

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA MINERA Y METALÚRGICA



**“MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL
PARA EL NUEVO TAJO LA QUINUA SUR
GRAVAS”**

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO GEÓLOGO**

**ELABORADO POR:
JUAN CARLOS MERLO MEDINA**

**ASESOR
MSc. Ing. GUILLERMO ABDON PEREZ VERASTEGUI**

**Lima - Perú
2013**

DEDICATORIA

A mis padres Gloria y Humberto, hermana Pilar y mi abuelo Manuel, ustedes me enseñaron el camino.

A mi esposa Jhajayra e hijos Ivanna y Evan, que son mi incentivo para seguir esforzándome cada día más.

RESUMEN

Los deslizamientos y saturamiento de agua en taludes y fondos de tajo respectivamente representan un problema frecuente en la minería superficial, son eventos no deseados que ponen en peligro la integridad del personal y equipo, llegando en algunos casos a poner en riesgo la viabilidad operacional de una empresa o negocio minero.

Minera Yanacocha (MYSRL), no es ajena a este problema, ubicada a 40 Km de la ciudad de Cajamarca opera en la actualidad 4 tajos. Durante los tres últimos años han ocurrido inestabilidades de talud a gran escala incluyendo saturaciones de agua en el fondo del tajo, localizadas en los tajos Chaquicocha y Tapado Oeste, que pusieron en riesgo 250,000 onzas de oro.

Para tener un mejor control hidrogeológico, el Grupo de Hidrogeología puso en marcha un plan de investigación que incluyó perforaciones con método de aire reverso, mapeo hidrogeológico, pruebas hidráulicas e instalación de piezómetros de tubo abierto.

La información hidrogeológica y monitoreo de los piezómetros permitió determinar el comportamiento hidrogeológico de la zona en estudio, como transmisividad, permeabilidad y conductividad hidráulica.

Para el desarrollo de las operaciones de La Quinoa Sur, es necesario llevar a cabo un plan de drenaje que garantice que las labores en el fondo del tajo se realicen de manera seca y segura garantizando la estabilidad de los taludes que forman las paredes del tajo.

El presente informe detalla los criterios y métodos de estudio realizados con la finalidad de modelar conceptualmente el comportamiento hidrogeológico y solucionar problemas de saturamiento de agua y de estabilidad y evitar así la ocurrencia de una falla catastrófica.

ABSTRACT

Landslides and its saturation water banks and bottoms cut respectively represent a common problem in surface mining are unwanted events that endanger the integrity of staff and equipment, and in some cases jeopardize the operational feasibility of a mining company or business.

Minera Yanacocha (MYSRL), is no stranger to this problem, located 40 km from the city of Cajamarca currently operates four pits. During the last three years of slope instabilities including large-scale water saturations in the bottom of the pit, located in the West Tapado Chaquicocha and pits, which put at risk 250,000 ounces of gold have occurred.

To have a better hydrogeological control, Hydrogeology Group launched a research plan that included drilling with reverse circulation method, hydrogeological mapping, water testing and installation of piezometers open tube.

The hydrogeological information and monitoring of piezometers allowed to determine the hydrogeological behavior of the study area, such as transmissivity, hydraulic conductivity and permeability.

For the development of the operations of the La Quinoa Sur, it is necessary to carry out a drainage plan to ensure that the work on the bottom of the pit is made of dry and safely guaranteeing the stability of the slopes that form the walls of the pit.

This report details the criteria and methods of study undertaken in order to conceptually model the hydrogeological behavior and troubleshoot its saturation of water and stability and prevent the occurrence of a catastrophic failure.

ÍNDICE

	Pág
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	13
1.1 Planteamiento del Problema	13
1.2 Objetivos	14
1.3 Ubicación y accesibilidad	16
1.3.1 Distrito Minero Yanacocha	16
1.3.2 Tajo La Quinoa Sur	16
1.4 Antecedentes	20
1.5 Climatología	21
1.5.1 Clima	21
1.5.2 Precipitación	21
1.5.3 Evapotranspiración	24
CAPÍTULO II: LA GEOMORFOLOGÍA DE LA ZONA EN ESTUDIO	25
CAPÍTULO III: MARCO GEOLÓGICO	27
3.1 Geología Regional	27
3.1.1 Estratigrafía	28
3.1.2 Alteración Hidrotermal	31
3.1.3 Geología Estructural	33
3.1.4 Metalogenia	34

3.2	Geología Local	36
3.2.1	Estratigrafía	37
3.2.2	Geología Estructural	41
3.3	Contexto Hidrológico	43
CAPÍTULO IV: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA		46
4.1	Perforación Hidrogeológica - RCD	46
4.1.1	Perforación para piezómetros	47
4.1.2	Descripción técnica de los piezómetros	49
4.1.3	Metodología de pruebas de inyección	65
4.2	Instrumentación Hidrogeológica	66
4.2.1	Instrumentación Hidrogeológica 2012	66
CAPÍTULO V: ESTUDIOS BÁSICOS		67
5.1	El acuífero	67
5.1.1	Características del acuífero	67
5.1.2	Funcionamiento del acuífero	71
5.2	El Manto freático	72
5.2.1	Comportamiento de los niveles de agua	72
5.2.2	Inventario de puntos de agua subterránea	75
5.2.3	Monitoreo de niveles de agua subterránea	75
5.3	Parámetros Hidrogeológicos del acuífero	79
5.4	Hidrogeoquímica	81

CAPÍTULO VI: HIDROGEOLOGÍA CONCEPTUAL	85
6.1 Hidrogeología Conceptual de las gravas	87
6.2 Hidrogeología Conceptual del macizo rocoso subyacente	94
CAPÍTULO VII: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	98
7.1 Metodología	98
7.2 Modelamiento del balance hídrico	101
CONCLUSIONES	110
RECOMENDACIONES	112
BIBLIOGRAFÍA	114
ANEXOS	116

LISTA DE FIGURAS

		Pág
Foto 1.1	Falla de talud del tipo flujo, en la mina de cobre Grasberg	14
Foto 1.2	Perforadoras y camión impactados por la falla de talud de la mina Grasberg	15
Foto 1.3	Acumulación de agua en el fondo del tajo Chaquicocha	15
Foto 1.4	Presencia de agua en el fondo del tajo del Tapado Oeste	16
Figura 1.1	Ubicación distrito minero Yanacocha	17
Foto 1.5	Vista panorámica del proyecto La Quinua Sur	18
Figura 1.2	Ubicación local La Quinua Sur Gravas	19
Figura 3.1	Mapa Geológico regional del distrito minero Yanacocha	29
Figura 3.2	Columna estratigráfica del distrito minero Yanacocha	30
Figura 3.3	Plano simplificado de alteración del distrito minero Yanacocha	32
Figura 3.4	Geología estructural regional del área de Yanacocha	35
Figura 3.5	Formación del depósito La Quinua Sur Gravas	37
Figura 3.6	Columna estratigráfica de La Quinua Sur	39
Foto 3.1	Vista mostrando relaciones de contacto basamento, la cuenca Pre-La Quinua, Secuencia Inferior y Superior	40
Foto 3.2	Imagen satelital mostrando la falla activa de La Quinua con movimiento normal y sinistral, afectando a la Secuencia Superior de gravas de la cuenca La Quinua.	40
Figura 3.7	Ubicación de la cuenca La Quinua Sur y esquema estructural	42
Figura 3.8	Sección estructural mostrando la Secuencia Inferior y la Secuencia Superior de la cuenca La Quinua, el alto el Tapado	43
Figura 3.9	Ubicación general y Cuencas	44

Figura 4.1.	Área del proyecto La Quinoa Sur Gravas y niveles de agua	48
Figura 4.2	Registro de completación piezómetro LQDST-039	52
Figura 4.3	Prueba de inyección piezómetro LQDST-039	53
Figura 4.4	Registro de completación piezómetro LQ-1149	56
Figura 4.5	Registro de completación piezómetro LQ-1150	59
Figura 4.6	Registro de completación piezómetro LQ-1151	62
Figura 4.7	Prueba de inyección piezómetro LQ-1151 recuperación	64
Figura 5.1	Mapa geológico de La Quinoa Sur Gravas	69
Figura 5.2	Mapa espesor de gravas La Quinoa Sur	70
Figura 5.3	Hidrogramas de piezómetros de La Quinoa Sur Gravas	73
Figura 5.4	Isopiezas de La Quinoa Sur Gravas	74
Figura 5.5	Sección A-A'	76
Figura 5.6	Sección B-B'	77
Figura 5.7	Sección C-C	78
Figura 5.8	Comportamiento de los parámetros físico químicos de campo	84
Figura 6.1	Cortes de 12 m horizontales para el cálculo de almacenamiento	86
Figura 6.2	Niveles de agua y tasas de bombeo en La Quinoa Sur Gravas	90
Figura 7.1	Plan conceptual de desagüe de La Quinoa Sur Gravas	108

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1.1	Resumen de precipitación total mensual y media anual (mm)	22
Tabla 1.2	Resumen de temperatura media mensual y media anual (°C)	23
Tabla 1.3	Evapotranspiración anual real por el método de Turc (mm)	24
Tabla 4.1	Ubicación de piezómetros	49
Tabla 4.2	Análisis de las pruebas de inyección	63
Tabla 4.3	Análisis de la prueba de recuperación de inyección (slug test)	63
Tabla 5.1	Mediciones de niveles de agua de piezómetros	75
Tabla 5.2	Valores de conductividad hidráulica de las unidades hidrogeológicas del área de estudio	79
Tabla 5.3	Análisis de las pruebas de inyección	80
Tabla 5.4	Análisis de las pruebas recuperación de inyección (Slug Test)	80
Tabla 5.5	Datos generales de estaciones de muestreo	81
Tabla 5.6	Datos estadísticos de parámetros físico químicos de piezómetros	82
Tabla 5.7	Calidad química del agua subterránea	83
Tabla 7.1	Resumen de cortes horizontales de 12 m utilizados para los cálculos de almacenamiento en el modelo del balance hídrico	105
Tabla 7.2	Resumen de los caudales de los componentes contribuyentes del balance hídrico para La Quinoa Sur Gravas	107
Tabla 7.3	Resumen del rendimiento del balance hídrico conceptual	109

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Planteamiento del Problema

Las fallas de talud a gran escala así como el saturamiento de agua en los fondos de los tajos, son un problema frecuente en la operación de tajos mineros; estos eventos ponen en riesgo al personal, equipo y en algunos casos incluso la viabilidad del negocio minero. Por ejemplo el 9 de Octubre del 2003 ocurrió una falla de talud a gran escala en la Mina de cobre “Grasberg” de Indonesia (Fotos 1.1 y 1.2), el resultado 8 personas fallecidas y varios equipos enterrados por el deslizamiento. El gobierno indonesio cerró la mina por 6 meses, se declaró en imposibilidad de cumplir sus contratos de venta de concentrado y en consecuencia el precio mundial del cobre se incrementó.

En minera Yanacocha se operan tajos de gran magnitud, los cuales no están exentos de este tipo de problemas, es así que en los Tajos de Chaquicocha y Tapado Oeste han presentado saturaciones de agua en el fondo del tajo que produjeron inestabilidades y acumulaciones a finales del 2012 (Fotos 1.3 y 1.4).

Estas inestabilidades y saturaciones de agua retrasaron el plan de producción poniendo en riesgo la producción de aproximadamente 250,000 onzas de Au.

1.2 Objetivos

- Evaluar las condiciones hidrogeológicas que nos permitan conocer las características del manto freático.
- Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual.
- Obtener el Título de Ingeniero Geólogo.



Fotografía 1.1 Falla de talud del tipo flujo, en la mina de cobre “Grasberg” de Indonesia.



Fotografía 1.2 Perforadoras y camión impactados por la falla de talud de la mina Grasberg.



Fotografía 1.3 Acumulación de agua en el fondo del tajo Chaquicocha



Fotografía 1.4 Presencia de agua en el fondo del tajo del Tapado Oeste

1.3 Ubicación y accesibilidad

1.3.1 Distrito Minero Yanacocha

El distrito minero Yanacocha, es un complejo de depósitos epitermales y clásticos de clase mundial, se ubica en la provincia y región de Cajamarca, a 48 Km al Norte de la ciudad de Cajamarca y 900 Km al Noreste de Lima. Las elevaciones varían entre 3400 a 4200 m.s.n.m. (ver Figura 1.1). En la actualidad, el distrito minero tiene una producción acumulada de 30 millones de Au y unas reservas de 15 millones de Au.

1.3.2 Tajo La Quinoa Sur

El nuevo tajo en estudio formará parte de los tres tajos que actualmente opera Minera Yanacocha, se ubica en la parte central del distrito minero (ver Figura 1.1

y Foto 1.5), se encuentra geográficamente ubicada entre las coordenadas : Este: 770958-772630 y Norte:9222961-9224858 (ver Figura 12).

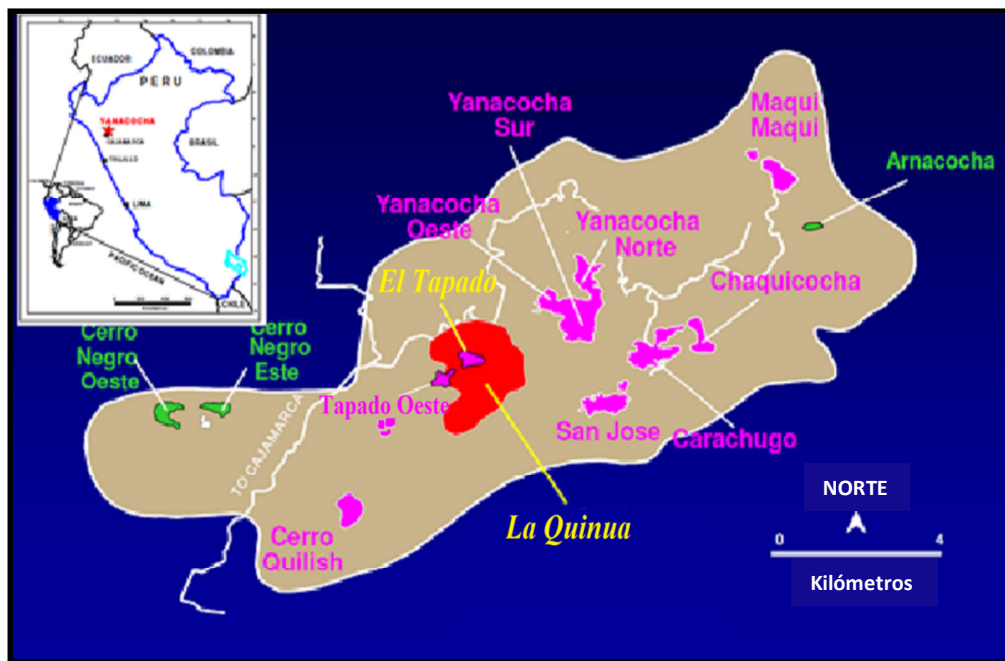


Figura 1.1. Ubicación distrito minero Yanacocha.



Fotografía 1.5 Vista Panorámica del Proyecto La Quinua Sur

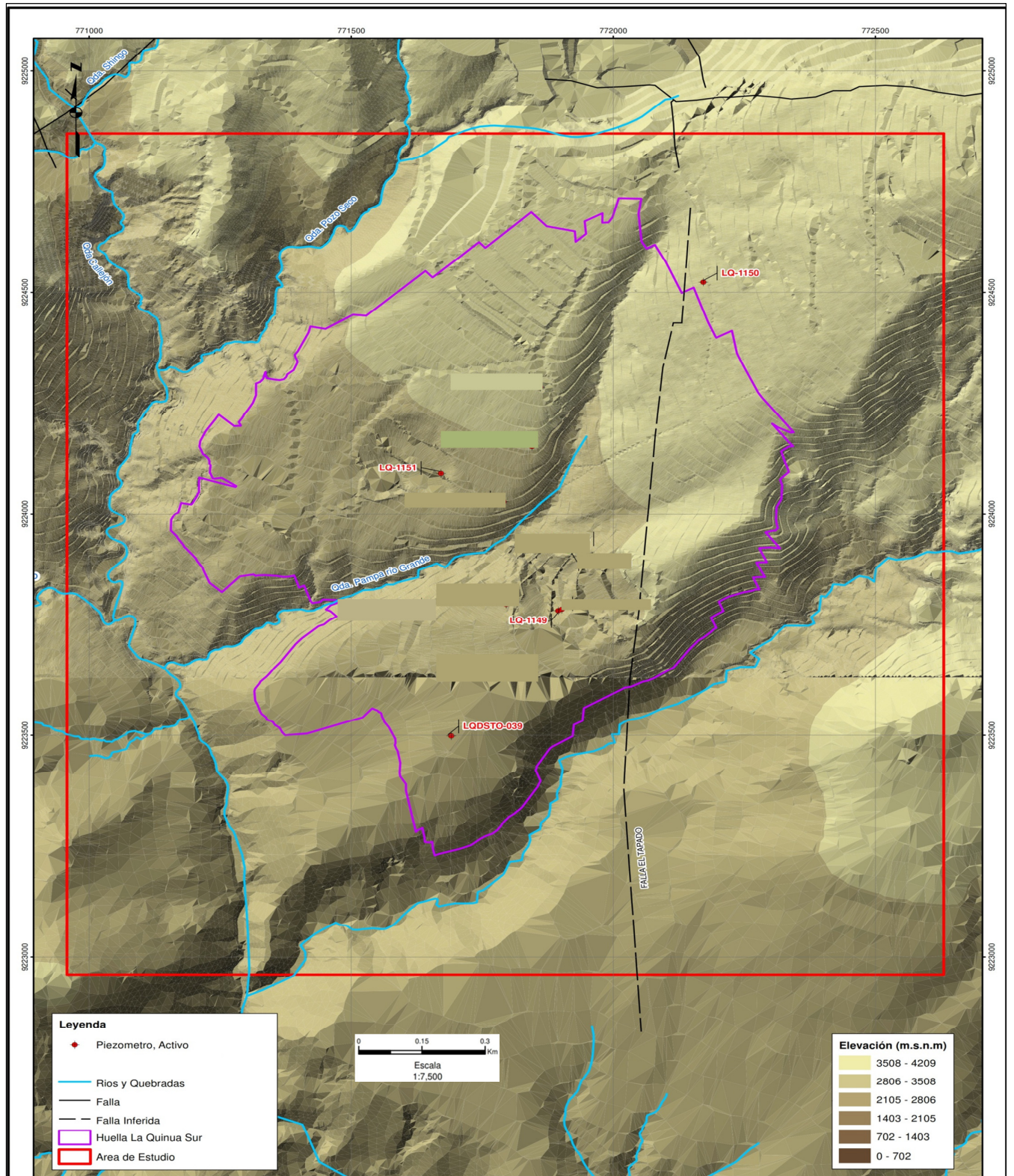


Figura 1.2 Ubicación local La Quinua Sur Gravas

1.4 Antecedentes

Minera Yanacocha S.R.L. (MYSRL) dentro de sus planes de minado tiene proyectado realizar el desarrollo del proyecto La Quinoa Sur, el cual consiste en un tajo al Sur Central de la zona del distrito minero.

Para llevar a cabo esta labor se debe diseñar un sistema de drenaje, por tal motivo se vienen realizando una serie de estudios de carácter exploratorio en los que se incluyen perforaciones para instalación de piezómetros para monitoreo, y estudios de carácter hidrogeológico.

En este informe se describe las características geológicas e hidrogeológicas del área de estudio en general y de forma local las características geológicas y los parámetros hidrogeológicos obtenidos de perforaciones y de pruebas hidráulicas realizadas sobre los sondeos. Así mismo se incluye un análisis de la evolución de los niveles piezométricos, breve resumen de la calidad química del agua. Junto con las características descriptivas del área de estudio.

1.5 Climatología

1.5.1 Clima

El clima en Yanacocha es distintamente estacional, con una época de lluvias desde Octubre a Abril y una estación seca desde Mayo a Septiembre. Las precipitaciones en Yanacocha son el resultado de vientos Nor-Orientales que traen masas húmedas calurosas de aire desde la Amazonía. Las masas aéreas, cuando se encuentran en contacto con Los Andes, se condensan originando frescura y luego precipitación.

1.5.2 Precipitación

Se cuenta con información meteorológica que registra las precipitaciones medias mensuales con bastante consistencia.

La precipitación promedio mensual varía según la época seca o húmeda. A continuación se presenta la Tabla resumen (Tabla 1.1) de las precipitaciones promedios mensuales registrados en los últimos 13 años.

Tabla 1.1 Resumen de precipitación total mensual y media anual (mm)

Precipitación total mensual y media anual (mm)														
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	Promedio
2000	57.20	213.85	254.00	105.80	95.10	30.20	1.60	14.80	155.60	23.37	60.38	194.06	1205.96	100.50
2001	348.24	149.60	476.67	149.10	113.03	20.32	41.92	1.02	100.58	129.04	265.19	222.26	2016.95	168.08
2002	120.40	130.60	305.04	235.46	63.50	16.26	20.83	0.00	75.70	199.66	104.73	189.49	1461.65	121.80
2003	105.42	91.39	89.40	100.58	41.90	3.57	0.00	0.00	46.00	81.85	79.79	113.77	753.67	62.81
2004	79.76	166.88	199.90	180.63	112.28	19.31	25.65	13.97	122.16	224.27	248.66	360.90	1754.37	146.20
2005	87.88	217.14	296.16	76.44	66.76	37.07	0.76	13.71	26.41	321.83	66.80	169.43	1380.39	115.03
2006	73.41	194.55	362.97	136.65	47.75	32.50	9.91	29.21	66.81	116.33	168.91	140.97	1379.97	115.00
2007	156.71	66.54	269.71	170.69	66.30	3.30	49.27	12.69	35.82	229.09	245.09	103.61	1408.83	117.40
2008	148.34	234.16	317.48	152.67	87.87	32.49	5.33	19.55	187.73	240.26	155.72	81.01	1662.61	138.55
2009	304.80	177.04	267.73	205.72	119.64	62.92	27.17	19.81	18.53	233.16	138.94	200.39	1775.85	147.99
2010	88.38	202.93	305.56	124.47	101.10	29.47	39.10	4.36	0.00	135.63	168.64	82.28	1281.92	106.83
2011	129.05	94.99	287.52	264.16	16.77	2.53	47.73	2.28	78.22	122.68	163.56	191.74	1401.24	116.77
2012	315.74	149.85	111.24	219.68	131.34	11.50	0.00	18.03	22.10	187.45	299.21	105.15	1571.29	130.94
2013	106	163	308	115	160	-	-	-	-	-	-	-	851	170.13

1.5.3 Evapotranspiración

Se calculó la evapotranspiración anual real de la zona en estudio (Tabla 1.3) utilizando la fórmula de Turc, con los datos de precipitación media anual y temperatura media anual (Tabla 1.2).

Formula de Turc:

$$ETR = P / (0.9 + (P/L)^2)^{1/2}$$

Donde:

ETR= Evapotranspiración real en mm/año

Pp= Precipitación en mm/año

$L = 300 + 25(T) + 0.05(T)^3$

T= Temperatura media anual en °C

Tabla 1.3 Evapotranspiración anual real por el método de Turc (mm)

Evapotranspiración anual (mm)			
Año	Pp (mm)	T(°C)	ETR (mm)
2000	1205.96	15.78	729.56
2001	2016.95	15.89	827.30
2002	1461.65	15.55	762.07
2003	753.67	15.45	586.97
2004	1754.37	15.21	776.96
2005	1380.39	16.10	772.46
2006	1379.97	15.68	756.15
2007	1408.83	15.45	751.38
2008	1662.61	15.08	764.07
2009	1775.85	13.62	709.77
2010	1281.92	14.18	686.99
2011	1401.24	13.79	687.22
2012	1571.29	14.98	750.99
2013	851.00	15.58	628.04

CAPÍTULO II

LA GEOMORFOLOGÍA DE LA ZONA EN ESTUDIO

El proyecto se sitúa en la región inter montañosa de la zona Norte de la Cordillera de los Andes. Los procesos que actuaron y modelaron el relieve actual, son el resultado de los diferentes procesos geológicos y geomorfológicos tales como el tipo de litología, tectónica, pendiente, cobertura vegetal y clima. Los diferentes tipos de formas (geoformas) que se observan en el área del proyecto son el resultado de la combinación de estos procesos.

La morfología actual es el resultado de la acción combinada de una intensa actividad volcánica ocurrida durante el terciario y cuaternario, la cual ha sufrido procesos erosivos a partir de una actividad glaciaria principalmente.

En un contexto general el relieve topográfico se caracteriza por la presencia de montañas con cumbres elevadas y accidentadas, colinas ondulantes, valles inter-montañosos con pendientes entre suaves y pronunciadas y quebradas.

Localmente en el sector de La Quinoa Sur se presentan abanicos periglaciares generados por la erosión de afloramientos del basamento volcánico, asimismo se aprecian quebradas de apariencia lineal, posiblemente siguiendo la tendencia estructural de la zona.

Debido al control estructural reinante en la zona es posible apreciar quebradas y ríos que se encuentran en zonas de aluvión desarrolladas recientemente.

La geomorfología en la zona de La Quinoa Sur, en términos generales, presenta una pendiente moderada a alta de 12% a 24 % que va desde la parte norte hacia la parte suroeste, la pendiente cambia abruptamente a una pendiente alta del orden de 50 % mientras se va llegando hacia las quebradas principales Río Grande y Encajón, estas presentan en sus laderas flancos muy escarpados en donde es claro notar afloramientos de las gravas que conforman el yacimiento.

CAPÍTULO III

MARCO GEOLÓGICO

3.1 Geología Regional

El Distrito Minero de Yanacocha está localizado cerca a la intersección de un cambio en la orientación del paralelo Andino caracterizado por una orientación NNW a WNW (y casi E-W) con una zona estructural transandina ENE (Turner, 1997). El alineamiento del paralelo Andino está representado por un patrón de pliegues orientados, dentro de rocas mesozoicas, y con un alineamiento de intrusiones terciarias en el área de Cajamarca (Wilson, 1985). El patrón transandino conocido como el corredor estructural Chicama- Yanacocha, se evidencia por el desplazamiento del litoral peruano, y el alineamiento ENE del distrito Yanacocha (Quiroz, 1997). Este corredor estructural, corresponde a una franja de 30 a 40 Km. de ancho, de por lo menos 200 Km. de largo, que se inicia en el río y puerto de Chicama y se extiende en dirección N40°E, pasando por Guzmango y Contumazá, Cajamarca, La Encañada, Yanacocha, y Hualgáyoc, extendiéndose aún más hacia el este. En el corredor estructural Chicama-Yanacocha se presentan fallas transversales al rumbo andino (Transandinas), eventos magmáticos alineados en la misma

dirección, lo mismo que fenómenos de alteración hidrotermal y mineralización metálica (Quiroz, 1997). Ver Figura 3.1.

3.1.1 Estratigrafía

El distrito minero Yanacocha está emplazado en un paquete volcánico con edades entre el Mesozoico y Cenozoico, que descansa sobre rocas sedimentarias del Cretácico. Este paquete presenta una gruesa secuencia basal de lavas andesíticas con aisladas intercalaciones de niveles piroclásticos, estas infrayacen a una secuencia de textura predominantemente fragmental; las cuales incluyen unidades piroclásticas con algunos niveles de intercalaciones de flujo de lava. Numerosos domos, diatremas, diques e intrusiones pocos profundos cortan a todo este paquetes, así como también múltiples eventos de brechas. Ver Figura 3.2.

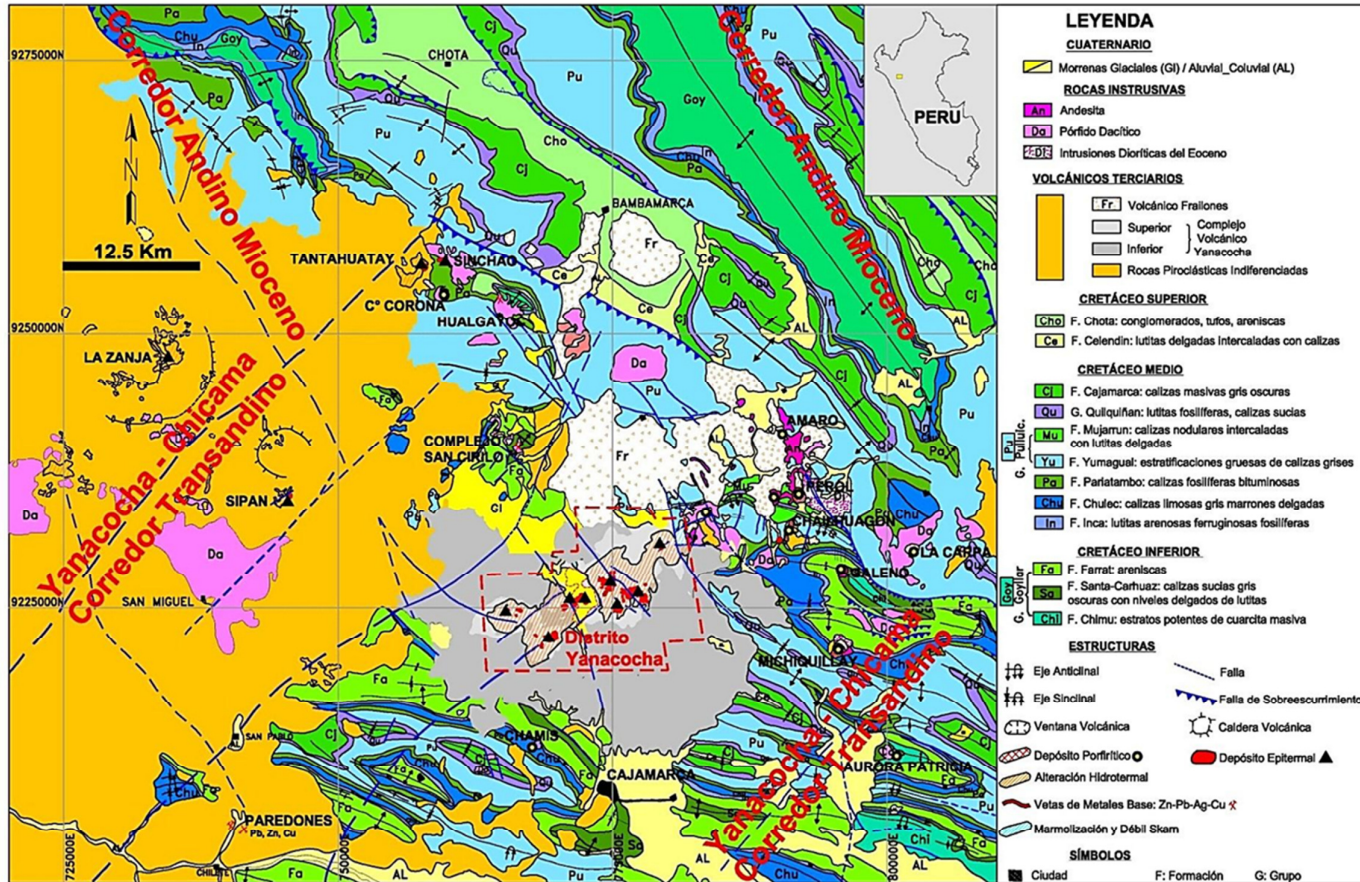


Figura 3.1 Mapa Geológico Regional del distrito minero Yanacocha y otros distritos en el Norte del Perú, mostrando los principales controles estructurales (Modificado de Veliz 2002, Longo 2005 y Mendoza 2010)

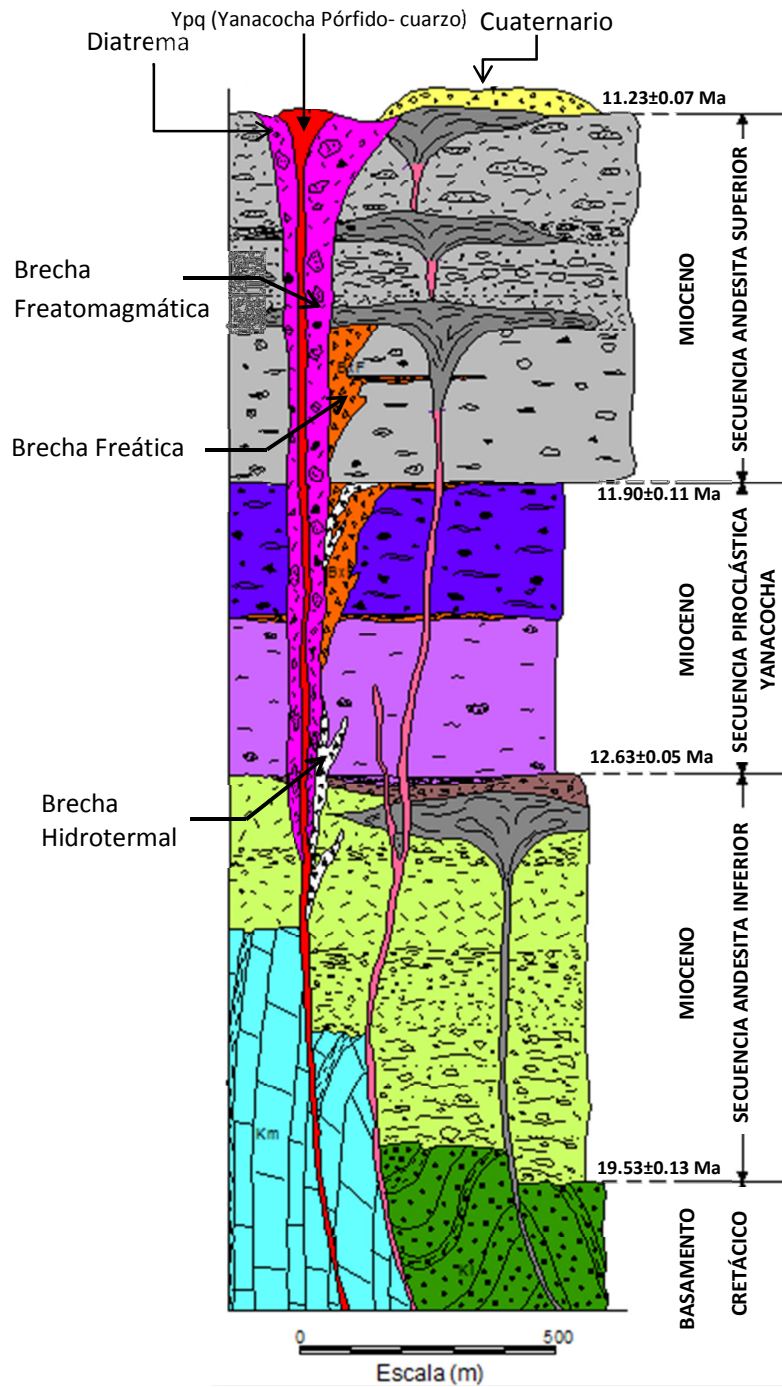


Figura 3.2 Columna estratigráfica generalizada del Distrito Minero Yanacocha (J. Gomes, Julio 2004).

3.1.2 Alteración Hidrotermal

La alteración en el distrito Yanacocha es típica de un sistema de alta sulfuración. La alteración es intensa y los límites del distrito están definidos por la extensión de la alteración.

La alteración en el distrito consiste en asociaciones de minerales que gradan desde un núcleo generalmente aurífero de sílice masiva, a una aureola de sílice vuggy con horizontes someros de sílice granular, a un halo de alteración argílica avanzada (alunita-pirofilita), a un halo más distal de argílica intermedia y hasta una zona propilítica. Este mosaico de superposición se repite en distintos centros de alteración, que abarcan aproximadamente un área de 18km en dirección noreste por 6km en dirección noroeste (Teal & Benavides, 2010). Ver Figura 3.3.

Cabe resaltar que el término “sílice” se refiere al cuarzo, pero se utiliza, en este estudio, para nombrar la alteración que tiene la roca al presentar un reemplazamiento de sílice (cuarzo) hidrotermal.

