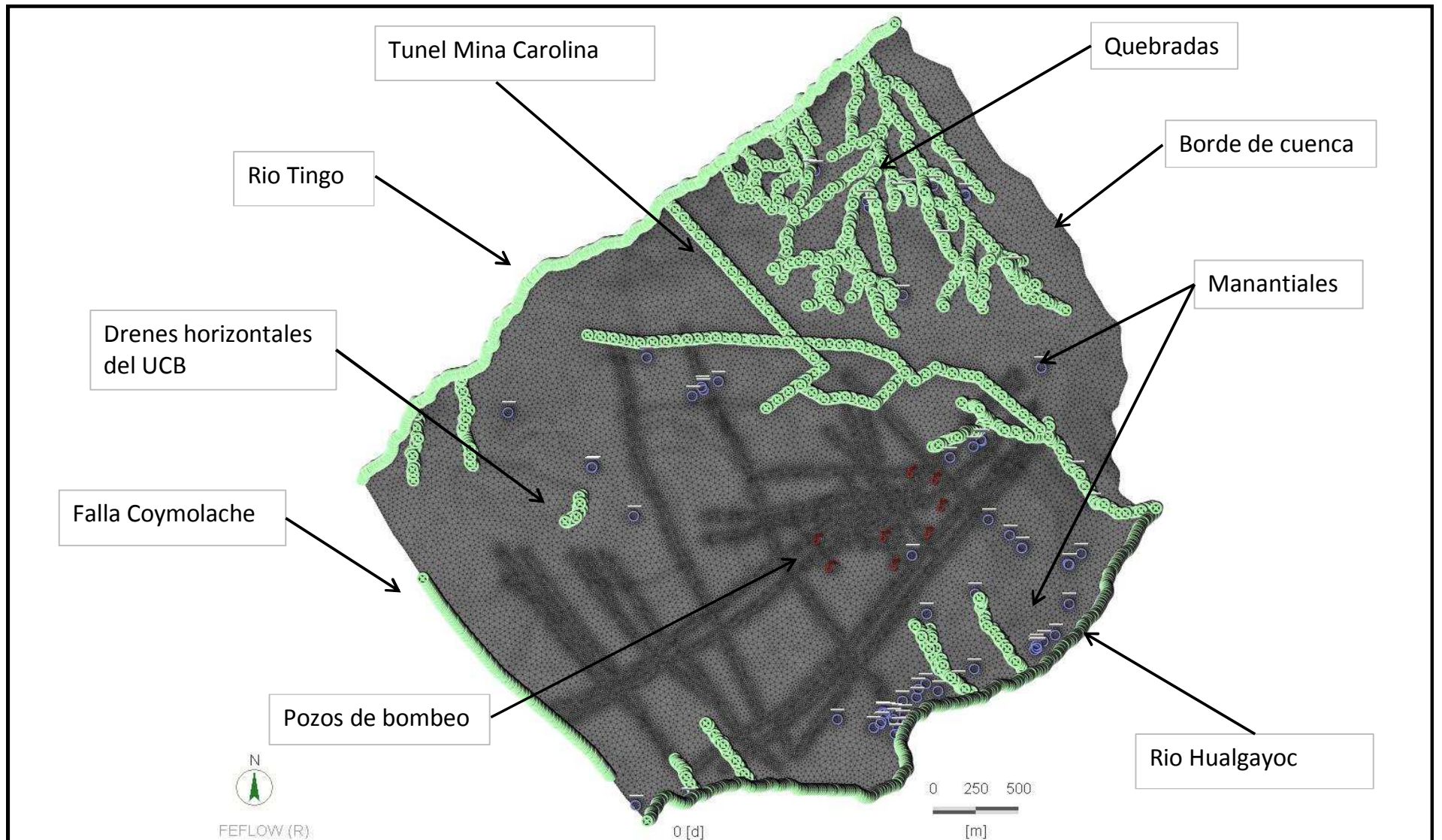
MAPA



20

ELABORADO: *Bachiller Jesús Mejía Rueda*

FECHA: 2014

DISCRETIZACIÓN DEL MODELO



 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA</p> 		MAPA 21
TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desagüe del Tajo 01 Acuífero Yumagal - Cajamarca		
ELABORADO: <i>Bachiller Jesús Mejía Rueda</i>	FECHA: 2014	CONDICIONES DE BORDE Y DE CONTORNO



