



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Civil

“EVALUACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA
EN LAS ZONAS INESTABLES DE LA PRESA
TABLACHACA, HUANCVELICA - 2020”

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título
profesional de:

Ingeniero Civil

Autores:

Bach. Richard Pool Yañez Albarran
Bach. Agustín Domingo Vega Maza

Asesor:

Mg. Ing. Gonzalo Hugo Díaz García

Lima - Perú

2020

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedicamos a nuestras familias que siempre mantuvieron su apoyo incondicional en todo sentido, a pesar que se vivieron momentos muy difíciles ante las circunstancias mundiales que todos conocemos y pasamos en el 2020. También a todos nuestros amigos ingenieros que gracias a sus aportes en conocimiento y experiencia permitieron afianzar nuestra profesión.

AGRADECIMIENTO

Richard P. Yañez Albarran

A mis padres quienes forjaron en mí, una persona íntegra de valores, determinación y compromiso en el difícil camino de la vida, a mi hermana por el ánimo y entusiasmo en terminar y presentar mi tesis.

Agustín D. Vega Maza

A los ingenieros y docentes por brindarme su apoyo y el conocimiento intelectual en mi carrera universitaria, a mis amigos y compañeros de la universidad por ser parte de mi vida que influyeron en mi desarrollo profesional.

A nuestro asesor el Ing. Gonzalo Hugo Díaz García por brindarnos la atención y tiempo necesario para realizar esta tesis, de forma adecuada y correcta.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE CONTENIDO	4
ÍNDICE DE TABLA	6
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE ECUACIÓN	11
ÍNDICE DE ANEXO.....	12
RESUMEN.....	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN.....	15
CAPÍTULO 1.	
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.....	15
1.2. REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	16
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.3.1. Problema general	17
1.3.2. Problema específico	17
1.3.2.1. Problema específico 1.....	17
1.3.2.2. Problema específico 2.....	17
1.3.2.3. Problema específico 3.....	17
1.4. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	17
1.5. ANTECEDENTES.....	18
1.5.1. Estudios internacionales de procesos de instrumentación geotécnica	18
1.5.2. Estudios nacionales de procesos de instrumentación geotécnica.....	19
1.5.3. Estudio local de proceso de instrumentación geotécnica.....	20
1.6. JUSTIFICACIÓN	21
1.7. OBJETIVO.....	22
1.7.1. Objetivo general.....	22
1.7.2. Objetivo específico	22
1.7.2.1. Objetivo específico 1	22
1.7.2.2. Objetivo específico 2	22
1.7.2.3. Objetivo específico 3	22

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA.....	23
2.2. INCLINÓMETRO VERTICAL.....	25
2.3. PIEZÓMETRO CUERDA VIBRANTE.....	30
2.3.1. <i>Funcionamiento</i>	31
2.4. ENSAYO DE PERMEABILIDAD-LEFRANC	33
2.4.1. <i>Ensayo de permeabilidad in - situ</i>	34
2.4.1.1. Ensayo de permeabilidad a carga constante	34
2.4.1.2. Ensayo de permeabilidad a carga variable.....	35
2.5. DEFINICIONES Y TÉRMINOS.....	39
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA	44
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	44
3.2. PERFORACIÓN DIAMANTINA EN LAS ZONAS INESTABLES N° 1 Y 2	47
3.3. ENSAYO DE PERMEABILIDAD LEFRANC	54
3.3.1. <i>Procedimiento de campo</i>	54
3.3.2. <i>Ensayo de permeabilidad a carga constante</i>	55
3.3.3. <i>Ensayo de permeabilidad a carga variable</i>	57
3.4. CÁLCULOS DE LOS ENSAYOS DE PERMEABILIDAD LEFRANC	59
3.4.1. <i>Zona inestable N°1</i>	62
3.4.2. <i>Zona inestable N°2</i>	69
3.5. INSTALACIÓN DE TUBERÍA PIEZOMÉTRICA E INCLINOMÉTRICA.....	75
3.6. PUESTA EN MARCHA	83
3.6.1. <i>Inclinómetro vertical</i>	83
3.6.2. <i>Piezómetros de cuerda vibrante VW</i>	86
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	91
4.1. RESULTADO DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 1	91
4.2. RESULTADO DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 2	93
4.3. RESULTADO DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 3	93
4.3.1. <i>Resultados en piezómetros de cuerda vibrante zona N° 1 y 2</i>	94
4.3.2. <i>Resultados en inclinómetros verticales de la zona N° 1 y 2</i>	97
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	103
RECOMENDACIONES	105
REFERENCIAS	107
ANEXOS	110

ÍNDICE DE TABLA

Tabla N° 1 Equipos principales empleados en instrumentación y monitoreo.....	25
Tabla N° 2 Tubería inclinométrica (guide casing), Sonda torpedo con adaptador, Cable graduado eléctrico con carrete y Unidad lectora portátil utilizado en el proyecto (sombreado gris).....	29
Tabla N° 3 Tipos de piezómetro utilizado en el proyecto (sombreado gris).....	30
Tabla N° 4 Tamaño de poros y conductividad hidráulica.....	33
Tabla N° 5 Coeficientes de permeabilidad y capacidad de infiltración	34
Tabla N° 6 Características de permeabilidad de suelos y sus métodos de medición	37
Tabla N° 7 Coeficiente de permeabilidad de diferentes tipos de suelos	38
Tabla N° 8 Correlación entre el coeficiente de permeabilidad, tipo de suelo y tamaño de las partículas	38
Tabla N° 9 Máquinas y métodos de perforación y utilizado en el proyecto (sombreado gris)	47
Tabla N° 10 Denominación y tamaño de la perforación para los diferentes diámetros utilizados en sondeos geotécnicos	48
Tabla N° 11 Registro y cálculo de S/\emptyset	62
Tabla N° 12 Datos del medidor de caudal de agua para el D1-P-1, el caudal calculado a partir de la regresión lineal	62
Tabla N° 13 Resultado del coeficiente de permeabilidad “K” del D1-P-1	63
Tabla N° 14 Registro y cálculo de S/\emptyset	63
Tabla N° 15 Datos del medidor de caudal de agua para el D1-P-2, el caudal calculado a partir de la regresión lineal	64
Tabla N° 16 Resultado del coeficiente de permeabilidad “K” del D1-P-2	64
Tabla N° 17 Registro y cálculo de S/\emptyset	65
Tabla N° 18 Datos del medidor de caudal de agua para el D1-P-3, el caudal calculado a partir de la regresión lineal	65
Tabla N° 19 Resultado del coeficiente de permeabilidad “K” del D1-P-3	66
Tabla N° 20 Registro y cálculo de S/\emptyset	66
Tabla N° 21 Datos del medidor de caudal de agua para el D1-P-4, el caudal calculado a partir de la regresión lineal	67
Tabla N° 22 Resultado del coeficiente de permeabilidad “K” del D1-P-4	67
Tabla N° 23 Registro y cálculo de S/\emptyset	68
Tabla N° 24 Datos del medidor de caudal de agua para el D1-P-5, el caudal calculado a partir de la regresión lineal	68
Tabla N° 25 Resultado del coeficiente de permeabilidad “K” del D1-P-5	69
Tabla N° 26 Registro y cálculo de h_0 y h	69
Tabla N° 27 Datos registrados con el medidor de agua de la variación del nivel de agua para el D2-P-1, cálculo de la permeabilidad utilizando la expresión “b)” y cálculo del coeficiente de permeabilidad “K” utilizando la expresión “d)” ambas deducidas de la ecuación N°7; y grafico de la pendiente “m” para realizar los ajustes lineales en base al tiempo “t” en segundos y “ln (h/h ₀)”	70

Tabla N° 28 Registro y cálculo de S/\emptyset	71
Tabla N° 29 Datos del medidor de caudal de agua para el D2-P-2, el caudal calculado a partir de la regresión lineal	71
Tabla N° 30 Resultado del coeficiente de permeabilidad “K” del D2-P-2	72
Tabla N° 31 Registro y cálculo de S/\emptyset	72
Tabla N° 32 Datos del medidor de caudal de agua para el D2-P-3, el caudal calculado a partir de la regresión lineal	73
Tabla N° 33 Resultado del coeficiente de permeabilidad “K” del D2-P-3	73
Tabla N° 34 Registro y cálculo de h_0 y h	74
Tabla N° 35 Datos registrados de la variación del nivel de agua para el D2-P-4 con el medidor de agua, cálculo de la permeabilidad utilizando la expresión “b)” y cálculo del coeficiente de permeabilidad “K” utilizando la expresión “d)” ambas deducidas de la ecuación N° 7; y grafico de la pendiente “m” para realizar los ajustes lineales en base al tiempo “t” en segundos y “ln (h/h ₀)”	74
Tabla N° 36 Resumen de Instalaciones de tubería.....	75
Tabla N° 37 Información de los piezómetros automatizados	91
Tabla N° 38 Resultados de coeficiente de permeabilidad.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Organigrama Empresa Sierra Alta Ingenieros S.A.C.....	16
Figura N° 2 Estudio y monitoreo de deslizamientos.....	23
Figura N° 3 Componentes de un sistema de inclinómetro vertical.....	26
Figura N° 4 1)Tubería (guide casing), 2)Sonda torpedo con adaptador, 3)Cable graduado con carrete y 4)Unidad lectora portátil.....	26
Figura N° 5 Dimensiones de una sonda de inclinómetro típica.....	27
Figura N° 6 Limitaciones de la sonda del inclinómetro dentro de la tubería curva de 70 mm de diámetro exterior (DE) y Diagrama exagerado de límites de curvatura por el cual puede pasar	27
Figura N° 7 Esquema del desplazamiento de un inclinómetro	28
Figura N° 8. Esquema del transductor de presión de cuerda vibrante	31
Figura N° 9 1)Transductor de presión, 2)Cable, 3)Datalogger, 4)Lab3	32
Figura N° 10 Esquema del ensayo de permeabilidad a carga constante	35
Figura N° 11 Esquema del ensayo de permeabilidad Lefranc a carga variable.....	36
Figura N° 12 Ensayo de permeabilidad Lefranc de campo	37
Figura N° 13 Al pasar el flujo de agua a lo largo de las fracturas, se produce inicialmente una pérdida de resistencia por la eliminación de la succión y posteriormente, la generación de presión de poros.....	40
Figura N° 14 El efecto de deterioro.....	40
Figura N° 15 La saturación del perfil del suelo puede activar un deslizamiento.....	42
Figura N° 16 Esquema de un bloque sobre una pendiente. Al aumentar la pendiente aumenta F_d (fuerza de empuje).....	43
Figura N° 17 a) Mapa Político del Perú.....	44
Figura N° 18 b) Departamento de Huancavelica	45
Figura N° 19 Imagen Satelital de las zonas inestables N° 1 y 2	45
Figura N° 20 Imagen Satelital 3D, línea amarilla borde de las zona inestable N°1.....	46
Figura N° 21 Imagen Satelital 3D, línea amarilla borde de las zona inestable N°2.....	46
Figura N° 22 Varios tipos de brocas, de izquierda a derecha: Brocas de corte de tierra de tres hojas, Brocas de corte de roca con rodillo tricónico, brocas de dientes de carbolog tipo corona para cortar roca blanda y broca de diamante para perforación de roca.....	49
Figura N° 23 Instalación y nivelación de tornamesa	50
Figura N° 24 Partes estándar de máquina perforadora diamantina.....	50
Figura N° 25 Máquina perforadora y montaje.....	51
Figura N° 26 Máquina perforadora y montaje.....	51
Figura N° 27 Control de verticalidad con niveles de mano certificados nuevos e imantados	52
Figura N° 28 Control de verticalidad con niveles de mano certificados nuevos, certificados e imantados	53
Figura N° 29 Control Topográfico de verticalidad en la perforación para piezómetros de cuerda vibrante y en especial para inclinómetros verticales	53