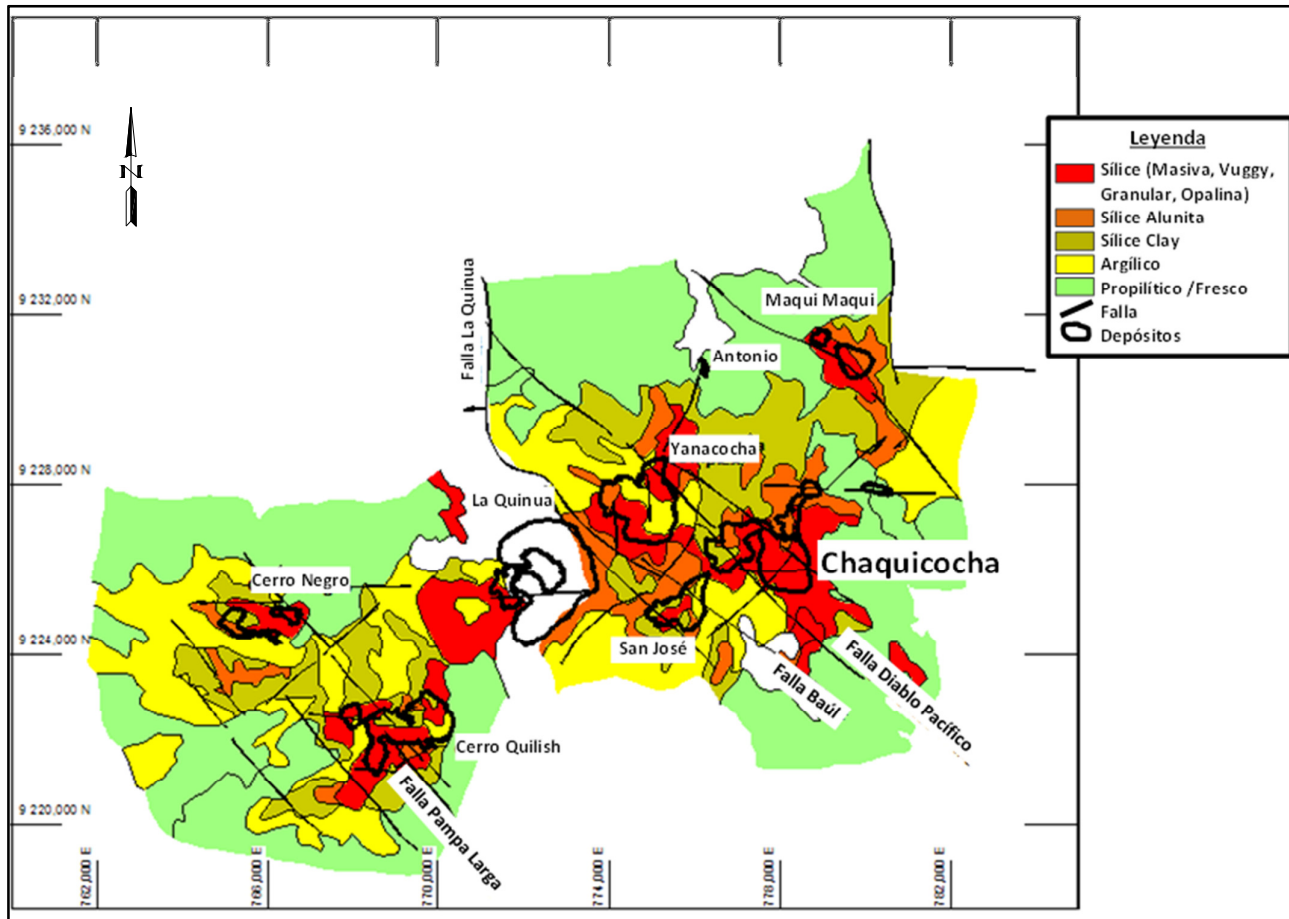


Figura 3.3 Plano simplificado de alteración del distrito minero Yanacocha (J. Gomes, S. Moore, L. Teal, 2003)

3.1.3 Geología Estructural

Los depósitos del distrito de Yanacocha se desarrollaron dentro del cinturón orogénico Andino central, una zona de deformación con orientación Nor-Oeste. Este cinturón orogénico consiste en rocas sedimentarias plegadas y falladas del Ordovícico al Cretácico los cuales infrayacen a rocas volcánicas del Terciario al Holoceno y son intruidas por rocas intrusivas félsicas del Terciario.

En el Norte del Perú, las rocas sedimentarias del Cretácico fueron afectadas por dos periodos principales de deformación compresiva con orientación Este-Noreste, la orogenia Inca I (Paleoceno, 59-55 Ma) y la orogenia Inca II (Eoceno medio, 43-44 Ma). El vulcanismo dentro de este cinturón se inició en el Eoceno temprano (45 Ma) siguiendo la deformación Inca I y continuó intermitentemente durante el periodo de deformación Inca II. En la región de Cajamarca, la deformación Inca I corresponde a plegamientos y fallamientos con tendencia Noroeste, mientras que la deformación Inca II corresponde a una deflexión a escala regional de la orogenia Inca I con plegamientos y sobreescurrecimientos con orientación Oeste-Noroeste a Este-Oeste de las rocas sedimentarias del Cretácico. Esta deflexión se conoce como la curvatura de Cajamarca y se interpreta que se formó como resultado del aumento del ratio de convergencia y un cambio del movimiento de subducción en la infrayacente placa de Nazca (Benavides-Cáceres, 1999).

El alineamiento Este-Noreste de los depósitos del distrito de Yanacocha fue controlado por la intersección del corredor estructural Chicama-Yanacocha (sistema Trasandino) y el sistema de fallas pertenecientes a las fases Inca I e Inca II (sistema Andino). Esta intersección controla los dominios estructurales, la

ubicación de las brechas y el emplazamiento de las intrusiones en el complejo volcánico, y posteriormente la ubicación de las múltiples fases de mineralización de oro (Teal & Benavides, 2010). Ver Figura 3.4.

3.1.4 Metalogenia

En la región Cajamarca, los depósitos se han desarrollado en un alineamiento NW, conocido como el cinturón metalogénico miocénico Cajamarca – Huaraz (Noble D. y Mckee; 1999, Sillioe R.; 2008). El cinturón está constituido por diversos yacimientos hidrotermales de diferentes estilos de mineralización. En el área, los depósitos están alineados a lo largo del corredor estructural “Chicama – Yanacocha”. Entre los principales depósitos se tiene:

- Los distritos polimetálicos Hualgayoc y San Cirilo, sistemas de mineralización tipo manto y vetas en cuerpos de reemplazamiento y skarn.
- Como sistemas porfiríticos están Minas Conga, El Galeno, Michiquillay y Cerro Corona.
- Yanacocha, Sipan, Tantahuatay y La Zanja, yacimientos epitermales de alta sulfuración.

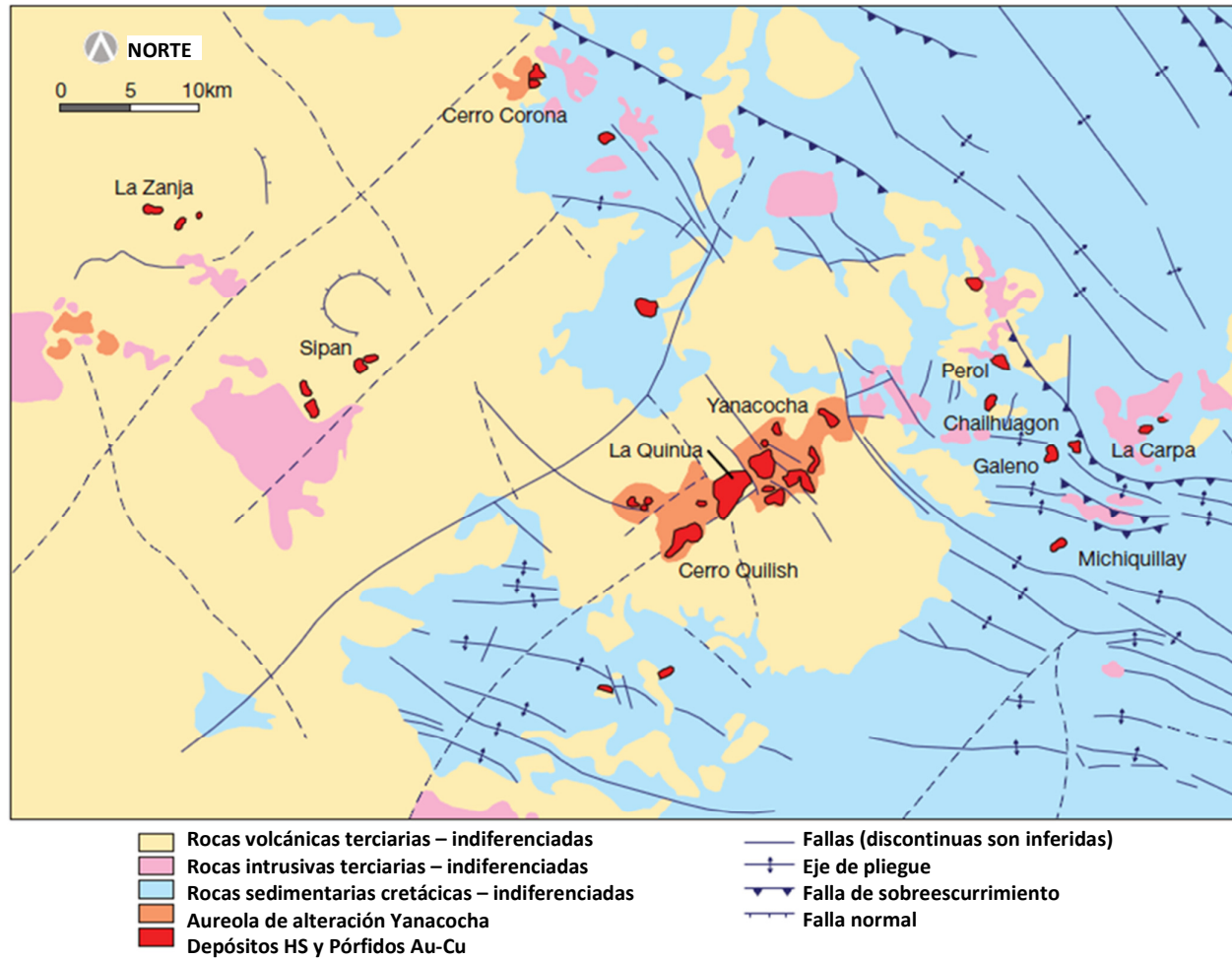


Figura 3.4 Geología estructural regional del área de Yanacocha mostrando los distintos depósitos en la región. (Benavides & Teal, 2010)

3.2 Geología Local

La Quinua es un gran depósito de oro aluvio glacial no consolidado en el distrito aurífero Yanacocha. La Quinua se divide en tres zonas denominadas Norte, Central y Sur.

El depósito La Quinua Sur se derivó de erosión, transporte y deposición de partículas de oro y clastos mineralizados de los depósitos de Yanacocha Sur y Yanacocha Oeste. Ver Figura 3.5. Sin embargo, una parte del oro puede haber resultado de la movilización química y reprecipitación. Las partículas de oro son en su mayoría de tamaño micrométrico, liberado dentro de la matriz de lodo, y difundido en clastos mineralizados. Se han observado partículas liberadas a 0,2 mm. El oro está diseminado por todo el depósito. Las gravas no consolidadas no forman afloramientos por lo que toda la superficie de pre-minado está cubierta de vegetación.

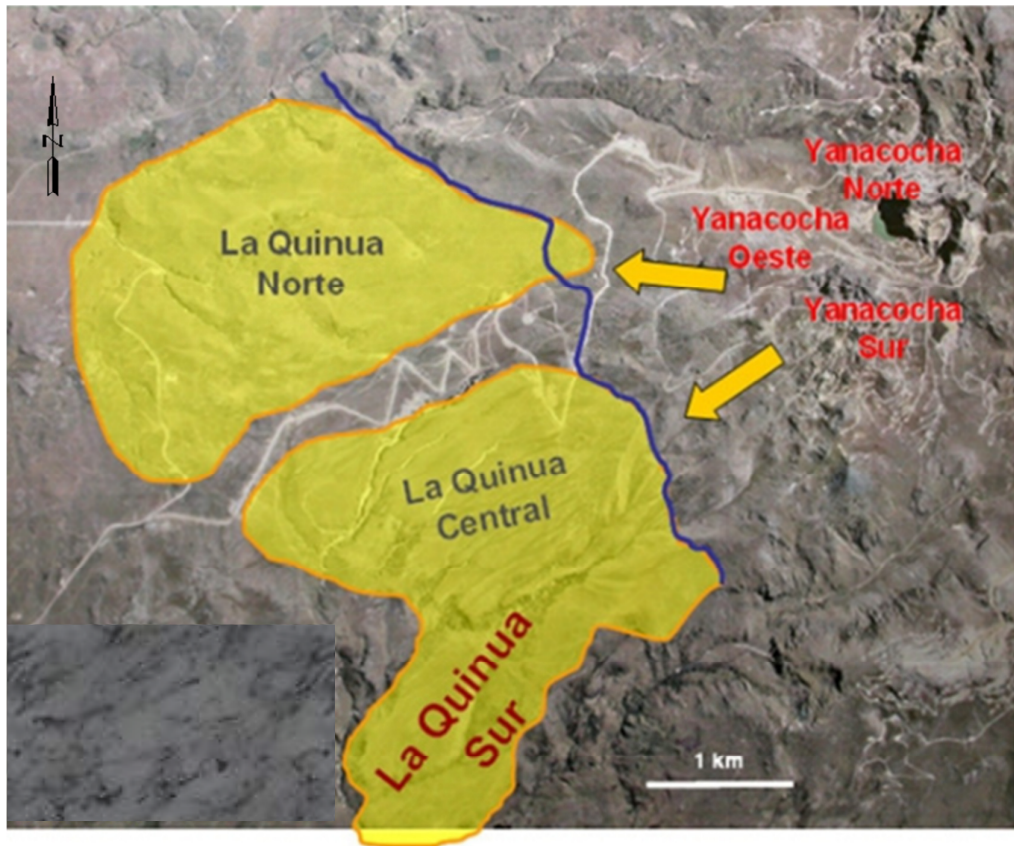


Figura 3.5 Formación del depósito La Quinua Sur Gravas

3.2.1 Estratigrafía

La columna estratigráfica de la zona en estudio es mostrada en la Figura 3.6 y está conformada por:

A. Un basamento conformado por rocas volcánicas frescas y alteradas, de dacitas, brechas hidrotermales, cenizas volcánicas y rocas intrusivas.

B. La Formación La Quinua o gravas aluviales está formada por dos secuencias o miembros inferior y superior. Estas secuencias marcan el relleno sedimentario de la cuenca La Quinua de dirección NO-SE que está controlada en gran parte por la

falla La Quinua que los separa de los yacimientos epitermales de alta sulfuración de Yanacocha:

1. La Secuencia Inferior formada por gravas en la parte proximal y gravas intercaladas de arenas y arcillas en la parte distal. Esta secuencia termina hacia el techo con secuencias cada vez más finas, es decir predominio de arcillas sobre gravas, principalmente en la parte distal. Sin embargo, la proporción de finos es menor que en La Quinua Central.

2. La Secuencia Superior se halla en discordancia sobre la Secuencia Inferior. Empieza con gravas de tamaños centimétricos que se hacen cada vez más gruesas, aumentando el tamaño de los clastos hacia el techo, y también hacia la parte proximal de la cuenca. En la parte basal de esta secuencia se ha desarrollado un nivel de gravas ferruginosas (ferricreta) con fragmentos de rocas, matriz arcillosa, conteniendo goethita y hematita diseminada, donde se presenta ferricretas. En el caso de La Quinua Sur, las gravas ferruginosas presentan un mayor espesor en la parte distal y tienen un máximo de 12 m.

3. Morrenas posteriores. La parte superior de la serie sedimentaria está compuesta por depósitos morrénicos, que al Sur de la cuenca son de muy poco espesor, como máximo 1 ó 2 m. y además se hallan muy localizados.

La falla La Quinua corta a las morrenas y a la Secuencia Superior (Ver Fotos 3.1 y 3.2).

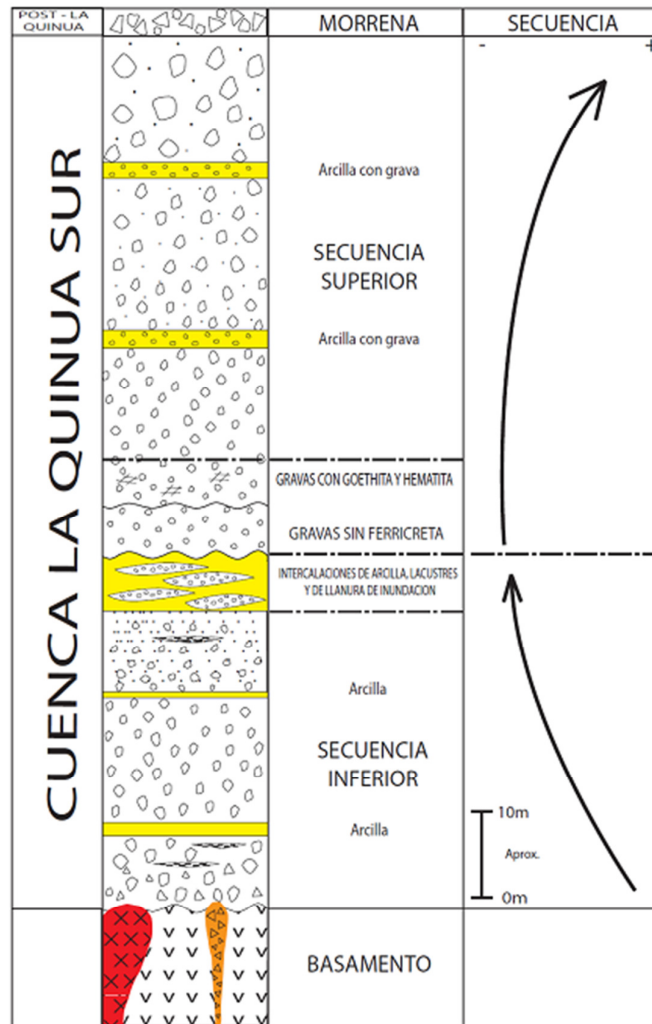
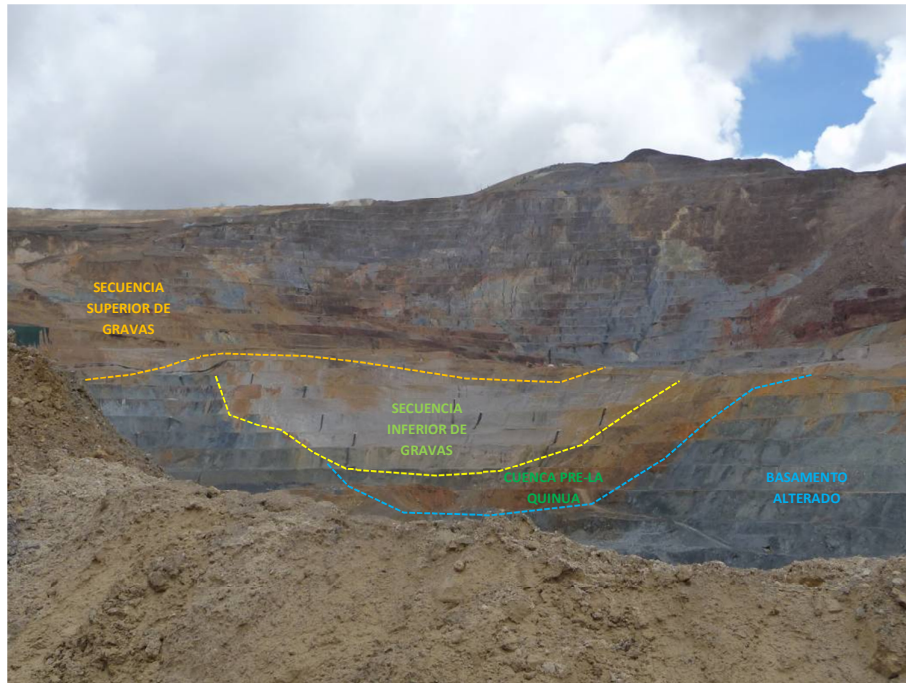
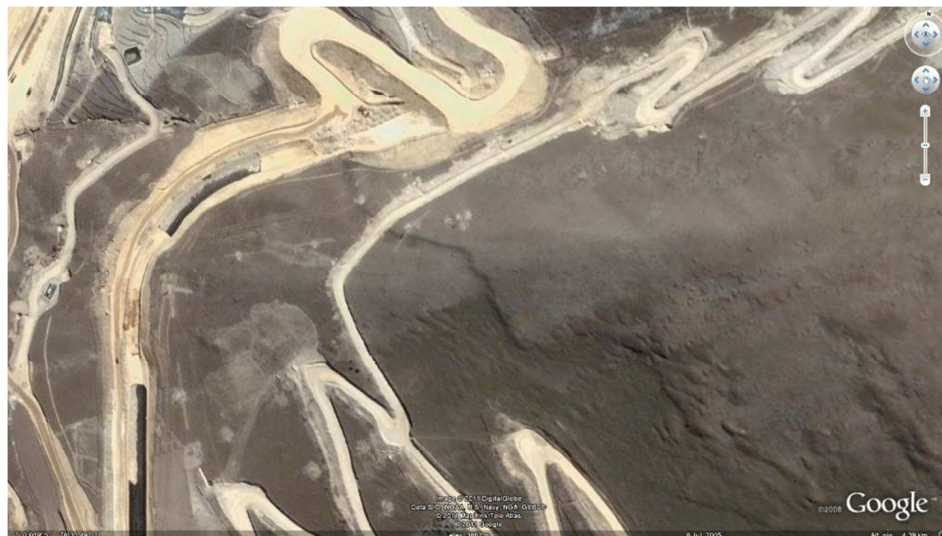


Figura 3.6 Columna estratigráfica de La Quinua Sur.



Fotografía 3.1 Vista mostrando las relaciones de contacto entre el basamento, la cuenca Pre-La Quinua, la Secuencia Inferior y Secuencia Superior de gravas.



Fotografía 3.2 Imagen satelital mostrando la falla activa de La Quinua con movimiento normal y sinistral, afectando a la Secuencia Superior de gravas de la cuenca La Quinua.

3.2.2 Geología Estructural

La cuenca La Quinoa Sur es parte de la cuenca La Quinoa y está localizada al Suroeste del distrito minero de Yanacocha inmediatamente al Oeste y pendiente abajo del centro volcánico que hospeda los depósitos de Au de Yanacocha Sur y Yanacocha Oeste. La Quinoa Sur está localizada al Sur de La Quinoa Central. (Ver Figura 3.5)

Las sub-cuencas La Quinoa Central y La Quinoa Sur están limitadas al NE y Este por la falla NO-SE La Quinoa. Los movimientos de esta falla han controlado la evolución de la cuenca.

El alto El Tapado es una estructura levantada del basamento que divide la cuenca Quinoa en dos (Quinoa Sur y Quinoa Central), ver Figuras 3.7 y 3.8. Este alto se prolonga a la cuenca La Quinoa Sur. El alto de dirección NO-SE más las fallas E-O y NE-SO han determinado que la cuenca presente sub-cuencas más pequeñas y que en algunas de ellas se hayan desarrollado los sistemas lacustres y palustres (sedimentos de arrastre de los glaciares), particularmente en la evolución de la Secuencia Inferior de La Quinoa Central.

Por otro lado, la falla Rio Grande es el límite Oeste de la cuenca La Quinoa Central (Figura. 3.7) y parece haber estado activa en algunas épocas ya que hay un pequeño aporte de gravas de conos aluviales desde el oeste y suroeste. La falla Rio Grande habría formado un relieve que jugó como una trampa estructural

permitiendo el desarrollo de un sistema lacustre. Sin embargo hacia la Quinua Sur, los horizontes lacustres tienden a ser muy delgados o desaparecen.

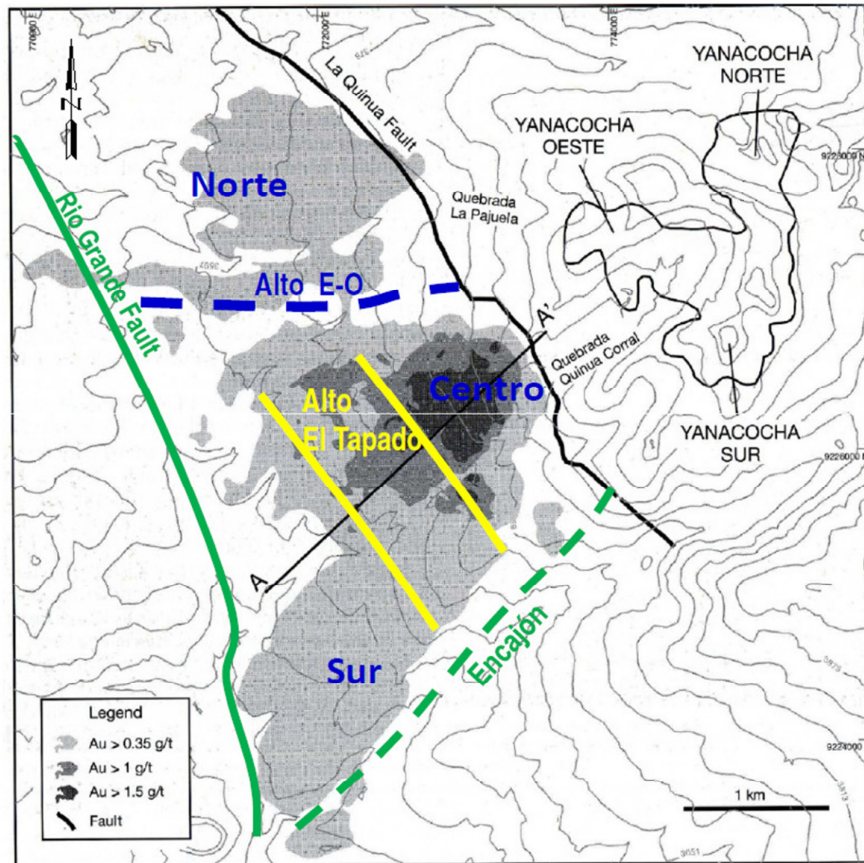


Figura 3.7 Ubicación de la cuenca La Quinua Sur y esquema estructural mostrando las fallas La Quinua y Rio Grande, así como el alineamiento Encajón (Mallette et al., 2004).

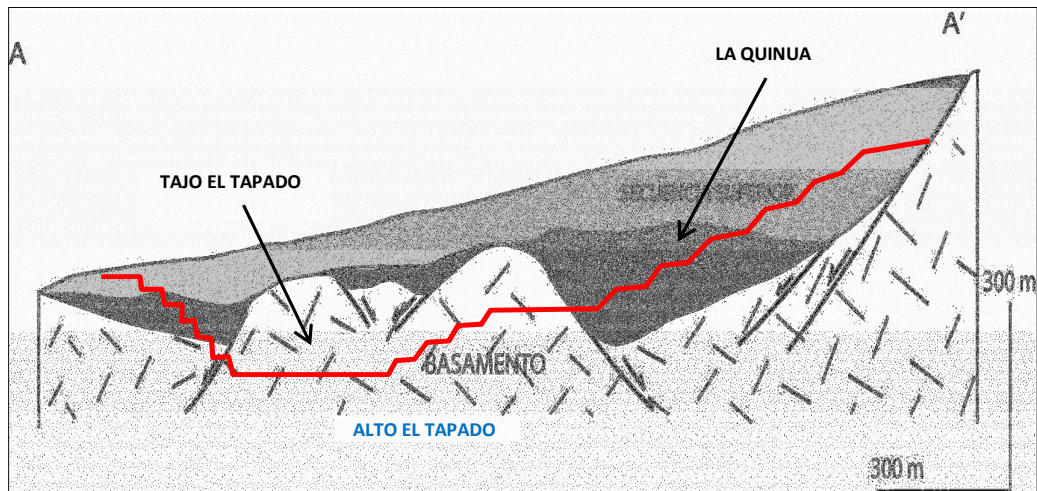


Figura 3.8 Sección estructural mostrando la Secuencia Inferior y la Secuencia Superior de la cuenca La Quinua, el alto el Tapado (Modificado de Mallette et al., 2004). El modelo de esta sección también es válido para La Quinua Sur.

3.3 Contexto Hidrológico

La Quinua Sur se ubica en el sector alto de la sub cuenca del Río Grande entre el Río Grande, las Quebradas Callejón, Pozo Seco y Encajón. La sub cuenca Río Grande tiene un área total de 20.52 km². (Figura 3.9)

En términos generales en la zona de estudio, el flujo discurre desde la zona del tajo de La Quinua Sur en dirección Suroeste. En el área circundante a la zona de estudio, el principal río que forma esta subcuenca es El Río Grande.

La parte superior este de la sub cuenca Río Grande está constituida por una serie de quebradas casi paralelas que se juntan para formar el Río Grande. Los flujos de agua (drenaje) de las Quebradas más importantes de esta sub cuenca se describen a continuación.

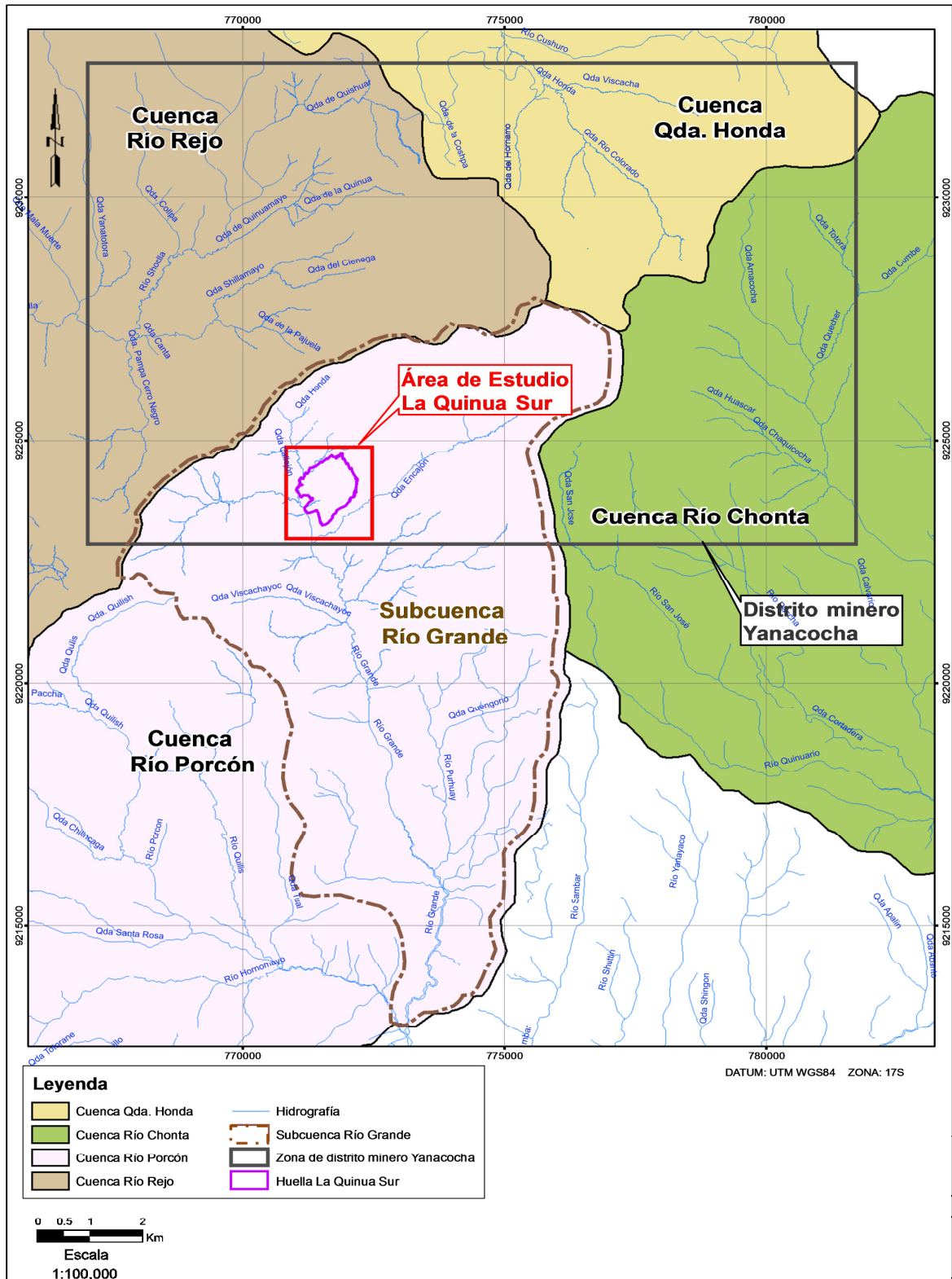


Figura 3.9 Ubicación general y Cuencas

Quebrada Callejón

La Quebrada Callejón se originaba en el área actualmente ocupada por una parte del Tajo La Quinoa. Esta quebrada durante su recorrido recibe los aportes de la Quebrada Ornamo, y aguas abajo se une con la Quebrada Pozo Seco para formar el Río Grande.

Quebrada Pozo Seco

La Quebrada. Pozo Seco se origina de la confluencia de la Quebrada. Tuyo (también denominada Quebrada Muschuden) y la Quebrada Derrumbe (también denominada Quebrada Yanacocha), en su recorrido recibe el aporte de la Quebrada Pecho Colorado, luego se junta con la Quebrada Callejón para formar el Río Grande. Los canales Encajón Collotán y Quishuar se inician en esta quebrada.

Quebrada Encajón

La Quebrada Encajón está ubicada en la parte Noreste de la sub cuenca del Río Grande. El área de drenaje de la Quebrada Encajón es de aproximadamente 1,16 ha. También hay una serie de filtraciones ácidas que ocurren naturalmente y que descargan agua en la quebrada, en la parte baja del drenaje. El Canal Llagamarca (también llamado Yanacocha) atraviesa el drenaje de Norte a Sur. La Quebrada Encajón fluye aproximadamente 6 km al Sur Oeste, antes de entregar sus aguas al Río Grande.

CAPÍTULO IV

INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Para comprender mejor la hidrogeología del acuífero constituido por gravas del proyecto LQSG (La Quinoa Sur Gravas) y los sistemas de acuíferos del macizo rocoso subyacente y gradiente arriba, se llevó a cabo un programa de perforación de Circulación Inversa.

El programa de perforación de circulación inversa sirve para dos propósitos:

- (1) Realizar pruebas hidráulicas del depósito de gravas y los sistemas del macizo rocoso subyacentes y gradiente arriba.
- (2) Conseguir piezómetros terminados limpios que se pueden utilizar en el futuro para tomar muestras representativas de la calidad del agua de los sistemas acuíferos como línea de base.

4.1 Perforación Hidrogeológica - RCD

La figura 4.1 ilustra la ubicación de los cuatro piezómetros (LQDST-039, LQ-1149, LQ-1150, y LQ-1151) instalados durante la campaña de perforación RCD en los

meses de Febrero y Marzo de 2012. Dos de los piezómetros se instalaron (LQ 1149 y LQ1150) en el macizo rocoso para determinar las condiciones hidráulicas debajo de las gravas y el gradiente arriba hacia el depósito de grava. Los otros dos piezómetros (LQDST-039 y LQ-1151) se instalaron en el depósito de grava a macizo rocoso, luego se colocó un sello de bentonita entre el macizo rocoso y las gravas y el piezómetro se entubó con filtros o tubería ranurada cortando las gravas de 10 a 20 metros dentro la superficie saturada. Las Figuras 4.2, 4.4, 4.5 y 4.6 ilustran el registro geológico y la instalación de los piezómetros.

4.1.1 Perforación para piezómetros

La perforación de piezómetros se lleva a cabo con el fin de adquirir los conocimientos geológicos e hidrogeológicos de la zona de estudio.

En las perforaciones se han instalado piezómetros abiertos para obtener información geológica y resultados de pruebas hidráulicas que se utilizarán para definir el modelo hidrogeológico conceptual que se desarrolla en el capítulo VII.

En la figura 4.1 y en la Tabla 4.1 se muestra la ubicación de los cuatro piezómetros.