Río Tingo

Tajo 1

Río Hualgayoc



FEFLOW (R)



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA



TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01
Acuífero Yumagual - Cajamarca

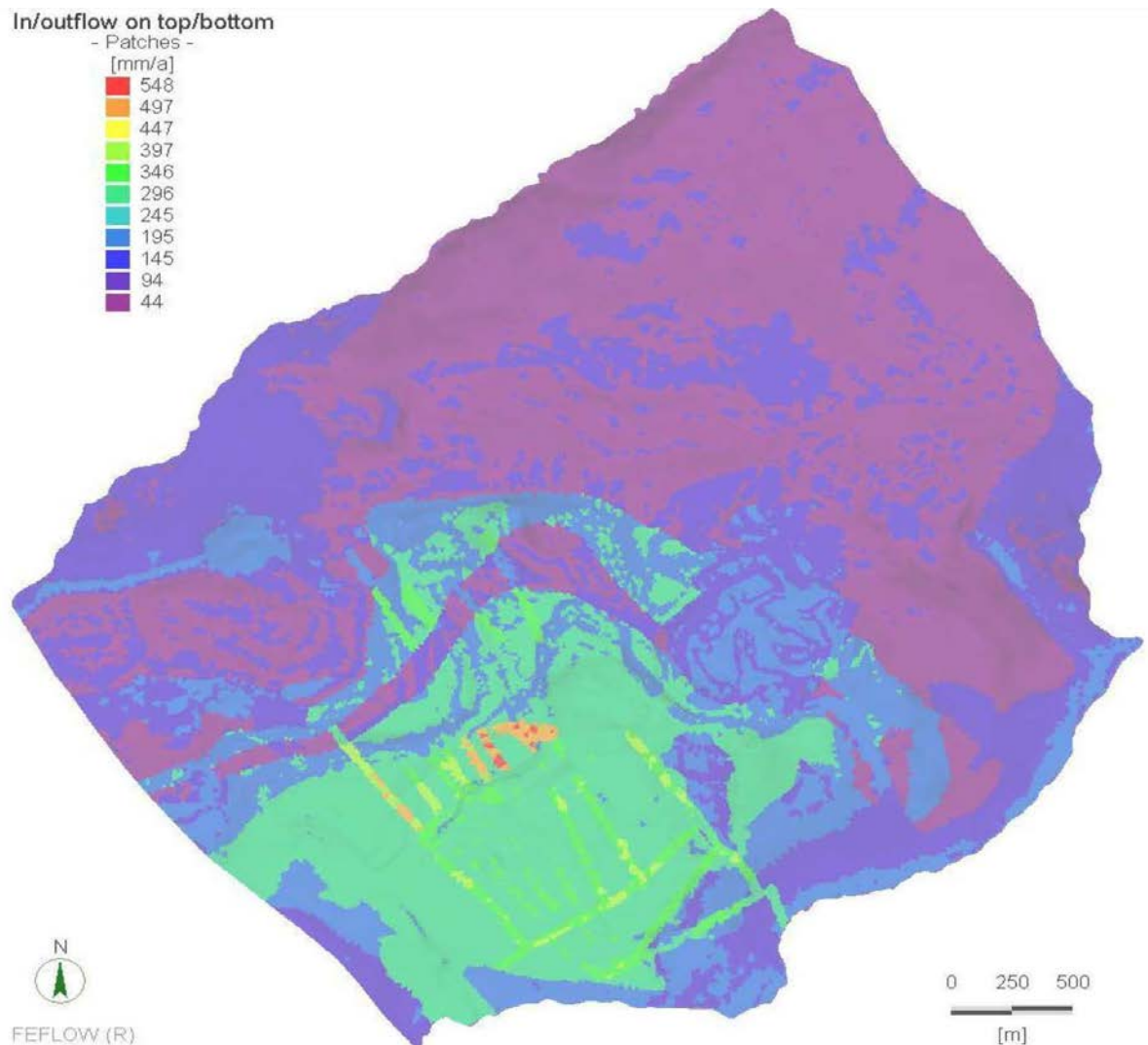
MAPA

ELABORADO: *Bachiller Jesús Mejía Rueda*

FECHA: 2014

FRACTURAS DEL MODELO

22



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA



TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01
Acuífero Yumagual - Cajamarca