Figura N° 30 El ratio de avance en la perforación y el cambio de presión requerida puede ayudar a identificar los cambios de estrato. Las pérdidas o ganancias de agua permiten definir presiones piezométricas y el flujo a través de las capas investigadas. La medida del nivel freático al final de un día e inicio del siguiente, permite cuantificar las permeabilidades e identificar aguas estáticas	54
Figura N° 31. Por ejemplo, para el punto D1-P5 de la zona inestable N° 1, se observa que antes de ingresar a suelo firme o roca, se presenta un estrato posiblemente permeable donde se pueda estar desarrollando la superficie de deslizamiento, discontinuidad y falla progresiva. Por ello la profundidad del ensayo se desarrolla entre los 19.55m y 21.15 m	55
Figura N° 32 Llenando de agua al interior de tubería de casing de acero en pozo perforado.....	56
Figura N° 33 a) Estructura metálica donde se coloca el medidor de caudal de agua y accesorios adicionales. b) Medidor de volumen de agua	56
Figura N° 34 Toma de datos durante la ejecución del ensayo de permeabilidad Lefranc a carga constante	57
Figura N° 35 Toma de datos como el tiempo y medición del volumen de agua en relación con los niveles de agua en el interior de tubería de casing de acero en pozo perforado	57
Figura N° 36 a) Medidor sonda de nivel de agua. b) Toma de datos del descenso del nivel de agua durante la ejecución del ensayo de permeabilidad Lefranc a carga variable	58
Figura N° 37 Etapa de registros del ensayo de permeabilidad Lefranc a carga variable, el ensayo dura aproximadamente una hora.....	58
Figura N° 38 De la figura N° 9, se deduce las dimensiones completaría que son registradas de campo	59
Figura N° 39 De la figura N° 9, se deduce las dimensiones completaría que son registradas de campo	60
Figura N° 40 Tubería ranurada con geotextil y tapa de fondo.....	75
Figura N° 41 Sujeción y vertido de arena N°20-40.....	76
Figura N° 42 Vertido de bentonita granular	76
Figura N° 43 a), b) y c) Vaciado de lechada por etapas hasta el nivel de superficie d) Verificación vertical de la tubería mientras fragua la lechada	77
Figura N° 44 a), b) y c) Colocación de tapa de fondo de tubería inclinométrica.....	78
Figura N° 45 Acople de tapa de fondo	79
Figura N° 46 Introducción de tubería inclinométrica	79
Figura N° 47 Tubería inclinométrica alineada.....	80
Figura N° 48 Acople entre segmentos de tubería inclinométrica	80
Figura N° 49 Junta de acople asegurada.....	80
Figura N° 50 Ranuras orientadas y tubería centrada.....	81
Figura N° 51 Dosificación de cemento más bentonita mezclado en el agitador.....	82
Figura N° 52 Se debe verificar siempre que la tubería inclinométrica se encuentre centrada y con la lechada cemento-agua bentonita hasta el nivel de superficie.....	82
Figura N° 53 Verifica verticalidad y orientación al termino de inyección y construcción de caja de protección.	82
Figura N° 54 Software Digipro2	83
Figura N° 55 Equipos utilizados para la medición de la puesta en marcha	84

Figura N° 56 Ingreso del sensor en el A+.....	84
Figura N° 57 Ingreso del sensor en el A.....	85
Figura N° 58 A y B en sus unidades clásicas de “sen θ ”.....	85
Figura N° 59 Ejemplo de datos del inclinómetro de movimientos acumulados resultante en el eje a y b86	
Figura N° 60 Software LogView	87
Figura N° 61 Verificación y calibración de transductor en conexión con Datalogger.....	87
Figura N° 62 Ejemplo de hoja de parámetros de calibración del Transductor, las lecturas cero en el sitio deben coincidir con las lecturas de fábrica contenidos en los 20 dígitos después de efectuar las correcciones atmosféricas y de temperatura	88
Figura N° 63 Ingreso de Transductor configurado, con de barra de 30 cm (contrapeso evitará que flote).....	88
Figura N° 64 Ejemplo de ID de conectividad.....	89
Figura N° 65 Ejemplo de Sensor Setting	89
Figura N° 66 Esquema de conexión y puesta en marcha para piezómetro de cuerda vibrante VW	90
Figura N° 67 Diagrama de barras de perforación e instalación de tubería zona	92
Figura N° 68 Diagrama de barras de perforación e instalación de tubería zona	92
Figura N° 69 Mediciones de la puesta en marcha del piezómetro D1-P1	94
Figura N° 70 Mediciones de la puesta en marcha del piezómetro D2-P3	95
Figura N° 71 Mediciones de la puesta en marcha del piezómetro D2-P4	96
Figura N° 72 D1-P2 Resultado en el eje A de los desplazamientos horizontales acumulados, componente A y B. Dirección del eje ranurado +A de la tubería inclinométrica: Azimut calculado $336^{\circ}13'46''$ según como quedo orientado en la instalación siguiendo el sentido del desplazamiento.	97
Figura N° 73 D1-P3 Resultado en el eje A de los desplazamientos horizontales acumulados, componente A y B. Dirección del eje ranurado +A de la tubería inclinométrica: Azimut calculado $354^{\circ}52'34''$ según como quedo orientado en la instalación siguiendo el sentido del desplazamiento.	98
Figura N° 74 D1-P4 Resultado en el eje A de los desplazamientos horizontales acumulados, componente A y B. Dirección del eje ranurado +A de la tubería inclinométrica: Azimut calculado $214^{\circ}12'57''$ según como quedo orientado en la instalación siguiendo el sentido del desplazamiento.	99
Figura N° 75 D1-P5 resultado en el eje A de los desplazamientos horizontales acumulados, componente A y B. Dirección del eje ranurado +A de la tubería inclinométrica: Azimut calculado $336^{\circ}48'05''$ según como quedo orientado en la instalación siguiendo el sentido del desplazamiento.	100
Figura N° 76 D2-P1 resultado en el eje A de los desplazamientos horizontales acumulados, componente A y B. Dirección del eje ranurado +A de la tubería inclinométrica: Azimut calculado $25^{\circ}07'59''$ según como quedo orientado en la instalación siguiendo el sentido del desplazamiento.	101
Figura N° 77 D2-P2 resultado en el eje A de los desplazamientos horizontales acumulados, componente A y B. Dirección del eje ranurado +A de la tubería inclinométrica: Azimut calculado $11^{\circ}35'30''$ según como quedo orientado en la instalación siguiendo el sentido del desplazamiento.	102
Figura N° 78 lluvias, niveles freáticos.....	105

ÍNDICE DE ECUACIÓN

Ecuación N° 1 Formula básica para el cálculo de permeabilidad.....	33
Ecuación N° 2 Ensayo a carga constante.....	34
Ecuación N° 3 Ensayo a carga variable.....	35
Ecuación N° 4 Se deduce de la ecuación N°2, si $S/\emptyset < 2$	60
Ecuación N° 5 Se deduce de la ecuación N°2, si $S/\emptyset = 2$	60
Ecuación N° 6 Se deduce de la ecuación N°2, si $S/\emptyset > 2$	60
Ecuación N° 7 Viene de la ecuación N° 3, se puede expresar de la siguiente manera	61
Ecuación N° 8 Cálculo de dígitos.....	90

ÍNDICE DE ANEXO

Anexo A. Matriz de Consistencia	110
Anexo B. a) Tamaños estándar de herramientas tuberías de perforación	111
Anexo C. b) Tamaños estándar de herramientas tuberías de perforación.....	112
Anexo D. Certificado de calibración medidor de caudal Lefranc.....	113
Anexo E. Certificado de calibración del Sensor torpedo Slope Indicador Dgsi_50332510. El equipo de unidades métricas de Slope Indicator proporciona una precisión del sistema de $\pm 0,25$ mm por lectura, o ± 6 mm acumulados en 50 lecturas, La especificación se derivó empíricamente de una gran cantidad de conjuntos de datos e incluye errores aleatorios y sistemáticos para incrementos de 50 lecturas y una sonda de inclinómetro de 2 pies.....	114
Anexo F. Durante la perforación diamantina e instalación.....	115
Anexo G. Durante los ensayos de permeabilidad Lefranc.....	115
Anexo H. Durante las mediciones inclinométricas y puesta en marcha	116
Anexo I. Durante las verificaciones de gabinete	116
Anexo J. a) Piezómetro cuerda vibrante y b) Inclinómetro zona inestable N° 1	117
Anexo K. Inclinómetro zona inestable N° 1	118
Anexo L. Inclinómetro zona inestable N° 2	119
Anexo M. Piezómetro de cuerda vibrante de zona inestable N° 2.....	120
Anexo N. Plano de ubicación de la zona inestable N° 1.....	121
Anexo O. Plano de la zona inestable N° 2.....	122

RESUMEN

El presente trabajo presenta la puesta en marcha de la evaluación de los fenómenos geodinámicos y su evolución durante este periodo, para su continuidad en el tiempo y en base de registros detallados con el propósito de monitorear su condición de estabilidad. Para el desarrollo de la instrumentación geotécnica se centrará en las zonas inestables uno y dos del embalse de la presa Tablachaca, el primero contará con cuatro puntos de monitoreo inclinómetro vertical y un punto de control piezométrico de cuerda vibrante y en la segunda zona dos puntos de monitoreo inclinómetro vertical y dos de control piezométrico de cuerda vibrante, se ejecutaron metodologías y procedimiento de perforación, instalación de tubería inclinométrica y piezométrica de cuerda vibrante, ensayo Lefranc y monitoreo de la puesta en marcha en la etapa inicial que permitirá obtener un conocimiento básico sobre las técnicas empleadas, procesos, análisis e importancia de implementar la instrumentación geotécnica.

La misma se convierte en una valiosa herramienta dentro del control y seguimiento en zonas inestables, Bassett (2012) afirma que “el uso en el sitio, observaciones en tiempo real de los cambios físicos reales y las tasas de cambio pueden dar a los diseñadores la capacidad de mejorar sus evaluaciones teóricas y dar a los contratistas condiciones para que sus procedimientos de construcción permanezcan seguros”.

Asimismo, el presente trabajo servirá a otros profesionales y proyectos en continuar mejorando las técnicas y procedimientos en la evaluación de la instrumentación geotécnica, no es exclusivo a zonas inestables. También puede verse desarrollado en presas, represas, relaveras, edificaciones, proyectos de carreteras, infraestructuras y Minería.

Palabras Clave: Instrumentación geotécnica, Inclinómetro vertical, Piezómetro de cuerda vibrante, Ensayo Lefranc.

ABSTRACT

This work presents the implementation of the evaluation of geodynamic phenomena and its evolution during this period, for its continuity in time and based on detailed records in order to monitor its stability condition. For the development of geotechnical instrumentation, it will focus on unstable zones one and two of the Tablachaca dam reservoir, the first one will have four vertical inclinometer monitoring points and a vibrating wire piezometric control point and in the second zone two points of vertical inclinometer monitoring and two vibrating wire piezometric control, drilling methodologies and procedures, installation of vibrating wire inclinometric and piezometric pipes, Lefranc test and commissioning monitoring in the initial stage that will allow obtaining a basic knowledge about the techniques used, processes, analysis and importance of implementing geotechnical instrumentation.

It becomes a valuable tool within the control and monitoring in unstable areas, Bassett (2012) affirms that “the use in the site, real-time observations of the real physical changes and the rates of change can give designers the ability to improve their theoretical evaluations and give contractors conditions so that their construction procedures remain safe”.

Likewise, this work will serve other professionals and projects in continuing to improve techniques and procedures in the evaluation of geotechnical instrumentation, it is not exclusive to unstable areas. It can also be seen developed in dams, dams, tailings, buildings, highway projects, infrastructures and Mining.

Keywords: Geotechnical Instrumentation, Vertical Inclinometer, Vibrating Wire Piezometer, Lefranc Test.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción de la Empresa

Sierra Alta Ingenieros S.A.C (SAI) es una empresa que pertenece al grupo empresarial del El Árabe S.A.

Sierra Alta Ingenieros S.A.C. Es una empresa especializada en brindar servicios integrales de consultoría, diseño, planificación y gestión en el desarrollo sostenible de proyectos civiles, hidráulicos, eléctricos y ambientales en los sectores mineros e industriales. Inicia sus operaciones en el año 2016 con el nombre de Cárdenas Group Contratistas Generales E.I.R.L, pero en cumplimiento de su plan estratégico técnico-económico de crecimiento cambio a su nombre actual, siendo una empresa relativamente joven cuenta con talento humano de mucha experiencia, que hace de sus proyectos exitosos y en satisfacción de sus clientes. La empresa se encuentra certificada con las cinco ISOS, Calidad 9001, Ambiente 14001, Seguridad 45001, Antisoborno 37001, Energética 50001. Homologado por SGS para actividades conexas en compañía Minera Antamina S.A y por Bureau Veritas para actividades conexas y suministro para Shougang Hierro Perú S.A.A.

Su experiencia principalmente se basa en las siguientes líneas de negocio. ingeniería Geotécnica, instrumentación Geotécnica, movimiento de tierras, laboratorio (suelo, concreto y asfalto), monitoreo y evaluación de riesgos.

Misión

Brindar soluciones de ingeniería y construcción a nuestros clientes del sector público y privado, ejecutando proyectos con estándares de calidad, seguridad y en los plazos establecidos.

Visión

Ser una empresa reconocida a nivel nacional en el campo de la ingeniería y construcción que genere confianza a sus clientes del sector público y privado.

Proyecto de referencia del presente trabajo

Consorcio: Consorcio Instrumentación Tablachaca (CIT), del cual forma parte Sierra Alta Ingenieros S.A.C y tuvo a cargo toda la parte técnica y económica del proyecto.

Abril 2019 – Enero 2020.

Cliente: Empresa Electricidad del Perú - Electroperú S A.

Proyecto: “Saldo de Obra para la Instrumentación complementaria en Zonas Inestables segunda etapa”.