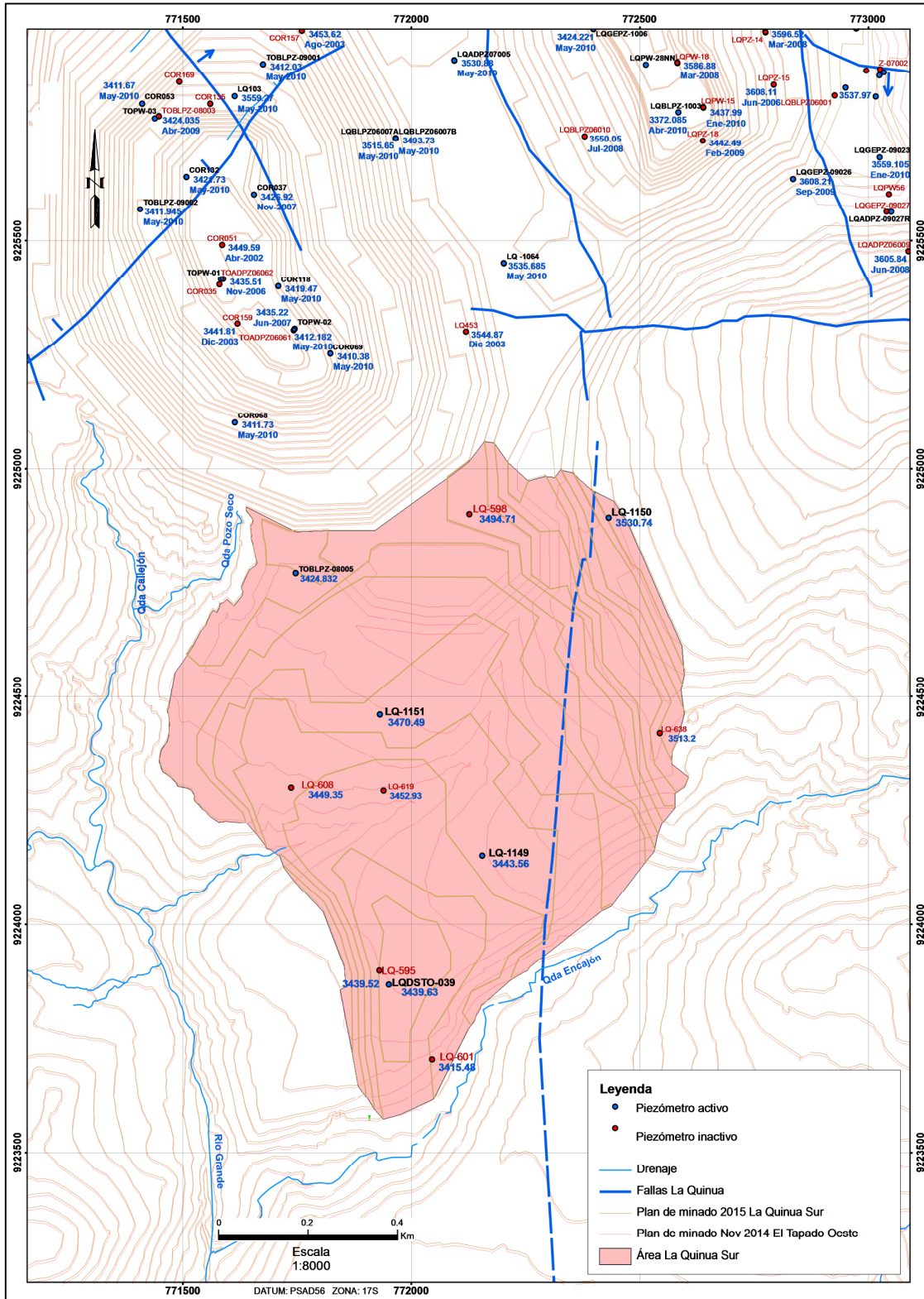


Figura 4.1 Área del proyecto La Quinua Sur Gravas y niveles de agua

Tabla 4.1. Ubicación de piezómetros

Código del Pozo	Localidad	Distrito	Provincia	Departamento	Coordenadas UTM		Altitud del Terreno (msnm)
					Este	Norte	
LQDST-039	La Quinua	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	771693	9223505	3474
LQ-1149	La Quinua	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	771897	9223787	3487
LQ-1150	La Quinua	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	772174	9224529	3578
LQ-1151	La Quinua	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	771673	9224097	3490

4.1.2 Descripción técnica de los piezómetros

Los piezómetros se han instalado en pozos perforados por el método de roto percusión con circulación inversa en diámetros de perforación de 5¼" con tuberías PVC de 1.5" y 2" ranurada y ciega en función de la geología hallada en la perforación. Los tramos ranurados fueron colocados desde el fondo del pozo hasta el límite superior de la zona saturada del acuífero y tubería ciega hasta la boca del pozo. Se colocaron empaques de filtro de grava y un sello de bentonita en el término del empaque de gravas.

Las profundidades de los pozos pilotos fueron estimadas según el objetivo de investigación y el modelo geológico de bloques disponible en la fecha del diseño de los piezómetros. A continuación se describen los piezómetros habilitados:

LQDST-039

El piezómetro LQDST-039 se encuentra ubicado cerca de la región más profunda de las gravas en el extremo sur del depósito (Figura 4.1). El piezómetro se instaló

al final de una serie de 10 a 12 horizontes de grava con diversos grados de clasificación y contenido de arcilla, desde la superficie hasta 132 metros. La arcilla y el contenido de finos generalmente aumentan con la profundidad mientras que el grado de clasificación disminuye. Se encontró macizo rocoso después de penetrar una capa de suelo transicional y roca contenida en una matriz de arcilla de alta plasticidad. El macizo rocoso subyacente está compuesto de un material piroclástico alterado a arcilla.

A pesar de que el nivel estático del agua era de 34.4 metros por debajo de la superficie, la producción de agua durante la perforación fue baja y no se logró su elevación por medio de aire comprimido por encima de 135 metros. La elevación de agua por medio de aire comprimido se incrementó de menos de 0.5 l/s a 1 l/s justo por encima de la capa de arcilla cerca del contacto de macizo rocoso, y disminuyó a menos de 0.25 l/s después de penetrar en el macizo rocoso debajo del contacto. En lo que respecta al contacto del macizo rocoso, la temperatura del agua disminuyó de 18 a 11 grados Celsius, el pH bajó de 8.2 a 7.6 y la conductividad eléctrica se incrementó de menos de 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ a más de 250 $\mu\text{s}/\text{cm}$, que indica el encuentro de una nueva fuente de agua al penetrar el macizo rocoso. El cambio en los parámetros de campo sugiere una separación del acuífero de gravas del acuífero del macizo rocoso subyacente, presumiblemente debido a la capa de arcilla encontrada en el contacto. El piezómetro se entubó con filtros o tubería ranurada a lo largo de las gravas debajo de la superficie freática (34.4 m, 3,439.8 msnm) entre los 53 y 131 metros, ver Figura 4.2.

Las pruebas de inyección indicaron que la permeabilidad de las gravas es menor que la prevista en el orden de 5×10^{-7} a 6×10^{-8} m/s (ver Tabla 4.2). La recuperación de la prueba de inyección se le conoce como slug test y el resultado se observa en la Tabla 4.3.

Una interpretación posterior de los resultados de las pruebas proporciona información que todavía no ha sido procesada, tal como se ilustra en la Figura 4.3. Durante el período de inyección el aumento del nivel de agua es 13 metros con un caudal de 1.5 l/s.

Durante la prueba el nivel de agua no recupera su nivel inicial, debido a que en el período de inyección, el agua se acumulaba por encima de la superficie freática original. El análisis de las pruebas concuerda con el resultado mostrado en las Tablas 4.2 y 4.3, y se concluye que la conductividad hidráulica en la prueba de inyección y en la de recuperación es baja. Es importante destacar que el valor bajo de la recuperación indica la baja transmisividad de la roca.

La permeabilidad más baja encontrada en la prueba de recuperación se debe a la reducción de la gradiente hidráulica entre el agua en la columna del piezómetro y el nivel de agua que rodea inmediatamente al piezómetro en la acumulación creada por el agua inyectada.

De las pruebas realizadas en este piezómetro se concluye que las gravas presentan una transmisividad relativamente baja.

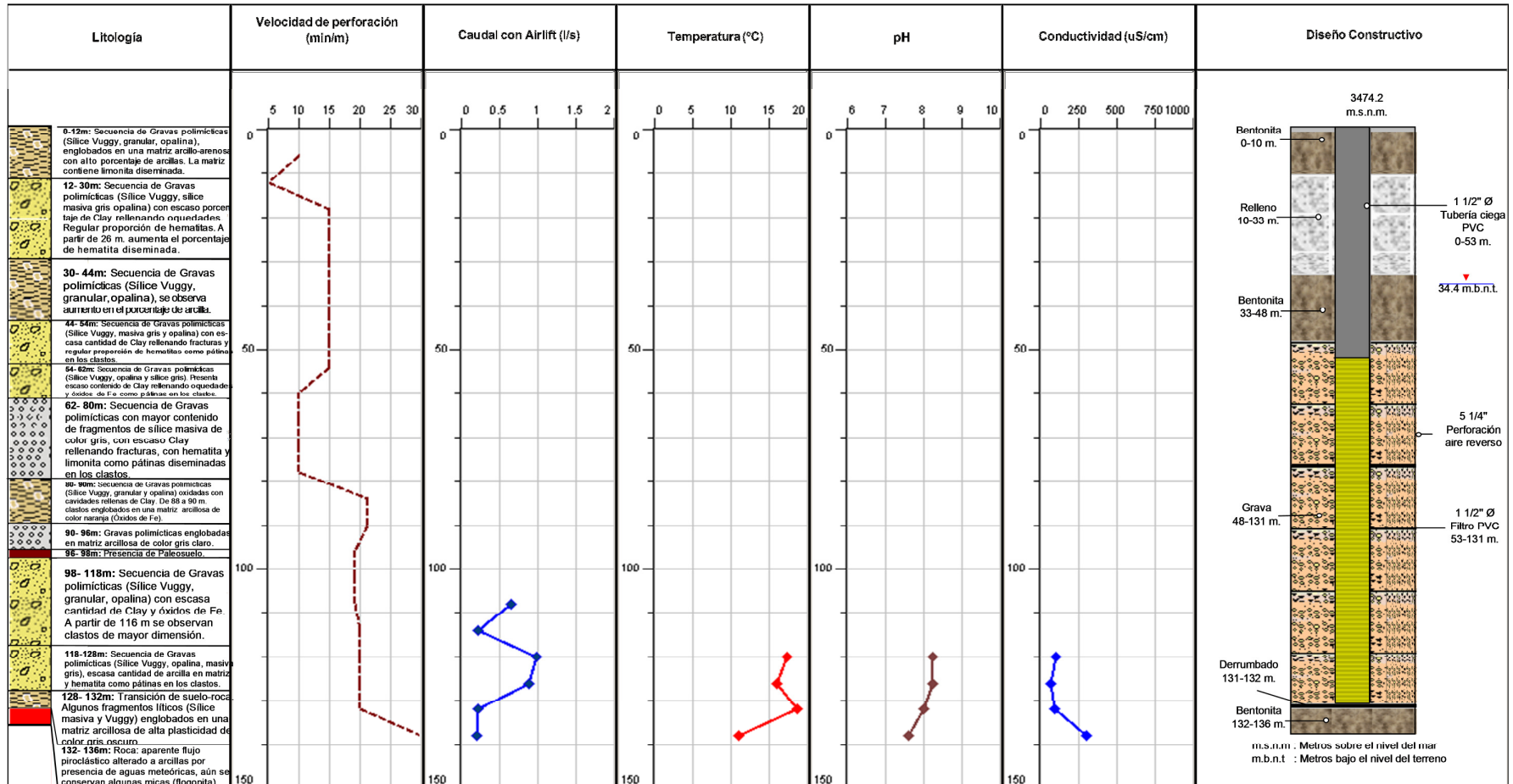


Figura 4.2 Registro de completación piezómetro LQDST-039

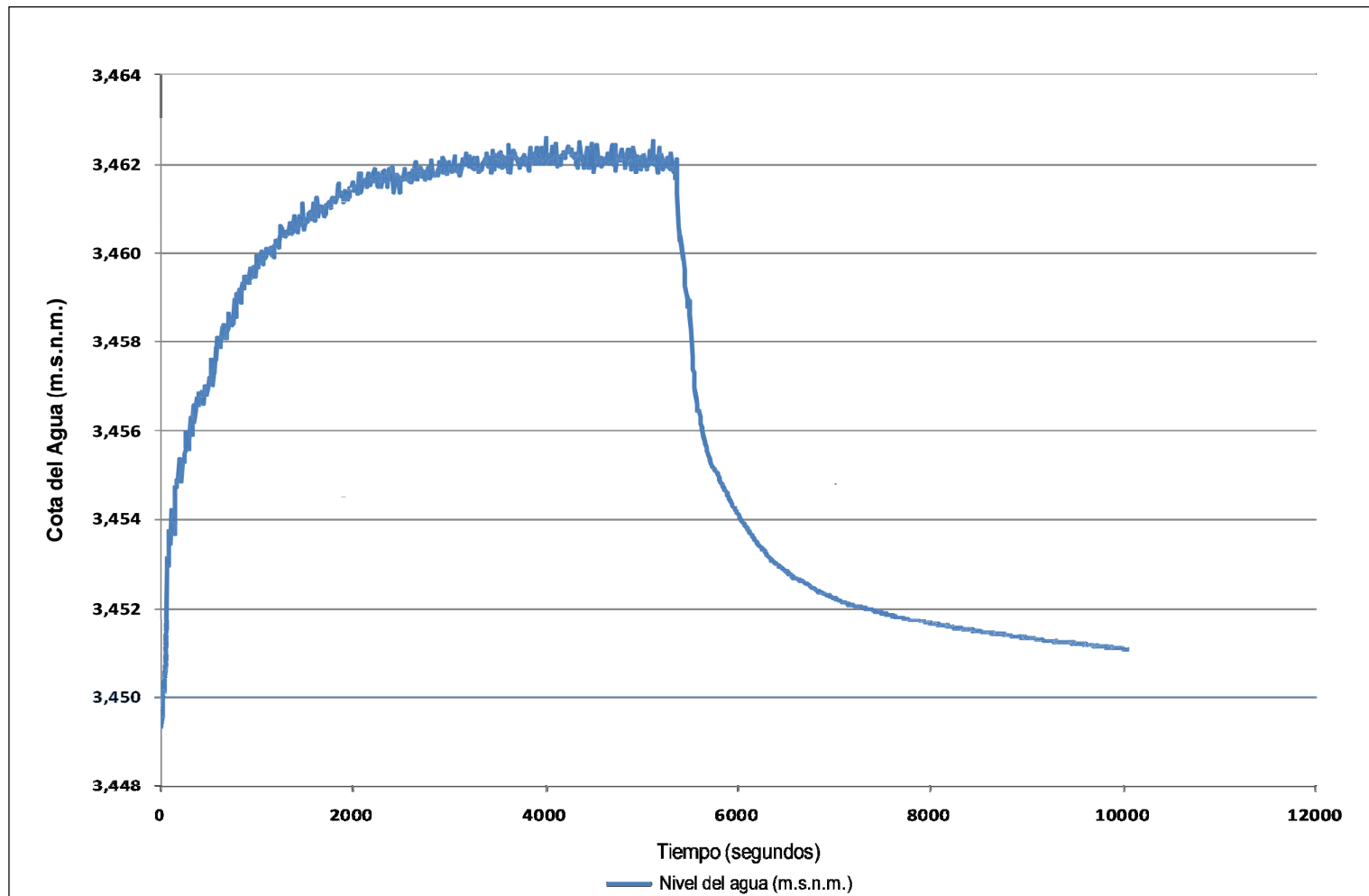


Figura 4.3 Prueba de inyección piezómetro LQDST-039

LQ-1149

El piezómetro LQ-1149 se encuentra ubicado en la parte Central Sur del área del proyecto en una región relativamente profunda del depósito de grava (Figura 4.1). El piezómetro fue perforado atravesando varios horizontes amplios de grava con diversos grados de clasificación y contenido de arcilla penetrando en última instancia una capa gruesa (de 116 a 134 metros) de gravas incluida en una matriz de arcilla antes de interceptar un macizo rocoso de transición a los 134 metros. El piezómetro luego se perforó hasta una profundidad total de 180 metros en el macizo rocoso de andesitas subyacentes (de 134 a 180 metros).

A pesar de que el nivel estático es 43.6 metros por debajo de la superficie, la elevación de agua por medio de aire comprimido no fue significativa por encima de 120 metros, y al igual que el piezómetro LQDST-039, la tasa de elevación se incrementó al contacto con el macizo rocoso y luego disminuyó conforme la perforación penetraba en el macizo rocoso. De forma similar que en el LQDST-039, el pH bajó de 8.9 a 7.6, la conductividad eléctrica se incrementó de menos de 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ a más de 250 $\mu\text{s}/\text{cm}$, mientras que la temperatura se incrementó de 12 a 15 grados Celsius. Nuevamente, este es un indicador importante de haber encontrado una nueva fuente de agua en el contacto con el macizo rocoso y una separación entre el acuífero constituido por gravas y el acuífero de macizo rocoso subyacente mediante la barrera de arcilla gruesa encontrada encima del contacto del macizo rocoso. El piezómetro se entubó con filtros desde 160 a 180 metros en la andesita. Pruebas subsiguientes del piezómetro indicaron que la permeabilidad

de la andesita es moderada en el orden de 1×10^{-4} a 1×10^{-7} m/s, en base al análisis de la prueba de inyección y de recuperación de la prueba “slug test”. Ver Tablas 4.2 y 4.3 y Figura 4.4.

Al igual que en las pruebas del LQ-1149, el nivel de agua no regresó al nivel de agua original, lo que sugiere que se produjo una acumulación en el macizo rocoso subyacente e indica una transmisividad relativamente baja para esta unidad de roca.

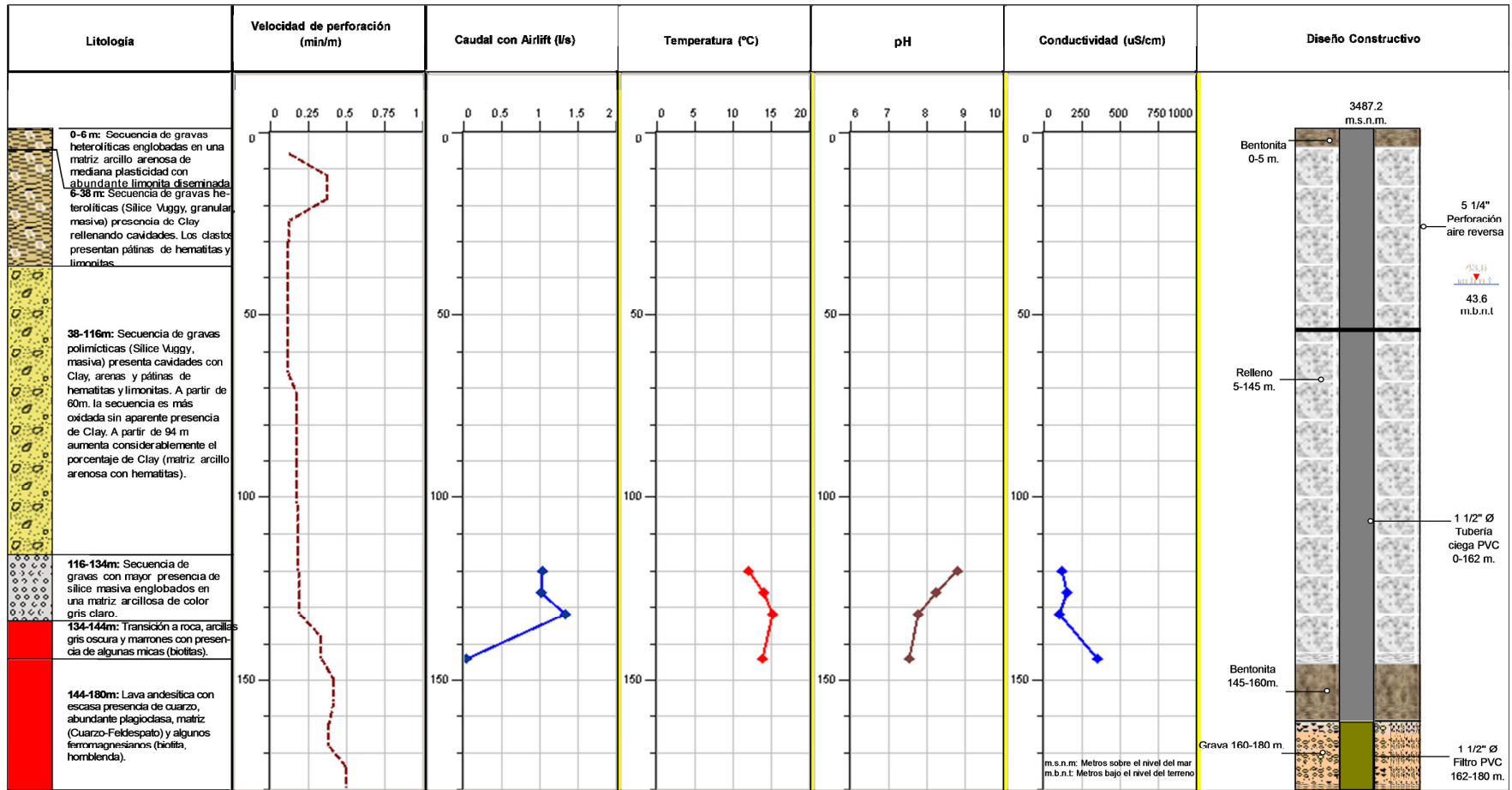


Figura 4.4 Registro de completación piezómetro LQ-1149

LQ-1150

El piezómetro LQ-1150 se encuentra ubicado en el borde Nororiental del depósito de grava de LQSG, donde la grava se torna más fina (Figura 4.5). El piezómetro se encuentra ubicado en el macizo rocoso gradiente arriba en el lado Este de la falla del Tapado que va en dirección Norte a Sur a través del depósito que se observa en la Figura 4.1. La perforación interceptó el macizo rocoso a 52 metros y alcanzó una profundidad total de 180 metros. El macizo rocoso consistió principalmente de una capa gruesa de andesita (52 a 158 metros) desde el contacto con las gravas hasta que la perforación encontró macizo rocoso alterado a sílice granular a una profundidad de 158 metros hasta el final de la perforación a 180 metros.

El nivel de estático para este piezómetro está a 47.3 metros por debajo de la superficie. La elevación de agua por medio de aire comprimido se inició a 108 metros, pero se mantuvo bajo (<0.25 l/s) hasta encontrar sílice granular a 158 metros. La temperatura disminuyó de 17 a 13 grados Celsius entre la andesita y la sílice granular, mientras que el pH se mantuvo relativamente constante en aproximadamente 8 unidades de pH. La conductividad eléctrica varió ampliamente en la andesita de 450 a más de 1100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en la andesita inferior y disminuyó a menos de 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en la sílice granular subyacente. El piezómetro se entubó con filtros de 90 hasta 180 metros, cortando una parte de andesita y de sílice granular subyacente. Los resultados de las pruebas del piezómetro para la sílice granular concuerdan con los observados en esta unidad a través de toda la

propiedad de Yanacocha, en el orden de 2×10^{-6} m/s para el análisis de recuperación e inyección. Ver Tablas 4.2 y 4.3 y Figura 4.5.

La prueba de inyección, especialmente en la parte de recuperación, pareció verse afectada por el sistema dual de los dos tipos de macizo rocoso. Durante la inyección, siendo la sílice más permeable que la andesita, recibió la mayor parte del agua y controla la forma de la curva de respuesta de inyección. No obstante, durante la fase de recuperación de la prueba, debido a que el sistema retornó a su estado de presión original, la respuesta se controla durante el inicio mediante el flujo rápido de agua a la sílice de mayor permeabilidad y al final mediante la recuperación lenta de la presión de agua en la andesita de menor permeabilidad. La andesita, al presentar menor permeabilidad recupera la presión de agua estática original de manera más lenta, afectando con ello la curva de recuperación del período final. El análisis de esta prueba se concentró en el análisis de la parte de la sílice granular de las curvas de recuperación en lugar de en el análisis de la andesita. Por consiguiente, el análisis de la curva de recuperación se concentró en la recuperación inicial. Ver Anexo A.

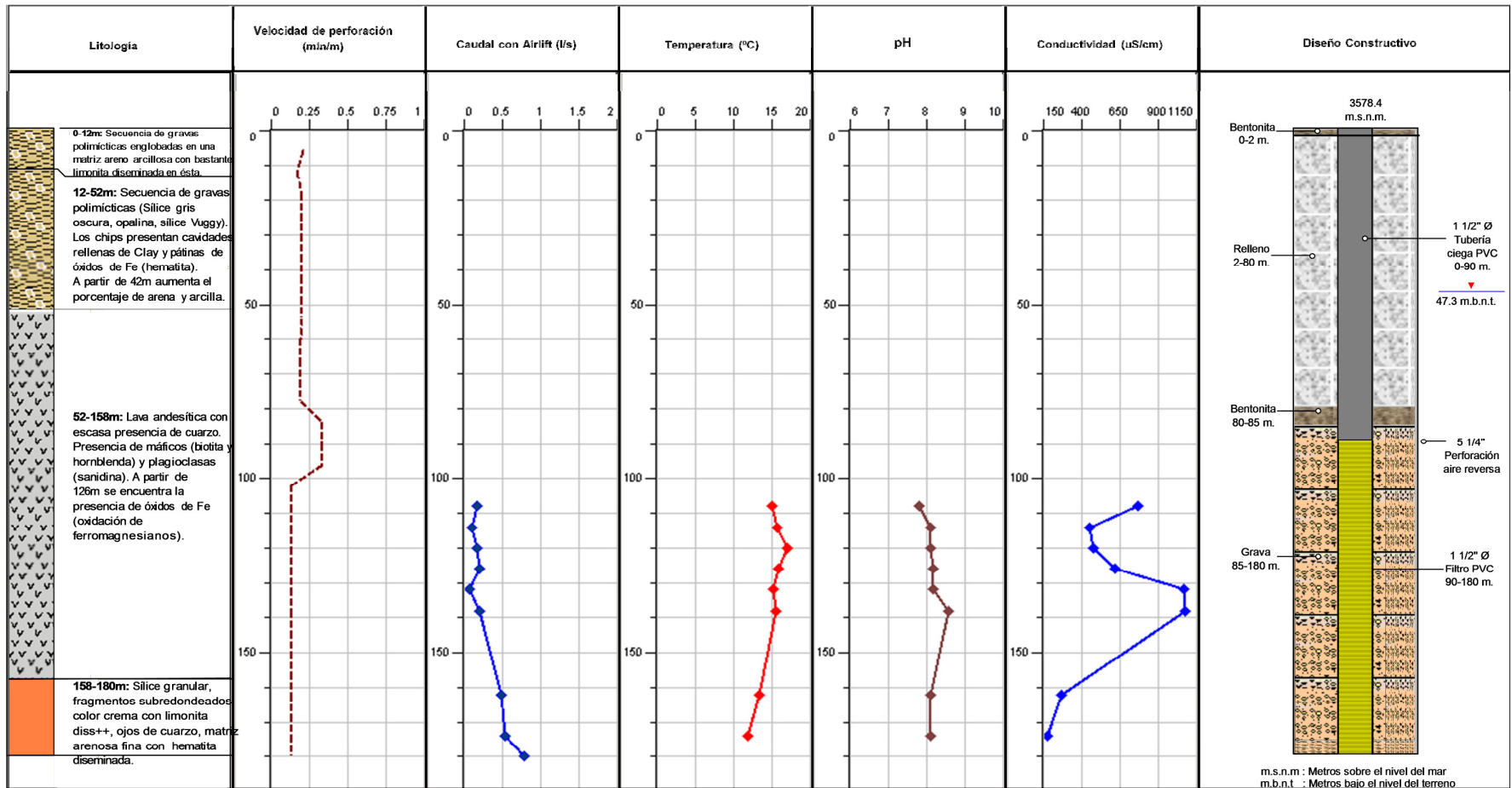


Figura 4.5 Registro de completación piezómetro LQ-1150

LQ-1151

El piezómetro LQ-1151 se encuentra ubicado en la parte Central Occidental del depósito de grava de LQSG (La quinua Sur Gravas), donde la grava presenta una profundidad moderada (Figura 4.6). Al igual que con los demás piezómetros, la perforación encontró varias capas de grava con diversos contenidos de arcilla. La capa superior desde la superficie hasta 36 metros se encuentra más clasificada con un mayor contenido de sílice; y su contenido de arcilla se incrementa con la profundidad. Desde los 36 metros hasta los 60 metros, las gravas presentan menor clasificación con un mayor contenido de arcilla. Desde los 60 hasta los 90 metros, se encontró una secuencia transicional gruesa con un alto contenido de arcilla antes de llegar al macizo rocoso de andesita. Se encontró macizo rocoso de andesita a partir de los 92 metros hasta la profundidad total de 140 metros.

El nivel de estático para el piezómetro es de 19.5 metros por debajo de la superficie. No obstante, los caudales de la elevación de agua por medio de aire comprimido fueron significativos por encima de 50 metros, aumentando únicamente después de penetrar más de 20 metros de macizo rocoso. La temperatura del agua en el macizo rocoso fue de 16 grados Celsius, el pH se encontró entre 7 y 8 y la conductividad fue menor de 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

El piezómetro se entubó con filtros de 25 metros hasta 127 metros a lo largo de la Secuencia Inferior de gravas, la arcilla y el macizo rocoso de andesita subyacente. Los resultados de la prueba del piezómetro indican un sistema de porosidad y

permeabilidad duales, tal como se podría esperar debido al intervalo de entubado filtrante que atraviesa varias unidades muy diferentes; por lo tanto, se espera que la permeabilidad tenga una amplia variación. Ver Figura 4.6.

El análisis de inyección y las pruebas de recuperación del período inicial para las unidades de grava indican una permeabilidad de 1×10^{-7} a 4×10^{-7} m/s para la inyección y recuperación, respectivamente, lo cual concuerda con los resultados de la prueba de inyección del LQDST-039 para las unidades de grava. El análisis de la prueba de recuperación del período final indica que la permeabilidad para la capa de arcilla podría encontrarse en el rango de 2×10^{-8} m/s. Ver Tablas 4.2 y 4.3.

Además de la permeabilidad y porosidad dual del LQ-1151, el nivel de agua no regresó a su elevación original similar a las pruebas del LQDST-039, lo cual indica nuevamente la formación de una acumulación de agua por encima de la superficie freática durante la inyección, sugiriendo una transmisividad relativamente baja para las gravas, que concuerda con las pruebas en el LQDST-039 (Figura 4.7).

La diferencia observada entre el valor de permeabilidad resultante de la inyección (1×10^{-7} m/s) y el de la recuperación (4×10^{-7} m/s) se relaciona con la acumulación de agua por encima de la superficie freática. La acumulación de agua reduce la carga diferencial (gradiente) entre el nivel de agua inicial en la parte de recuperación de la prueba y el de la nueva superficie freática (acumulada).

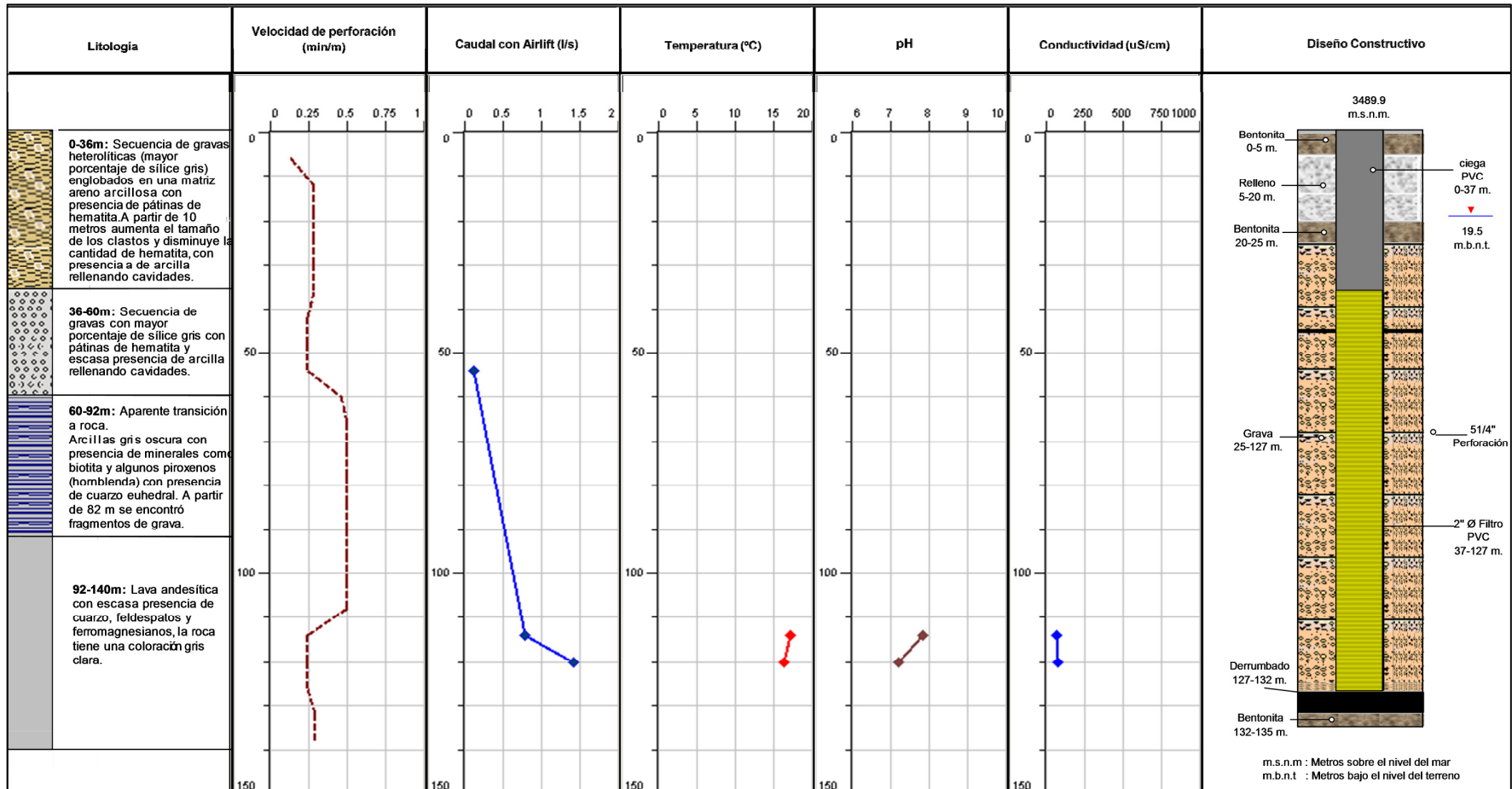


Figura 4.6 Registro de completación piezómetro LQ-1151

La gradiente reducida resultante se expresa como un resultado de menor permeabilidad para el análisis de la prueba de recuperación.