MAPA

ELABORADO: Bachiller Jesús Mejía Rueda

FECHA: 2014

RECARGA SUBTERRÁNEA DEL MODELO

23

Conductivity: K_{xx}

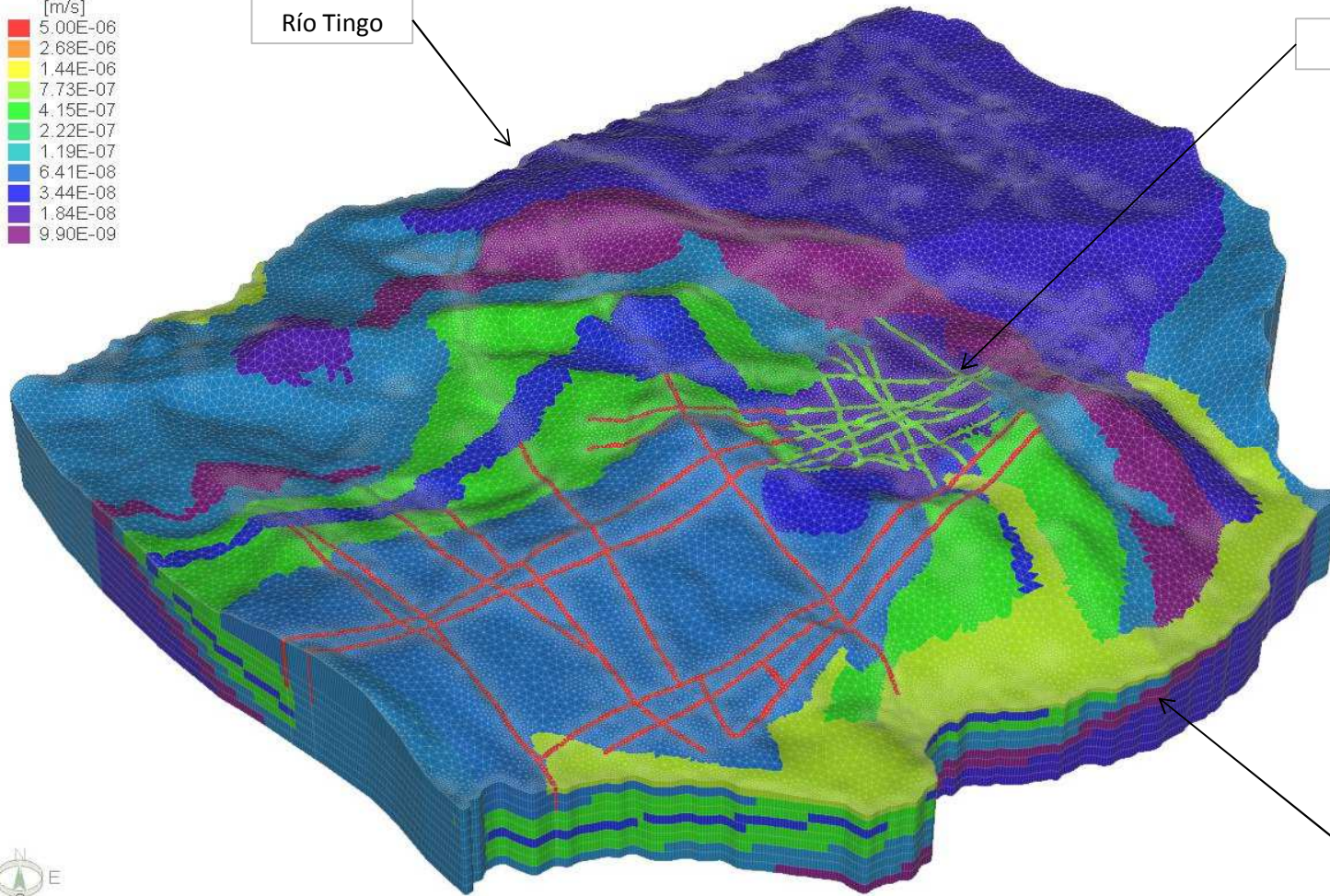
- Patches -

[m/s]



Río Tingo

Tajo 1



FEFLOW (R)

Río Hualgayoc



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA



TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01
Acuífero Yumagual - Cajamarca