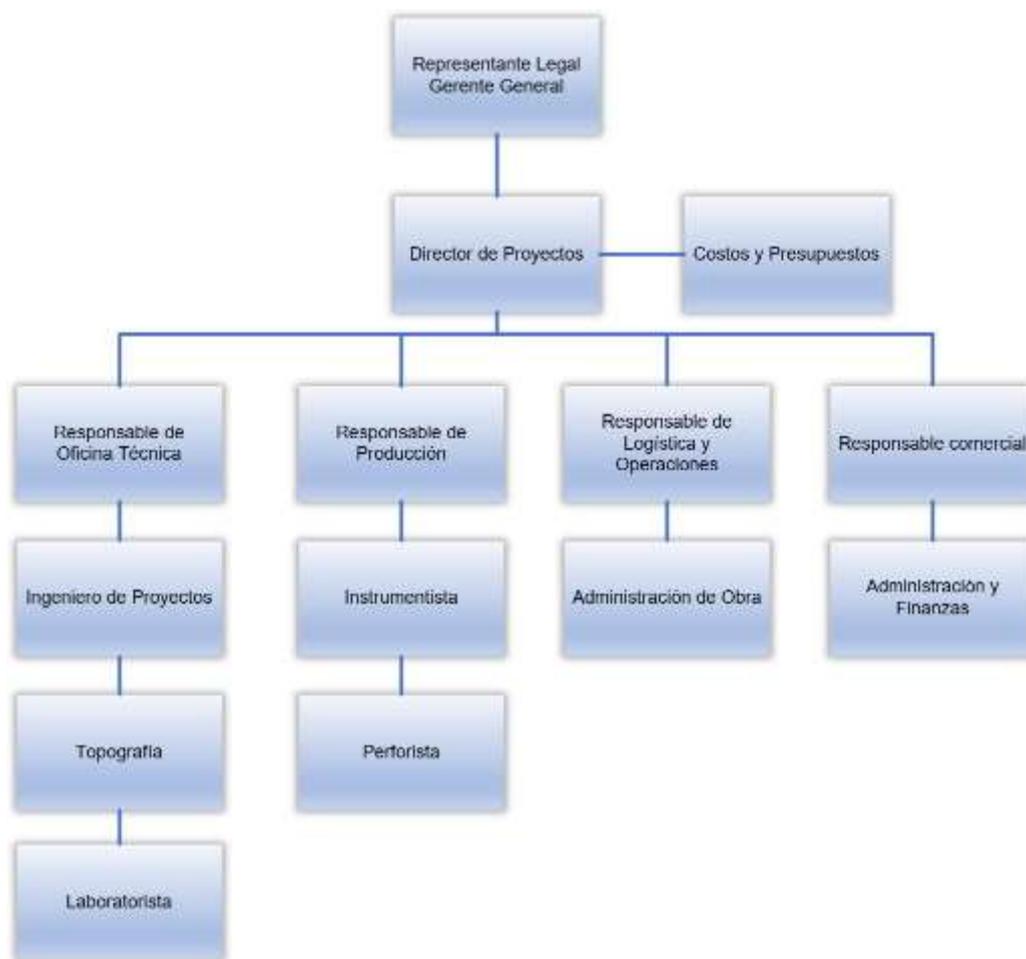


Figura N° 1 Organigrama Empresa Sierra Alta Ingenieros S.A.C

Fuente: SAI. Elaboración: propia

1.2. Realidad Problemática

La existencia de zonas inestables, siempre debe estar en constante vigilancia y control técnico preventivo ante los posibles deslizamientos que podrían afectar embalses de presas, estructuras adyacentes como la misma presa, taludes (naturales o de intervención Humana), laderas, terraplenes, carreteras, túneles, taludes entorno a Minería y en toda construcción de edificaciones e infraestructuras. Actualmente el empleo de instrumentos y equipos para monitorear las condiciones de estabilidad de estas zonas periódicamente, se encuentra muy diversificada en marcas, tipos y modelos según las prestaciones y requerimientos que deben estar sujetos a las condiciones técnico económica y fenómenos geodinámicos de cada una de las zonas de estudio. Asimismo, como se describe en los antecedentes Nacionales y Locales donde se realizó instrumentación geotécnica en presa y unidades Mineras necesarios para salvaguardar la integridad y seguridad de las personas y obras por medio de los monitoreos periódicos y algunos automatizados. Sin embargo, las condiciones que presentan los diferentes sectores aguas arriba de la presa Tablachaca, está vinculado al problema

de inestabilidad de las zonas y que ante posibles incrementos en los movimientos asociados directamente y principalmente a épocas lluviosas; por tanto el presente trabajo abarca el uso de equipos de instrumentación en medición de movimientos internos, inclinómetros verticales y variaciones del nivel freático en metros de columna de agua mH₂O por medio de piezómetros de cuerda vibrante en las zonas inestables N°1 y 2.

1.3. Formulación del Problema

1.3.1. Problema general

¿Cuál fue el resultado de la evaluación de la instrumentación geotécnica de las zonas inestables, del embalse aguas arriba de la presa Tablachaca, identificados por cliente Electroperú?

1.3.2. Problema específico

1.3.2.1. Problema específico 1

¿De qué forma se pudo establecer el aseguramiento de ensayos geotécnicos con perforación diamantina e instalación de tubería piezométrica e inclinométrica vertical en las zonas inestables N° 1 y N° 2?

1.3.2.2. Problema específico 2

¿Cómo se determinaría representativamente el coeficiente de permeabilidad del suelo durante la perforación, en las zonas inestables N° 1 y N° 2?

1.3.2.3. Problema específico 3

¿Cuál fue el resultado de establecer la puesta en marcha de la instrumentación geotécnica en las zonas inestables N° 1 y N° 2?

1.4. Población y Muestra

Para el presente trabajo hemos considerado la población a todas las zonas inestables del embalse de la presa Tablachaca y laderas aguas arriba de río Mantaro, y como nuestra muestra en particular las zonas inestables N°1 y 2 del embalse de la presa Tablachaca aguas arriba.

1.5. Antecedentes

1.5.1. Estudios internacionales de procesos de instrumentación geotécnica

De acuerdo a la Investigación de Rey (2016) denominada “Análisis de la instrumentación y del monitoreo en túneles estación e interestación del Metro de Santiago”, para alcanzar el título profesional de Ingeniería Civil por la Universidad de Chile, Santiago de Chile; el objetivo general fue analizar el plan de instrumentación y monitoreo geotécnico de desplazamientos implementado para un tramo de la construcción de túneles, el diseño que empleo fue experimental y los dispositivos de medición fueron hitos de nivelación superficial, hitos de nivelación profunda, prismas de nivelación, monitoreo geodésico tridimensional, cinta extensométrica de invar con dispositivos de tensionado y puntos de convergencia con cinta. Finalmente, concluye que la propuesta de instrumentación y monitoreo podría ser más detallada en cuanto a los requerimientos y exigencias en las metodologías de medición. Es de suma importancia tener un total conocimiento de los sistemas de medición que se van a utilizar. En ese sentido, se debe entender como son las metodologías de medición, cuáles son los errores típicos presentes en ellas y como repercuten a los resultados del monitoreo.

Según la investigación desarrollada por Acuña (2019) titulada “Instrumentación para producir información geotécnica en proyectos de construcción de túneles viales”, para alcanzar el título profesional de Ingeniería Civil por la Universidad Católica de Colombia, Bogotá; su campo de estudio fue en la construcción de túneles viales tuvo como objetivo conocer y describir el uso de la instrumentación empleada para la obtención de los datos de tipo geotécnica. El diseño fue explorativo documental con la búsqueda de información, recopilación, sistematizado y análisis de acuerdo a la categoría de instrumentación para la información geotécnica en túneles. Finalmente, concluye que donde la instrumentación se utiliza en forma adecuada se entrega datos importantes para poderse anticipar a posibles mecanismos de falla, también arroja un mejor conocimiento del terreno porque cuando se hace la construcción es cuando realmente ocurren los problemas de ingeniería.

También se tiene la investigación realizado por Guadalupe (2015) denominada deslizamiento de Leintz Gatzaga: “Instrumentación geotécnica y monitorización del movimiento con técnicas terrestres y espaciales”, ubicada en la cabecera del río Deba del norte de España, en la Cornisa Cantábrica. La inestabilidad de ladera que afecta a la villa de Leintz Gatzaga y su entorno ha producido desde hace siglos daños estructurales en viviendas, muros y vías, que van desde moderados a intensos. Esto ha obligado a ejecutar diferentes actuaciones de reparación y consolidación. Se realiza en este trabajo una discusión geológica/geotécnica de los datos disponibles sobre el deslizamiento que afecta a la ladera, así como de los resultados obtenidos a partir de su monitorización con inclinómetros, piezómetros y fisurómetros en los últimos años. Finalmente, concluye que los inclinómetros instalados registran desplazamientos de 1-3 mm/año en épocas secas y 4-5 mm/año en épocas lluviosas.

También, los niveles piezómetros varían con la pluviometría, habiéndose medido una oscilación máxima en torno a 1,2 m a lo largo del periodo de control con registro continuo.

1.5.2. Estudios nacionales de procesos de instrumentación geotécnica

Según la investigación desarrollado por Alva y Escalaya (2011) Titulada “Instrumentación geotécnico de la presa Pillones”, el objetivo principal es describir las técnicas e instrumentación instalados en la presa Pillones, se utilizaron como instrumentos los piezómetros eléctricos de cuerda vibrante, piezómetros hidráulicos tipo Casagrande, celdas de asentamiento de cuerda vibrante de tipo no venteada, inclinómetros y acelerógrafo. Finalmente, concluye que la instalación de un sistema de instrumentación geotécnica permite la oportuna detección de anomalías que se desarrollen o tengan tendencia a desarrollarse tanto durante la construcción como durante la vida útil de la obra, es el medio más eficiente para que el ingeniero encargado vigile el comportamiento de una obra y evalúe su seguridad.

Según la investigación desarrollada por Cabrera (2018) titulada “Análisis del sistema de monitoreo para el control de estabilidad de la presa de relaves, Unidad Minera Yauricocha”, para obtener el título profesional de Ingeniero Civil por la Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca; siendo el tipo de investigación descriptivo, alcance correlacional y con enfoque cuantitativo. El objetivo general de la investigación es analizar el sistema de monitoreo para el control de estabilidad de la presa de relaves en la Unidad Minera Yauricocha. Para mayor detalle de la investigación, se tiene como objetivos principales: Determinar los factores geotécnicos que influyen en la estabilidad de la presa de relaves y evaluar los equipos más idóneos para la implementación del sistema de monitoreo. Finalmente, concluye que la presa de relaves tiene un comportamiento estable; sin embargo, se comprueba que es necesario contar con un sistema de monitoreo basado en la instrumentación geotécnica, a través del cual se logre óptimo control y monitoreo de la estabilidad de la presa de relaves; el que a la vez debe ejecutarse de manera continua en función del tiempo operativo de la mina.

De acuerdo a la investigación de Cisneros (2019) denominada “Investigación geotécnica e instrumentación para el diseño de construcción e instalación de piezómetros y pozos de drenaje en la Mina Pierina”, para alcanzar el título de Ingeniero de Minas por la Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo”, Huaraz, departamento de Ancash; el método de investigación será cuantitativo, los datos obtenidos en campo y laboratorio son medibles y serán relacionados con el uso de gráficos. Los resultados permiten llegar a la conclusión de que el monitoreo constante en la zona a través de la adquisición de un Datalogger, para el monitoreo automático de los sensores de cuerda vibrante, permitiendo monitorear de forma constante en la detección de cualquier anomalía que podría darse en los reportes semanal o mensual; el cual, permitiría una mejor respuesta a cualquier evento que podría suscitarse.

Según la investigación desarrollada por Rea W. (2017) titulada “Implementación del sistema de monitoreo geotécnica integral para evaluar el comportamiento de taludes en la mina Antapaccay Región Cusco”, para obtener el título profesional de Ingeniero Civil por la Universidad Cesar Vallejo, Lima; la metodología de trabajo se basó en la realización de un sistema de monitoreo geotécnica integral para evaluar el comportamiento de taludes de la mina, con el objetivo integrar los datos de los sensores de monitoreo como radares, estaciones totales, piezómetros, estaciones meteorológicas, con la finalidad de centralizarlos en una sola base de datos procesarlos y analizarlos. Finalmente, concluye que debe instarse sensores de monitoreo geotécnico desde el inicio de las operaciones mineras, las cuales deben cumplir determinadas características como la confiabilidad, robustez y funcionamiento a largo plazo.

Según la investigación desarrollada por Chuquimango (2009) denominada “Instrumentación geotécnica en la mina Lagunas Norte / Dique Viscachaz- Alto Chicama, distrito de Quiruvilca de Santiago de Chuco - departamento de la Libertad”, para obtener el título profesional de Ingeniero de minas por la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima; Los objetivos principales de cada tipo de instrumentación que fueron instalados son los siguientes; Hitos de Monitoreo, los hitos de monitoreo nos permiten conocer cuál es la deformación superficial del terreno; piezómetros de tubo abierto, es un tipo de instrumentación que permite conocer cuál es la profundidad del nivel freático y se mide desde la superficie con un indicador de profundidad e inclinómetros, el desarrollo de este tipo de instrumentación es una de las más importantes contribuciones de análisis de movimientos de deslizamiento. Finalmente, concluye según el monitoreo con el piezómetro el nivel freático es estable; sin embargo, se necesita seguir monitoreando por más tiempo con una frecuencia quincenal para conocer con la exactitud su comportamiento en las diferentes estaciones del año, además, la información obtenida de los monitoreos de inclinómetros, se concluye que el dique es completamente estable.