Tabla 4.2 Análisis de las pruebas de inyección

Piezómetro	Prueba	(m/s)	Método de análisis	Unidad litológica
LQDST-039	1a prueba	4.72E-07	Theis	gravas
LQ-1149	1a prueba	1.20E-06	Papadopulos-Cooper	andesita
	2a prueba	1.01E-06	Papadopulos-Cooper	
LQ-1150	1a prueba	2.39E-06	Papadopulos-Cooper	sílice granular
LQ-1151	1a prueba	1.89E-07	Cooper Jacob	gravas
	2a prueba	1.15E-07	Cooper Jacob	

Tabla 4.3 Análisis de la prueba de recuperación de inyección (slug test)

Piezómetro	Prueba	(m/s)	Método de Análisis	Unidad litológica
LQDST-039	1 prueba	6.43E-08	Bouwer & Rice	gravas
		5.90E-08	Hvorslev	
LQ-1149	1a prueba	4.05E-07	Bouwer & Rice	andesita
		4.53E-07	Hvorslev	
	2a prueba	1.60E-07	Bouwer & Rice	
		1.83E-07	Hvorslev	
LQ-1150	1a prueba	1.82E-06	Bouwer & Rice	sílice granular
		1.39E-06	Hvorslev	
LQ-1151	1a prueba	3.15E-07	Bouwer & Rice	gravas
		3.35E-07	Hvorslev	
	2a prueba	4.43E-07	Bouwer & Rice	
		4.33E-07	Hvorslev	
LQ-1151	1a prueba	2.25E-08	Bouwer & Rice	arcilla
		2.14E-08	Hvorslev	
	2a prueba	1.27E-08	Bouwer & Rice	
		2.15E-08	Hvorslev	

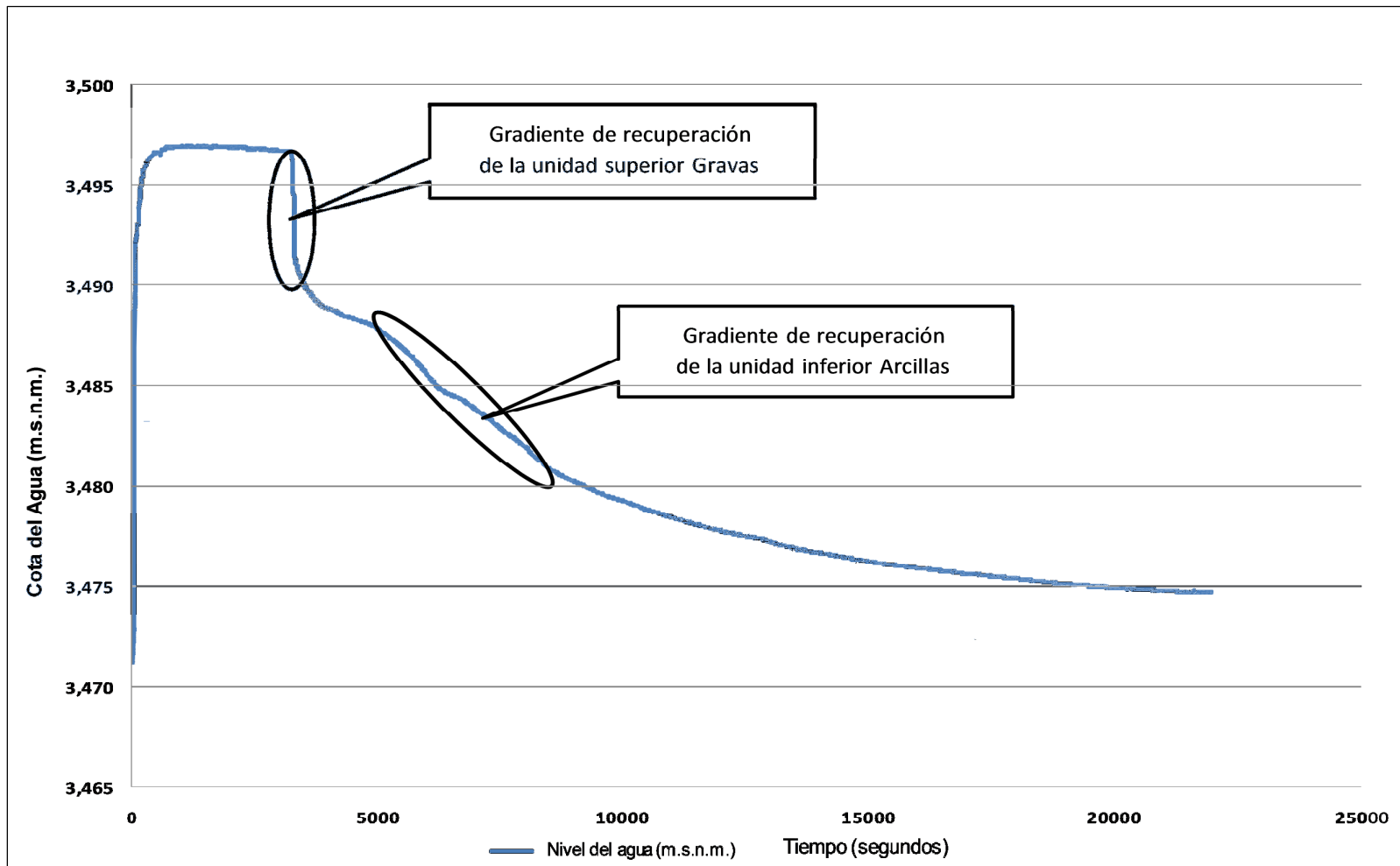


Figura 4.7 Prueba de inyección piezómetro LQ-1151 recuperación

4.1.3 Metodología de pruebas de inyección

Se llevaron a cabo pruebas de inyección en cada piezómetro mediante la inyección de agua dentro del PVC con un caudal constante desde una cisterna. Los caudales variaron de 1.5 a 2 l/s, dependiendo de la permeabilidad percibida del sistema.

El período de inyección fue de una hora. Cuando la inyección de la cisterna culminó, se cerró la válvula y se midió la recuperación del nivel del agua hasta que estuvo estable. Para medir la presión del agua durante las fases de inyección y recuperación de la prueba, se instaló un Diver (sensor) equipado con cable de datos debajo del nivel estático original del agua y se registraron las variaciones del nivel de agua con un intervalo de 10 segundos durante el tiempo de duración de la prueba, desde el inicio de la inyección hasta que se determinó la recuperación estable.

El análisis de inyección y recuperación se llevó a cabo utilizando el software estándar reconocido por la industria: Aqtesolve Pro, versión 4.5 de HydroSOLVE, Inc. para el análisis de la prueba “slug test” (Prueba de recuperación) y prueba de inyección. El análisis de la prueba se llevó a cabo en la prueba de inyección, reconociendo que una prueba de inyección es equivalente a una de bombeo inversa y que se puede utilizar para obtener valores razonables de permeabilidad. No obstante, por tratarse de una prueba de un solo pozo a corto plazo, no se puede utilizar para obtener coeficientes de almacenamiento razonables. Los métodos de solución para las pruebas de recuperación de inyección varían, dependiendo de los

supuestos de las pruebas individuales y la realización como piezómetro para grava o macizo rocoso. Las interpretaciones típicas obtenidas utilizaron la solución Cooper-Jacob, Papodapolus & Cooper y Theis. El análisis de la prueba “slug test” se llevó a cabo en la parte de recuperación de la prueba utilizando las soluciones estándar de Bouwer & Rice y Hvorslev.

4.2 Instrumentación Hidrogeológica

La instrumentación hidrogeológica tiene por objetivos principales, definir los mecanismos actuantes en las inestabilidades y monitorear los niveles de agua en el tajo. De esta manera se pueden aplicar modelos para predecir eventos de deslizamientos catastróficos y monitorear la efectividad de los métodos de estabilización en el futuro tajo. Entre los equipos de instrumentación hidrogeológica utilizados tenemos: piezómetros de tubo abierto y en el futuro se contará con piezómetros de cuerda vibrante. En el Anexo B, se detalla las características de cada equipo y su utilización.

4.2.1 Instrumentación Hidrogeológica 2012

En la zona de estudio se instrumentó con 04 piezómetros de tubo abierto, los cuales fueron instalados en los taladros hidrogeológicos. La ubicación de estos instrumentos es mostrada en la Figura 4.1.

CAPÍTULO V

ESTUDIOS BÁSICOS

5.1 El Acuífero

5.1.1 Características del acuífero

El nuevo tajo se encuentra en una zona que presenta dos unidades hidrogeológicas que se detallan a continuación:

- Unidad Hidrogeológica asociada a las gravas que forman parte del depósito de La Quinua Sur
- Unidad Hidrogeológica asociada al basamento rocoso (volcánico) subyacente y circundante.

Se describen seguidamente las dos unidades hidrogeológicas donde se ubicará el tajo.

Unidad asociada al depósito de gravas de La Quinua Sur Gravas (LQS)

Esta unidad corresponde a la extensión del depósito de gravas de LQS, limitada al Norte por el tajo nuevo al Oeste por el Río Grande y al Sur por la Quebrada Encajón. La falla El Tapado y el sistema de fallas son responsables del desarrollo de las quebradas del área ya que controlan la forma y la potencia de la unidad asociada a las gravas, tal como se observan en los Figuras 5.1 y 5.2.

El flujo de agua subterránea dentro de la unidad acuífera de gravas se produce por medio de flujo intergranular a través de los sedimentos no consolidados o parcialmente consolidados en dirección Suroeste.

La disposición de la estratificación y el contenido de finos de las gravas con respecto a la profundidad son factores que controlan el flujo o movimiento de las aguas subterráneas en esta unidad. En base a la experiencia obtenida del drenaje del depósito de gravas realizado en el tajo La Quinua, se indica lo siguiente:

- La Secuencia Superior de gravas muestra una permeabilidad mayor
- La Secuencia Intermedia o ferricreta muestra una permeabilidad relativamente alta
- La Secuencia Inferior tiene una baja permeabilidad debido al alto contenido de material fino

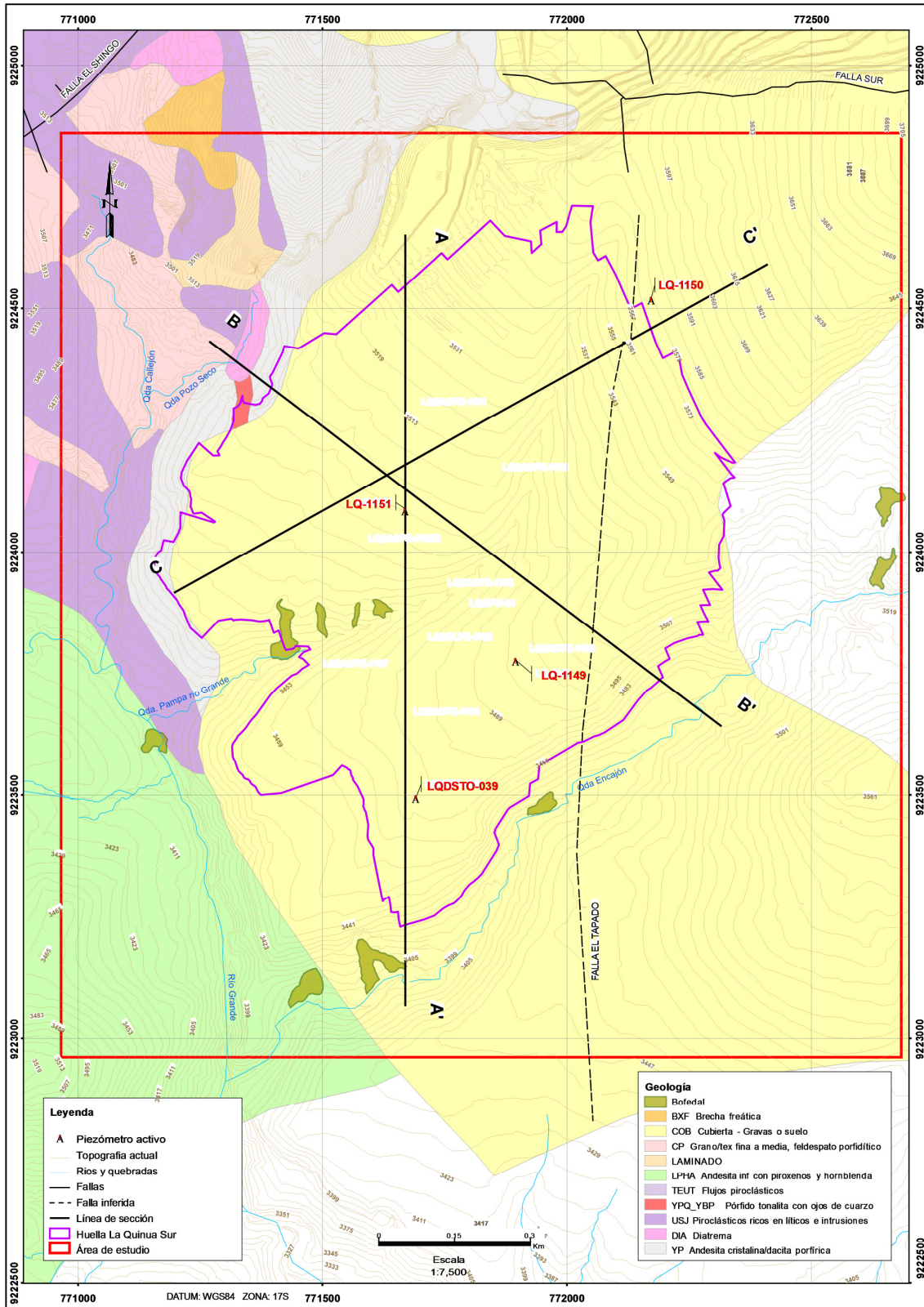


Figura 5.1 Mapa geológico de La Quinua Sur Gravas

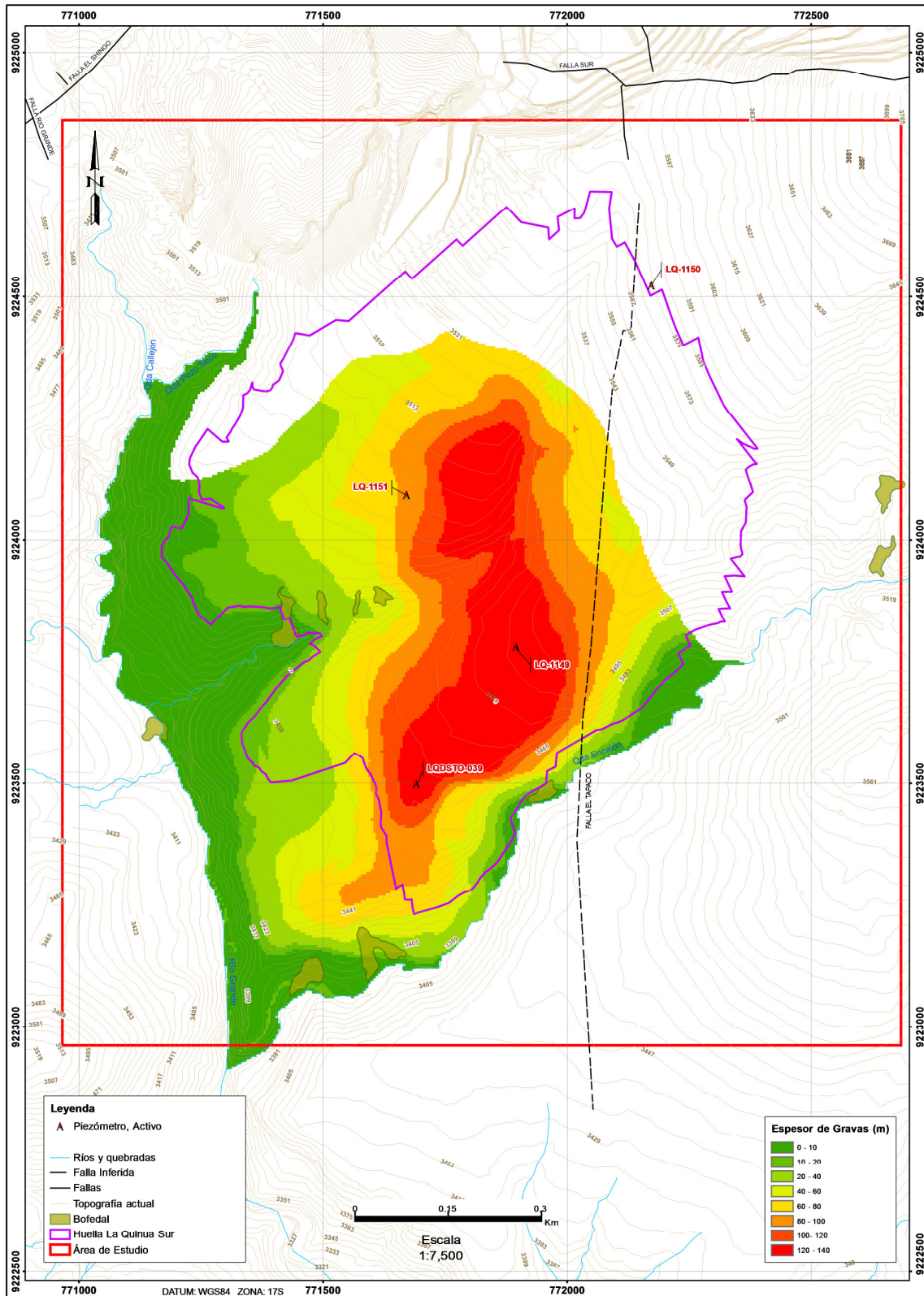


Figura 5.2 Mapa esesor de gravas La Quinua Sur

Unidad asociada al basamento rocoso (volcánico)

Esta unidad corresponde a la roca volcánica regional que subyace y circunda al depósito de La Quinoa Sur. Este sistema está constituido por unidades de roca con distintos grados de alteración y sistemas de fracturamiento variable. El flujo de agua subterránea en esta unidad está controlado principalmente por el tipo de alteración de la roca y por la presencia y continuidad de fracturas, diaclasas, o estructuras regionales. La permeabilidad de esta unidad es muy variable dependiendo principalmente de la existencia de fallas y/o estructuras, y de la existencia de tipos de alteraciones muy permeables tal como la alteración sílice granular. El movimiento del agua a través de esta unidad acuífera se debe a la porosidad secundaria. Este tipo de unidad muestra permeabilidades moderadas a altas.

5.1.2 Funcionamiento del acuífero

Como se ha descrito en el capítulo IV en el nuevo tajo hay dos unidades acuíferas (unidad acuífera de gravas y unidad acuífera asociado al basamento rocoso). Dado que la explotación del tajo se centrará en la unidad de gravas sin alcanzar el basamento rocoso, el drenaje permitirá deprimir los niveles de la mencionada unidad, por debajo del piso del tajo proyectado.

Los niveles piezométricos en las gravas en el entorno de la zona en estudio varían entre un máximo de 3530 msnm y un mínimo de 3425 msnm.

La superficie piezométrica en la zona de estudio está influenciada por el control estructural de la zona, así, las curvas piezométricas cerca a la falla El Tapado van aumentando en gradiente hidráulico, lo que supone que la falla actúa como una barrera hidráulica. Los gradientes hidráulicos son del orden de 4% a 7% en el sector Norte, Oeste y Sur del tajo y del 20% en el sector Este cerca a la falla El Tapado.

La dirección de flujo en las gravas es Noreste hacia el Suroeste en la parte Central del nuevo tajo.

5.2 El Manto freático

5.2.1 Comportamiento de los niveles de agua

Cuando hay precipitación el nivel del agua en el acuífero aumenta, y recupera su nivel original entre 30 y 45 días, tal y como se observa en la Figura 5.3.

En la Figura 5.4 se aprecia el comportamiento de las isopiezas (niveles iguales de agua) actualizado hasta abril 2012, el movimiento del flujo de agua subterránea va desde el Noreste hacia el Suroeste en dirección a la confluencia de Río Grande y Quebrada Encajón a un gradiente hidráulico homogéneo de 7% en el lado Oeste de la falla El Tapado, sin embargo el gradiente hidráulico al Este de la falla es mayor al orden de 20%, tal como se aprecia en las secciones hidrogeológicas de las Figuras 5.5, 5.6 y 5.7.

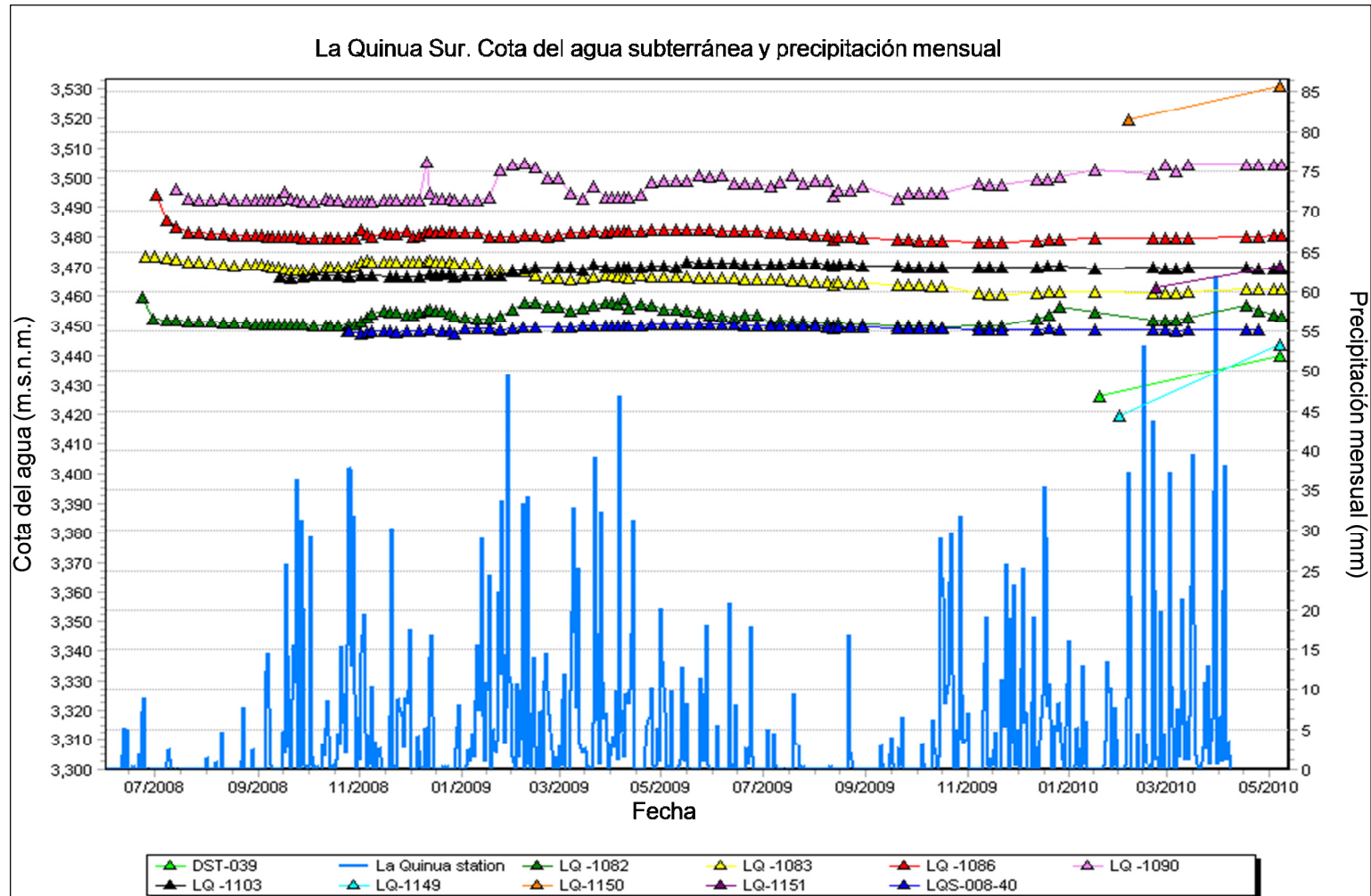


Figura 5.3 Hidrogramas de piezómetros de La Quinoa Sur Gravas

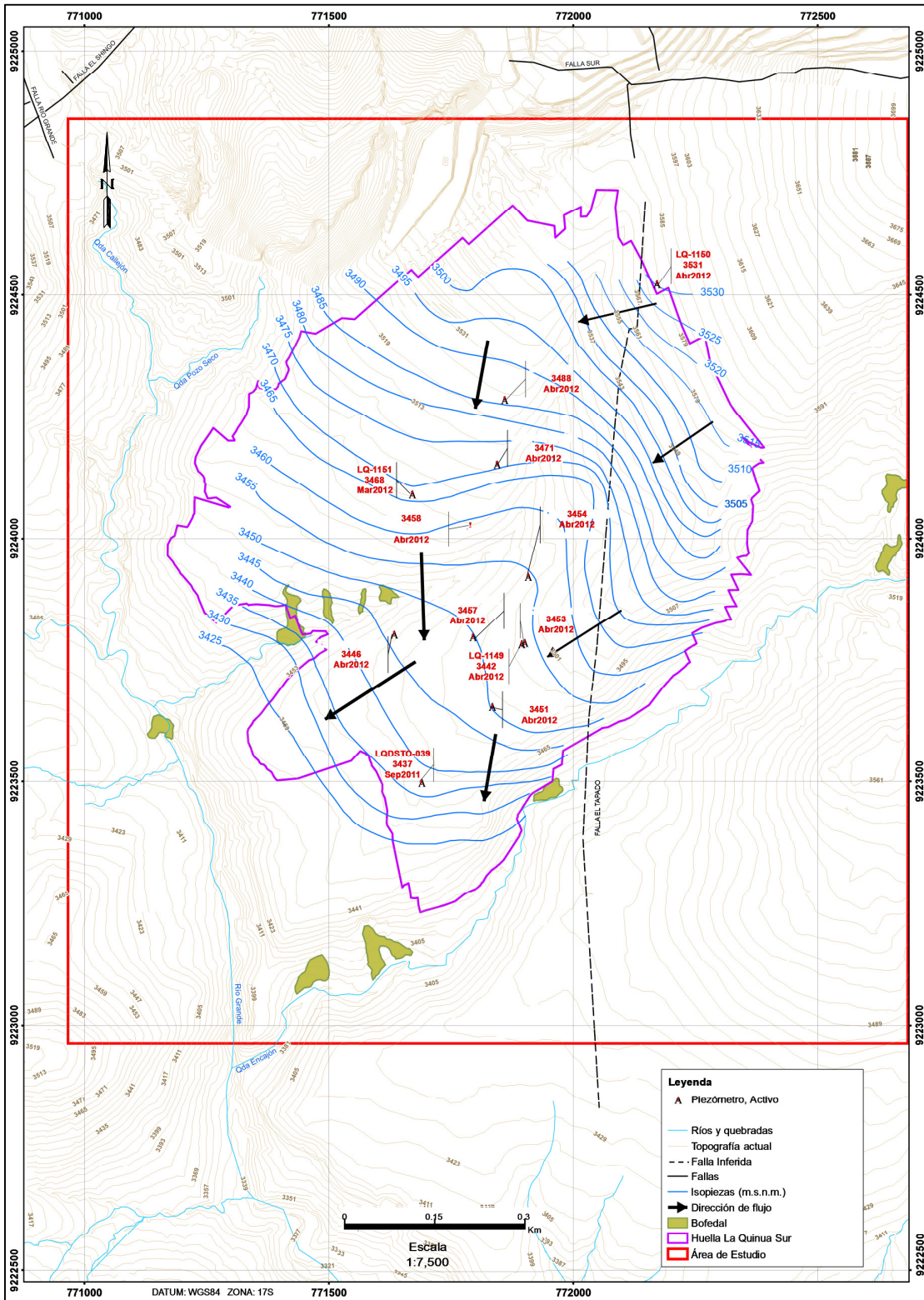


Figura 5.4 Isopiezas de La Quinua Sur Gravas

5.2.2 Inventario de puntos de agua subterránea

En el 2012 en la zona de estudio se perforó e instaló 04 piezómetros, cuya disposición espacial puede verse en la Figura 5.1.

5.2.3 Monitoreo de niveles de agua subterránea

En la Tabla 5.1 se presentan datos de niveles de un total de 4 piezómetros, con la información resumida de la red de monitoreo de las aguas subterráneas de La Quinoa Sur.

El régimen de monitoreo de niveles de agua subterránea se realiza dos veces por semana.

Tabla 5.1 Mediciones de nivel de agua de los piezómetros

Piezómetros	Fecha de inicio del monitoreo	Fecha última medida	Número total de medidas	Última elevación del nivel de agua (msnm)
LQ-1149	7-May-12	27-Abr-13	155	3441.9
LQ-1150	7-May-12	27-Abr-13	149	3530.9
LQ-1151	13-May-12	2-Mar-13	146	3468.0
LQDSTO-039	13-May-12	2-Mar-13	109	3437.4

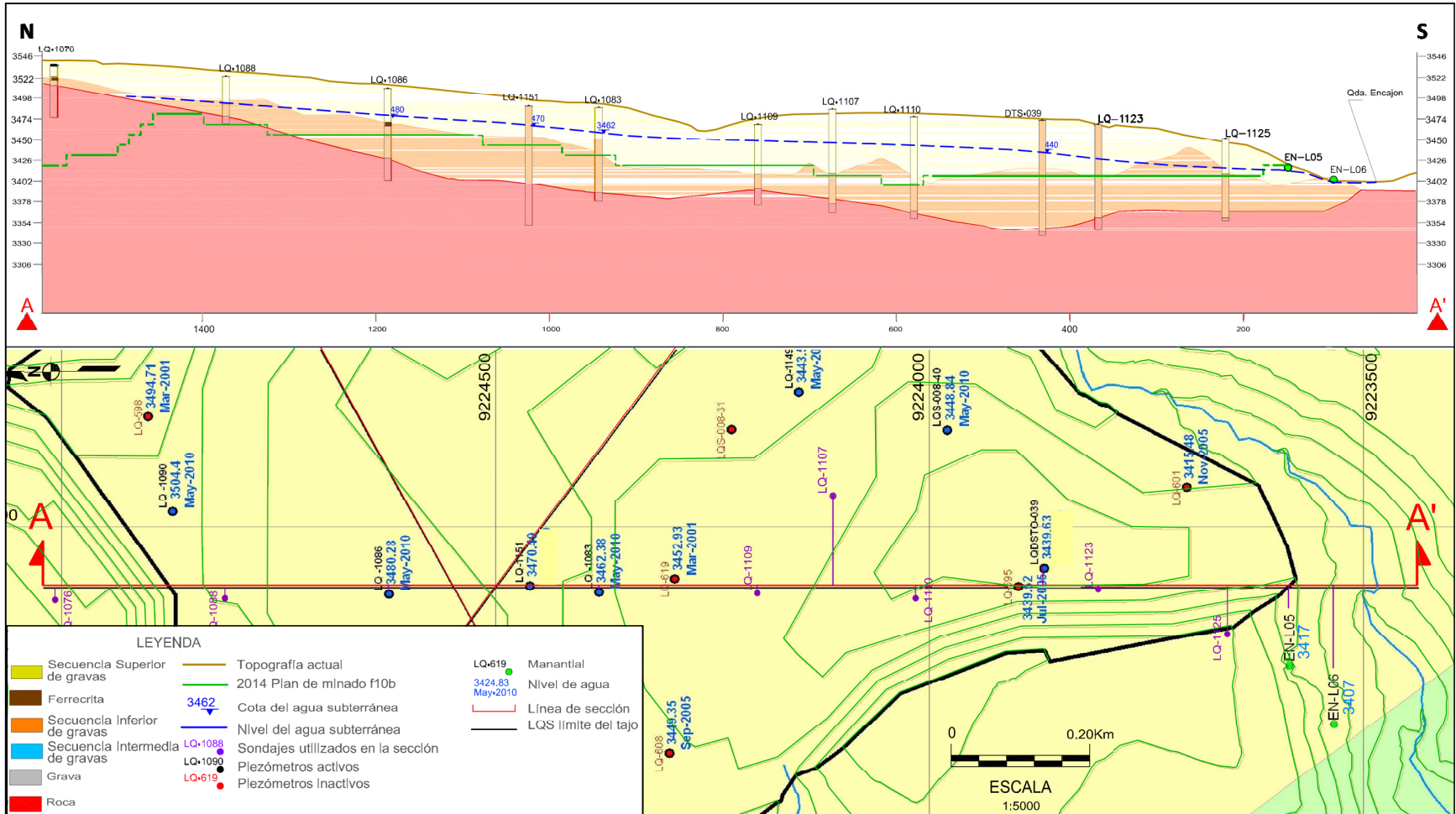


Figura 5.5 Sección A-A'

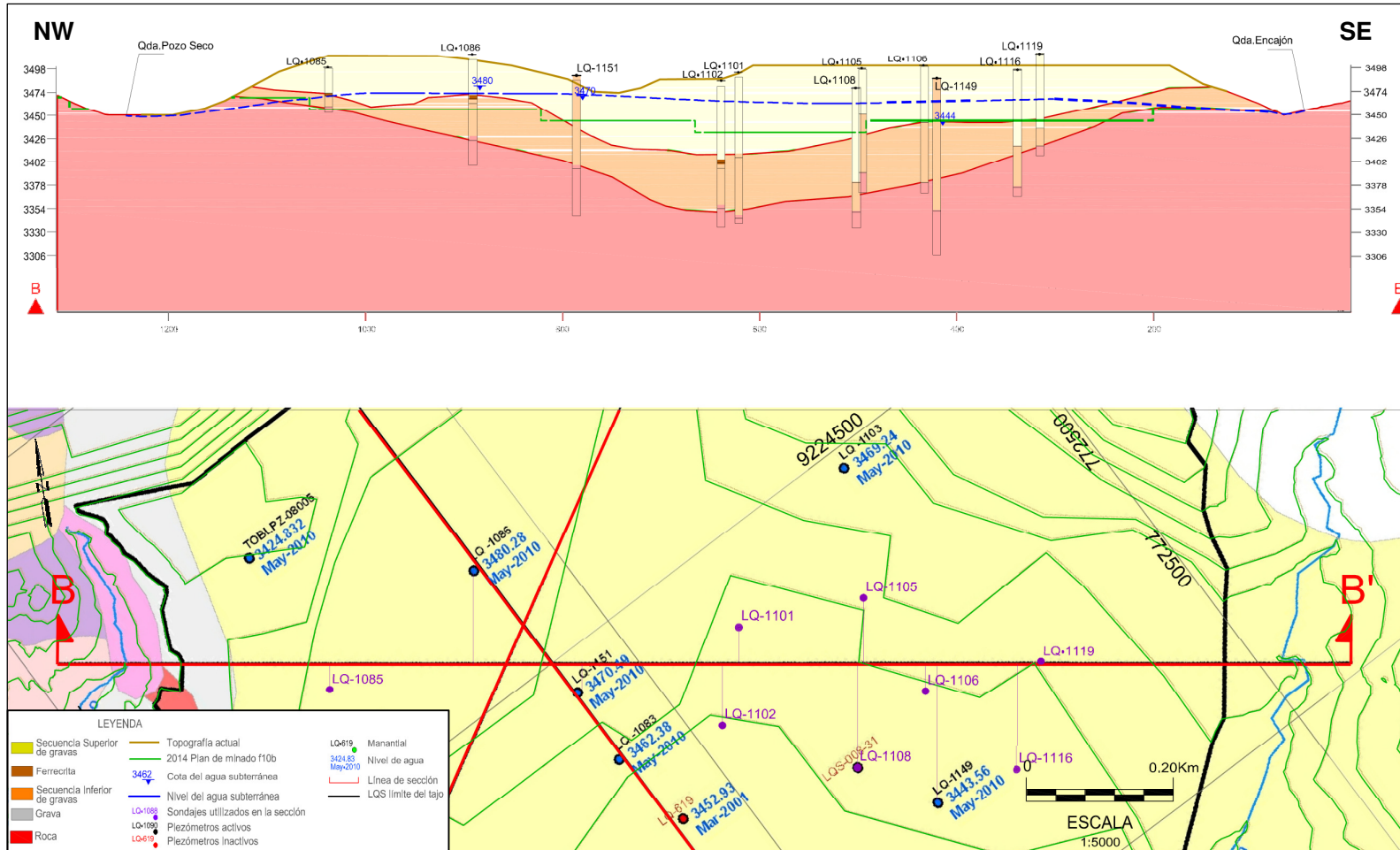


Figura 5.6 Sección B-B'

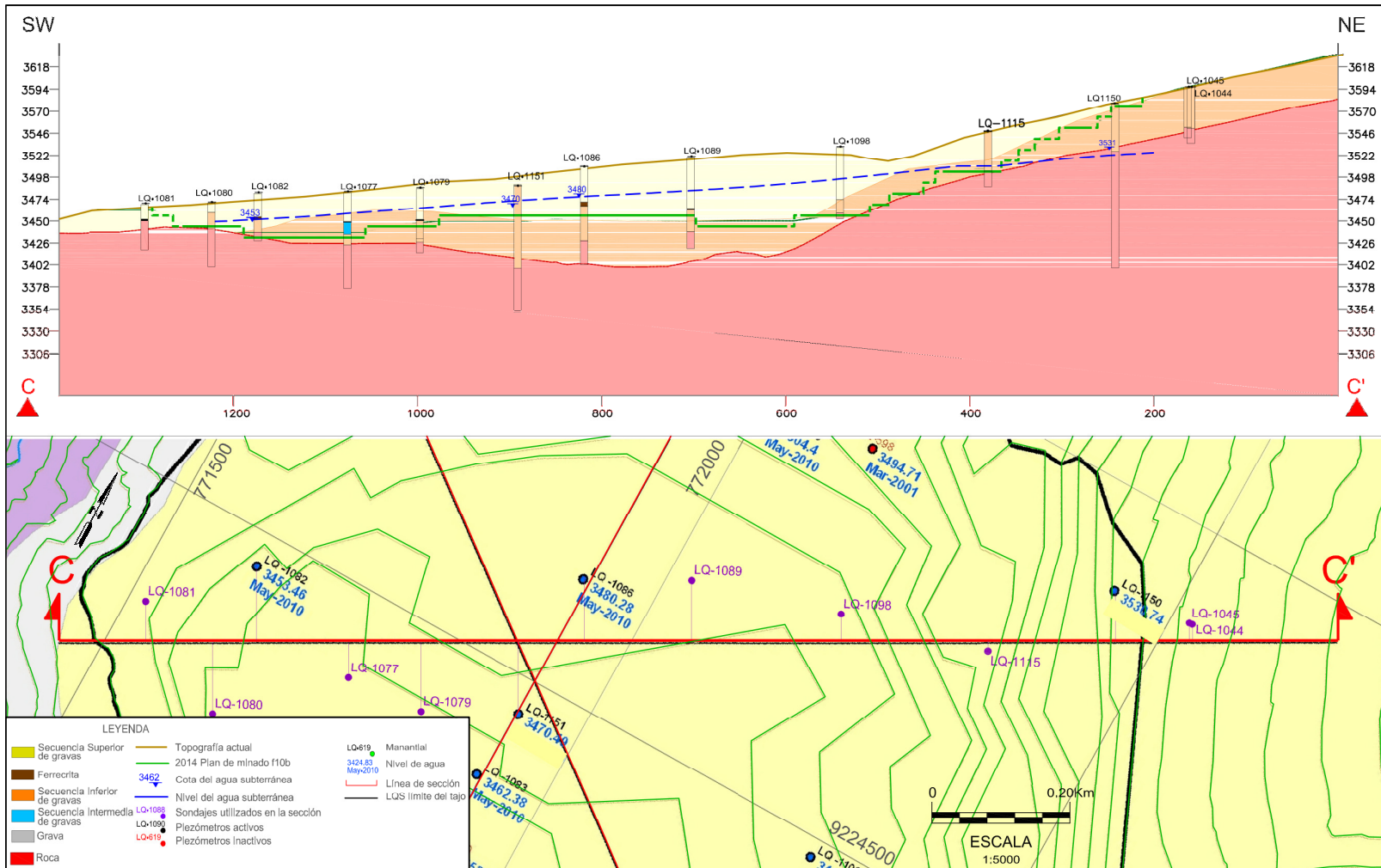


Figura 5.7 Sección C-C'

5.3 Parámetros hidrogeológicos del acuífero

En la Tabla 5.2 se incluyen los valores de permeabilidad consignados para las distintas unidades, obtenidas de las pruebas de bombeo y pruebas de carga variable que se han ido realizando a lo largo del tiempo, en los distintos pozos de producción perforados en toda el área de estudio.