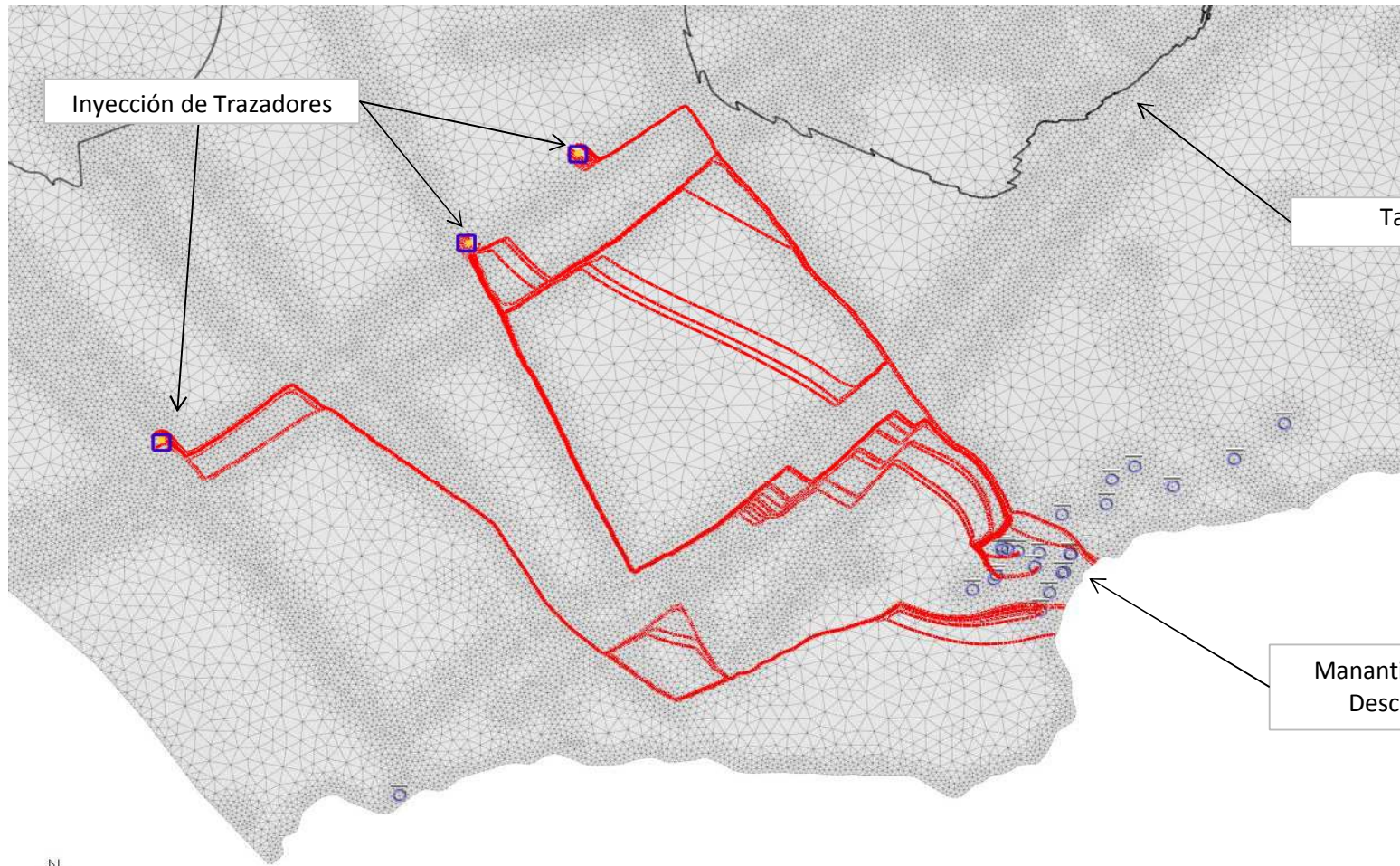
MAPA

ELABORADO: *Bachiller Jesús Mejía Rueda*

FECHA: 2014

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA -VISTA 3D

24



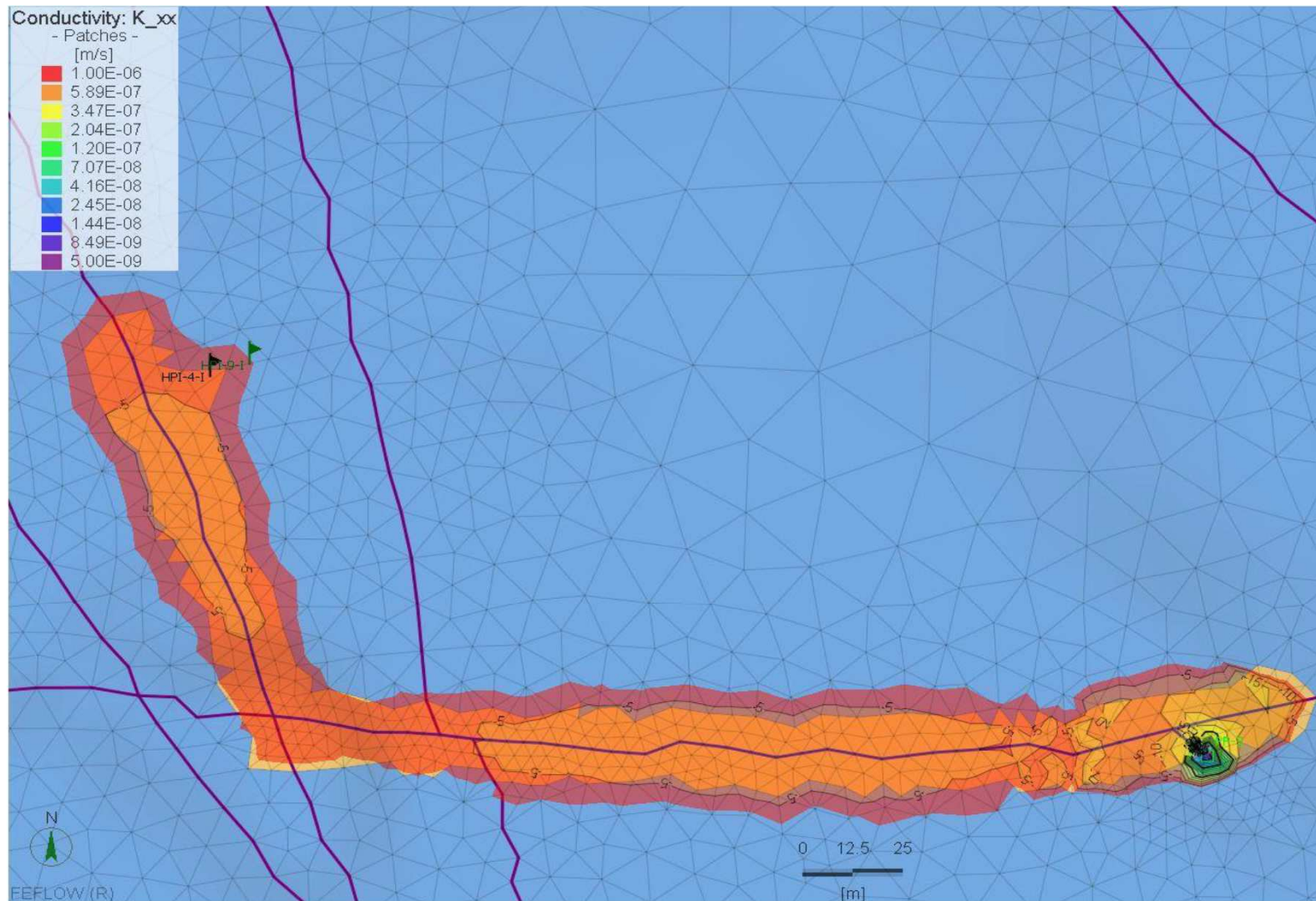
N
 FEFLOW (R)

3 nodes selected

0 100 200
 [m]

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA</p>		
<p>TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desagüe del Tajo 01 Acuífero Yumagual - Cajamarca</p>		<p>MAPA</p>
<p>ELABORADO: <i>Bachiller Jesús Mejía Rueda</i></p>	<p>FECHA: 2014</p>	<p>25</p>

RASTREO DE PARTÍCULAS - SIMULACIÓN DE TRAZADORES



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
 ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA



TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01
 Acuífero Yumagual - Cajamarca