1.5.3. Estudio local de proceso de instrumentación geotécnica

Según la investigación desarrollada por Delgadillo (2015) denominada “Proceso de monitoreo de estructuras a través de inclinómetro profundo, para obtener el título profesional de Ingeniero Civil por la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho; el objetivo principal es mejorar el desarrollo de sistemas automatizados de instrumentación para conocer el comportamiento de obras geotécnicas, a fin de obtener resultados confiables tanto para recolectar, transmitir, almacenar, procesar, evaluar, reportar y brindar las recomendaciones para garantizar la confiabilidad de las mediciones y para validar los datos obtenidos de la instrumentación de una estructura. Finalmente, concluye que la instrumentación es la técnica que proporciona al ingeniero información cuantitativa y cualitativa para permitirle adecuar y balancear los diseños geotécnicos de manera racional, obteniendo tanto seguridad como eficiencia, por lo que se le reconoce una gran utilidad ya que ayuda a detectar anomalías que existan o se desarrollen en otras partes de la obra, por lo que se requiere

determinar con claridad y visión los objetivos de todo proyecto de instrumentación por simple que parezca.

1.6. Justificación

El presente trabajo, pretende contribuir con procedimientos y metodologías necesarios para la realización de la instrumentación geotecnia y su puesta en marcha, que permite monitorear y recolectar información significativamente confiable de los parámetros geológicos y geotécnicos de los movimientos de las laderas en estudio y niveles freáticos y conforme se realiza su registro y análisis en el tiempo, poder actuar previamente en resguardo de la continuidad en primera línea de la vida humana, las operaciones de la presa Tablachaca y toda las instalaciones hidroeléctricas de las centrales del Mantaro y garantizar el abastecimiento de energía. Finalmente, la evaluación del presente trabajo servirá a otros profesionales para continuar investigando sobre innovación en la instrumentación geotécnica que conlleva a realizar procedimientos, metodologías utilizando otras técnicas y materiales, acorde a las necesidades del proyecto y con el objetivo de concluir a los mismos en el plazo establecido, reducir los costos e impacto ambiental.

1.7. Objetivo

1.7.1. Objetivo general

Realizar la evaluación de la instrumentación geotécnica de las zonas inestables uno y dos del embalse aguas arriba de la presa Tablachaca, en la región Huancavelica.

1.7.2. Objetivo específico

1.7.2.1. Objetivo específico 1

Determinar la técnica y procedimiento en el aseguramiento de ensayos geotécnicos con perforación diamantina e instalación de tubería piezométrica e inclinométrica vertical en las zonas inestables N° 1 y N° 2.

1.7.2.2. Objetivo específico 2

Determinar representativamente el coeficiente de permeabilidad del suelo durante la perforación, mediante el ensayo Lefranc, y de esta forma estimar el tamaño de las partículas y el tipo de suelo con el cálculo del coeficiente de permeabilidad en las zonas inestables N° 1 y N° 2.

1.7.2.3. Objetivo específico 3

Evaluación de la puesta en marcha de la instrumentación geotécnica de las zonas inestables N° 1 y N° 2, en el primero un piezómetro de cuerda vibrante y en el segundo dos. Asimismo, de inclinómetros verticales, cuatro en N° 1 y dos en el N° 2 permitiendo continuar con el monitoreo de los niveles freáticos y desplazamientos en el tiempo.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Instrumentación Geotécnica

Forma parte de las nuevas tecnologías y su objetivo principal es monitorear el comportamiento del terreno a lo largo del tiempo; el uso de estos sistemas permite obtener información y medir algunas variables que controlan el mecanismo de falla en las zonas inestables que presenta el terreno. Se soporta sobre la ingeniería geotécnica rama de la ingeniería civil que emplea métodos científicos para determinar evaluar y aplicar la interrelación entre la geología y las obras civiles. Ver Figura N° 2.

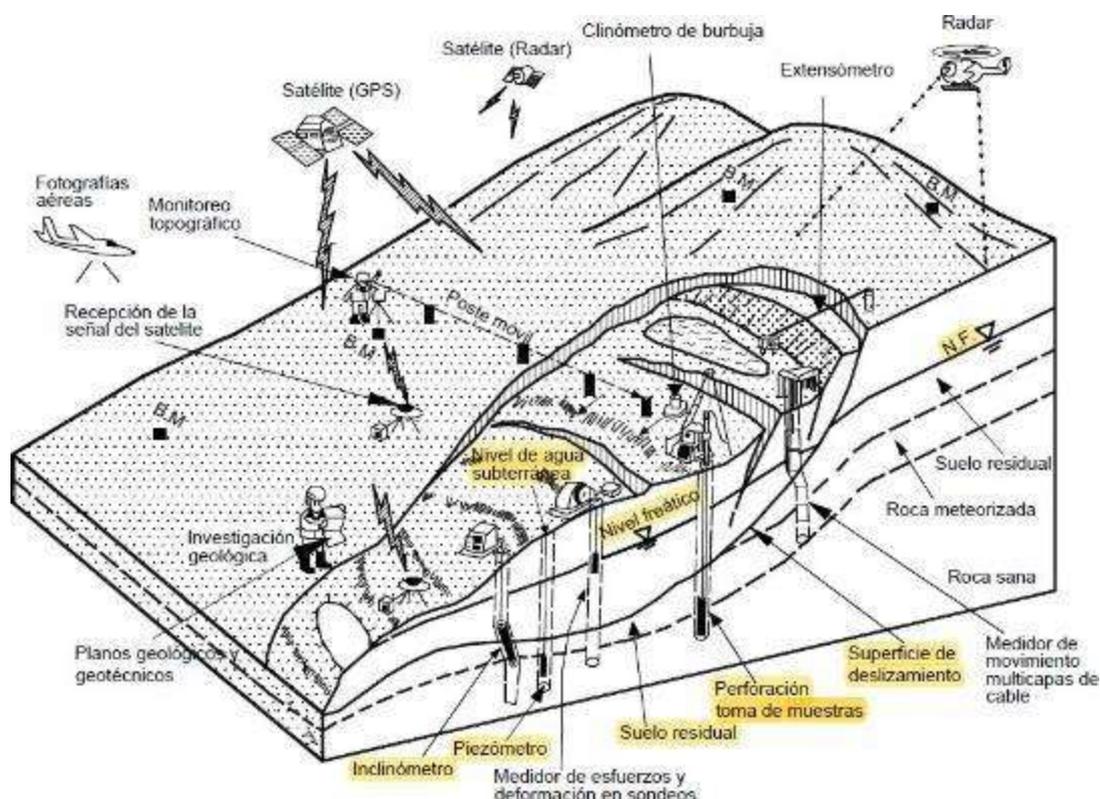


Figura N° 2 Estudio y monitoreo de deslizamientos

Fuente: SUAREZ, Jaime. Capítulo 12.

Suárez, J. (2009). Las situaciones típicas en las cuales se requiere la instrumentación, son las siguientes:

- Determinación de la profundidad y forma de la superficie de falla en un deslizamiento activo.
- Determinación de los movimientos laterales y verticales dentro de la masa deslizada.
- Determinación del ratio o velocidad de deslizamiento y el establecimiento de mecanismos de alarma.

- Monitoreo de la actividad de cortes o rellenos e identificación de los efectos de una determinada construcción.
- Monitoreo de los niveles de agua subterránea o presiones de poros y su correlación con la actividad del deslizamiento (Capítulo 12).

Clasificación

Existen muchos equipos y versiones, pero puede hacerse una clasificación en función de las variables que miden:

- **Inclinación: Inclinómetro vertical** y Horizontal.
- Inclinación puntual: Sensor electro nivel, Clinómetro y Clinómetro cable free, Sistema de convergencias Bassett, Clinómetro portátil digital.
- **Agua: Piezómetro de cuerda vibrante**, Piezómetro de cuerda vibrante (Heavy Duty), Piezómetro abierto, Piezómetros hidráulicos, Piezómetros neumáticos, Sondas indicadores de nivel de agua.
- Presión: Células de presión de cuerda vibrante, Célula de presión total push-in, Células de esfuerzos en hormigón de cuerda vibrante.
- Extensión: Sonda extensométrica magnética, Cinta extensométrica digital, Extensómetro de cuerda vibrante, Extensómetro de varillas.
- Juntas, grietas y fisuras: Medidor de juntas interno de cuerda vibrante, Medidor de grietas y fisuras de cuerda vibrante, Medidor de juntas tridimensionales de cuerda vibrante, Medidor de juntas mecánico triaxial, Medidor de grietas y fisuras potenciométrico.
- Carga: Células de carga de cuerda vibrante.
- Asientos: Células de asiento hidráulicas, Células de asiento de cuerda vibrante, Sonda de control de asiento.
- Deformaciones: Extensómetro de cuerda vibrante soldable por puntos, Extensómetro de cuerda vibrante por soldadura de arco, Extensómetro de hormigón en superficie, Extensómetro de cuerda vibrante embebido, Extensómetro re-bar.
- Temperatura: Sensor de temperatura resistivo, Sensor de temperatura de cuerda vibrante, Sensor de temperatura Termopar.

CONAGUA. (2012). Los instrumentos que miden movimientos del terreno, cimentaciones o estructuras térreas se pueden agrupar en tres categorías:

- Medición de movimientos superficiales.
- Medición de movimientos internos.
- Medición de movimientos sísmicos.

Tabla N° 1 Equipos principales empleados en instrumentación y monitoreo

Función	Aparato o equipo	Utilización
Medida de desplazamientos	Hitos de nivelación	Asientos terreno
	Regletas o clavos	Asientos en estructuras
	Dianas, prismas, etc.	Control topográfico
	Cinta de convergencia	Desplazamientos entre puntos a distancia métrica
	Electroniveles	Registro continuo de asientos
	Inclinómetros	Desplazamientos o flechas
	Extensómetros	Desplazamientos o asientos relativos entre puntos
	Fisurómetros o "crack meters", micrómetros, comparadores, transductores de lectura manual o de registro automático, etc.	Medida de apertura de grietas, movimientos entre partes de una estructura, etc.
	TriVec	Extensómetro múltiple
	Clinómetros	Inclinación de edificios
Medida de deformaciones	Extensímetros o strain-gauges	Medida de deformaciones en elementos estructurales
	Fibra óptica	Id.
Medida de fuerzas o tensiones	Células de presión total	
	Células de carga en anclajes	
	Células de presión intersticial	
	Células tipo Osterberg	
Medida de presión intersticial	Piezómetros de tubo abierto o de Casagrande	
	Piezómetros de cuerda vibrante	
	Manómetros	

Fuente: Gonzales, J. (2011)

2.2. Inclinómetro vertical

Consta de las siguientes partes esenciales:

- Tubos guía (guide casing): Se instalan permanente dentro de una perforación vertical, actualmente, el más recomendado es el de plástico ABS (acrylonitrile/butadiene/styrene-Acrilonitrilo butadieno estireno). Presenta cuatro ranuras longitudinales para guiar a la sonda, lo que permite medir la inclinación en dos planos \perp (A y B) biaxial. El eje A se orienta en la dirección principal del desplazamiento de la zona inestable. Ver Figura N° 3 y 4.
- Sonda torpedo: De acero inoxidable en donde se aloja el sensor para medir la inclinación. Se une a un cable graduado mediante un terminal. El otro extremo del cable graduado termina en la unidad de lectura. Se desliza dentro de la tubería, guiada por dos conjuntos de ruedas guía que se introducen en las ranuras longitudinales de la tubería en sentido del deslizamiento.

La distancia típica entre los dos conjuntos de ruedas guía es de 50 cm. La sonda se usa para medir la inclinación de la tubería con respecto a la vertical y de esta forma detectar cualquier cambio causado por el movimiento del terreno inestable. Ver Figuras N° 5 al 7.

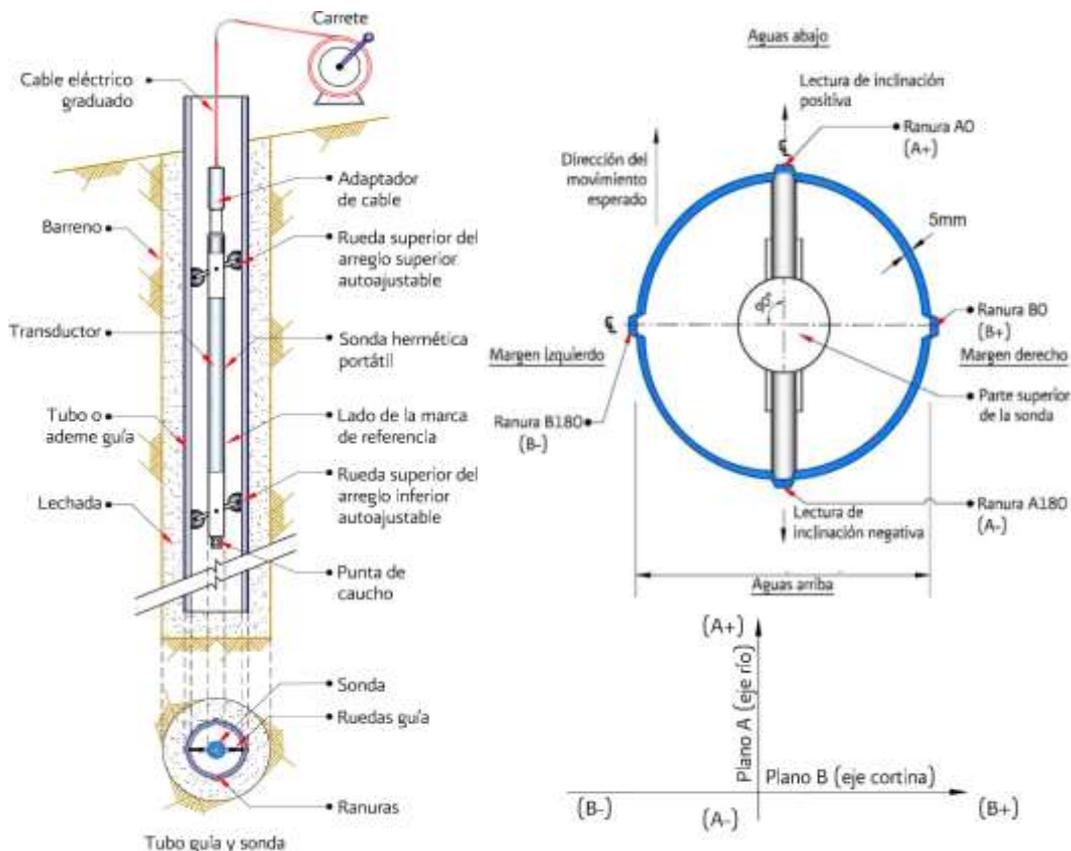


Figura N° 3 Componentes de un sistema de inclinómetro vertical

Fuente: Adaptado de CONAGUA. (2012).