Tabla 5.2 Valores de conductividad hidráulica de las unidades hidrogeológicas del área de estudio

Tipo de litoalteración	Conductividad hidráulica (m/s)			
	Número de valores	Máximo	Media	Mínimo.
Basamento				
Sílice	14	1 x 10 ⁻⁴	1 x 10 ⁻⁶	1 x 10 ⁻⁷
Sílice masiva	5	3.4 x 10 ⁻⁵	1 x 10 ⁻⁶	1 x 10 ⁻⁷
Alunita de sílice	3	4 x 10 ⁻⁶	1.5 x 10 ⁻⁶	1 x 10 ⁻⁷
Arcilla de sílice	3	7 x 10 ⁻⁷	4 x 10 ⁻⁷	2.5 x 10 ⁻⁷
Argílica/argílica avanzada	4	6 x 10 ⁻⁷	1.6 x 10 ⁻⁸	8 x 10 ⁻¹⁰
Roca regional	1	3x10 ⁻⁶	3x10 ⁻⁶	3x10 ⁻⁶
Secuencia de gravas La Quinua				
Secuencia Superior	5	6 x 10 ⁻⁵	1 x 10 ⁻⁵	5 x 10 ⁻⁸
Ferricreta	6	1 x 10 ⁻⁴	7.5 x 10 ⁻⁶	5 x 10 ⁻⁸
Secuencia Inferior	4	1 x 10 ⁻⁵	7.5 10 ⁻⁶	1 x 10 ⁻⁶

En la Tabla 5.3 y 5.4 se muestran los resultados de los ensayos de inyección y slug test en los piezómetros LQDST-039, LQ-1149, LQ-1150 Y LQ-1151. En el Anexo A se muestra la manera de obtener los resultados de las pruebas de inyección.

Tabla 5.3 Análisis de las pruebas de inyección

Piezómetro	Prueba	Conductividad hidráulica (m/s)	Método de análisis	Tipo de litología
LQDST-039	1a prueba	4.72×10^{-7}	Theis	Gravas
LQ-1149	1a prueba	1.20×10^{-6}	Papadopulos-Cooper	Andesita
	2a prueba	1.01×10^{-6}	Papadopulos-Cooper	
LQ-1150	1a prueba	2.39×10^{-6}	Papadopulos-Cooper	Roca con alteración sílice granular
LQ-1151	1a prueba	1.89×10^{-7}	Cooper Jacob	Gravas
	2a prueba	1.15×10^{-7}	Cooper Jacob	

Tabla 5.4 Análisis de las pruebas recuperación de inyección (Slug Test)

Piezómetro	Prueba	Conductividad hidráulica (m/s)	Método de Análisis	Tipo de litología
LQDST-039	1 prueba	6.43×10^{-8}	Bouwer & Rice	Gravas
		5.90×10^{-8}	Hvorslev	
LQ-1149	1a prueba	4.05×10^{-7}	Bouwer & Rice	Andesita
		4.53×10^{-7}	Hvorslev	
	2a prueba	1.60×10^{-7}	Bouwer & Rice	
		1.83×10^{-7}	Hvorslev	
LQ-1150	1a prueba	1.82×10^{-6}	Bouwer & Rice	Roca con alteración sílice granular
		1.39×10^{-6}	Hvorslev	
LQ-1151	1a prueba	3.15×10^{-7}	Bouwer & Rice	Gravas
		3.35×10^{-7}	Hvorslev	
	2a prueba	4.43×10^{-7}	Bouwer & Rice	
		4.33×10^{-7}	Hvorslev	
LQ-1151	1a prueba	2.25×10^{-8}	Bouwer & Rice	Arcilla
		2.14×10^{-8}	Hvorslev	
	2a prueba	1.27×10^{-8}	Bouwer & Rice	
		2.15×10^{-8}	Hvorslev	

5.4 Hidrogeoquímica

Para la caracterización hidrogeoquímica de la zona de La Quinoa Sur se analizó las muestras correspondientes a 04 piezómetros de monitoreo, (20 muestras) y se resume en la Tabla 5.5 los datos generales de las estaciones de muestreo.

Tabla 5.5 Datos generales de estaciones de muestreo

Identificación	Fecha Inicio	Fecha Final	N° de muestreos	Profundidad Perforada
LQ-1149	9-May-12	1-Jun-13	6	180
LQ-1150	9-May-12	9-Mar-13	1	180
LQ-1151	9-May-12	11-Aug-13	5	135
LQDSTO-039	28-Aug-12	12-Aug-13	4	138

Como parte del procedimiento de muestreo se realizaron medidas físico químicas de campo las mismas que se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Datos estadísticos de parámetros físico químicos de piezómetros

Parámetro	Unid	LQ-1149				LQ-1150				LQ-1151				LQDSTO-039			
		Min	Prom	Max	Cant	Min	Prom	Max	Cant	Min	Prom	Max	Cant	Min	Prom	Max	Cant
C.E.	uS/cm	187	500	1011	5	254	254	254	1	70	233	329	5	204	702	1821	4
pH		6.75	7.12	7.56	5	8.81	8.81	8.81	1	5.62	6.15	7.32	5	6.58	6.78	6.99	4
Temp	°C	11.80	13.42	17.00	5	14.40	14.40	14.40	1	12.04	13.08	14.20	5	10.40	11.97	12.93	4

Tal como se observa en la tabla 5.6 el agua muestreada presenta un pH que va de ligeramente ácido a alcalino, además presenta una conductividad eléctrica de moderada a alta.

La Figura 5.8 muestra el comportamiento histórico de los parámetros físico químicos de campo (pH y CE) de los piezómetros, es claro notar que el pH y la conductividad eléctrica tienen una tendencia homogénea en el tiempo.

En la Tabla 5.7 se muestra la caracterización del agua, tomada de los piezómetros. Tener en cuenta que el piezómetro LQ-1150 se muestreó una sola vez, lo cual indica no ser representativo para el análisis de calidad de agua.

Tabla 5.7 Calidad química del agua subterránea

Piezómetro	Tipo de Agua
LQ-1149	bicarbonatada sulfatada cálcica sódica magnésica
LQ-1151	sulfatada bicarbonatada cálcica sódica
LQDSTO-039	bicarbonatada sulfatada cálcica sódica

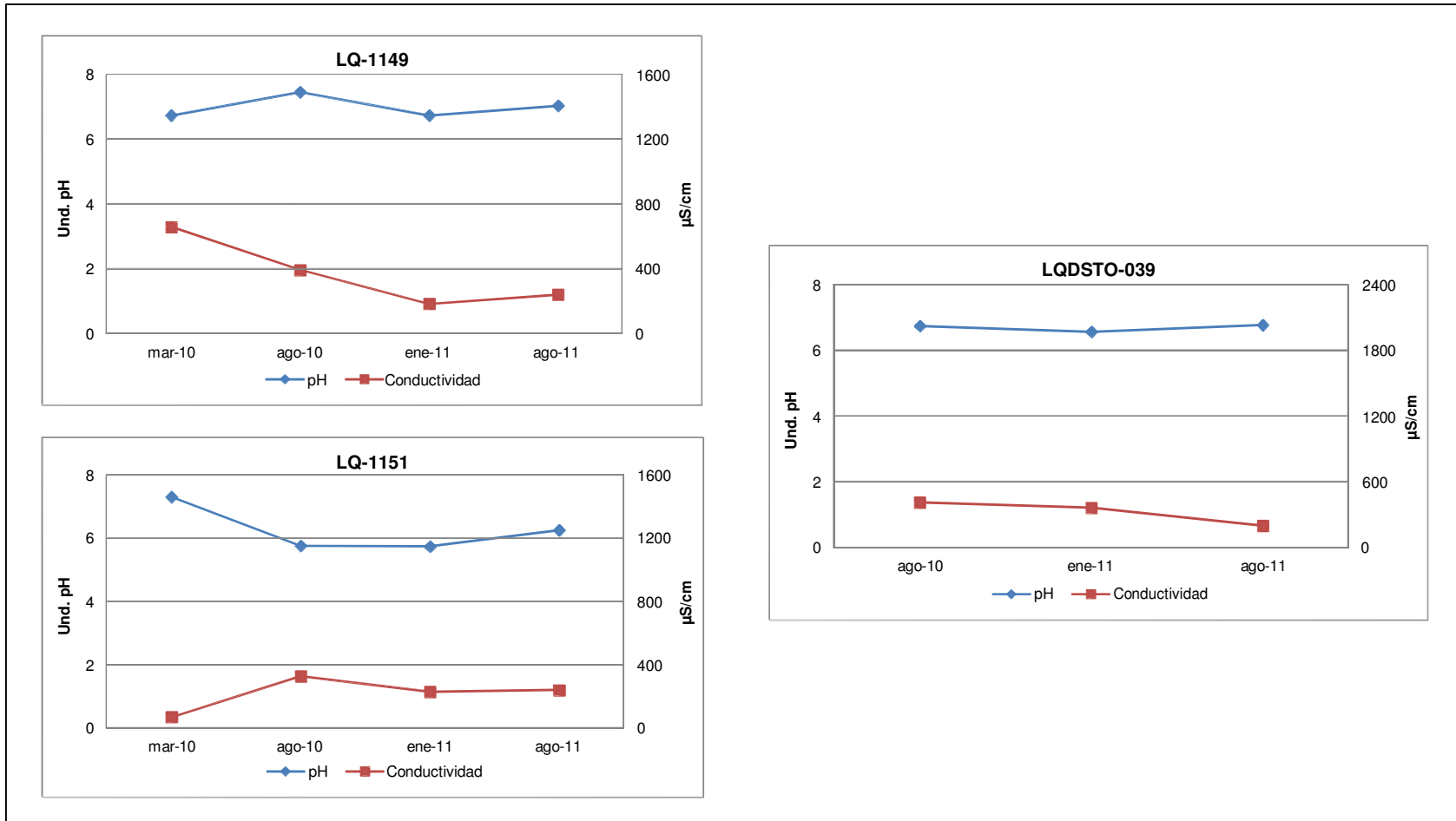


Figura 5.8 Comportamiento de los parámetros físico químicos de campo

CAPÍTULO VI

HIDROGEOLOGÍA CONCEPTUAL

El proyecto LQSG está actualmente planificado para 2 años y diseñado con bancos de 12 m. (Figura 6.1). El proyecto se iniciará a principios del año 2015 y se culminará a finales del año 2017. El plan de minado actual se encuentra incluido en el depósito de grava, y limita con la Quebrada Encajón por el sureste, el Río Grande por el suroeste y el proyecto El Tapado Oeste por el Noroeste. Al Noreste, el depósito de grava gradiente arriba se torna más fino hacia el área de La Quinua 2C. La reducción del grosor se debe a la continuación de la falla El Tapado de Norte a Sur en el límite Oriental del depósito de grava, originando un área elevada (Horst o pilar tectónico) o macizo rocoso directamente al Noreste del área del proyecto.

El proyecto de LQSG tendrá una elevación de tajo final de 3,396 msnm y está limitado debajo del depósito por el contacto del macizo rocoso entre 100 y 130 m por debajo de la superficie.

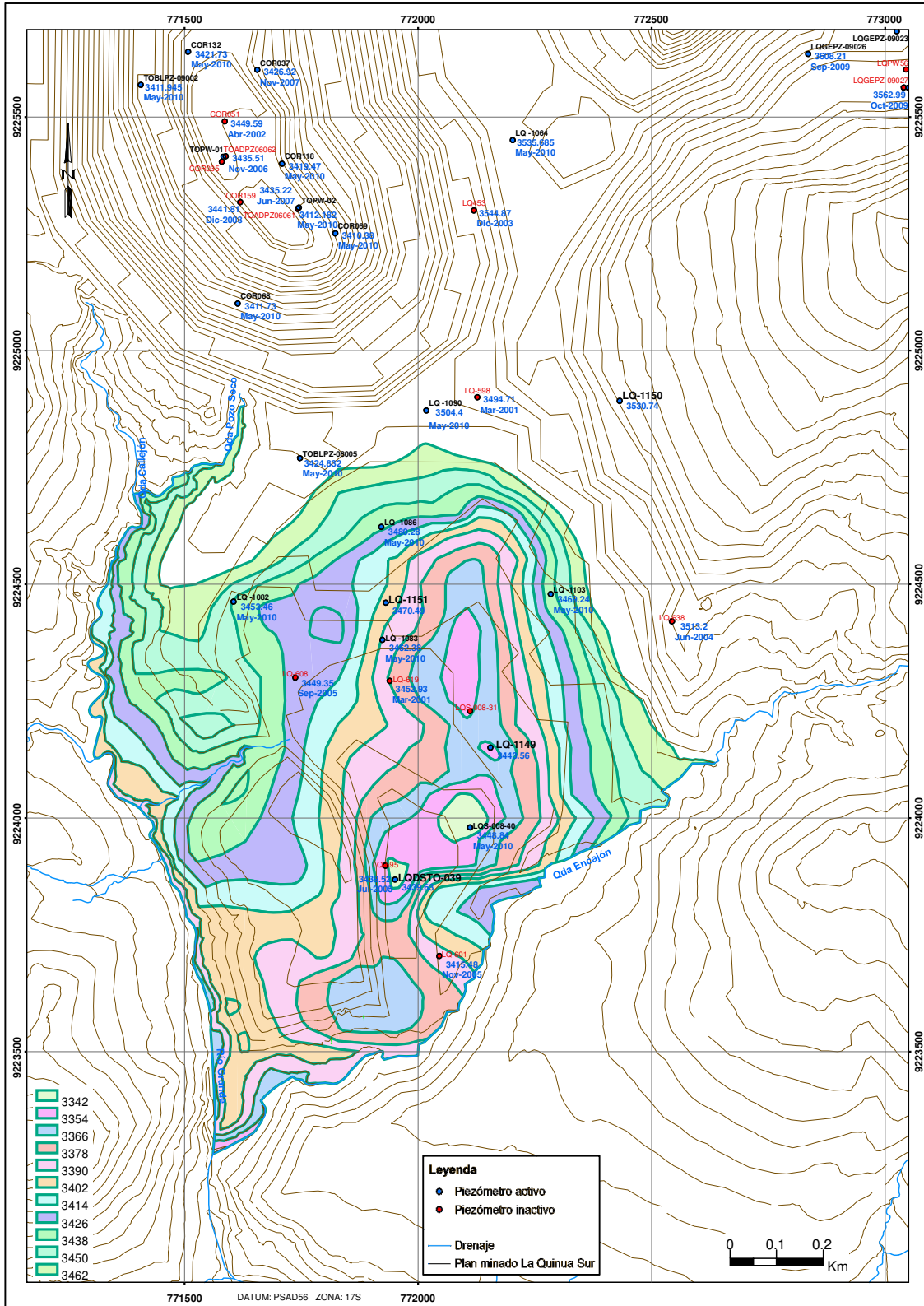


Figura 6.1 Cortes de 12 m horizontales para el cálculo de almacenamiento

6.1 Hidrogeología conceptual de las gravas

Por lo general, el nivel de agua en las gravas es más alto en el área Noreste del proyecto, tal como se ilustra en el mapa de isopiezas, o curvas de igual altura de agua, Figura 5.4 y las secciones transversales, Figuras 5.5, 5.6 y 5.7. La tabla de agua decrece hacia el Suroeste y luego gira hacia una dirección más al Sur a medida que se aproxima a las confluencias del Río Grande y la Quebrada Encajón. Existe una gradiente mayor en la región nororiental de las gravas hacia el lado este de la falla El Tapado. La gradiente en esta región se encuentra en dirección suroeste y se cree que es el resultado de sistemas acuíferos separados y niveles de agua superiores de macizo rocoso al sur de la falla El Tapado.

Al Oeste de la falla El Tapado, el nivel de agua generalmente baja de forma razonablemente suave en toda el área del proyecto, lo cual indica que no existen estructuras geológicas principales o variaciones en la transmisividad en la parte Occidental y Sur del depósito de grava. La tabla de agua es relativamente uniforme al oeste de la falla El Tapado con un gradiente promedio de aproximadamente 7%.

Basado en la morfología de las curvas isopiezas, es probable que el sistema acuífero de gravas descargue a la Quebrada Encajón bajo condiciones naturales. Esta es la región de descarga más probable debido a la falla El Tapado y a un sistema de fallas en dirección Noreste a Suroeste, cuya existencia se pensó en base al patrón de drenaje que se superpone al depósito. Estas fallas en dirección Noreste a Suroeste incluyen la Quebrada Encajón, la Quebrada Pozo Seco y la Quebrada sin nombre que bisecta el borde Suroccidental del depósito.

La falla El Tapado y el sistema de fallas responsable del desarrollo de las quebradas controlan la forma y profundidad de las gravas, tal como lo ilustran las curvas de nivel en la Figura 6.1. Las curvas de nivel del macizo rocoso y las gravas suprayacentes incrementan su profundidad al Oeste de la falla El Tapado y siguen la misma dirección de Norte a Sur.

Actualmente se desconoce la ubicación, elevación y cantidad de la descarga a las quebradas, no obstante, se tiene previsto un estudio de manantiales y arroyos. El estudio incluirá la medición de los caudales a lo largo de todos los tramos próximos al área del proyecto tanto en la Quebrada Encajón como en el Río Grande, con el fin de identificar tramos ganados y perdidos, además del muestreo de la calidad del agua.

La recarga de la precipitación es un componente importante del modelo de hidrogeología conceptual. Para el área del proyecto LQSG, se considera que la recarga de precipitación para las gravas es insignificante en la condición natural, menos del 5% en base a la experiencia en otros depósitos de grava en el área, como por ejemplo La Quinoa 2C y la falta de una respuesta firme y consistente a la precipitación estacional durante más de dos años de monitoreo de piezómetros instalados en el área de LQSG, tal como se ilustra en la Figura 5.3.

Los datos del piezómetro del área del proyecto de La Quinoa reunidos durante los últimos dos años indican que los esfuerzos en favor del desagüe en los tajos aledaños (El Tapado Oeste, El Tapado y La Quinoa 2C) tienen poca o ninguna influencia en las elevaciones del agua subterránea en LQSG. De igual forma, LQSG parece no

ejercer ninguna influencia en los otros proyectos y forma un acuífero de grava relativamente aislado. Esto se ilustra en la Figura 6.1, donde se proporcionan los niveles de agua para LQSG, ET, ETO y LQ2C.

Cabe resaltar lo siguiente:

- Los niveles de agua de La Quinoa Sur Gravas (triángulos en la Figura 6.2) no responden a las fluctuaciones en los caudales de bombeo (líneas sólidas en la Figura 6.2).
- Los caudales de desagüe en El Tapado han aumentado más del doble desde principios del año 2009, mientras que no se ha observado ninguna respuesta en LQSG.
- Los niveles de agua de El Tapado Oeste (círculos en la Figura 6.2) han empezado a disminuir recientemente de forma leve debido al incremento de los flujos de desagüe mientras que LQSG (triángulos en la Figura 6.2) no ha respondido.
- Los niveles de agua de La Quinoa 2C han fluctuado decenas de metros durante los últimos 10 meses, mientras que no se observa ninguna respuesta en LQSG.

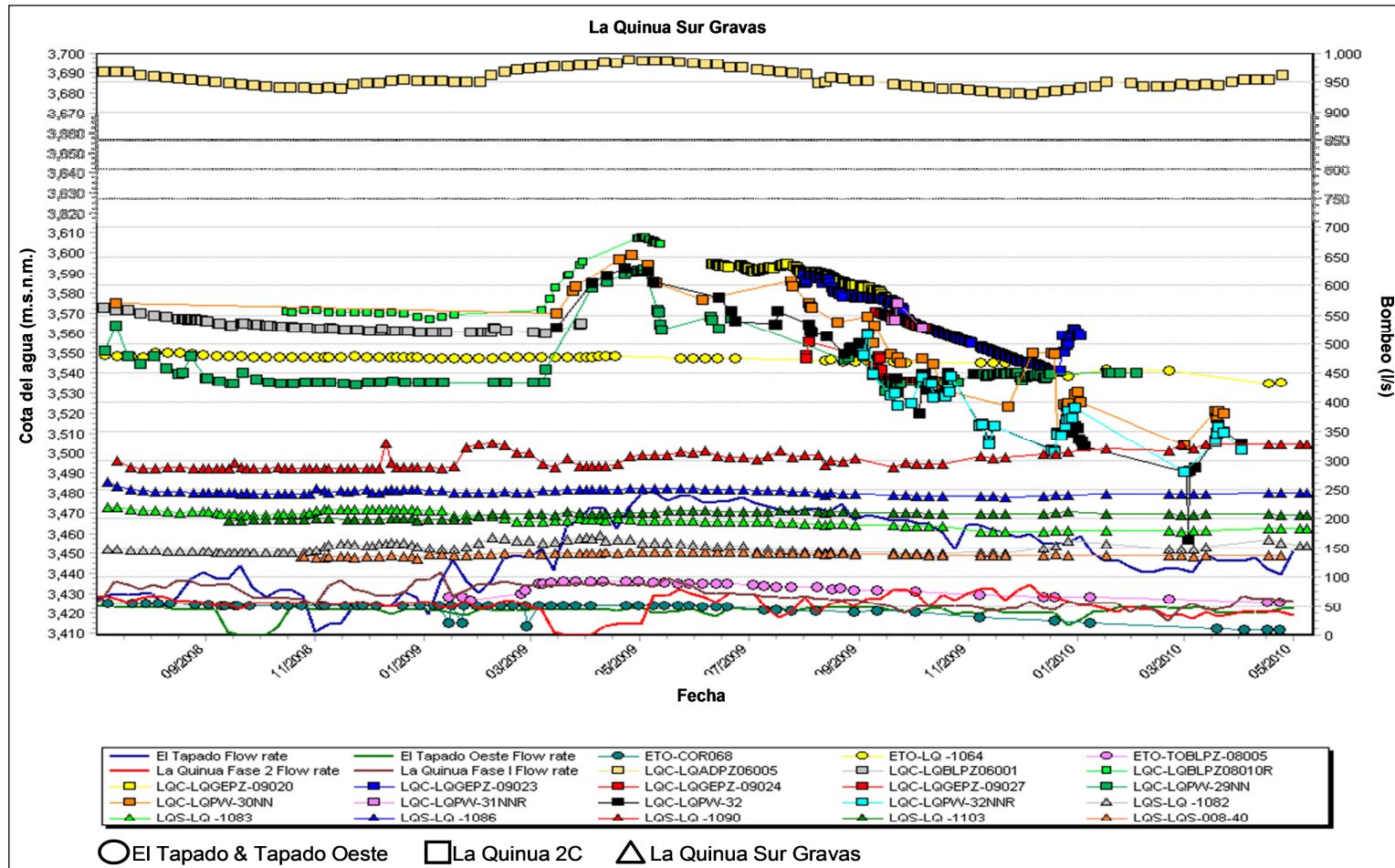


Figura 6.2 Niveles de agua y tasas de bombeo en La Quinoa Sur Gravas

Por consiguiente, se ha determinado que el depósito de LQSG no recibe flujos de ingreso de agua subterránea de otras áreas del proyecto, ni tampoco presenta flujos de salida hacia otras áreas del proyecto.

La comprensión de la estratificación y el contenido de finos de las gravas con la profundidad son factores importantes para la hidrogeología conceptual y el plan de desagüe. Anteriormente se han identificado tres unidades principales en las gravas:

- 1) Las gravas de Secuencia Superior, que están fundamentalmente bien clasificadas, con menos finos y generalmente presentan una mayor capacidad de drenaje y permeabilidad;
- 2) La ferricreta o capa de Secuencia Media, que generalmente es una capa oxidada bien cementada en el medio del depósito, que se caracteriza por su dureza y compactación, con espacios vacíos y fracturas. La unidad generalmente drena bien con el desagüe y por lo general tiene una permeabilidad relativamente alta. No obstante, una revisión de las secciones creadas con el modelo de bloque (Figuras 5.5, 5.6 y 5.7) indica la poca presencia de ferricreta en LQSG; y,
- 3) Las gravas de Secuencia inferior son la unidad más baja del depósito de grava y están compuestas de gravas clasificadas de forma deficiente, cuyo tamaño de grano varía entre canto rodado y arcillas y limos muy finos. La unidad tiene un contenido alto de finos y generalmente menor

permeabilidad que otras unidades. Actualmente se sabe que las tres capas existen en el depósito de LQSG, pero en general su contenido de finos en relación con el depósito principal de grava de La Quinua es mayor del que se podría esperar para depósitos coluviales que se encuentran lejos del área fuente en términos de distancia de las regiones más altas de Cerro Yanacocha y de la falla de La Quinua.

Una revisión del plan de minado indica que el enfoque del proyecto LQSG es explotar la gravas de la Secuencia Superior y dejar las gravas de la Secuencia Inferior relativamente intactas, tal como se puede apreciar en las secciones A-A', B-B' y C-C' en las Figuras 5.5, 5.6 y 5.7. Habiendo dicho esto, el desagüe necesitará avanzar muy por debajo del plan de minado (gravas de Secuencia Superior) y hacia las gravas de Secuencia Inferior para:

- 1) Una elevación de desagüe dirigida menor que la del tajo final (10 metros debajo del tajo final),
- 2) Niveles de bombeo dinámico en los pozos, que se tiene previsto serán 50 metros o más por debajo de la elevación de agua estática y,
- 3) El talud general del área del proyecto de Norte a Sur requerirá el desagüe de las gravas de Secuencia Inferior en la parte Norte del tajo, con el fin de cumplir con el plan de minado en la parte Central y Sur del tajo.

Los parámetros hidráulicos son importantes para comprender y relacionar la permeabilidad con el almacenamiento en este depósito dentro de las diferentes

unidades de las gravas y finalmente serán importantes para determinar el rendimiento de los pozos para el plan de desagüe. En base a la perforación RCD y al análisis de las pruebas de inyección llevadas a cabo en los piezómetros LQDST-039 y LQ-1151, la conductividad hidráulica aparente de LQSG se estima en 5×10^{-7} a 6×10^{-8} m/s. Sin embargo, en el lado inferior, esto concuerda con otros depósitos de grava en el área de La Quinoa que generalmente presentan un margen de conductividad hidráulica de 1×10^{-4} a 1×10^{-8} m/s y valores medios de aproximadamente 1×10^{-6} m/s. El piezómetro LQDST-039 está entubado con zona filtrante en las gravas de secuencia superior e inferior, y por lo tanto, la permeabilidad menor de las gravas de secuencia inferior está influenciando el valor de permeabilidad resultante.

Pruebas anteriores en otros depósitos de grava han determinado que las gravas de Secuencia Superior cuentan por lo general con una permeabilidad más alta que la de las gravas de Secuencia Inferior. En las Figuras 4.2, 4.4, 4.5 y 4.6 se pueden revisar los diagramas de terminación de piezómetros, y en el Anexo A se incluyen los análisis de pruebas de inyección.

La inspección de los registros de perforación recopilados del programa de perforación RCD indica un sistema heterogéneo con un grado de estratificación dentro del depósito. Debido a la estratificación se puede asumir que el rendimiento específico del depósito va a variar significativamente en los diferentes horizontes dentro de él. Los horizontes con un mayor contenido de arcilla tienen la posibilidad de retener un gran porcentaje de agua y reducir el rendimiento general. A pesar de que los estimados anteriores de porosidad eran más altos (15%), en base a las

pruebas recientes, según el conocimiento conceptual actual, es probable que se encuentren porcentajes más altos de arcilla y finos en el depósito y por lo tanto, es probable que la porosidad efectiva sea menor, en el rango de 8 a 10%, dado que existe la posibilidad de que una parte importante no produzca agua. Es importante notar que la porosidad efectiva del depósito sólo puede ser confirmada con una prueba de bombeo a largo plazo con un monitoreo adecuado de los piezómetros cercanos, dado que es necesario esforzar al sistema en la medida adecuada con el fin de obtener estimados razonables y defendibles del rendimiento específico.

6.2 Hidrogeología conceptual del macizo rocoso subyacente

El modelo conceptual hidrogeológico del proyecto LQSG ha considerado anteriormente dos posibles fuentes de recarga de agua subterránea ya sea.

- 1) El macizo rocoso gradiente arriba al Noreste del área del proyecto, al Este de la falla El Tapado, o
- 2) Gradiente hidráulico arriba en el macizo rocoso subyacente como filtración de las gravas sobreyacentes del área del proyecto.

Durante el programa de perforación, se construyó un piezómetro (LQ-1150) en el macizo rocoso al noreste del área del proyecto, al este y gradiente arriba de la falla El Tapado. Este piezómetro se instaló en andesita y macizo rocoso de sílice debajo de

las gravas y presenta una elevación de agua de 3,531 msnm, la cual es significativamente más alta (26.8 metros más) que el piezómetro LQ-1090 que se encuentra en el lado occidente de la falla El Tapado, con una elevación de agua de 3,504 msnm, ver Figura 4.1. Esta elevación de agua es significativamente mayor que la que se tendría prevista, únicamente en base a la topografía. La elevación de agua en LQ 1150 sugiere que una gradiente en dirección ascendente ocurre en el macizo rocoso inmediatamente al noreste del área del proyecto. La gradiente ascendente del macizo rocoso se relaciona potencialmente con la falla El Tapado que se proyecta a través de las gravas en estrecha proximidad con el piezómetro.

La mayor elevación de agua y la posible influencia de la falla El Tapado también son respaldadas por la mayor elevación de agua observada en el piezómetro de grava LQ-1103 que crea una deflexión en las curvas isopiezas y la elevación histórica del agua en el piezómetro de macizo rocoso LQ-838, cerca del borde occidental del depósito. Estos dos piezómetros se encuentran ubicados cerca a la traza de la falla El Tapado a través de los depósitos de grava (Figura 5.4). En base a estas observaciones, el flujo de agua subterránea a lo largo de la falla El Tapado es posiblemente la fuente de afluentes de agua subterránea al depósito de grava y requerirá de investigación posterior del área del proyecto.

A fin de investigar el macizo rocoso que subyace al depósito de LQSG, se instaló un piezómetro (LQ-1149) en la parte Sur Central del depósito en el macizo rocoso de andesita subyacente. En base al piezómetro LQ-1149, actualmente se cree que el macizo rocoso subyacente no suministra agua subterránea a las gravas, dado que

existe un gradiente aparente en sentido descendente que subyace a la parte central del depósito.

El gradiente se demuestra comparando los niveles de agua del macizo rocoso en el piezómetro LQ-1149 (3443.6 msnm) con los del piezómetro instalado pendiente abajo del piezómetro del macizo rocoso en las gravas, LQS-008-40 (nivel de agua de 3,448.8 msnm). En base a la topografía y a las curvas de nivel, LQ-1149 debería tener un nivel de agua mayor que LQS-008-40. Sin embargo, se observa que el nivel de agua en LQ-1149 es 5.2 metros menor que el nivel de agua de LQS- 008-40; ver Figura 5.4.

Actualmente no se ha previsto que la aparente gradiente arriba en el macizo rocoso que subyace a la parte norte de las gravas al este de la falla El Tapado creará problemas de estabilidad para las gravas de LQSG. Esto no se considera un problema de estabilidad del talud por varias razones:

- 1) Si bien existe una gradiente en sentido ascendente, no hay evidencias de presión debajo de las gravas,
- 2) Sobre la base del plan de minado, el talud del plan de minado no es agresivo y deja suficientes salientes en la región de mayor riesgo hacia la esquina Noreste del tajo (cerca de LQ-1150), al este de la falla El Tapado (ver Figura 3.1 y sección C-C' de Figura 5.7).

- 3) Plan de minado no se dirige al macizo rocoso y deja una parte sustancial de grava bien drenada en los taludes superiores. No obstante, la estabilidad de las gravas debería ser revisada más adelante.

CAPÍTULO VII

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

7.1 Metodología

Se ha desarrollado el modelo hidrogeológico conceptual con énfasis en el desagüe del proyecto y la interacción entre LQSG y otras áreas del proyecto. La hidrogeología conceptual se utiliza para identificar los principales componentes del balance hídrico, tales como volumen de almacenamiento, dirección y cantidad del flujo de agua subterránea, recarga y descargas conceptuales del sistema de acuíferos constituidos por gravas.

Al culminar el modelo hidrogeológico conceptual, se efectuó el modelo de desagüe del balance hídrico desarrollado en base al plan de minado. El balance hídrico utiliza la hidrogeología conceptual como base para modificar algunos componentes del balance hídrico, tales como la eliminación del almacenamiento de agua y afluentes y efluentes de agua subterránea. El modelo de balance hídrico se utilizó luego para proporcionar un plan de desagüe a nivel conceptual y una actualización de los flujos

previstos necesarios para el desagüe del tajo a medida que éste avanza. El plan proporciona estimados nuevos de los caudales mensuales anticipados para el desagüe y la caída prevista en los niveles del agua para cumplir con el plan de minado de LQSG en base a la comprensión conceptual revisada.

Se realizó una revisión de la infraestructura de desagüe y se proyectó para un año, teniendo en cuenta la hidrogeología conceptual. Los caudales actualizados (totales y por pozo), los niveles del agua de desagüe, el desembalse conceptual en los pozos, el número de pozos y las posibles ubicaciones en el tajo fueron reevaluados en base a la información nueva.