MAPA

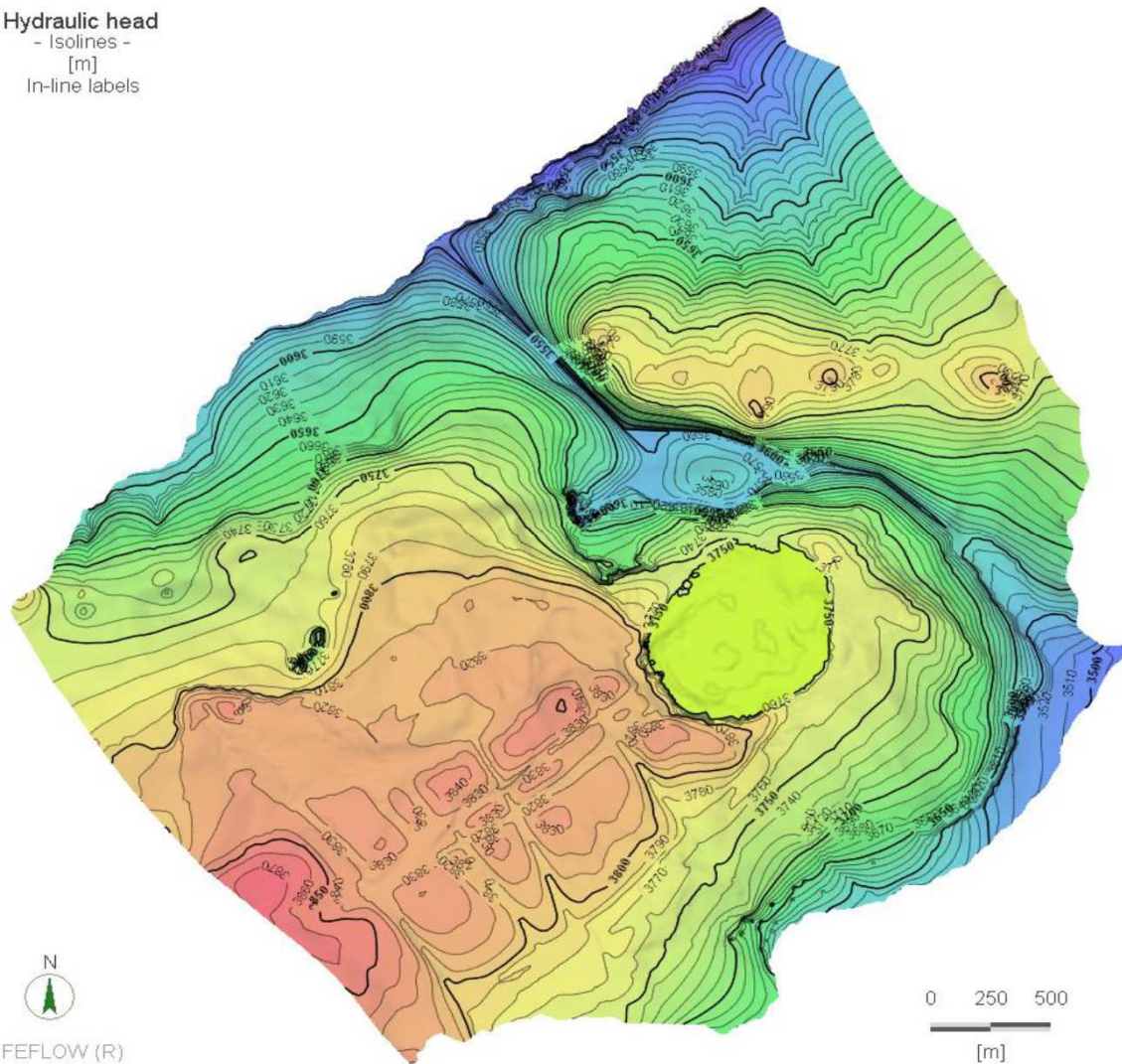
ELABORADO: *Bachiller Jesús Mejía Rueda*

FECHA: 2014

ISONIVELES DE DESCENSOS
 SIMULADOS POR BOMBEO DEL POZO PP-03

26

Hydraulic head
 - Isolines -
 [m]
 In-line labels



N

 FEFLOW (R)

0 250 500
 [m]

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNICA</p>		
TESIS: Modelamiento Hidrogeológico Conceptual y Numérico en Medios Kársticos para la Predicción del Desague del Tajo 01 Acuífero Yumagual - Cajamarca		MAPA
ELABORADO: <i>Bachiller Jesús Mejía Rueda</i>	FECHA: 2014	27
		SIMULACIÓN DE NIVELES POR DRENAJE DEL TAJO 1 A DICIEMBRE 2013