Figura N° 4 1)Tubería (guide casing), 2)Sonda torpedo con adaptador, 3)Cable graduado con carrete y 4)Unidad lectora portátil

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

- Cable graduado con carrete: Se utiliza para subir y bajar la sonda dentro de la tubería y transmite las señales eléctricas a la superficie. El cable tiene marcas de diferentes colores a cada 50 cm y 100 cm, está enrollado en un carrete con manivela y un seguro de fijación. Ver Figura N° 3. El carrete también necesita cargarse antes de su uso y conectarse con el dispositivo portátil. Ver Figura N° 4.
- Unidad lectora portátil: Recibe las señales eléctricas, registra las lecturas en forma digital, almacenar los datos y también se pueden visualizar en tiempo real como envió remoto con conexión a ethernet. Ver Figura N° 4.

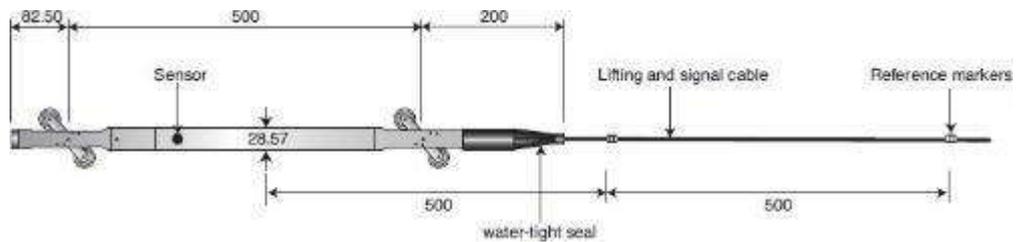


Figura N° 5 Dimensiones de una sonda de inclinómetro típica

Fuente:

Bassett, R. (2012)

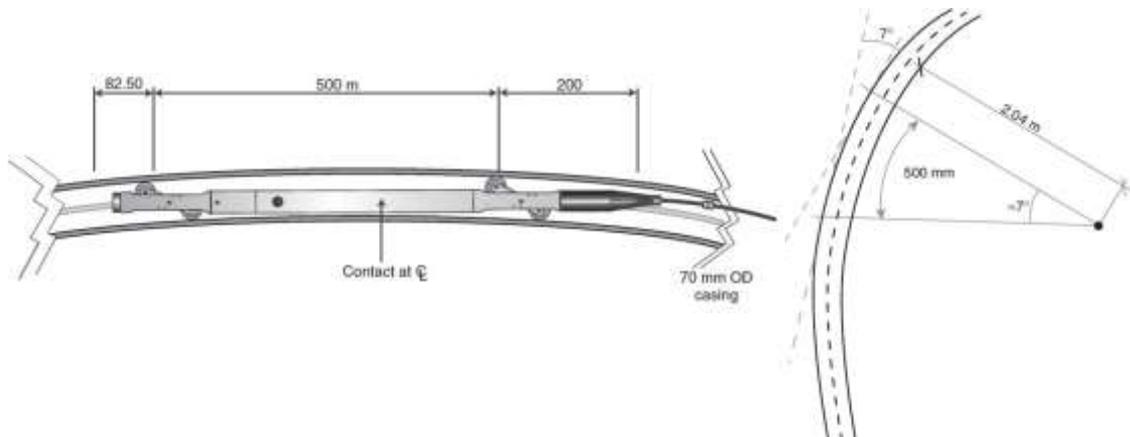


Figura N° 6 Limitaciones de la sonda del inclinómetro dentro de la tubería curva de 70 mm de diámetro exterior (DE) y Diagrama exagerado de límites de curvatura por el cual puede pasar

Fuente: Bassett, R. (2012)

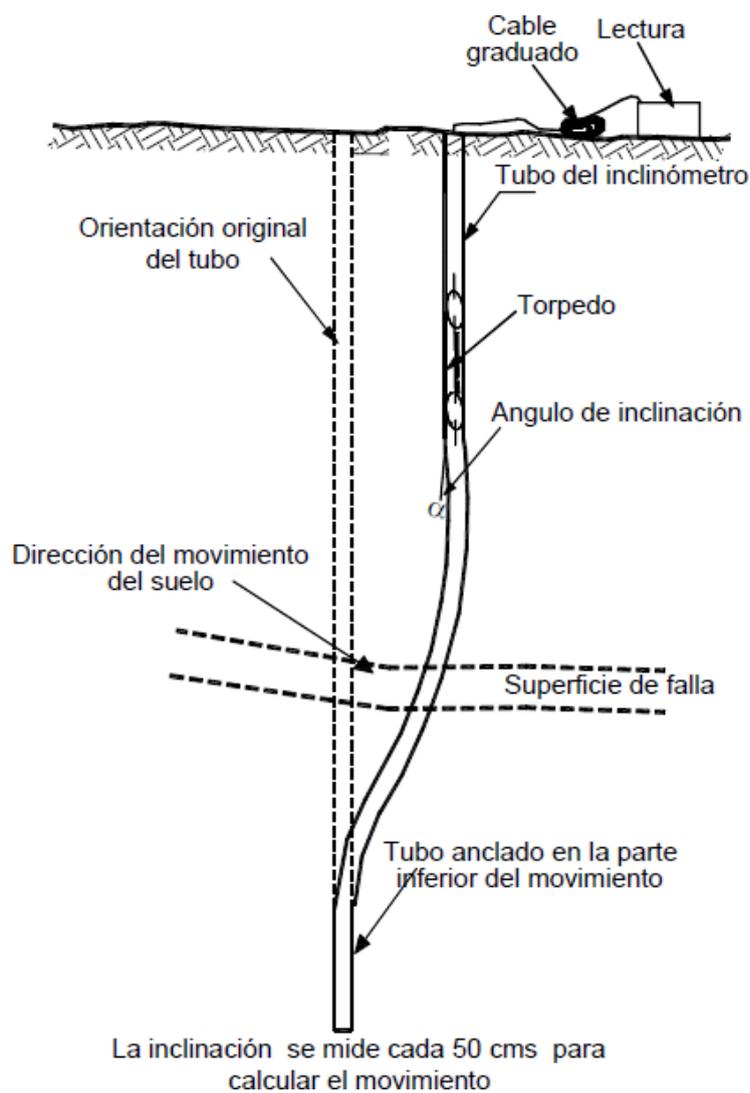


Figura N° 7 Esquema del desplazamiento de un inclinómetro

Fuente: Adaptado de Abramson y otros, (2002)

Tabla N° 2 Tubería inclinométrica (guide casing), Sonda torpedo con adaptador, Cable graduado eléctrico con carrete y Unidad lectora portátil utilizado en el proyecto (sombreado gris)

Fabricante	Tubería inclinométrica/ Vertical		Sonda/Torpedo		Cables eléctricos		Unidad Lectora Portátil		
	Tipo de tubería	Características	Sonda	Tipo	Descripción	Características	Programa	Descripción	Especificaciones
Slope Indicator	Rigida de plástico QC	Sección principal: Longitud: 1.52 m y 3.05 m Diámetro: 7 cm y 8.5 cm	Digital (Digital)	Acelerómetro o digital	El cable eléctrico puede colocarse dentro de un carrete con anillos deslizantes (slip-ring) que permite tomar lecturas mientras está operando; el carrete es diseñado con su eje de gran diámetro para evitar (fallar) cuando se enrolla.	Longitud de 35 m, 70 m, 110 m en carrete sin acceso de anillos deslizantes.	Digiflo para Windows®	Procesa y grafica los datos registrados por la consola de medición Digiflo. Datos: Genera gráficos de alta resolución y los parámetros los almacena para su utilización. El programa también proporciona rutinas de conversión y gráficos de diagnóstico que pueden mejorar la precisión y ahorrar horas de trabajo de hojas de cálculo.	Gráficos estándar: desplazamiento incremental, desplazamiento acumulado y gráficos de tiempos de desplazamiento. Diagnóstico gráfico: desviación incremental, desviación acumulada y las rutinas de control (checkum) para la verificación. Rutinas de corrección: la orientación del tubo guía, seno, desplazamiento y rotación del sensor. También procesa los datos de asentamientos y los datos registró generados por el programa Database Manager.
	Rigida de plástico estándar	Sección principal: Longitud: 1.52 m y 3.05 m Diámetro: 4.8 cm, 7 cm y 8.5 cm							
	Rigida de plástico CPI	Sección principal: Longitud: 1.52 m y 3.05 m Diámetro: 7 cm y 8.5 cm							
	Rigida de plástico con cable contacto	Sección principal: Longitud: 1.52 m y 3.05 m Diámetro: 7 cm y 8.5 cm							
	Rigida de plástico EPHC	Sección principal: Longitud: 3.05 m Diámetro: 7 cm							
Geokon	Rigida de plástico ABS modelo 6400	Sección principal: Longitud: 1.5 a 3 m Diámetro máximo: 7 cm Aceptamientos (sección telescópica) Longitud de compresión: 50.8 cm Longitud de extensión: 66 cm	Modelo 8000	Acelerómetro o de fuerza balanceada	Están diseñados para una gran variedad de aplicaciones geotécnicas e hidrologicas. Son a prueba de agua, mantienen buena conductividad eléctrica y pueden ser enterrados en el suelo o permanecer enterrados en el concreto. La fabricación del cable consta de uno o más pares de conductores con hilos de diseño individual para protección contra el ruido eléctrico. Una variedad de envolturas están disponibles, incluso el PVC para aplicaciones estándar, el uso de añes y poluretano para su uso en situaciones donde es necesario una resistencia extra a la abrasión. Cables Keivard® o Kaplon blindados o cables con aislamiento integral están disponibles para su uso en presas de fuerza.	Conductores fabricados de cobre	Programa modelo-8001-2	Simplifica las tareas de configuración, comunicación y monitoreo en la adquisición de datos utilizado en el registro de datos modelo LC-1, incluye formulario de configuración, una pantalla para las mediciones, la recopilación de datos en tiempo real basado en un monitor y emulador terminal (que permite ejecutar un programa de computadora). La forma de reducir datos incluye un editor de informes. La hoja de cálculo es compatible con Excel. La hoja de cálculo se puede cargar y guardar archivos de Excel versión 4.0/5.0/95 y crear tablas en HTML para su uso en Internet.	Respaldo del procesador: 486 funcionando a 25 MHz (mínimo) Pentium / Pentium Pro / Pentium II (o equivalente) o superior. Funcionando a 56 MHz o superior. Memoria requerida: 8 MB (mínimo), 32 MB o más (recomendado), 64 MB (mínimo), 12 MB (mínimo), 20 MB o más (recomendado).
	Rigida de fibra de vidrio modelo 6500	Sección principal: Longitud: 3 m Diámetro máximo: 7 cm Aceptamientos (sección telescópica) Diámetro: 7.65 cm Longitud: 30 cm							
Rat Instruments	Rigida de plástico	Sección principal: Longitud: 1.5 m a 3 m Diámetro externo: 7 cm a 8.5 cm Diámetro interno: 5.8 cm a 7.3 cm Aceptamientos (sección telescópica) Diámetro externo: 7.3 cm a 8 cm Longitud de compresión: 50.8 cm Longitud de extensión: 66 cm	Vertical MEMS	MEMS	El cable empleado es delgado, fuerte, contiene una cubierta de refuerzo tipo Kevlar® que permite su manipulación en que en tiempos, además de que se puede enrollar en un carrete pequeño. Esta provisto de marcas de aluminio que ajustan al cable. Las marcas de medición están espaciadas a cada 50 cm. El cable es marcado con color rojo a cada 5 m. La cubierta es de poluretano altamente resistente a la abrasión y mantiene flexibilidad a bajas temperaturas. Es recomendable no deslizarlo sobre bordes filosos y periódicamente limpiarlo con un paño.		Rat Inclinalyzer™ digital	Es la herramienta de programación para los inclinómetros Rat MEMS Digital. Permite al usuario de forma rápida y eficaz reducir volúmenes de datos en una gran variedad de formatos adecuados para el análisis y su presentación. Utiliza una interfaz multidocumentos, para que el usuario sea capaz de ver los datos de varias formas simultáneamente en la pantalla. Botones que con sólo pulsarlos crean presentaciones de datos en cuestión de segundos. Las presentaciones se pueden guardar como los informes individuales, lo cual permite flexibilidad en obtención de datos múltiples o para un solo sitio. Los datos se organizan en una estructura de archivos estándar que hace la importación de datos sin intervención con PC de campo ultrarapida.	Crea gráficos personalizados, vista de todo, gráficos vectoriales o de tiempo. Con sólo pulsar una tecla se puede obtener la derivación media, el desplazamiento incremental, posición absoluta, el desplazamiento acumulado, serie de comprobación, la trama del tiempo y gráficos vectoriales. El usuario puede definir la configuración de propiedades en los ejes X y Y como la escala, las unidades, las etiquetas y las líneas de división. Capacidad para leer una variedad de tipo de archivos de los inclinómetros: ".sav", ".log", ".bch". Soporta para la conversión de tipo de archivos en ".asp", ".dat", ".pm", ".tbl". Conversión de unidades entre milímetros, metros, pulgadas o pies. Selección de zonas de movimiento para gráficos en tiempo o seccional.