Se describe dos alternativas para el desagüe de LQSG, una alternativa que incluye una infraestructura de desagüe autónoma e independiente, y una segunda alternativa con el desagüe del sistema de desagüe de LQSG diseñado para ser “acoplado” sobre la infraestructura de desagüe de El Tapado Oeste. Las alternativas fueron desarrolladas debido a la proximidad del proyecto LQSG con el tajo de El Tapado Oeste que contará con un amplio sistema de desagüe antes del inicio del proyecto LQSG.

Con el propósito de proporcionar antecedentes, a continuación se describen las dos alternativas; sin embargo, la discusión posterior se referirá únicamente a la alternativa 2:

- La alternativa 1 consiste en una infraestructura de desagüe “autónoma” e independiente para transportar el agua directamente desde los pozos de desagüe en LQSG a la poza de retención de la Planta de Tratamiento de

Agua Ácida de La Quinua.

- La alternativa 2 consiste en un sistema de desagüe para LQSG “acoplado” a la infraestructura de desagüe de El Tapado Oeste, que a su vez consiste en transportar el agua desde LQSG hasta la estación de bombeo del tajo El Tapado Oeste (ETO) que se encontrará ubicada en el borde sur del tajo ETO. De esta manera se aprovecha la infraestructura existente de ETO para transportar el agua desde la estación de bombeo hasta la poza de retención de La Quinua. Seleccionándose esta alternativa.

Utilizando el sistema de bombeo en la alternativa 2 disminuirán significativamente los costos relacionados con el proyecto LQSG y se incrementarán ligeramente los del proyecto El Tapado Oeste debido al aumento en los caudales como resultado del flujo adicional del proyecto LQSG.

El diseño considera un sistema eléctrico independiente para los pozos de LQSG, pero incluye una reducción sustancial de la longitud de la tubería y no contempla un sistema adicional de bombeo, lo cual reduce la inversión total de capital en tuberías, sistemas de bombeo, transformadores, subestaciones y costos totales de energía para el proyecto.

En base al modelo de balance hídrico e hidrogeología conceptual actualizada se desarrolló una infraestructura a nivel conceptual para el desagüe, así como presupuestos para gastos de capital y gastos operativos para la opción “acoplada”

descrita en la alternativa 2. Los gastos de capital incluyen el costo por compras de equipos e instalaciones, ingeniería y perforación de pozos. Los gastos operativos se basaron en los costos imprevistos de reparación y reemplazo para el equipo instalado con una frecuencia anual y en el consumo de energía para los pozos de desagüe y los sistemas de bombeo.

7.2 Modelamiento del balance hídrico

Para desarrollar un plan de desagüe conceptual, se creó el modelo de balance hídrico para La Quinoa Sur Gravas basado en los principales componentes de la hidrogeología conceptual descritos en la sección anterior, tales como la eliminación del almacenamiento, infiltración de precipitaciones en el área del tajo, recarga de agua subterránea desde el macizo rocoso gradiente arriba y el efluente de agua subterránea hacia las quebradas Encajón y Río Grande.

El balance hídrico de desagüe preliminar cuenta con los siguientes componentes:

- Recarga - de precipitaciones
- Afluente de agua subterránea - desde el área de la fuente gradiente arriba, al este de la Falla El Tapado.
- Almacenamiento - la cantidad de agua drenable almacenada dentro del depósito.
- Efluente de agua subterránea - hacia los drenajes de la Quebrada Encajón y Río Grande.

- Bombeo - para eliminar el agua del almacenamiento y contrarrestar la recarga y el afluente.

Se cree que la recarga por precipitaciones es baja en condiciones naturales y se prevé que se encuentre en el rango de 10% durante el minado activo de las gravas.

Este supuesto se basa en la experiencia con el desagüe actual del área de La Quinua 2 C y la falta de respuesta del nivel de agua en el área LQSG a las fluctuaciones estacionales en precipitación, tal como se describe en la hidrología conceptual, (Ver Figura 5.1). Sobre la base de una precipitación anual promedio de 1,320 milímetros de la estación meteorológica de La Quinua y del área de la superficie estimada de las gravas de 0.79 km², la recarga anual promedio por infiltración de precipitaciones en el área del tajo es de aproximadamente 3.3 l/s durante la excavación del tajo en pleno. Se asume que la escorrentía de la precipitación proveniente de las áreas aledañas gradiente arriba del área del proyecto se desviará alrededor del tajo propuesto como agua sin contacto y por lo tanto, no contribuirá a la infiltración. También se asume que se manejará de manera efectiva la precipitación dentro del área del tajo (como agua de contacto) y no se permitirá su empozamiento en grandes cantidades.

Se estimó el afluente de agua subterránea utilizando el cálculo de Darcy para la condición de estado estacionario previo al minado activo, en base al talud promedio del nivel de agua a través del área del proyecto, el área transversal y la conductividad

hidráulica promedio asumida de las gravas. El cálculo permite restringir los afluentes y efluentes de agua subterránea a través del sistema en equilibrio antes de iniciar las actividades de minado, cuya parte interna proporciona una descarga estimada hacia las quebradas en condiciones de estado estacionario. Asimismo, el estimado proporciona un punto de partida en la previsión del futuro afluente subterráneo proveniente de las áreas aledañas debido a la depresión del nivel de agua a medida que se desarrolla el desagüe.

El cálculo de Darcy es el siguiente:

$$Q=k*A*(dH/dL)$$

Donde:

Q = flujo (m³/s)

K = conductividad hidráulica (m/s)

A = área transversal (m²)

dH/dL= gradiente hidráulico (adimensional)

Se calculó el gradiente de agua subterránea promedio dentro del área del proyecto a partir de los piezómetros dentro de las gravas en 7%. Se calculó la sección transversal saturada de las gravas de LQSG a través del área central del tajo a lo largo de la sección transversal B-B' perpendicular a la dirección del flujo de agua subterránea (Figura 5.6), en base al área debajo de una elevación de agua proyectada desde los piezómetros y contornos del macizo rocoso.

El área transversal saturada calculada es 42,275 m². La conductividad hidráulica, tal como se describe en la hidrogeología conceptual y el análisis de las pruebas de inyección se calcularon como 5×10^{-7} m/s.

En base a estos supuestos, el cálculo del flujo de Darcy proporciona un estimado de 1.5 l/s para el flujo de agua subterránea actual en LQSG.

Otro componente del afluyente de agua subterránea durante el minado activo es la fuga proveniente de la grava remanente que no se minará. No se prevé que varíe el afluyente proveniente del macizo rocoso gradiente arriba hacia las gravas como resultado del desagüe. Asimismo, se espera que permanezca bajo, en el rango de 1.5 a 3 l/s. Sin embargo, se prevé que la fuga combinada de las gravas remanentes y el afluyente proveniente del macizo rocoso gradiente arriba tengan un incremento de aproximadamente 6 l/s a medida que las elevaciones de agua se aproximen a la profundidad objetivo. Los 6 l/s son una combinación del flujo pasante y la infiltración de graves no minadas.

El componente de eliminación del almacenamiento del modelo del balance hídrico se desarrolló utilizando cortes horizontales de 12 metros del depósito de gravas. Las áreas de los cortes se unieron por la intersección de los cortes con contornos de contacto del macizo rocoso debajo del depósito y los contornos de nivel encima, con la Quebrada Encajón al Sureste, Río Grande al Suroeste, la región de las gravas finas al Norte de la Falla El Tapado al Noreste y el proyecto El Tapado al noroeste. Los cortes de 12 metros dentro de estos límites se sumaron luego para representar el acuífero drenable total dentro del depósito de gravas. La Tabla 7.1 resume los cortes

de 12 metros y los volúmenes y áreas estimados. La Figura 6.1 ilustra los cortes horizontales con los límites, tal como se describió anteriormente y el área de las gravas contenidas dentro de los límites descritos.

Tabla 7.1 Resumen de los cortes horizontales de 12 metros utilizados para los cálculos de almacenamiento en el modelo del balance hídrico

Elevación (msnm)	Área (m ²)	Volumen (m ³)	Volumen acumulativo (m ³)	Volumen acumulativo de almacenamiento (m ³)
3,390	398,199	3,822,120	3,822,120	382,212
3,402	407,128	3,296,940	7,119,060	711,906
3,414	496,074	3,578,652	10,697,712	1,069,771
3,426	517,297	3,716,988	14,414,700	1,441,470
3,438	520,808	2,634,564	17,049,264	1,704,926
3,450	467,246	2,034,756	19,084,020	1,908,402
3,462	351,621	122,534	19,206,554	1,920,655

El factor de almacenamiento para LQSG mantiene un parámetro relativamente libre. Hasta que se instale un pozo de bombeo y pueda realizarse una prueba de bombeo, este parámetro se mantendrá sin refinar. Para el período provisorio, se utilizó el valor relativamente conservador del 10% en el balance hídrico.

El valor se basa en el rango más alto de almacenamiento para otros depósitos de gravas, tales como La Quinoa fase I y fase II y el depósito de La Quinoa 2C, y disminuye ligeramente debido al contenido de arcilla y finos observados en los registros de perforación, lo cual reducirá la porosidad efectiva en el depósito de gravas.

Al usar el volumen acumulativo de los cortes horizontales, el volumen calculado de las gravas saturadas es 19.2 Mm^3 a un almacenamiento calculado de 10%. El volumen total del agua que será eliminado de las gravas es 1.9 Mm^3 . Para extraer solo el componente de almacenamiento, se necesitaría una velocidad de bombeo promedio de 20.1 l/s durante un período de 3 años. El desagüe en un período de tiempo más corto requeriría caudales considerablemente más elevados para el componente de eliminación del almacenamiento, incrementando el número de pozos de desagüe requeridos y los costos totales de infraestructura. Por ejemplo, para extraer 1.9 Mm^3 en 2 años se requeriría una velocidad de 30 l/s y un incremento de 33.3% en el caudal para el componente de eliminación del almacenamiento.

La Tabla 7.2 proporciona un resumen de los caudales contribuyentes previstos que serían requeridos para contrarrestar los afluentes, la recarga y la eliminación del almacenamiento dentro de las gravas por un período de 3 años.

Tabla 7.2 Resumen de los caudales de los componentes contribuyentes del balance hídrico para La Quinoa Sur Gravas

Componente del balance hídrico	Estimado
Velocidad promedio para la eliminación del volumen de almacenamiento de 19Mm ³ de la roca drenable en 3 años de bombeo	10% del volumen de almacenamiento (Mm ³) 1.9 (l/s) 20.1
Infiltración directa promedio ponderada en las gravas	10% de infiltración (l/s) 4
Afluente máximo proveniente de la gradiente inducida en las gravas no minadas	Conductividad hidráulica (5x10 ⁷ m/s) 6
Velocidad de bombeo	(l/s)
Promedio	35
Máximo	37

En base a la velocidad de recarga estimada, el afluente de agua subterránea gradiente arriba, la eliminación del almacenamiento y la fuga proveniente de la gradiente hidráulica inducida, la velocidad de bombeo que se requiere para cumplir con el plan de minado se estima un caudal promedio máximo de 37 l/s. La Figura 7.1 ilustra el balance hídrico mensualmente con la precipitación mensual promedio y el afluente de agua subterránea, tal como se describió anteriormente, y la eliminación del 10% del almacenamiento con el bombeo, tal como se resume en la Tabla 7.3.

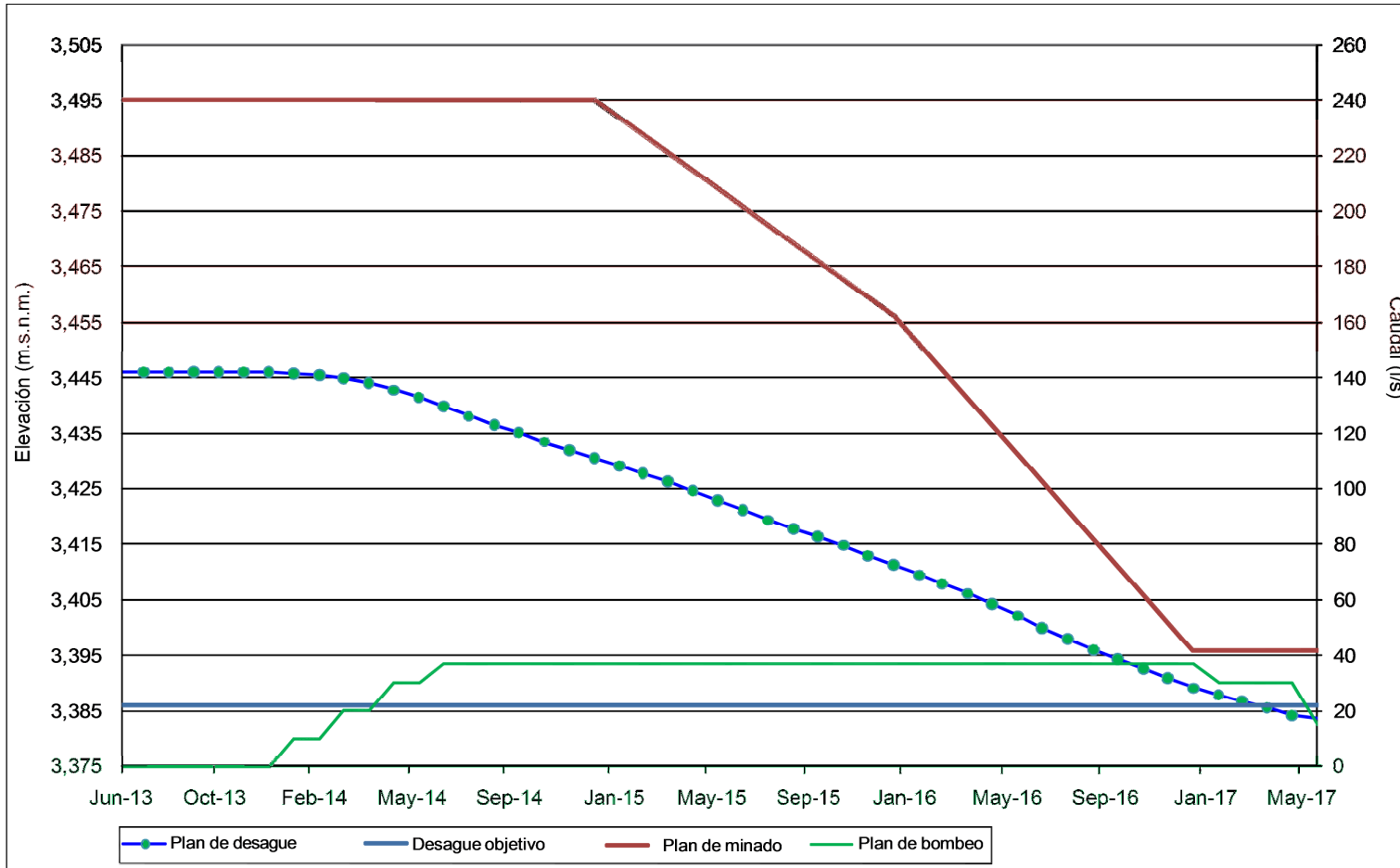


Figura 7.1 Plan conceptual de desagüe de La Quinua Sur Gravas

Tabla 7.3 Resumen del rendimiento del balance hídrico conceptual

Año	Número de pozos	Velocidad de bombeo total (l/s)	Descenso (m/mes)	Elevación de agua (m)
Ene-14	1	10	0.3	3,446
Feb-14	1	10	0.3	3,445
Mar-12	2	20	0.5	3,445
Abr-14	2	20	0.8	3,444
May-14	3	30	1.3	3,443
Jun-14	3	30	1.4	3,441
Jul-14	4	37	1.7	3,440
Ago-14	4	37	1.7	3,438
Sep-14	4	37	1.6	3,436
Oct-14	4	37	1.5	3,435
Nov-14	4	37	1.5	3,433
Dic-14	4	37	1.5	3,432
Ene-15	4	37	1.5	3,430
Feb-15	4	37	1.4	3,429
Mar-15	4	37	1.3	3,428
Abr-15	4	37	1.5	3,426
May-15	4	37	1.6	3,425
Jun-15	4	37	1.7	3,423
Jul-15	4	37	1.7	3,421
Ago-15	4	37	1.7	3,419
Sep-15	4	37	1.6	3,418
Oct-15	4	37	1.5	3,416
Nov-15	4	37	1.5	3,415
Dic-15	4	37	1.8	3,413
Ene-16	4	37	1.8	3,411
Feb-16	4	37	1.8	3,409
Mar-16	4	37	1.6	3,408
Abr-16	4	37	1.8	3,406
May-16	4	37	1.9	3,404
Jun-16	4	37	2.0	3,402
Jul-16	4	37	2.1	3,400
Ago-16	4	37	2.1	3,398
Sep-16	4	37	1.9	3,396
Oct-16	4	37	1.7	3,394
Nov-16	4	37	1.8	3,393
Dic-16	4	37	1.7	3,391

CONCLUSIONES

1. La zona de emplazamiento tajo La Quinoa Sur se encuentra en una zona hidrogeológicamente representada por dos unidades hidrogeológicas; la unidad Superior conformadas por el depósito de gravas y la unidad Inferior asociada al basamento rocoso.
2. Las gravas de Secuencia Superior presentan una mayor capacidad de drenaje y permeabilidad.
3. La Ferricreta o capa de Secuencia Media drena bien con el desagüe y por lo general tiene una permeabilidad relativamente alta.
4. Las gravas de Secuencia Inferior que son la unidad más baja del depósito presenta menor permeabilidad que las otras unidades.
5. Los niveles piezométricos en el entorno del tajo proyectado de LQS varían entre un máximo de 3,530 msnm y un mínimo de 3,425 msnm, hacia el Sur.

6. La clasificación hidroquímica de las aguas analizadas son principalmente bicarbonatadas sulfatada cálcica sódica.
7. Las muestras de los piezómetros de monitoreo analizadas, presentan valores de conductividad eléctrica del orden de 233 $\mu\text{s}/\text{cm}$ a 702 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Los valores de pH de las muestras analizadas en los piezómetros de muestreo, presentan resultados con una tendencia alcalina, con valores entre 6.8 y 8.8.
8. Se ha determinado que el depósito de LQS no recibe flujos de ingreso de agua subterránea de otras áreas del proyecto, ni tampoco presenta flujos de salida hacia otras áreas del proyecto.
9. La dirección de flujo en las gravas es del Noreste hacia Suroeste en la parte Central.
10. La superficie piezométrico en La Quinoa Sur está influenciada por el control estructural de la zona, de forma que las curvas piezométricas cerca a la falla El Tapado van aumentando en gradiente hidráulico, lo que nos hace suponer que la falla actúa como una barrera hidráulica. Los gradientes hidráulicos son del orden de 4% a 7% en el sector Norte, Oeste y Sur del tajo y del 20% en este cerca a la falla El Tapado.

RECOMENDACIONES

1. Para las perforaciones de pozos de producción se recomienda profundizar hasta antes del basamento y habilitar en la Secuencia de gravas, de tal manera que solo se drene la Secuencia de gravas y no tengamos conexión con el acuífero de la roca.
2. Si bien es cierto que el control hidrogeológico es en la Secuencia de gravas, ya que el minado no contempla la roca, es necesario tener piezómetros en roca para determinar el comportamiento hidrogeológico subyacente a la Secuencia de gravas.
3. Se recomienda realizar perforaciones piloto antes de empezar con las perforaciones de pozos de producción, de tal manera tengamos las ubicaciones definidas según las pruebas hidráulicas.
4. Para la infraestructura del bombeo de La Quinoa Sur Gravas, se recomienda un sistema integrado y no independiente. Así se acoplaría la línea de descarga

de la Quinoa Sur con la del Tapado Oeste ya que son Proyectos adyacentes, y así se generaría ahorro en costos totales para la empresa.

BIBLIOGRAFIA

1. WMC, 2006 Modelo Distrital de Flujo de Agua Subterránea de la Mina Yanacocha. Water Management Consultants S.A. (Perú), Octubre 2006.
2. Saderholm, Eric; Moore, Steve & The Yanacocha Geology Team. Yanacocha District Stratigraphic Summary, December 2002.
3. SWS, 2011 Actualización del Modelo Distrital de Flujo de Agua Subterránea de la Mina Yanacocha. SWS Perú S.A., Junio 2011.
4. Carlotto, 2011 Informe sobre la sedimentología de la cuenca La Quinua-distrito minero de Yanacocha, Geoandina-Minera Yanacocha, Febrero 2011.
5. Gonzales de Vallejo, L. I. (2004), Ingeniería Geológica, Pearson Educación, Madrid España.

6. Minera Yanacocha, 2010 Solicitud de autorización de ejecución de estudios de aguas subterráneas en la zona La Quinoa Sur.

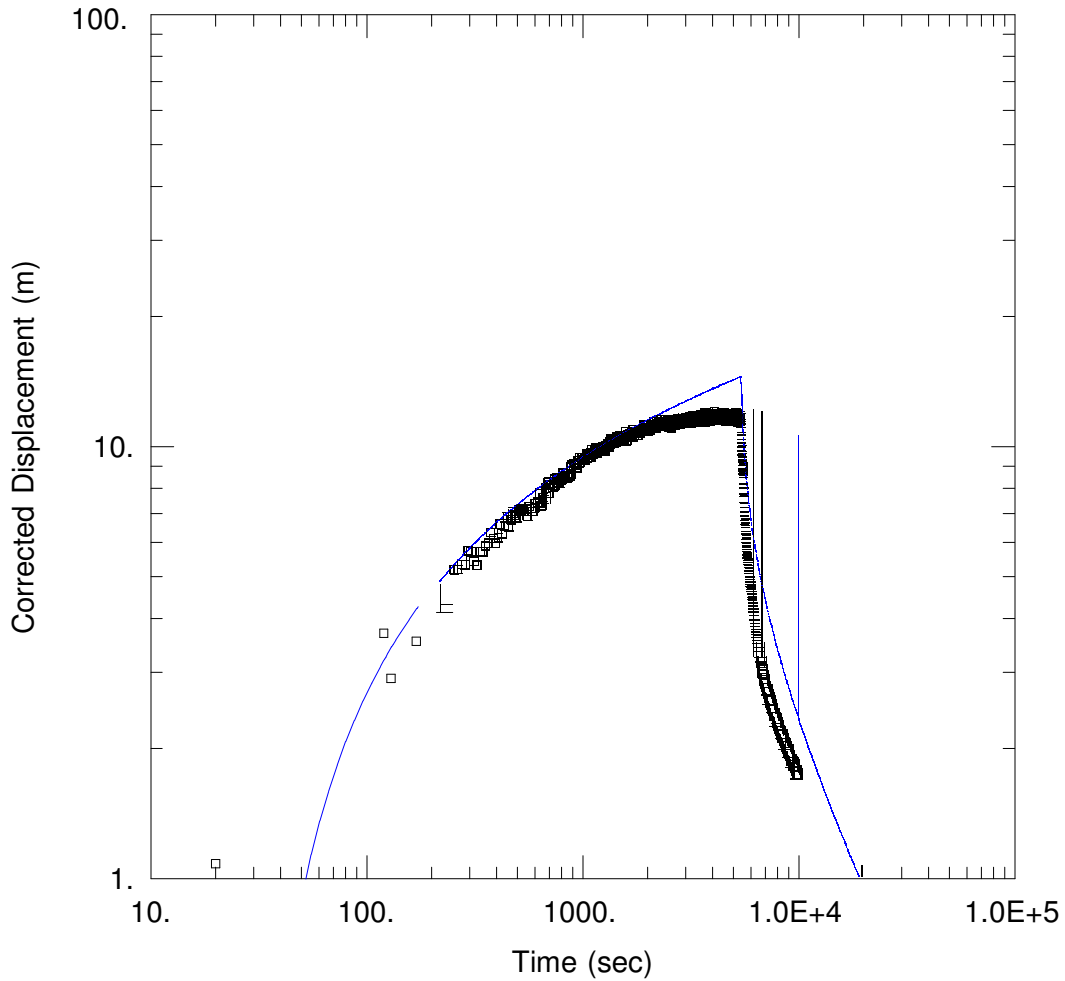
7. Minera Yanacocha, 2012 Memorándum Técnico, Drenaje subterráneo en La Quinoa Sur Gravas.

ANEXOS

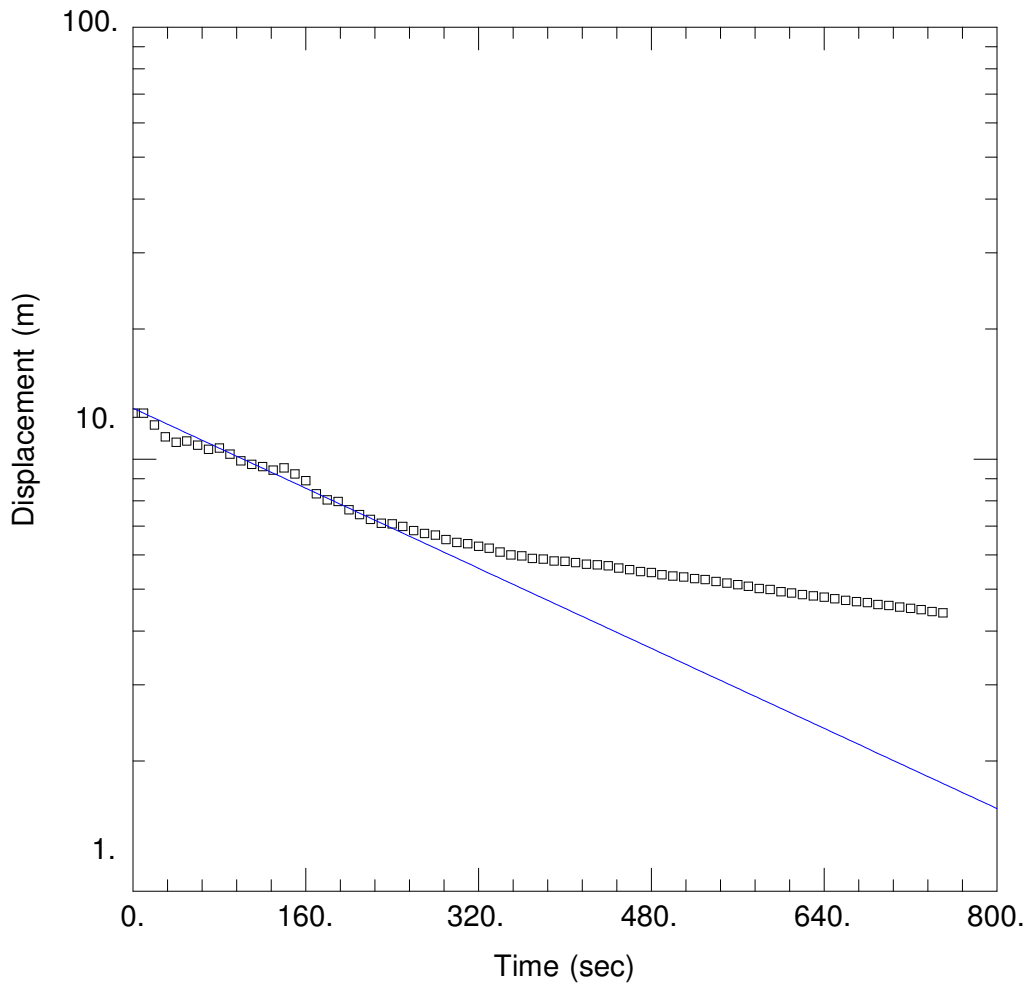
ANEXO -A

ANÁLISIS DE PRUEBAS DE INYECCIÓN

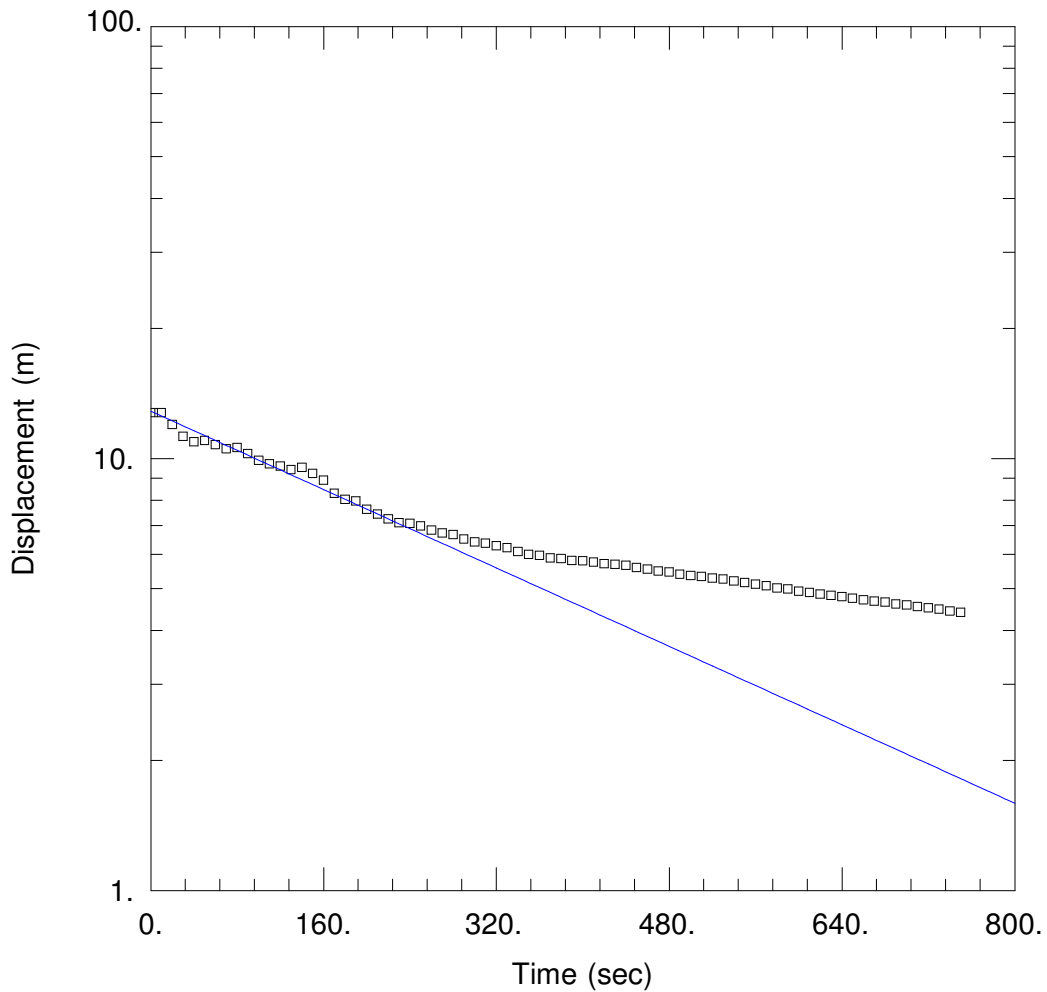
ANEXO A-1
LQ-DST-039



<u>WELL TEST ANALYSIS</u>					
Data Set: \...\DST_039 pump test Theis.aqt			Time: 12:17:58		
<u>PROJECT INFORMATION</u>					
Company:					
Client: Yanacocho					
Project: 5456--08					
Location: La Quinoa Sur					
Test Well: LQDST-039					
<u>WELL DATA</u>					
Pumping Wells			Observation Wells		
Well Name	X(m)	Y(m)	Well Name	X(m)	Y(m)
LQDST-039	0	0	LQDST-039	0	0
<u>SOLUTION</u>					
Aquifer Model: Unconfined			Solution Method: Theis		
T	=	3.921E-5 m2/sec	S	=	0.8722
Kz/Kr	=	1.395E+4	b	=	83. m

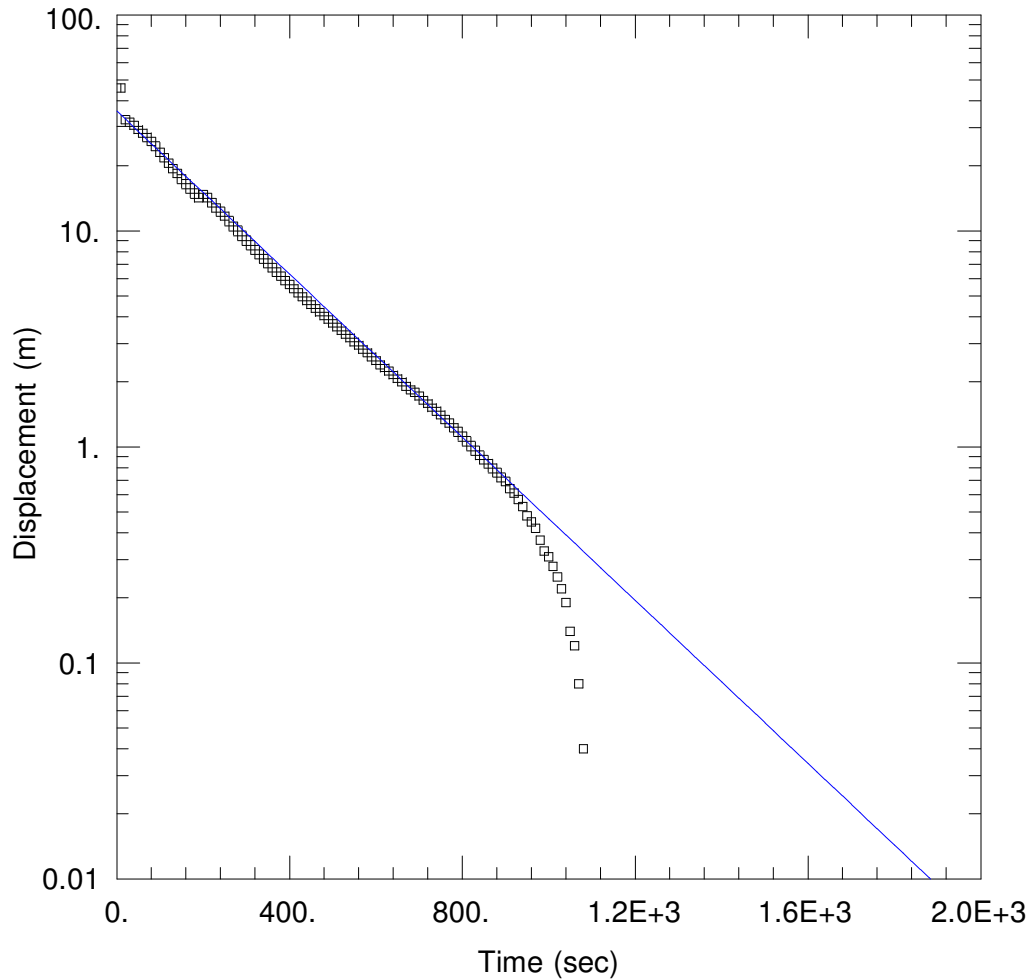


<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\DST_039 Slug test. Bouwer aqt.aqt Time: 12:19:13	
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQDST-039	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 96.6 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.
<u>WELL DATA (LQDST-039)</u>	
Initial Displacement: 12.77 m	Static Water Column Height: 96.6 m
Total Well Penetration Depth: 97. m	Screen Length: 83. m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Unconfined	Solution Method: Bouwer-Rice
K = 6.431E-8 m/sec	y0 = 13.11 m