Fuente: Catálogo de los fabricantes. Elaboración propia

2.3. Piezómetro cuerda vibrante

En la siguiente tabla se presenta los instrumentos para la medición de presiones y niveles freáticos:

Tabla N° 3 *Tipos de piezómetro utilizado en el proyecto (sombreado gris)*

	Tipo de sensor	Principio de funcionamiento	Ventajas	Limitaciones
Manuales	Piezómetro abierto o tipo Casagrande	Columna de agua en un ducto que conecta la celda de captación con la atmósfera. La variación de la longitud de la columna en el interior del ducto se relaciona directamente con la presión de poro.	Simple, económico y adecuado para la mayoría de problemas en suelos.	No se puede medir presión de poro negativa No se puede usar si el nivel piezométrico está arriba de la boca del tubo vertical.
	Piezómetro neumático	Diafragma flexible sometido a presión del agua, equilibrada por una presión neumática aplicada desde el exterior a través de un ducto flexible.	Estable, tiempos de retraso cortos.	
		El valor de la presión de equilibrio inyectada es el valor de la presión de poro.	Adaptable a registro continuo.	
Eléctricos	Piezorresistivo	Contiene un diafragma delgado de cerámica con resistores (strain gauges). Al deformarse el diafragma con la presión del líquido se modifica la resistencia de los sensores en forma directamente proporcional al esfuerzo aplicado. De manera electrónica se puede convertir esta señal de salida en una señal de corriente 4–20 mA (miliamperes).	Respuesta rápida a cambios de presión sin requerir cambios volumétricos importantes, gran precisión aun con rangos de presión pequeños	No recomendable para monitoreo de largo plazo (menor estabilidad).
			Pueden emplearse para mediciones dinámicas y conectarse a un sistema automático de adquisición de datos.	La longitud del cable afecta su calibración.
	Cuerda vibrante	Convierte la presión del agua en una señal de frecuencia con un diafragma metálico unido a un delgado filamento tensionado, el cual se excita mediante una bobina electromagnética. La variación en la presión aplicada sobre el diafragma modifica la tensión del filamento y en su frecuencia natural de vibración. Esta señal es transmitida en hertz (Hz).	Respuesta muy rápida a cambios de la presión de poro.	Menor precisión para pequeñas presiones.
			Alta repetitividad.	
			Gran estabilidad en periodos de tiempo prolongados.	
Fibra óptica	Está diseñado para medir sin contacto las deformaciones de un elemento mecánico óptico en miniatura (moms por sus siglas en inglés).	La longitud del cable puede modificarse sin afectar la calibración del sensor.	Costo elevado.	
		Se puede instalar con más de 1000 metros de cable sin afectar su precisión. Se puede conectar a un sistema automático de adquisición de datos.		
		Las dimensiones del sensor son muy pequeñas (5 mm), por lo que facilita su instalación en tuberías delgadas. Inmune a interferencias magnéticas, de señales de radio y a descargas eléctricas. Alta resolución y estabilidad. Baja influencia de cambios térmicos.		

Fuente: Adaptado de CONAGUA. (2012). Elaboración propia

2.3.1. Funcionamiento

Para el funcionamiento del piezómetro de cuerda vibrante se usan los siguientes equipos en el proyecto:

- Transductor de Presión de cuerda vibrante (VW): Manual de Instrucciones Serie Modelo 4500. Piezómetro de Cuerda Vibrante. Documento revisión (V7/13). Usa un diafragma sensible de acero inoxidable al cual se conecta un elemento de cuerda vibrante. En uso, las presiones cambiantes en el diafragma ocasionan que se desvíe y esta desviación se mide como un cambio en la tensión y frecuencia de vibración del elemento de cuerda vibrante. El cuadrado de la frecuencia de la vibración es directamente proporcional a la presión aplicada al diafragma. Dos bobinas, una con un imán, otra con una pieza polar, están colocadas próximas a la cuerda. En uso, se aplica un pulso de la frecuencia variable (frecuencia de barrido) a las bobinas y esto provoca que la cuerda vibre principalmente en su frecuencia resonante. Cuando termina la excitación, la cuerda continúa vibrando y una señal eléctrica sinusoidal CA en la frecuencia resonante es inducida en las bobinas y transmitida a la caja lectora de salida donde se condiciona y despliega. Dispone de un filtro poroso delante del diafragma, lo que permite que el fluido pase, pero evita que las partículas del suelo incidan directamente sobre el diafragma. Ver Figura N° 8 y 9.

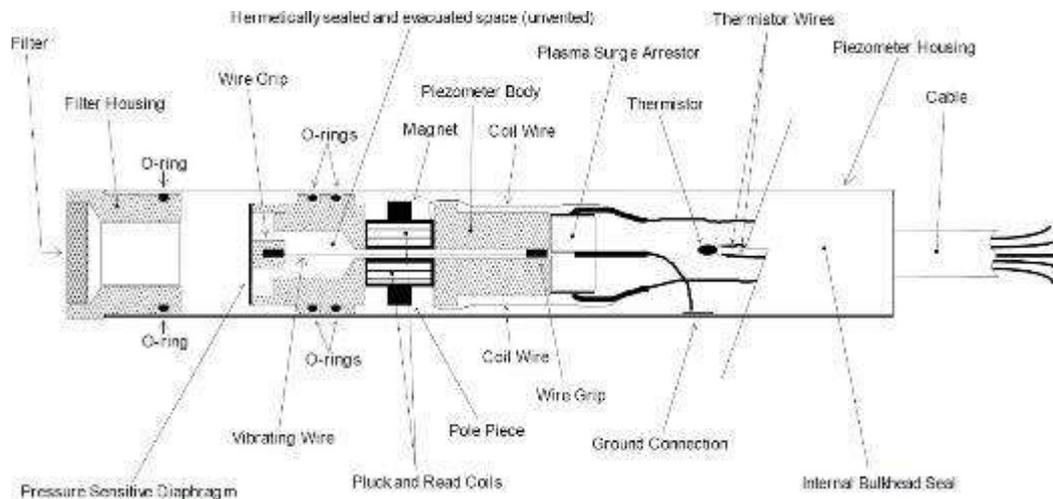


Figura N° 8. Esquema del transductor de presión de cuerda vibrante

Fuente: Manual de Instrucciones Serie Modelo 4500. Piezómetro de Cuerda Vibrante. Documento revisión (V7/13)

Cable del Transductor: Conecta al Transductor que transmite la medición de presión de poros del nivel freático y temperatura hacia el Datalogger, que almacena y registra los datos. Los cables están hechos de conductores de cobre trenzados individuales revestidos con un material aislante.

Los conductores individuales aislados se trenzan en pares, se agrupan dentro de un material de protección conductor tipo Mylar y luego se cubren con una cubierta exterior hecha del material más adecuado, se utiliza el de la marca Geokon de 4 conductores, 2 pares trenzados, 22 AWG 7/30 4, diámetro exterior (OD) 4,75 mm ($\pm 0,25$ mm) y con un rango de temperatura - 20 °C hasta +80 °C.

- Datalogger: GEOKON. Manual de Instrucciones Modelo LC-2.(GG,1/05/2019). El registrador de datos de un solo canal modelo LC-2; es un instrumento de medición de bajo costo, alimentado por batería y fácil de usar, diseñado para leer sensores de cuerda vibrante equipados con termistores. La memoria estándar proporciona almacenamiento para datos. Cada matriz consta de una cadena de identificación del registrador de datos opcional (16 caracteres como máximo), una marca de tiempo que consta del año, la fecha (formato de día juliano o mes / día), la hora (hhmm u formato de horas / minutos) y los segundos en que se tomó la lectura. También se incluye en los datos el voltaje de la batería interna de 3 V (o externa de 12 V), la temperatura del registrador de datos, la lectura del cable vibrante, la temperatura en el Transductor y el número de matriz en la memoria. La matemática interna se calcula utilizando notación de punto flotante de 32 bits (IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers). Las operaciones matemáticas en la lectura del instrumento, como la aplicación de una lectura cero, el factor de calibre (o factor de calibración) y la compensación cuando se usa una técnica de conversión lineal o coeficientes polinomiales cuando se usa la conversión polinomial, proporcionan resultados directamente en unidades de ingeniería, se explicará en el capítulo 4, 4.2 Piezómetro de cuerda vibrante. Ver Figura N° 9.

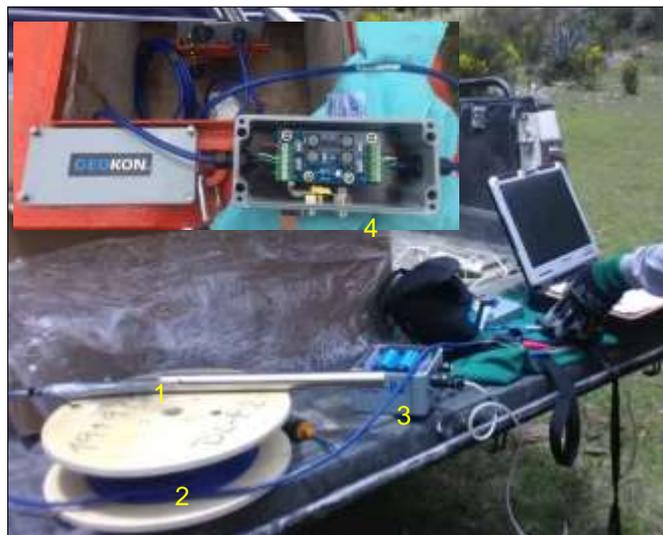


Figura N° 9 1)Transductor de presión, 2)Cable, 3)Datalogger, 4)Lab3

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

- Tablero pararrayos: GEOKON. Manual de Instrucciones Modelo 4999-12L/LE(LAB3). Las placas de protección contra sobretensiones están diseñadas para proteger a los Transductores de cuerda vibrante de las sobrecargas de voltaje de corta duración que pueden ser inducidas en los cables del

Transductor por rayos. Las placas LAB-3 se pueden suministrar en tres configuraciones: Modelo 4999-12L-A para señales de 5 voltios Modelo 4999-12L-B para señales y alimentación de 12 voltios Modelo 4999-12L-C para señales y alimentación de 24 voltios La placa LAB-3 está diseñada para instalarse en el cable que va del Transductor al registrador de datos Datalogger. Ver Figura N°9.

2.4. Ensayo de permeabilidad-LEFRANC

- Suárez, J. (2009). Conductividad Hidráulica o “Coeficiente de Permeabilidad”. La facilidad con que el suelo fluye a través de un material, se denomina “conductividad hidráulica” (permeabilidad) y el parámetro que permite cuantificar este fenómeno se llama “coeficiente de permeabilidad” y se encuentra en la literatura con la simbología de la letra K. La conductividad hidráulica depende del tamaño de los vacíos o poros, es alta en las gravas y baja en las arcillas. Los ensayos de permeabilidad de laboratorio no siempre representan las situaciones en el campo y la ejecución de ensayos en el sitio, permite obtener la influencia de las discontinuidades y la meteorización. El coeficiente de permeabilidad (k) puede calcularse del resultado de ensayos de pozos a carga constante o variable dentro de la excavación de un sondeo.

$$K = \frac{q}{5.5 rh}$$

Donde:

K = Permeabilidad

q = Caudal

r = Radio de la columna de ensayo

h = Cabeza

Ecuación N° 1 Formula básica para el cálculo de permeabilidad

Fuente: Cedergren. (1977)

Tabla N° 4 *Tamaño de poros y conductividad hidráulica*

Material	Tamaño de poros	Conductividad hidráulica (permeabilidad) (cm/seg)
Arcilla	$<10^{-4} - 10^{-3}$	$<10^{-6}$
Limo	$10^{-3} - 10^{-2}$	$10^{-6} - 10^{-4}$
Arenas	$10^{-2} - 10^{-1}$	$10^{-4} - 10$
Gravas	$10^{-1} +$	$10 - 10^2$

Fuente: Suárez, J. (2009)

Tabla N° 5 *Coefficientes de permeabilidad y capacidad de infiltración*

Suelo	Conductividad hidráulica (permeabilidad) K (cm/seg)	Capacidad de infiltración (mm/hora)
Arcillas	$< 10 \times 10^{-9}$	0.25 a 2.5
Limos	1×10^{-9} a 1×10^{-7}	2.5 a 8
Arenas finas	1×10^{-7} a 1×10^{-5}	8 a 13
Arenas gruesas	1×10^{-5} a 1×10^{-2}	13 a 20
Gravas	$> 1 \times 10^{-2}$	20 a 30

Fuente: Suárez, J. (2009)

2.4.1. Ensayo de permeabilidad in - situ

Este ensayo se realiza con el objetivo de obtener el coeficiente de permeabilidad durante la perforación. Es importante considerar que estos valores son solo indicativos y deben usarse con cuidado, Custodio y Llamas (1983). Los ensayos Lefranc realizados hoy en día distan del método original de Lefranc, sino que se basan en unas pautas de la United States Bureau Reclamation (Oficina de Reclamación EE.UU), las cuales son muy similares a los ensayos de Lefranc y Gilg – Gavard, Custodio et. al. (1983). Ver Figura N°12.