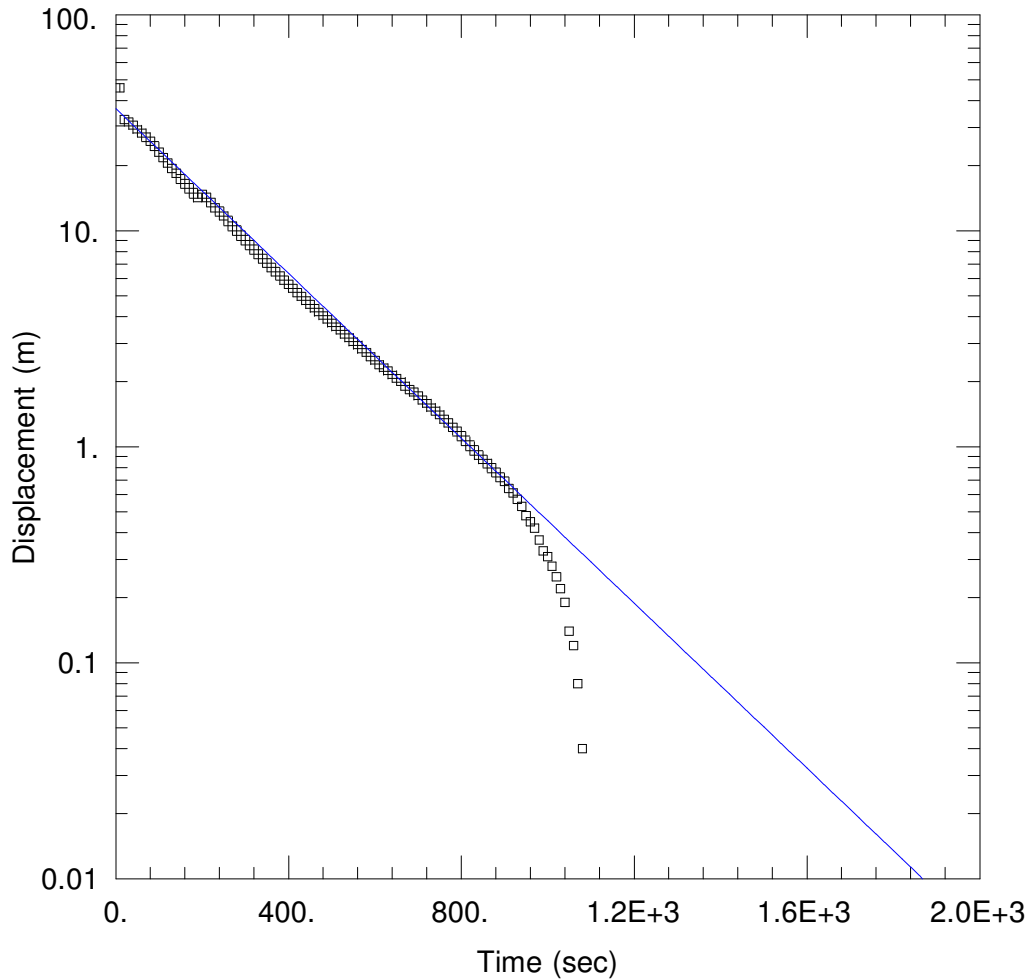


<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\DST_039 Slug test. Hvorslev.aqt	Time: 12:19:39
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQDST-039	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 83 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.
<u>WELL DATA (LQDST-039)</u>	
Initial Displacement: 12.77 m	Static Water Column Height: 96.6 m
Total Well Penetration Depth: 83 m	Screen Length: 83. m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Unconfined	Solution Method: Hvorslev
K = 5.379E-8 m/sec	y0 = 12.87 m

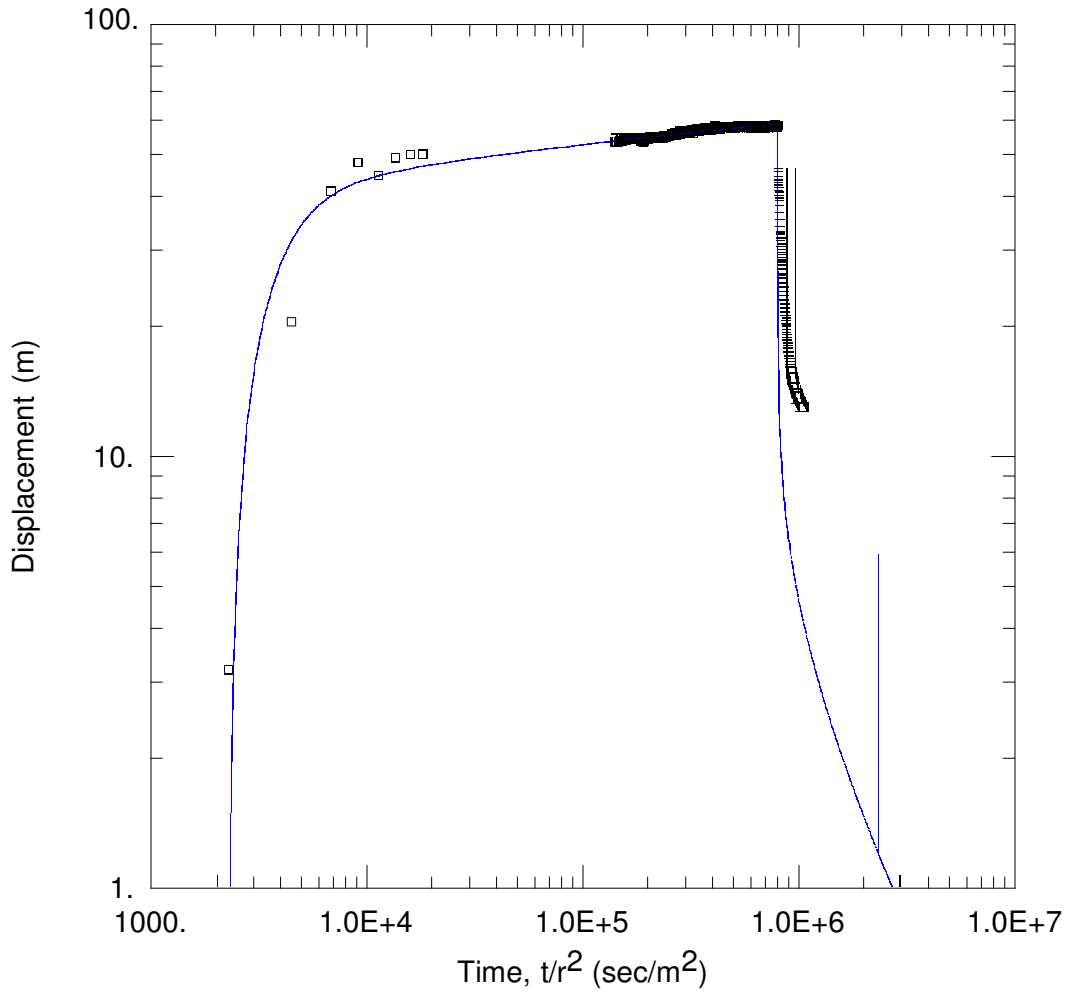
ANEXO A-2
LQ-1149



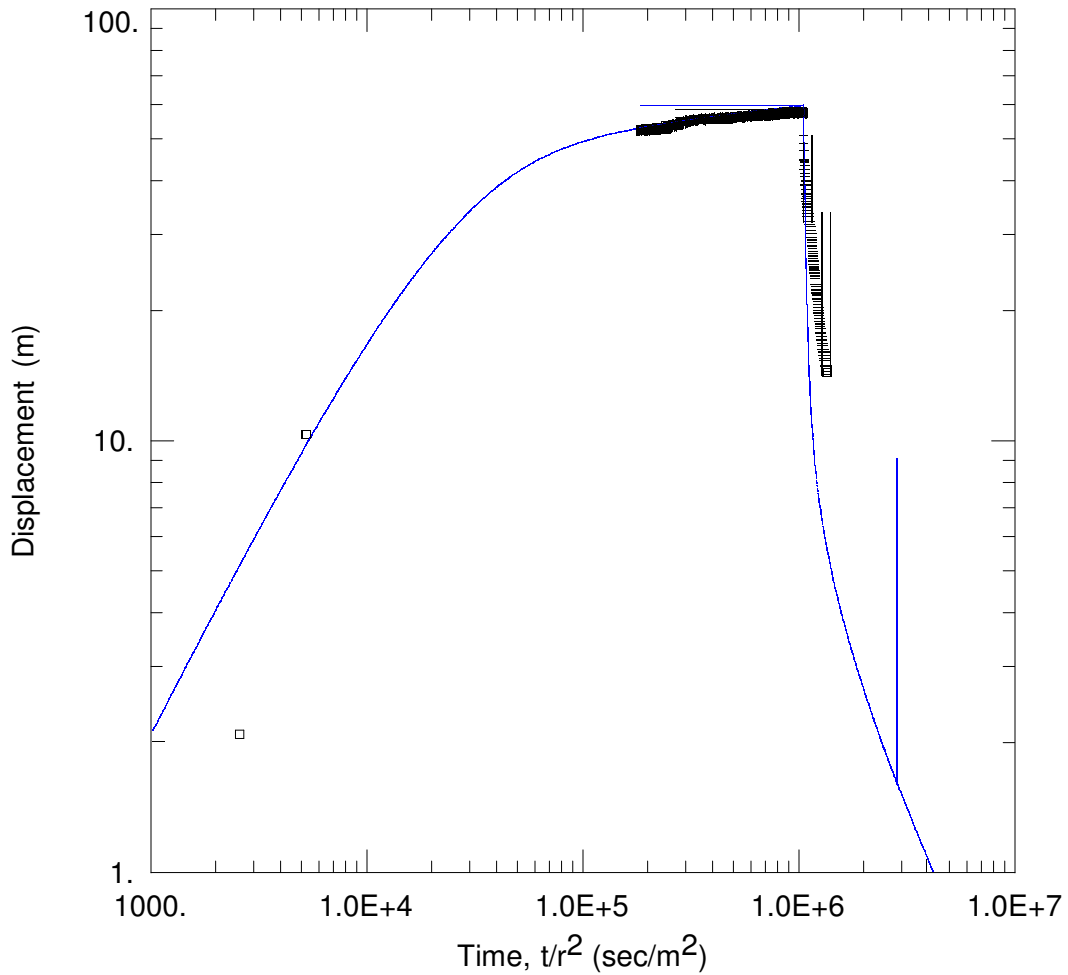
<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\LQ_1149 1 slug 1st test Bouwer.aqt Time: 12:20:33	
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQ-1149	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 46 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.
<u>WELL DATA (LQ-1149)</u>	
Initial Displacement: 45.8 m	Static Water Column Height: 136.4 m
Total Well Penetration Depth: 136.4 m	Screen Length: 20 m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Unconfined	Solution Method: Hvorslev
K = 4.052E-7 m/sec	y0 = 35.91 m



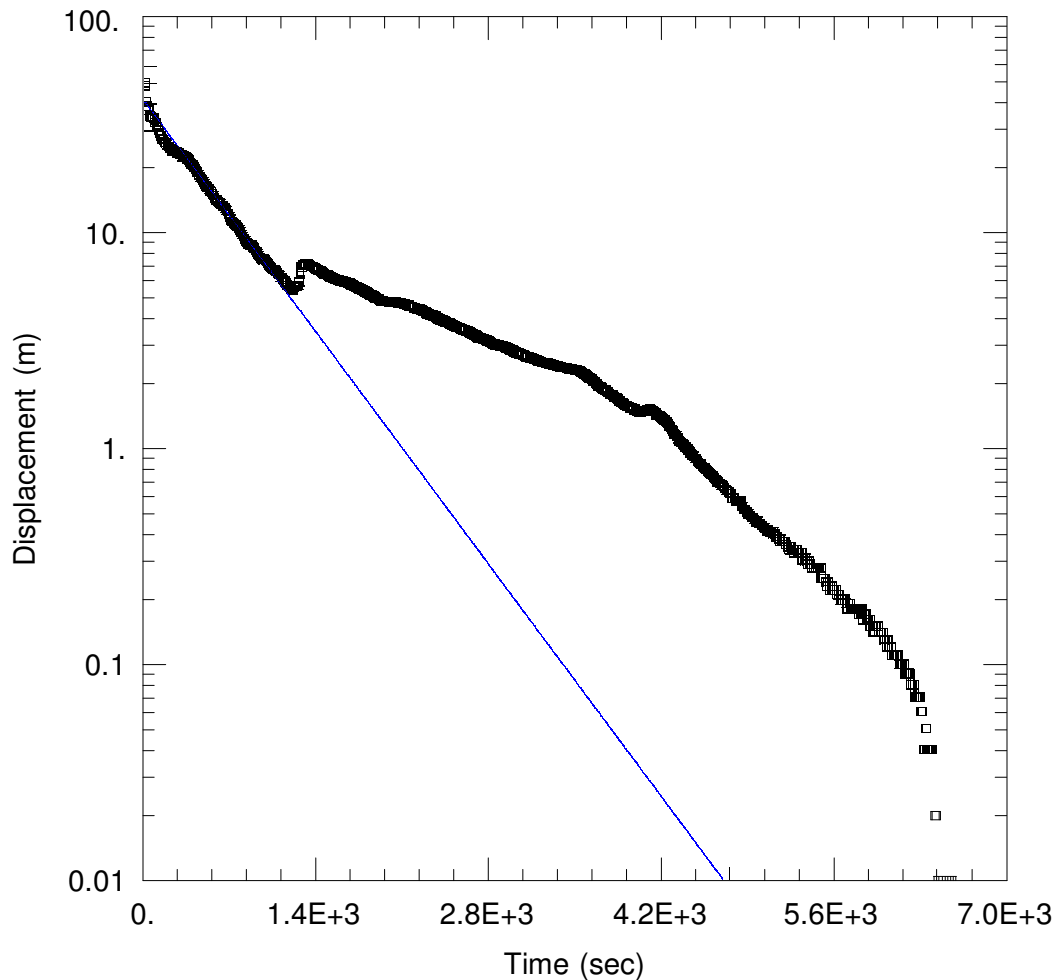
<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\LQ_1149 1 slug 1st test Hvorslov.aqt Time: 12:21:03	
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQ-1149	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 46 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.
<u>WELL DATA (LQ-1149)</u>	
Initial Displacement: 45.8 m	Static Water Column Height: 136.4 m
Total Well Penetration Depth: 136.4 m	Screen Length: 20 m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Unconfined	Solution Method: Hvorslev
K = 4.534E-7 m/sec	y0 = 35.74 m



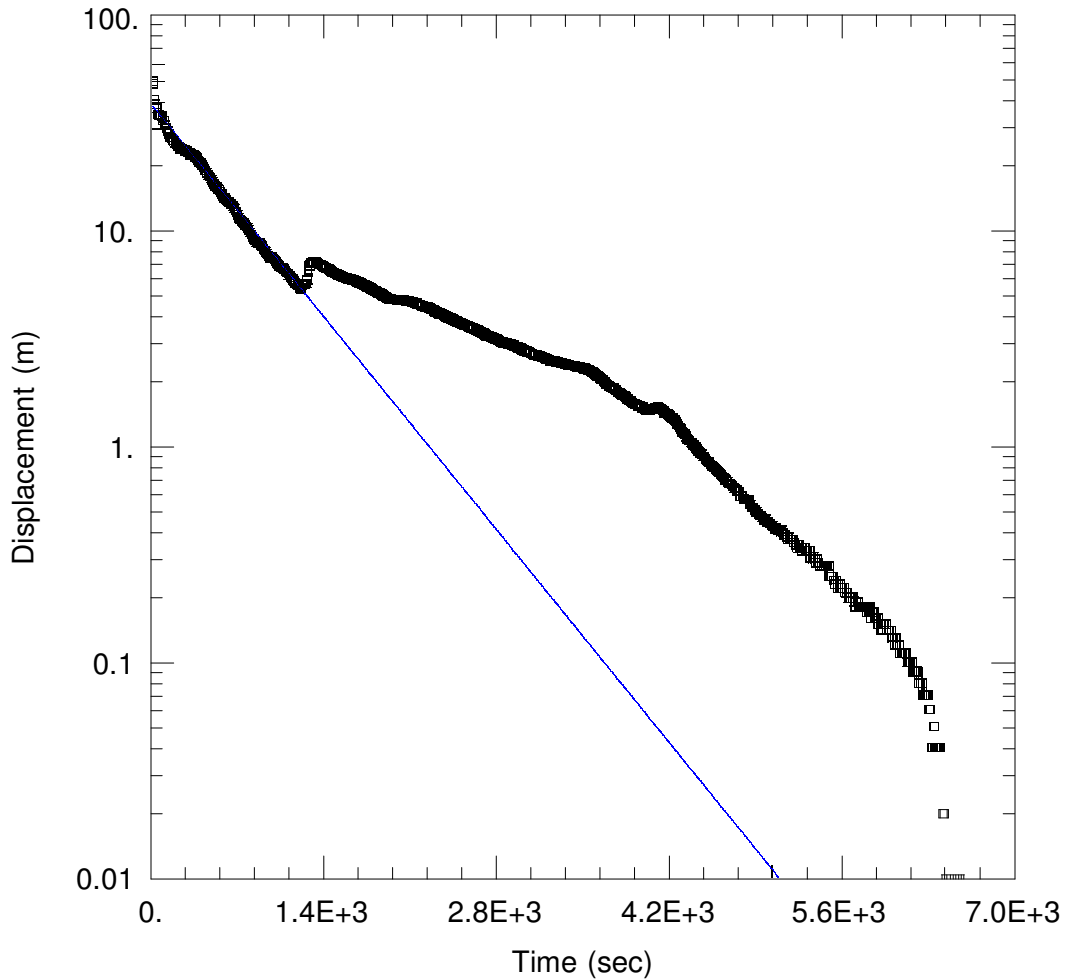
<u>WELL TEST ANALYSIS</u>					
Data Set: \...\LQ_1149 pump test 1st test Paupodopolus Cooper.aqt				Time: 12:21:28	
<u>PROJECT INFORMATION</u>					
Company:					
Client: Yanacocha					
Project: 5456--08					
Location: La Quinoa Sur					
Test Well: LQ-1149					
<u>AQUIFER DATA</u>					
Saturated Thickness: 46. m			Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.		
<u>WELL DATA</u>					
Pumping Wells			Observation Wells		
Well Name	X(m)	Y(m)	Well Name	X(m)	Y(m)
LQ-1149	0	0	LQ-1149	0	0
<u>SOLUTION</u>					
Aquifer Model: Confined			Solution Method: Papadopulos-Cooper		
T	=	5.535E-5 m2/sec	S	=	1.09E-07
r(w)	=	0.06667 m	r(c)	=	0.009657 m



<u>WELL TEST ANALYSIS</u>					
Data Set: \...\LQ_1149 pump test 2nd test Paupodopolus Cooper.aqt			Time: 12:21:56		
<u>PROJECT INFORMATION</u>					
Company:					
Client: Yanacocha					
Project: 5456--08					
Location: La Quinoa Sur					
Test Well: LQ-1149					
<u>AQUIFER DATA</u>					
Saturated Thickness: 46. m			Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.		
<u>WELL DATA</u>					
Pumping Wells			Observation Wells		
Well Name	X(m)	Y(m)	Well Name	X(m)	Y(m)
LQ-1149	0	0	LQ-1149	0	0
<u>SOLUTION</u>					
Aquifer Model: Confined			Solution Method: Papadopulos-Cooper		
T	= 4.644E-5 m2/sec		S	= 1.09E-07	
r(w)	= 0.06222 m		r(c)	= 0.03348 m	

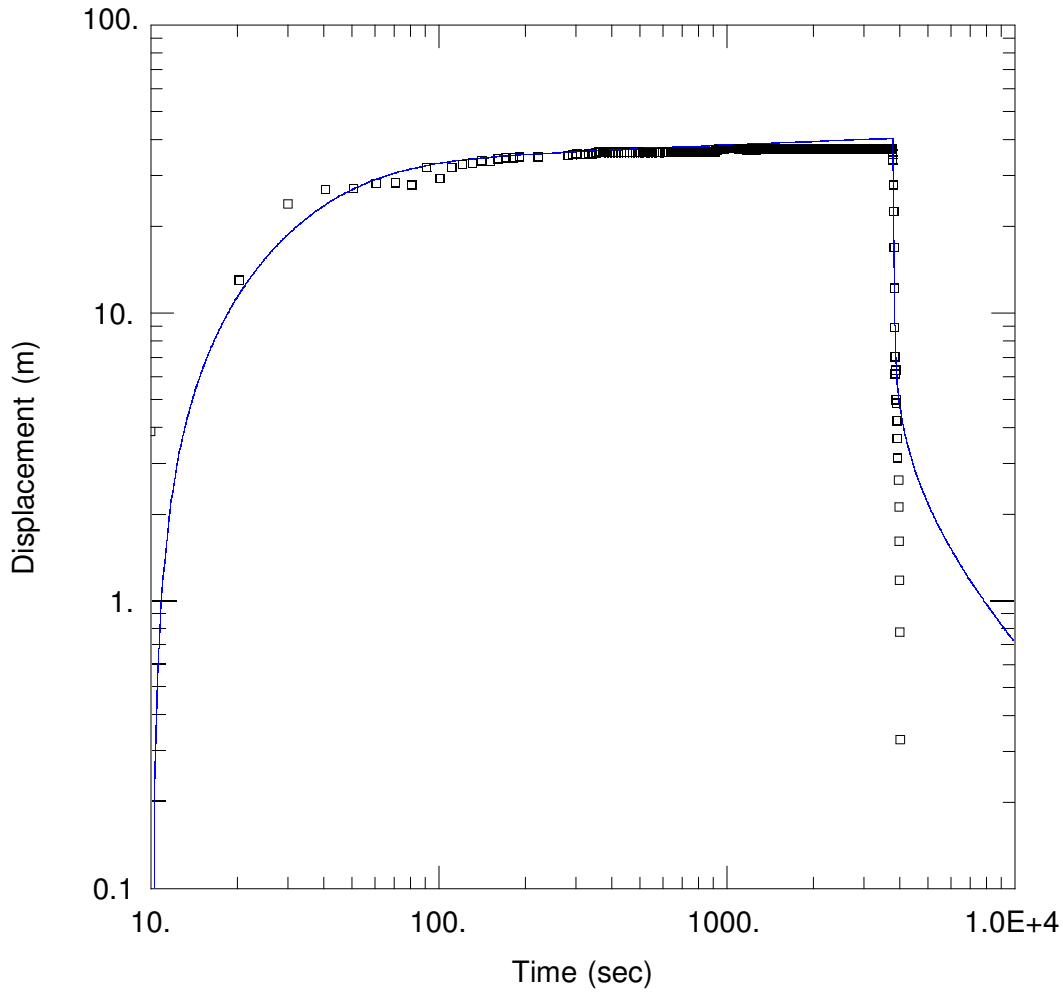


<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\LQ_1149 slug 2nd test Bouwer V2.aqt	Time: 12:22:17
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQ-1149	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 46 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.
<u>WELL DATA (LQ-1149)</u>	
Initial Displacement: 50.31 m	Static Water Column Height: 136.4 m
Total Well Penetration Depth: 46 m	Screen Length: 18 m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Confined	Solution Method: Bouwer-Rice
K = 1.596E-7 m/sec	y0 = 40.84 m

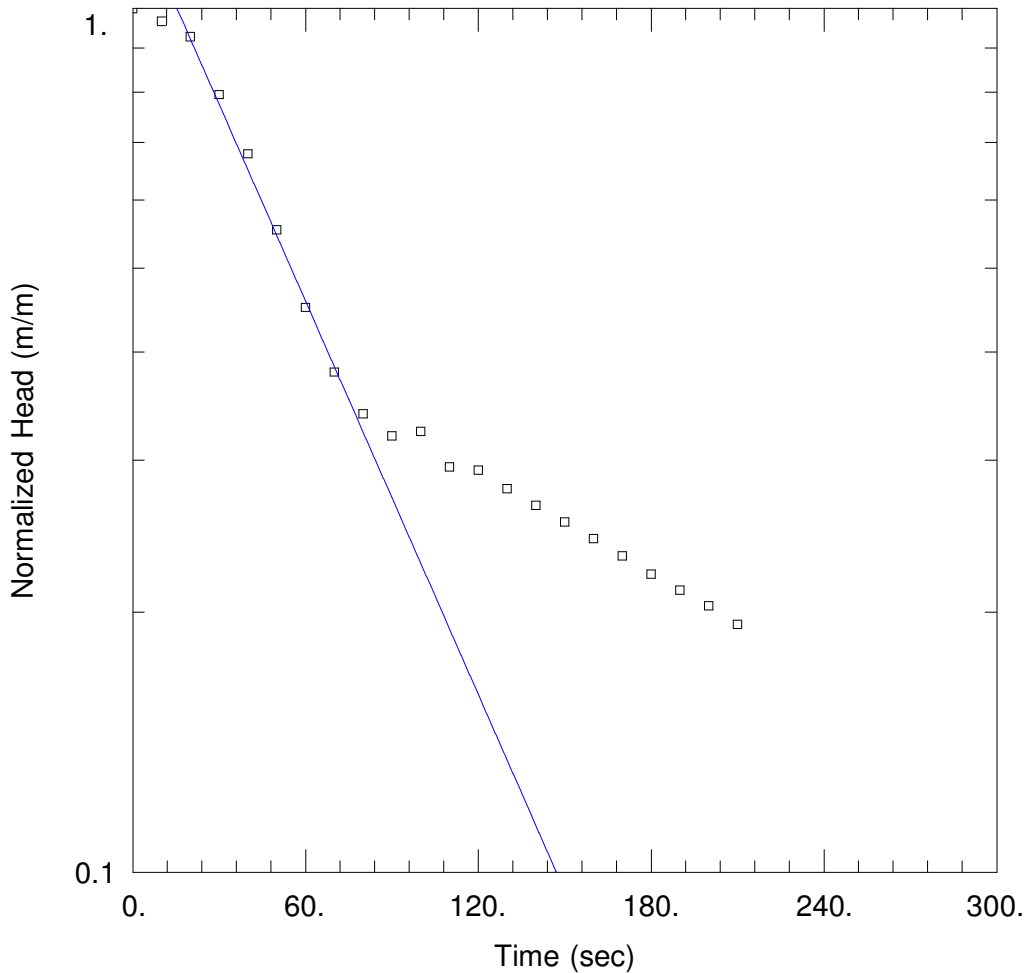


<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\LQ_1149 slug 2nd test.Hvorslov V2.aqt	Time: 12:22:41
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQ-1149	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 46 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.
<u>WELL DATA (LQ-1149)</u>	
Initial Displacement: 50.31 m	Static Water Column Height: 136.4 m
Total Well Penetration Depth: 46 m	Screen Length: 18 m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Confined	Solution Method: Bouwer-Rice
K = 1.827E-7 m/sec	y0 = 38.31 m

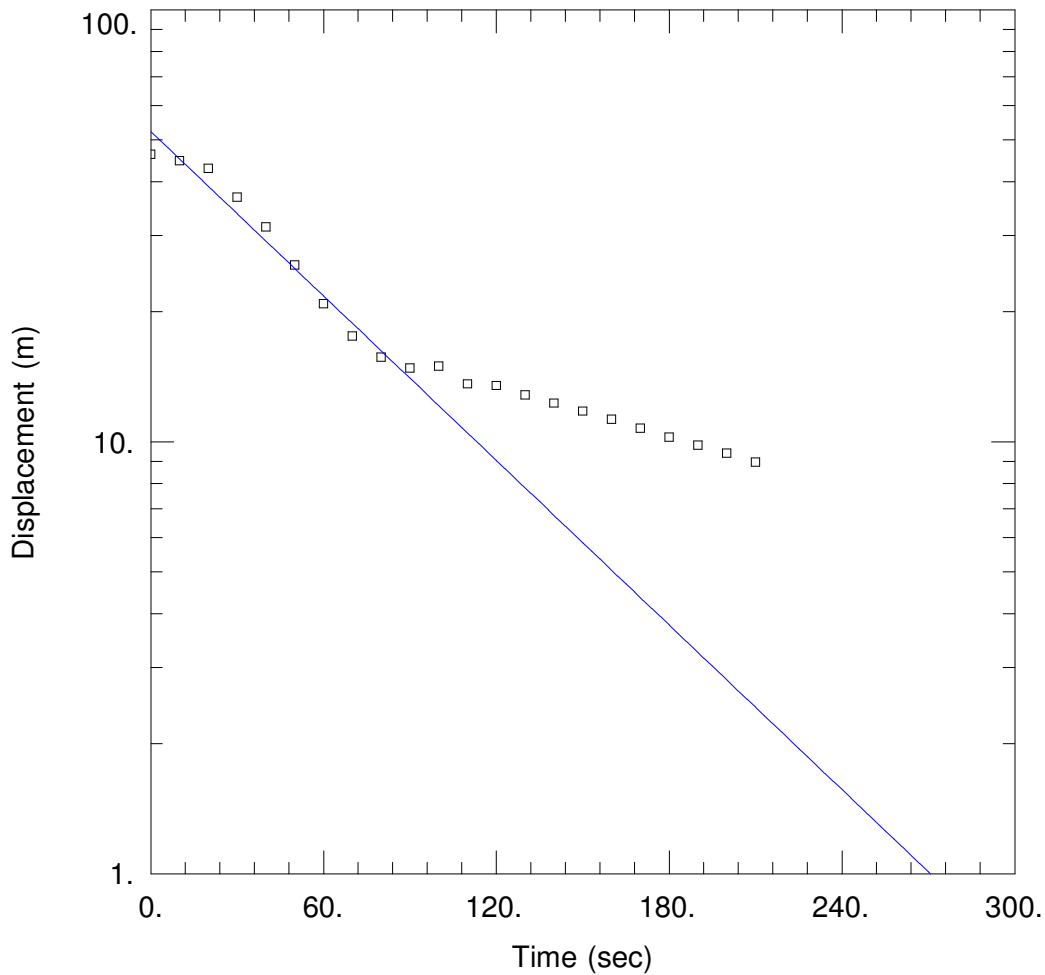
ANEXO A-3
LQ-1150



<u>WELL TEST ANALYSIS</u>					
Data Set: \...\LQ_1150 pump test Papadopulus cooper.aqt				Time: 12:23:11	
<u>PROJECT INFORMATION</u>					
Company:					
Client: Yanacochoa					
Project: 5456--08					
Location: La Quinoa Sur					
Test Well: LQ-1150					
<u>AQUIFER DATA</u>					
Saturated Thickness: 22 m			Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.		
<u>WELL DATA</u>					
Pumping Wells			Observation Wells		
Well Name	X(m)	Y(m)	Well Name	X(m)	Y(m)
LQ-1150	0	0	LQ-1150	0	0
<u>SOLUTION</u>					
Aquifer Model: Confined			Solution Method: Papadopulos-Cooper		
T	= 5.262E-5 m2/sec		S	= 1.17E-10	
r(w)	= 0.08203 m		r(c)	= 0.01462 m	

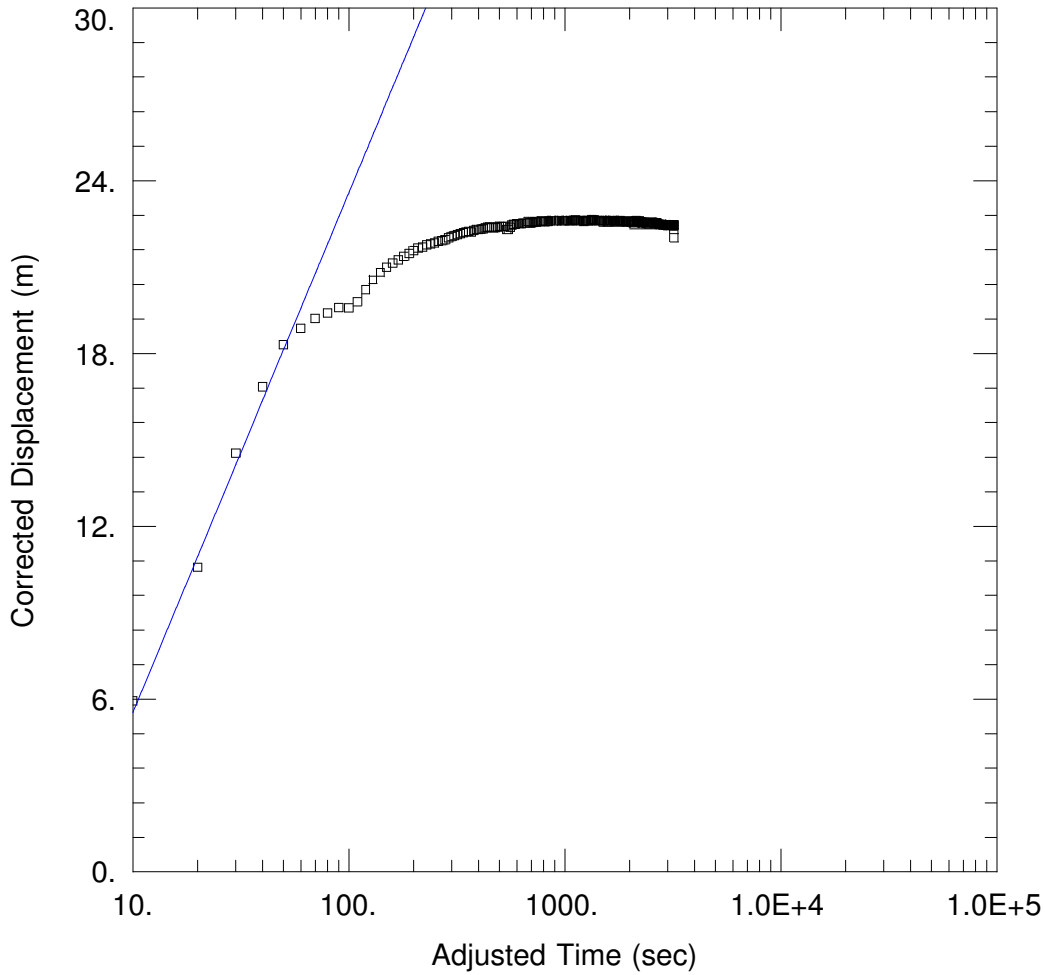


<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\LQ_1150 slug test Bouwer.aqt	Time: 12:23:35
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQ-1150	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 22 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 0.0138
<u>WELL DATA (LQ-1150)</u>	
Initial Displacement: 46.32 m	Static Water Column Height: 132.7 m
Total Well Penetration Depth: 132.7 m	Screen Length: 22 m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Unconfined	Solution Method: Hvorslev
K = 2.178E-6 m/sec	y0 = 60.55 m

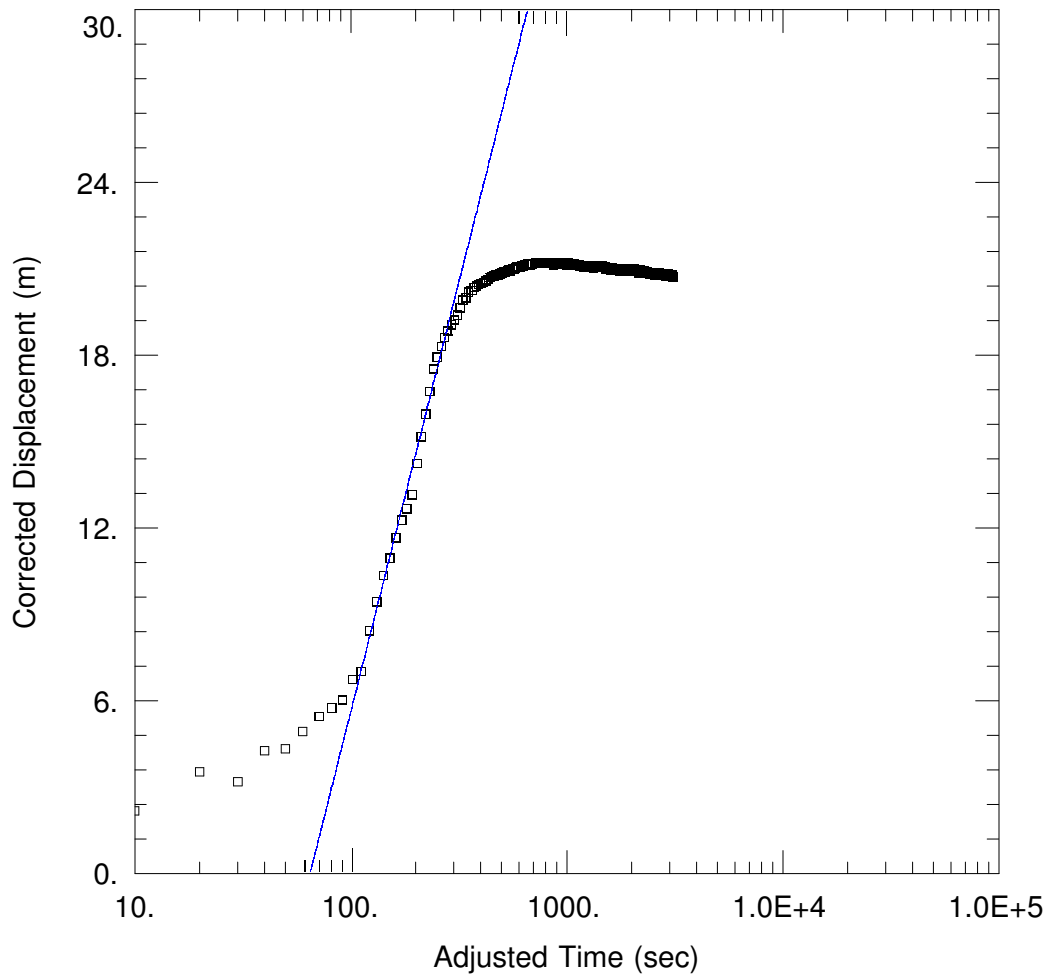


<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\LQ_1150 slug test Hvorslev.aqt	Time: 12:24:04
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocho	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQ-1150	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 22 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1
<u>WELL DATA (LQ-1150)</u>	
Initial Displacement: 46.32 m	Static Water Column Height: 132.7 m
Total Well Penetration Depth: 132.7 m	Screen Length: 22 m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Confined	Solution Method: Hvorslev
K = 1.391E-6 m/sec	y0 = 52.3 m

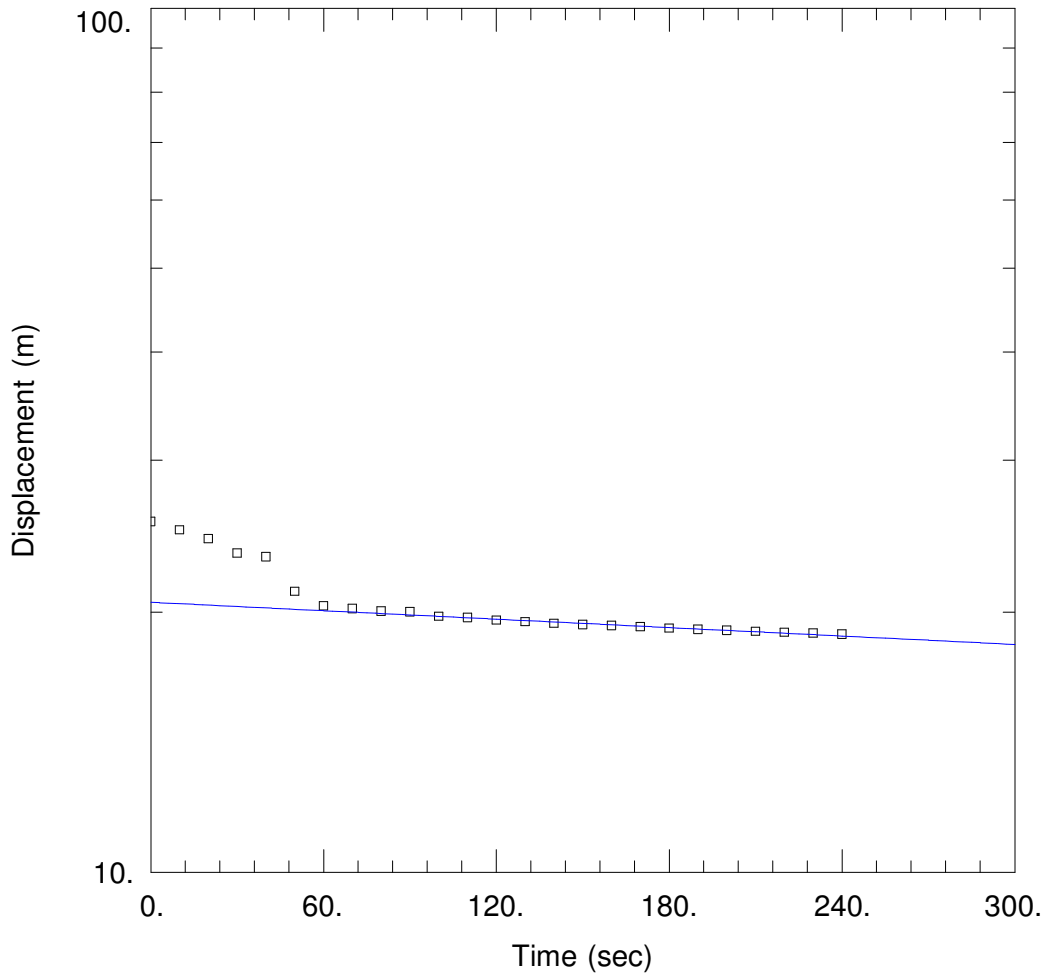
ANEXO A-4
LQ-1151



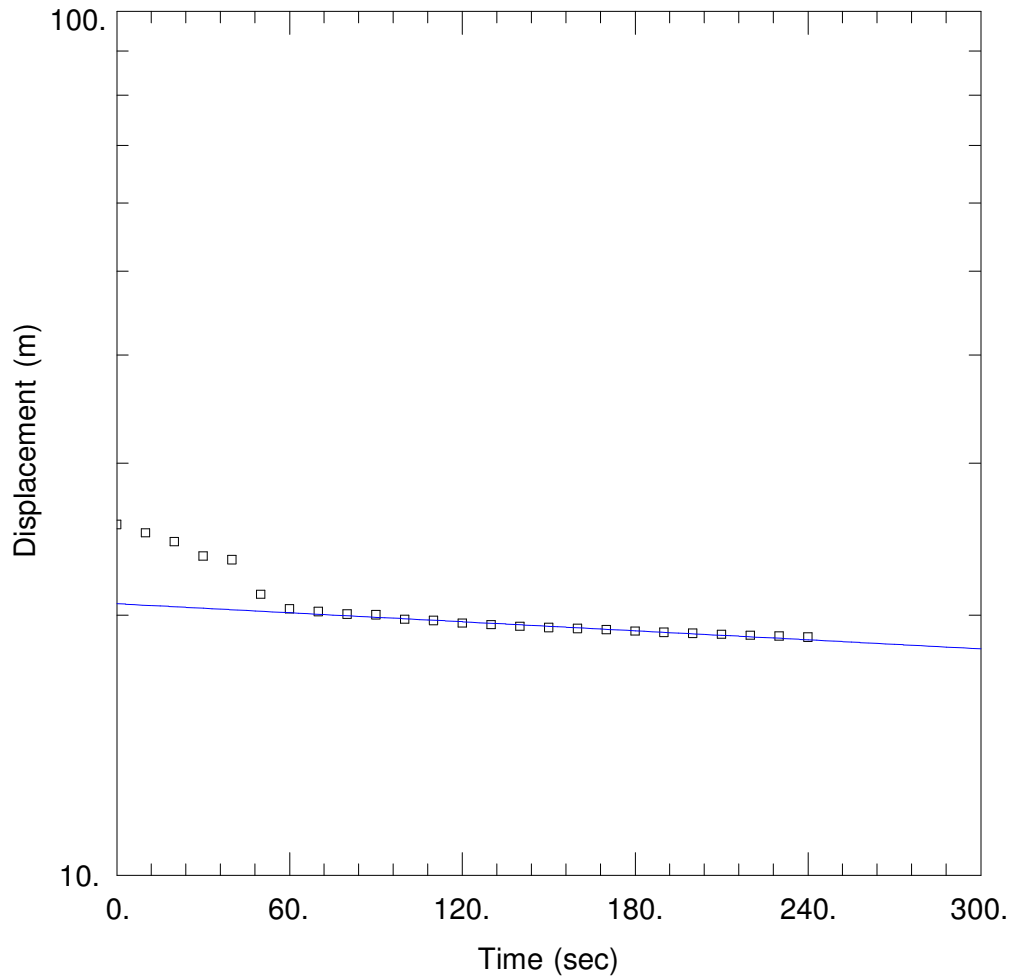
<u>WELL TEST ANALYSIS</u>					
Data Set: \...\LQ_1151 pump test 1st test Cooper Jacob.aqt				Time: 12:24:30	
<u>PROJECT INFORMATION</u>					
Company:					
Client: Yanacocha					
Project: 5456--08					
Location: La Quinoa Sur					
Test Well: LQ-1151					
<u>AQUIFER DATA</u>					
Saturated Thickness: 107.5 m			Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.		
<u>WELL DATA</u>					
Pumping Wells			Observation Wells		
Well Name	X(m)	Y(m)	Well Name	X(m)	Y(m)
New Well	771931	9224460	New Well	771931	9224460
<u>SOLUTION</u>					
Aquifer Model: Unconfined			Solution Method: Papadopulos-Cooper		
T = 2.031E-5 m2/sec			S = 5.07E-02		



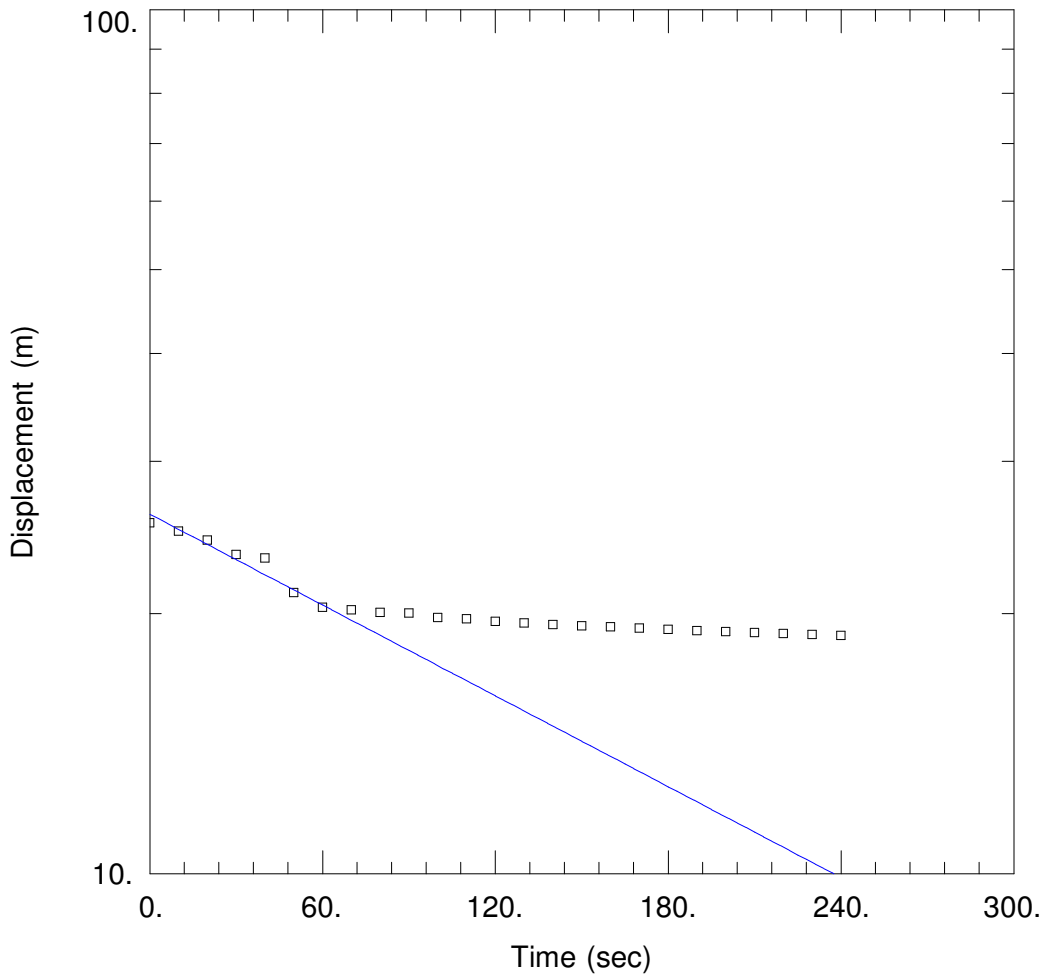
<u>WELL TEST ANALYSIS</u>					
Data Set: \...\LQ_1151 pump test 2nd test cooper Jacob.aqt				Time: 12:24:55	
<u>PROJECT INFORMATION</u>					
Company:					
Client: Yanacochoa					
Project: 5456--08					
Location: La Quinoa Sur					
Test Well: LQ-1151					
<u>AQUIFER DATA</u>					
Saturated Thickness: 112.5 m			Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.		
<u>WELL DATA</u>					
Pumping Wells			Observation Wells		
Well Name	X(m)	Y(m)	Well Name	X(m)	Y(m)
LQ-1151	771931	9224460	LQ-1151	771931	9224460
<u>SOLUTION</u>					
Aquifer Model: Unconfined			Solution Method: Cooper-Jacob		
T = 1.237E-5 m ² /sec			S = 3.70E-01		



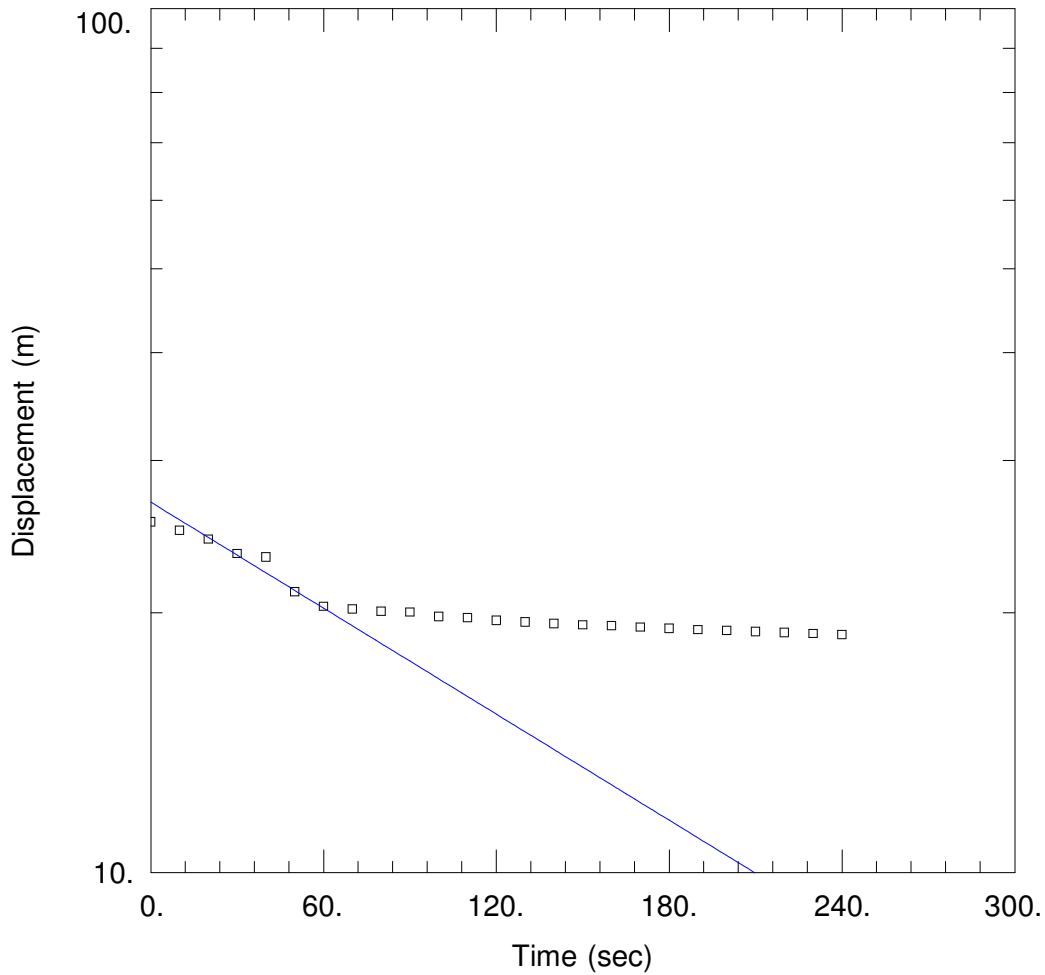
<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\LQ_1151 slug test 1st test Bouwer clay.aqt	Time: 12:26:50
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQ-1151	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 32 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1
<u>WELL DATA (LQ-1151)</u>	
Initial Displacement: 25.48 m	Static Water Column Height: 107.5 m
Total Well Penetration Depth: 124.5 m	Screen Length: 107 m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Unconfined	Solution Method: Bouwer-Rice
K = 2.249E-8 m/sec	y0 = 20.54 m



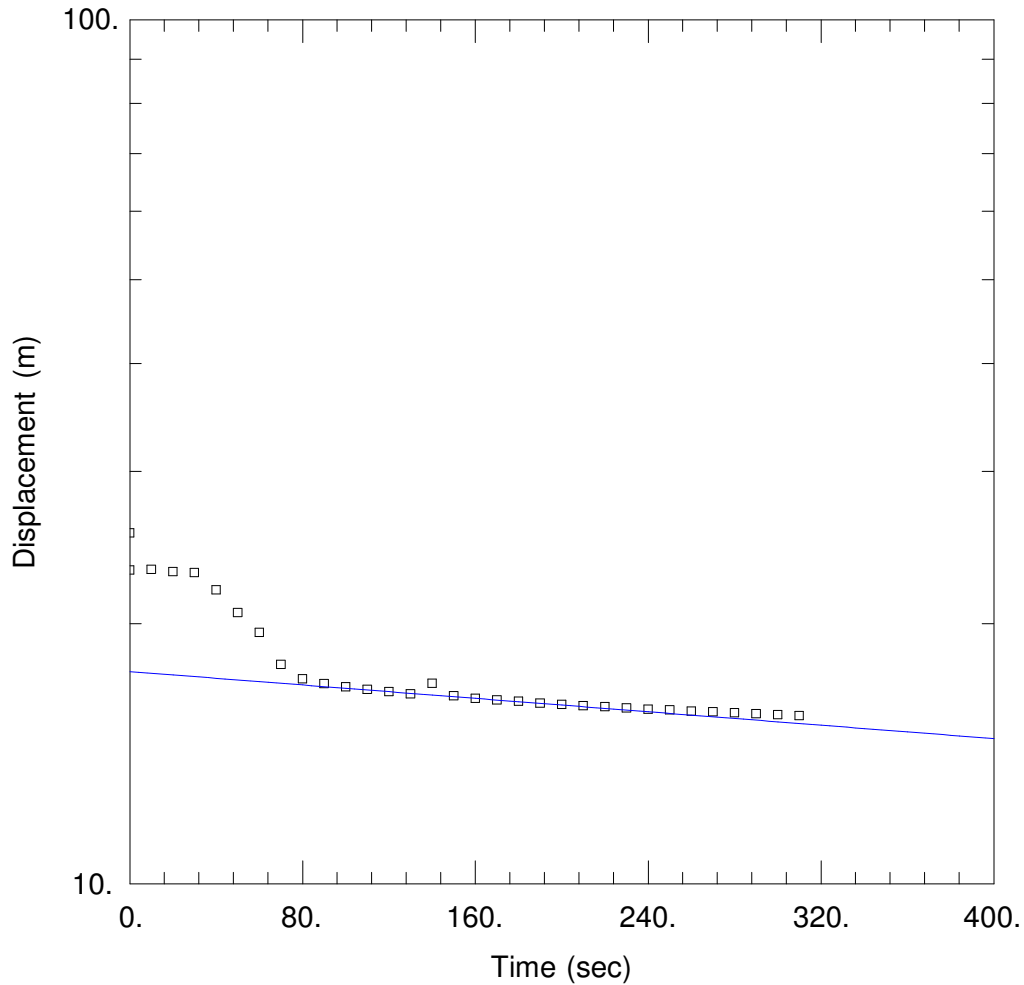
<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\LQ_1151 slug test 1st test Hvorslov clay.aqt	Time: 12:29:52
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQ-1151	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 32 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1
<u>WELL DATA (LQ-1151)</u>	
Initial Displacement: 25.48 m	Static Water Column Height: 107.5 m
Total Well Penetration Depth: 124.5 m	Screen Length: 107 m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Unconfined	Solution Method: Hvorslev
K = 2.141E-8 m/sec	y0 = 20.63 m



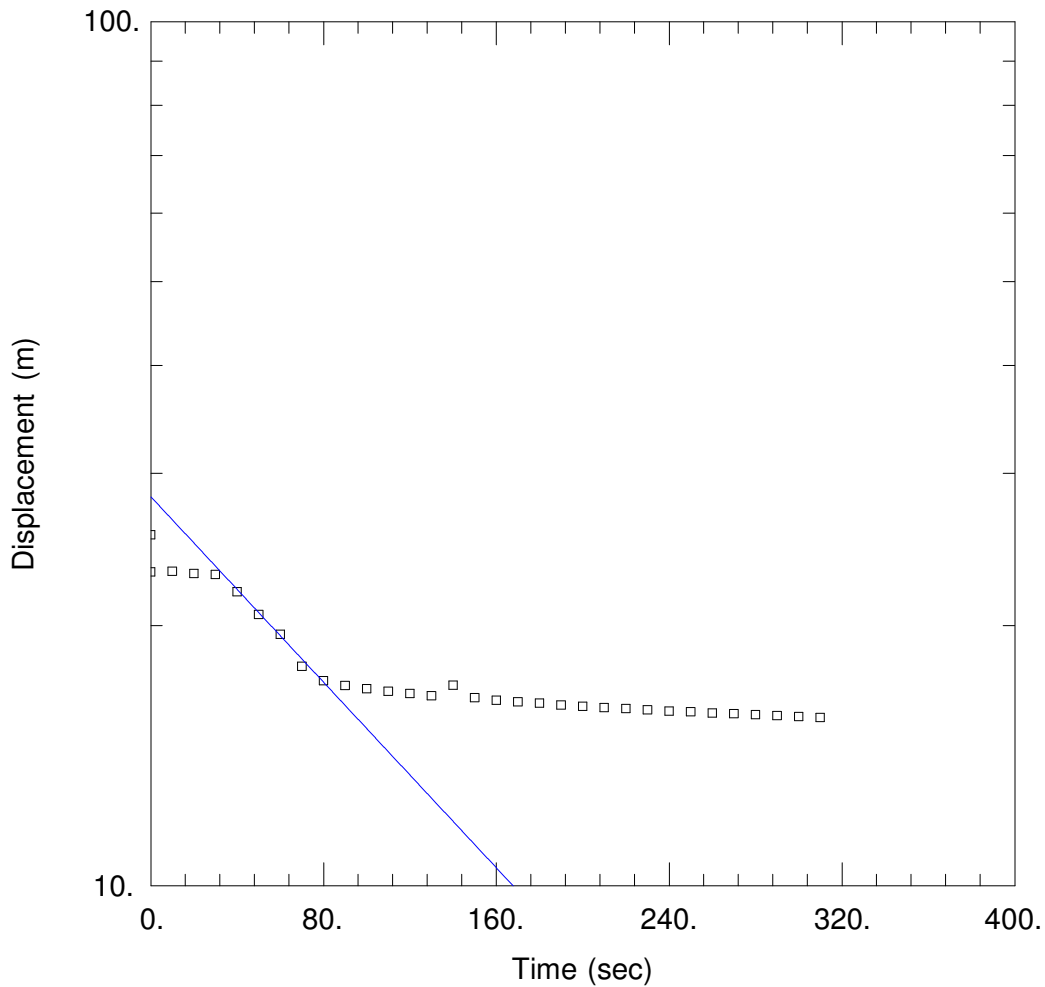
<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\LQ_1151 slug test 1st test Bower gravels.aqt	Time: 12:28:29
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQ-1151	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 24 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1
<u>WELL DATA (LQ-1151)</u>	
Initial Displacement: 25.48 m	Static Water Column Height: 107.5 m
Total Well Penetration Depth: 124.5 m	Screen Length: 107 m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Unconfined	Solution Method: Bouwer-Rice
K = 3.152E-7 m/sec	y0 = 26.07 m



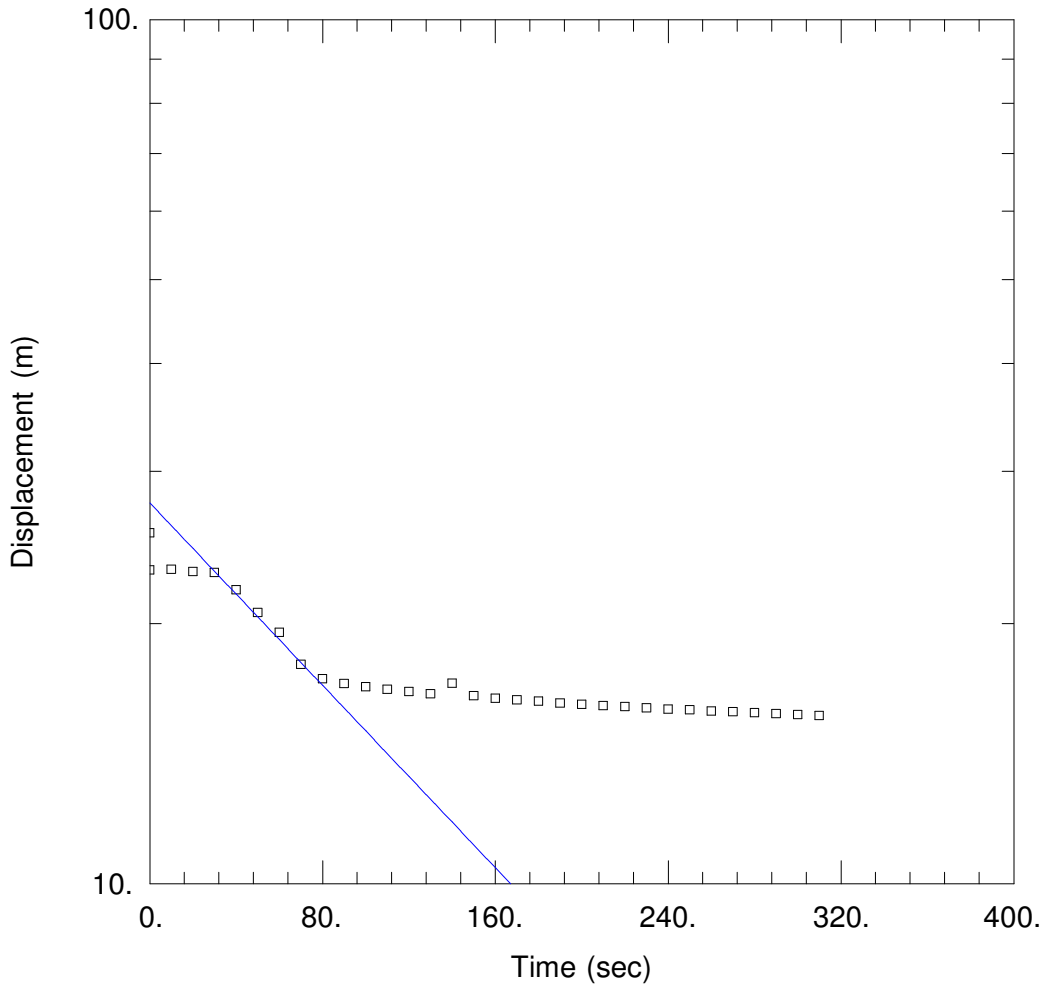
<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\LQ_1151 slug test 1st test Hvorslov gravels.aqt	Time: 12:30:44
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQ-1151	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 24 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1
<u>WELL DATA (LQ-1151)</u>	
Initial Displacement: 25.48 m	Static Water Column Height: 107.5 m
Total Well Penetration Depth: 124.5 m	Screen Length: 107 m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Unconfined	Solution Method: Hvorslev
K = 3.354E-7 m/sec	y0 = 26.85 m



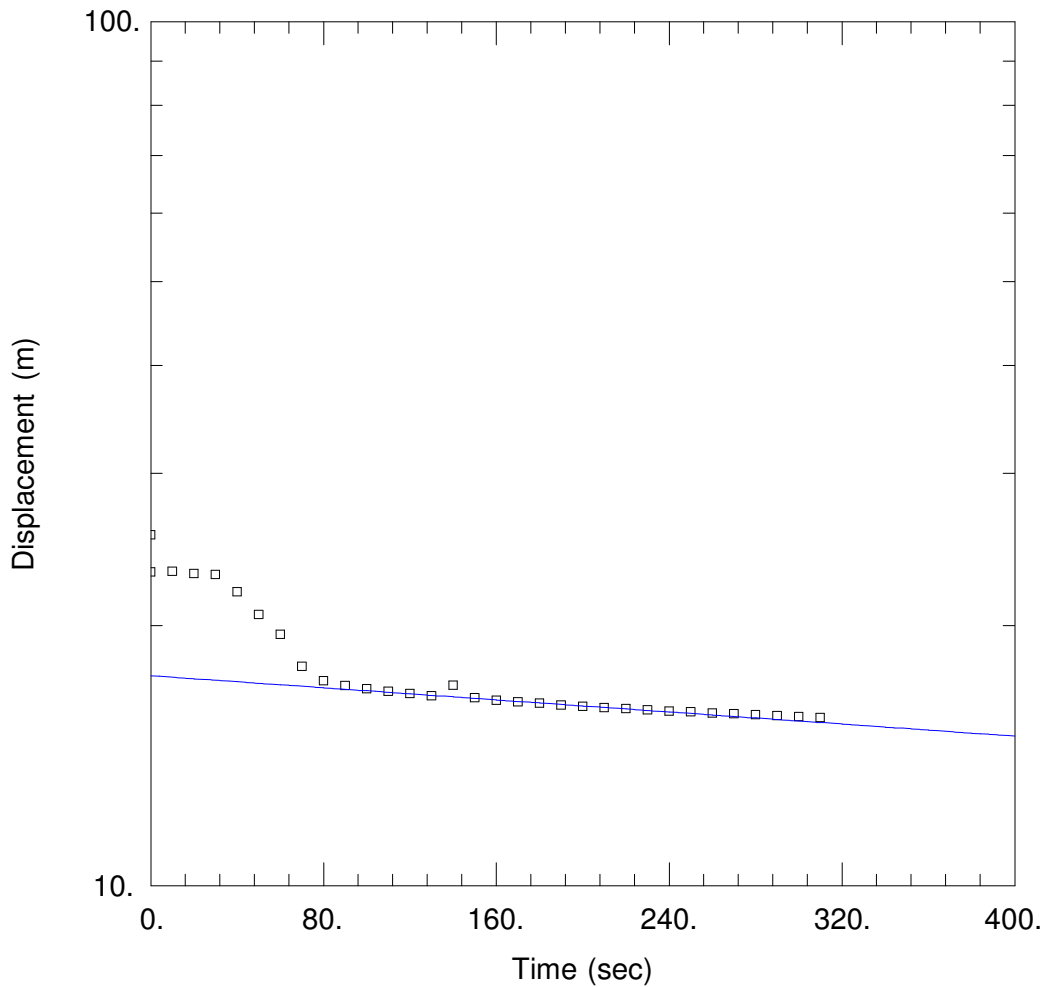
<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\LQ_1151 slug test 2nd test Bower clay.aqt	Time: 12:31:27
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQ-1151	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 72 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1
<u>WELL DATA (LQ-1151)</u>	
Initial Displacement: 25.48 m	Static Water Column Height: 107.5 m
Total Well Penetration Depth: 124.5 m	Screen Length: 107 m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Unconfined	Solution Method: Bower-Rice
K = 1.269E-8 m/sec	y0 = 17.6 m



<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\LQ_1151 slug test 2nd test Bower gravels.aqt	Time: 12:32:18
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQ-1151	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 24 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1
<u>WELL DATA (LQ-1151)</u>	
Initial Displacement: 25.48 m	Static Water Column Height: 107.5 m
Total Well Penetration Depth: 124.5 m	Screen Length: 107 m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Unconfined	Solution Method: Bouwer-Rice
K = 4.828E-7 m/sec	y0 = 28.19 m



<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\LQ_1151 slug test 2nd test Hvorslov gravels.aqt	Time: 12:33:51
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQ-1151	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 24 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1
<u>WELL DATA (LQ-1151)</u>	
Initial Displacement: 25.48 m	Static Water Column Height: 107.5 m
Total Well Penetration Depth: 124.5 m	Screen Length: 107 m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Unconfined	Solution Method: Hvorslev
K = 4.328E-7 m/sec	y0 = 27.59 m



<u>WELL TEST ANALYSIS</u>	
Data Set: \...\LQ_1151 slug test 2nd test Hvorslov clay.aqt	Time: 12:33:10
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company:	
Client: Yanacocha	
Project: 5456--08	
Location: La Quinoa Sur	
Test Well: LQ-1151	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: 32 m	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1
<u>WELL DATA (LQ-1151)</u>	
Initial Displacement: 25.48 m	Static Water Column Height: 107.5 m
Total Well Penetration Depth: 124.5 m	Screen Length: 107 m
Casing Radius: 0.0254 m	Well Radius: 0.06667 m
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: Unconfined	Solution Method: Hvorslev
K = 2.149E-8 m/sec	y0 = 17.5 m

ANEXO -B
EQUIPOS DE INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO HIDROGEOLÓGICO

Piezómetros de Cuerda Vibrante

Los piezómetros de cuerda vibrante son sensores que permiten medir la presión del agua en los poros y en las juntas. El fundamento de estos sensores consiste en una capsula metálica con una cuerda de acero en el interior, la capsula debe estar imbuida en el medio a medir (Figura 1). Cualquier cambio en las presiones del medio se traducirá en un cambio en la tensión del cable y por consiguiente un cambio en la frecuencia de vibración del mismo. La transmisión de la presión se realiza a través de una piedra porosa en el extremo. Esta variación en la frecuencia es medida por un data loguer, el cual almacena el dato y luego se transforma en unidades de presión mediante un procesamiento matemático. La utilización de este tipo de piezómetros es especialmente recomendable en medios poco permeables como limos y arcillas.

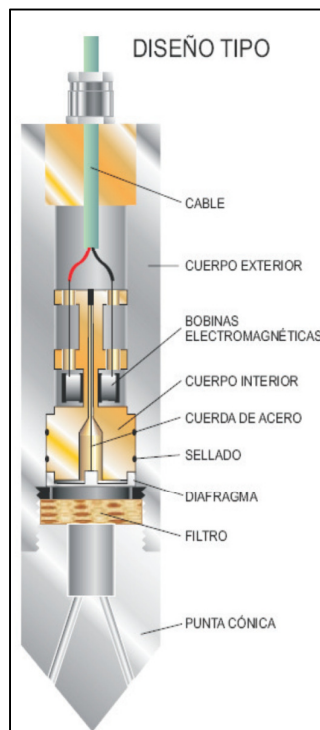


Figura 1. Partes de un piezómetro de cuerda vibrante

Piezómetros de Tubo Abierto

Conocido también como piezómetros de Casagrande, consiste de un tubo de PVC de una o dos pulgadas de diámetro, conectado a uno de sus extremos a un medio poroso (puede ser tubería ranurada), el cual debe ser colocado en el estrato que queremos medir. Luego esta tubería es colocada en una perforación quedando el extremo superior expuesto al medio ambiente (Figura 2). Posteriormente se coloca un filtro de grava en la zona ranurada y luego se sella con bentonita, esta configuración permite que el nivel la columna de agua reflejada en el tubo solo provenga del estrato medido. Luego se introduce una sonda dentro eléctrica con una cinta metálica dentro del tubo. Cuando la sonda toca el agua se cierra un circuito que hace sonar un timbre, cuando esto sucede la profundidad de la cinta es registrada, este dato representa el nivel de agua. La principal desventaja de este sistema es que tiene un periodo largo de respuesta a los cambio en los niveles freáticos.

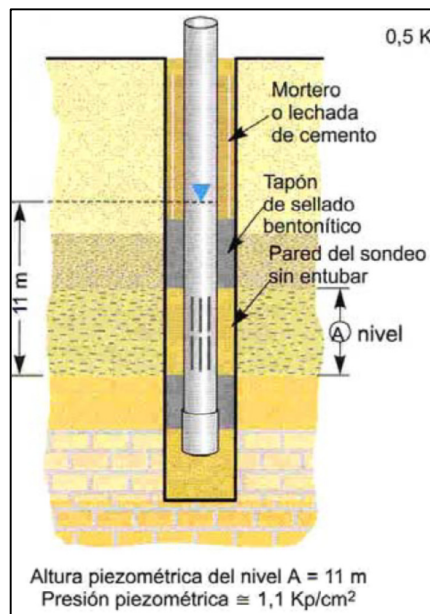


Figura 2. Piezómetro de tubo abierto