2.4.1.1. Ensayo de permeabilidad a carga constante

Para el calcular el coeficiente de permeabilidad se ha utilizado la formula según Hvorslev (1948), en su versión para un medio homogéneo ($k = k_{\text{horizontal}} = k_{\text{vertical}}$).

$$k = \frac{Q \ln \left(\frac{S}{\phi} + \sqrt{1 + \left(\frac{S}{\phi} \right)^2} \right)}{2\pi HS}$$

Ecuación N° 2 Ensayo a carga constante

Donde:

Q = caudal.

S = longitud de tramo de prueba.

ϕ = diámetro del tramo de prueba, sondeo.

H = sobrecarga hidráulica

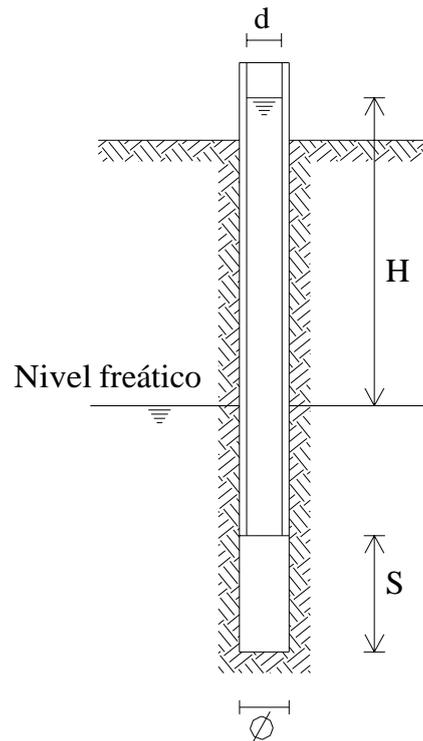


Figura N° 10 Esquema del ensayo de permeabilidad a carga constante

Fuente: Elaboración Propia

2.4.1.2. Ensayo de permeabilidad a carga variable

Para el calcular el coeficiente de permeabilidad se ha utilizado la formula según Hvorslev (1948), en su versión para un medio homogéneo ($k = k_{\text{horizontal}} = k_{\text{vertical}}$). La ecuación es válida cuando $S/\phi > 4$.

$$k = \frac{d^2 * \ln \frac{2 * S}{\phi}}{8 * S * t} \ln \frac{h_0}{h}$$

Ecuación N° 3 Ensayo a carga variable

Donde:

h_0 = carga hidráulica en el inicio del ensayo.

h = carga hidráulica en el tiempo “t”.

d = diámetro interior del tubo de perforación.

ϕ = diámetro del tramo de prueba, sondeo.

S = longitud de tramo de prueba.

t = tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo

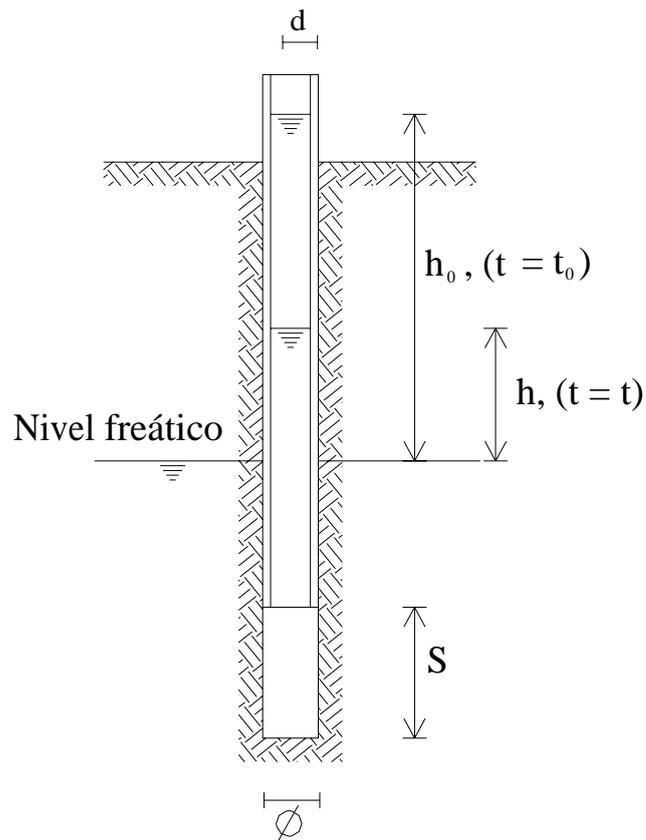


Figura N° 11 Esquema del ensayo de permeabilidad Lefranc a carga variable

Fuente: Elaboración Propia

Hunt, R. E. (2007). Dado que los valores de k son una función de las propiedades básicas y del índice, varios tipos de suelos y formaciones tienen un rango característico de valores. Muchas tablas y gráficos han sido publicados por varios investigadores que relacionan los valores de k con las condiciones geológicas. Las relaciones características de permeabilidad de los suelos y sus métodos de medición se dan en la Tabla N° 6.

Tabla N° 6 Características de permeabilidad de suelos y sus métodos de medición

Coeficiente de permeabilidad k (cm / s) (escala logarítmica)												
Coeficiente de permeabilidad k (cm / s) (escala logarítmica)												
	10 ⁻²	10 ⁻¹	10	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	
Drenaje				Buen drenaje					Mal drenaje		Prácticamente impermeable	
Tipos de suelo	Grava limpia			Arena limpia Arena limpia y mezclas de grava			limo y arcilla; depósitos de arcilla graciel hasta estratificada; etc. Arenas muy finas; limos orgánicos e inorgánicos; mezclas de arena.				"Suelos impermeables, por ejemplo, homogéneo arcillas debajo de la zona	
Directo determinación de coeficiente de permeabilidad	Prueba directa del suelo en su posición original. (por ejemplo, pruebas de bombeo de campo)											
	Permeámetro de flujo constante											
	Permeámetro de flujo descendente variable											
Indirecto determinación de coeficiente de permeabilidad	Cálculos por distribución granulométrica, porosidad, etc.											
	Prueba de captancia horizontal						Cálculos desde el tiempo tasa de consolidación y tasa de caída de presión a volumen constante					

Affer Casagrande, A. and Fadum, R.E., Soil Mechanics Series, Cambridge, MA, 1940 (from Leonards, G.A., Foundation Engineering, McGraw-Hill Book Co., New York, 1962, ch. 2).

Fuente: Hunt, R. E. (2007). Traducción propia.



Figura N° 12 Ensayo de permeabilidad Lefranc de campo

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

Budhu (2011), Lambe & Witman (1968) entre otros, presentan la siguiente tabla donde definen unos rangos que con los cuales a partir del cálculo del coeficiente de permeabilidad se le puede asignar una descripción cualitativa. Ver Tabla N° 7.

Tabla N° 7 Coeficiente de permeabilidad de diferentes tipos de suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)	Descripción	Drenaje
Grava limpia (GW, GP).	> 1.0	Alta	Muy buena
Arenas limpias, mezcla de grava y arena limpia (SW, SP).	1.0 a 10^{-3}	Media	Buena
Arenas finas, limos, mezclas que comprenden arenas, limos y arcillas (SM-SC).	10^{-3} a 10^{-5}	Baja	Pobre
Arcillas fisuradas y meteorizadas. Limo, arcilla limosa (MH, ML).	10^{-5} a 10^{-7}	Muy baja	Pobre
Arcillas homogéneas (CL, CH)	< 10^{-7}	Prácticamente impermeable	Muy pobre

Fuente: Budhu, M. (2011)

Hunt (2007) presenta un cuadro del libro “Basic Soils Engineering” el cual nos permite estimar el tamaño de las partículas y el tipo de suelo sabiendo el coeficiente de permeabilidad. Ver Tabla N° 8.

Tabla N° 8 Correlación entre el coeficiente de permeabilidad, tipo de suelo y tamaño de las partículas

Typical Permeability Coefficients for Various Materials^a

	Particle-Size Range				"Effective" Size		Permeability Coefficient k		
	Inches		Millimeters		D ₁₀ in	D ₁₀ (mm)	ft/year	ft/month	cm/sec
	D _{max}	D _{min}	D _{max}	D _{min}					
	Turbulent Flow								
Derrick stone	120	36			48		100×10^6	100×10^5	100
One-man stone	12	4			6		30×10^6	30×10^5	30
Clean, fine to coarse gravel	3	¼	80	10	½		10×10^6	10×10^5	10
Fine, uniform gravel	3/8	1/16	8	1.8	1/2		5×10^6	5×10^5	5
Very coarse, clean, uniform sand	1/8	1/32	3	0.8	1/16		3×10^6	3×10^5	3
	Laminar Flow								
Uniform, coarse sand	1/8	1/64	2	0.5	0.6		0.4×10^6	0.4×10^5	0.4
Uniform, medium sand			0.5	0.25	0.3		0.1×10^6	0.1×10^5	0.1
Clean, well-graded sand and gravel			10	0.05	0.1		0.01×10^6	0.01×10^5	0.01
Uniform, fine sand			0.25	0.05	0.06		4000	400	40×10^{-4}
Well-graded, silty sand and gravel			5	0.01	0.02		400	40	4×10^{-4}
Silty sand			2	0.005	0.01		100	10	10^{-4}
Uniform silt			0.05	0.005	0.005		50	5	0.5×10^{-3}
Sandy clay			1.0	0.001	0.002		5	0.5	0.05×10^{-4}
Silty clay			0.05	0.001	0.0015		1	0.1	0.01×10^{-4}
Clay (30-50% clay sizes)			0.05	0.0005	0.0008		0.1	0.01	0.001×10^{-4}
Colloidal clay (< 2µm25%)			0.01	10 ⁻⁴	40 ⁻⁴		0.001	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴

^a From Hough, K.D., Basic Soils Engineering, The Ronald Press, New York, 1957.

Fuente: Hunt, R. E. (2007)

2.5. Definiciones y términos

- **Discontinuidad** Estratigráfica: se llaman discontinuidades estratigráficas a las cicatrices producidas por una interrupción de la sedimentación durante un periodo de tiempo en que la región considerada se somete, además, en algunos casos, a procesos erosivos, para después reanudarse en la sedimentación, ésta ocurre sobre la superficie erosiva. Es una discontinuidad en la que, pese a la superficie de erosión entre dos formaciones, se mantiene el paralelismo entre los distintos grupos de estratos, lo que evidencia la ausencia de fenómenos de plegamiento durante la laguna estratigráfica. Ver Figura N° 13.
- **Deslizamiento** activación por lluvia: El proceso de saturación y ascenso del nivel freático pueden determinar el mecanismo de falla de un talud por efecto de la lluvia. El agua infiltrada puede inestabilizar el talud de dos formas diferentes: Eliminación de tensiones negativas. Al avanzar el frente húmedo por efecto de la infiltración, se eliminan las tensiones negativas y la cohesión aparente. Ascenso del nivel freático. El aporte de agua puede producir un ascenso del nivel freático y de la presión de poros y de esta forma, disminuir la resistencia del suelo. La eliminación de tensiones negativas ocurre de arriba hacia abajo y alcanza una determinada profundidad dependiendo de la intensidad y duración de las lluvias, de la conductividad hidráulica (permeabilidad) y de la profundidad del perfil permeable. Suárez, J. (2009). Cap.6. La activación de un deslizamiento puede depender no solo de la cantidad total de lluvia, sino también, de la duración y de la intensidad de la lluvia, del régimen de los periodos lluviosos y procesos antrópicos. Ver Figura N° 13.
- **Fallamiento:** El proceso de fallamiento después de que interviene el factor detonante, por lo general es un fenómeno físico, en el cual las condiciones de esfuerzo y deformación juegan un papel preponderante. Para el análisis de un deslizamiento o para la determinación de niveles de amenaza y riesgo, es esencial que se tenga claridad sobre los procesos de evolución que generan un deslizamiento, la susceptibilidad, los procesos de deterioro y los factores detonantes como falla progresiva en la mayoría de los casos no ocurren en forma repentina, sino que se toman un tiempo, el cual puede durar de minutos a años. El proceso se inicia con deformaciones o agrietamientos aislados, relacionados con la concentración de esfuerzos, estas deformaciones que se producen por la actuación de los esfuerzos, generan a su vez disminuciones en la resistencia. Suárez, J (2009). Cap.2. Ver Figura N° 14.
- **Inestabilización:** Terzaghi (1950), hizo una diferenciación entre los factores externos e internos que afectan la ocurrencia de los deslizamientos. Tanto las causas internas como las externas, afectan el estado de equilibrio de un talud de dos maneras diferentes o por la combinación de estas dos formas: 1. Disminución de la resistencia al cortante. 2. Aumento de los esfuerzos de cortante. Las causas internas: Son mecanismos que producen una reducción en la resistencia al cortante a un punto tal que inducen una falla. Bell (1983). (Ejemplos: Meteorización, presión de poros). Las causas externas: Son los mecanismos por fuera de la masa afectada, los cuales son responsables de un aumento de los esfuerzos por encima de la resistencia al cortante (sobrecargas, cortes, sismos,

vibraciones, etc.). Para el diagnóstico de las condiciones de estabilidad de un talud o ladera, es imprescindible conocer los agentes que causan la inestabilidad. Es importante poder anticipar los cambios que ocurren en el talud con el tiempo y las condiciones de carga, de humedad y drenaje a las cuales el talud va a estar expuesto durante toda su vida. En el caso de deslizamientos se requiere entender los factores esenciales de las situaciones que produjeron la falla.

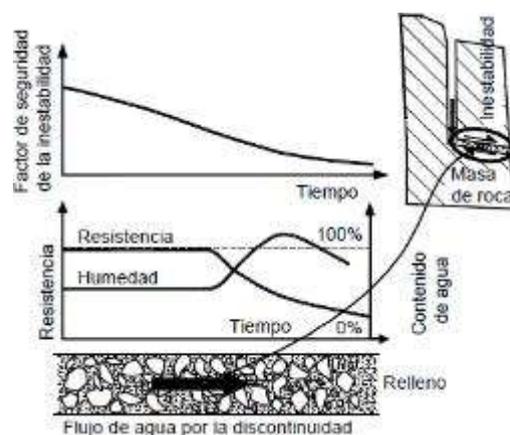


Figura N° 13 Al pasar el flujo de agua a lo largo de las fracturas, se produce inicialmente una pérdida de resistencia por la eliminación de la succión y posteriormente, la generación de presión de poros

Fuente: (Jaboyedoff y otros, 2004)

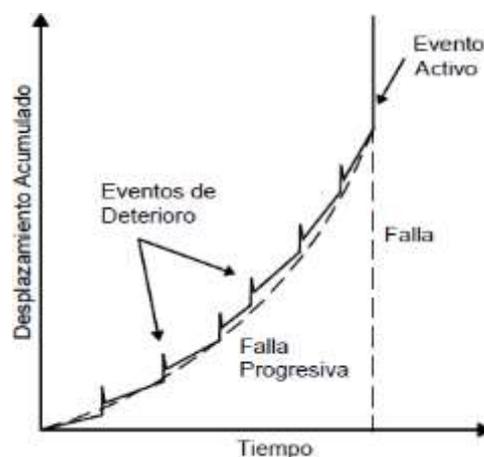


Figura N° 14 El efecto de deterioro

Fuentes: Suárez, J (2009)

- **Infiltración** capacidad: Las capacidades de infiltración varían desde dos milímetros por hora, en suelos muy impermeables a dos mil quinientos milímetros por hora, en suelos muy permeables dependiendo de la cobertura vegetal, pendiente, textura del suelo, humedad natural y prácticas de agricultura. Los suelos más permeables como las gravas y arenas, poseen una capacidad mayor de infiltración. Las gravas y arenas son mucho más permeables que las arcillas. La infiltración también está influenciada por la pendiente del terreno y por la textura del suelo y procesos antrópicos. Suárez, J (2009) Cap.6.

- **Meteorización:** Es la desintegración y descomposición de una roca en la superficie terrestre o próxima a ella como consecuencia de su exposición a los agentes atmosféricos, con la participación de agentes biológicos. Involucra reacciones químicas en las que los productos sirven de reactivos para síntesis subsiguientes. Si el proceso de la meteorización ocurre en la superficie del suelo se llama meteorización edafoquímica y si ocurre en capas más profundas se llama meteorización geoquímica. Recupero de www.ecured.cu/Meteorización. La meteorización afecta la susceptibilidad a los deslizamientos, al disminuir la resistencia al cortante o al cementar las partículas con óxidos o silicatos.
- **Mecanismo de falla:** La ocurrencia de una falla obedece a un proceso, el cual comprende una gran cantidad de factores, en el espacio y en el tiempo. Condiciones originales del talud (Susceptibilidad) todo talud tiene unas propiedades o características físicas como son el relieve, geología, propiedades mecánicas de los materiales y perfiles, condiciones ambientales, cobertura vegetal, etc. Equilibrio o desequilibrio de fuerzas (Factor de seguridad) en un talud estable hay un equilibrio entre las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes, entre las cuales es determinante la fuerza de gravedad. El deterioro (Modificación de las condiciones originales) el deterioro comprende la alteración física y química de los materiales y su subsecuente desprendimiento o remoción. Esto incluye la alteración mineral, los efectos de relajación y la abrasión. Los efectos del deterioro pueden ser lentos o rápidos y se acumulan hasta producir la falla en forma progresiva. Suárez, J (2009) Cap.2.
- **Mylar:** Película de poliéster / lámina de plástico se fabrica en una gran gama de diferentes estilos, acabados y espesores. También hay innumerables usos para la película de poliéster lámina de plástico o mylar, algunos de los nombres comerciales más conocidos son Mylar, Melinex y Hostaphan. Recupero de <https://de-senderismo.net/blog/mylar/>.
- **Nivel Freático:** La localización del nivel freático corresponde a la línea de presión de poros igual a cero, lo cual equivale a que la presión neta en el sitio, es igual a la presión atmosférica. El nivel de agua determina los niveles de presiones hidrostáticas sobre una superficie localizada por debajo de ese nivel o los valores de presión negativa o de succión para el suelo por encima. En los taludes naturales de laderas, la línea de nivel freático general sigue una línea aproximadamente paralela a la superficie del terreno y ésta sube por el recargue debido a la infiltración. El agua subsuperficial puede dividirse entre zonas de presión de poros positiva y negativa. Las presiones de poros positivas son superiores y las negativas son inferiores, a la presión atmosférica. La línea divisoria es el nivel freático donde la presión es igual a la presión atmosférica, lo cual se designa como presión cero. Suárez, J (2009) Cap.6.
- **Procesos Antrópicos:** Las excavaciones o cortes que modifican la topografía original del terreno, especialmente, los cortes en el pie de los taludes, las excavaciones subterráneas (túneles), las cuales afectan la estructura y las condiciones de los esfuerzos del suelo que está encima, los rellenos o depósitos de materiales sobre el talud, disposición de residuos, etc. La irrigación que facilita la infiltración y los cambios de humedad y la presión de poros. La infiltración en los canales o cuerpos de agua. Las fugas de agua de las redes de servicios. El mantenimiento inadecuado de los

sistemas de drenaje y subdrenaje. La deforestación que produce cambios hidrológicos y afecta la resistencia del suelo, al eliminar el refuerzo de las raíces. Las vibraciones artificiales, tránsito de vehículos, vibraciones de maquinaria, detonaciones de explosivos, etc., las cuales generan fuerzas dinámicas y el deterioro de la estructura de los materiales. La disminución repentina del nivel de agua como en el caso del desembalse de una presa. Suárez, J (2009). Cap.2.

- **Talud:** Según Polo (2005) se denomina talud a la superficie inclinada con respecto a la horizontal que adoptan las masas del suelo cuando se encuentran libremente en la naturaleza (laderas); cuando se depositan o almacenan en una superficie (talud reposo); cuando se construye terraplenes (talud de terraplén) o cuando se excava el suelo en el banqueo de un movimiento de tierra. Además, se entiende por talud a cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que hayan de adoptar las estructuras de tierra. Al respecto se entiende por estabilidad a la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento. Ver Figura N° 15.

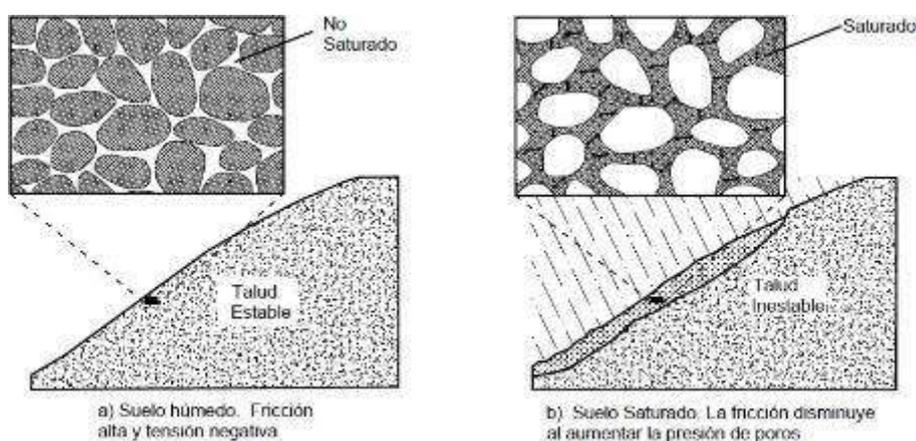


Figura N° 15 La saturación del perfil del suelo puede activar un deslizamiento

Fuente: Suárez, J (2009)

- **Termistor:** Elemento de detección de temperatura compuesto por material semiconductor sinterizado que presenta un gran cambio en la resistencia en proporción a un cambio pequeño en la temperatura. En general, los termistores tienen coeficientes de temperatura negativos, lo que significa que la resistencia del termistor disminuye a medida que aumenta la temperatura. Los termistores se fabrican con una mezcla de metales y materiales de óxido metálico.
- **Succión:** Según Freedlund (1995) Traducción propia. Está compuesta de dos elementos básicos: la succión matricial y la succión osmótica. La succión matricial se define como la diferencia entre la presión del aire y la presión de poros, y la succión osmótica depende de las características químicas del fluido en los poros. La succión o tensión capilar disminuye al aumentar el espesor de la película de agua, alrededor de las partículas de suelo. La medición de la succión matricial, equivalente a la energía requerida para mover una molécula de agua dentro de la matriz del suelo y la succión total, que es la energía requerida para mover una partícula de agua desde el suelo a un estado de vapor. En un material granular libre de sales, la succión total y la succión matricial son

iguales, en cambio si aparecen sales disueltas, la succión osmótica puede alcanzar valores significativos.

- **Pendiente y relieve:** Suárez, J (2009). Cap.2. Al aumentar la pendiente, generalmente se aumentan las fuerzas que tratan de desestabilizar el talud y disminuyen los factores de seguridad al deslizamiento. Los taludes de alta pendiente son muy susceptibles a la ocurrencia de inclinaciones, caídos y flujos de residuos. Además de la pendiente, es muy importante la curvatura de la superficie. Ver figura N° 16.

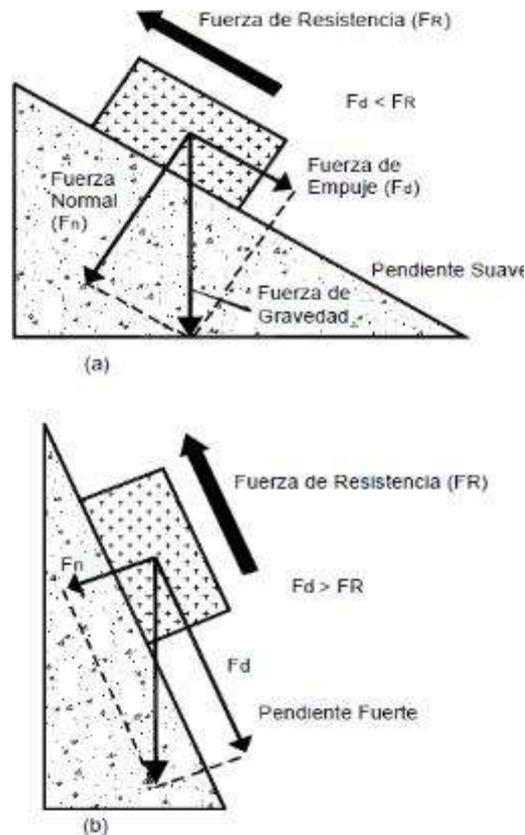


Figura N° 16 Esquema de un bloque sobre una pendiente. Al aumentar la pendiente aumenta F_d (fuerza de empuje)

Fuente: Suárez, J (2009)

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

3.1. Descripción del Proyecto

- El proyecto: “Saldo de Obra para la Instrumentación Complementaria en Zonas Inestables segunda Etapa”. Cliente: Electroperú S.A. Contempló la instrumentación geotécnica de nueve zonas inestables denominadas derrumbes, sin embargo, como se detalla en los objetivos específicos del presente trabajo solo se evaluará las zonas inestables N°1 y 2.
- La instrumentación geotécnica se llevó a cabo entre el mes de abril del 2019 y el mes de enero 2020.
- El proyecto se ubica en el departamento de Huancavelica, en la provincia de Huancavelica distrito de Acoria, margen derecho de la cuenca del río Mantaro, aguas arriba del embalse de la presa Tablachaca emplazada a una altitud media de 2750 msnm, con una temperatura máxima de 26°C, mínima de 16°C y promedio de 17°C. Precipitación aproximada anual de 600mm.
- Las principales vías de acceso asfaltada al área de los trabajos inician desde Lima por las siguientes vías: Lima - Oroya - Quichuas, Lima - Pisco - Castrovirreyna - Huancavelica - Quichuas, la distancia aproximada desde Lima es de 430 km.



Figura N° 17 a) Mapa Político del Perú

Fuente: Elaboración propia



Figura N° 18 b) Departamento de Huancavelica

Fuente: Elaboración propia

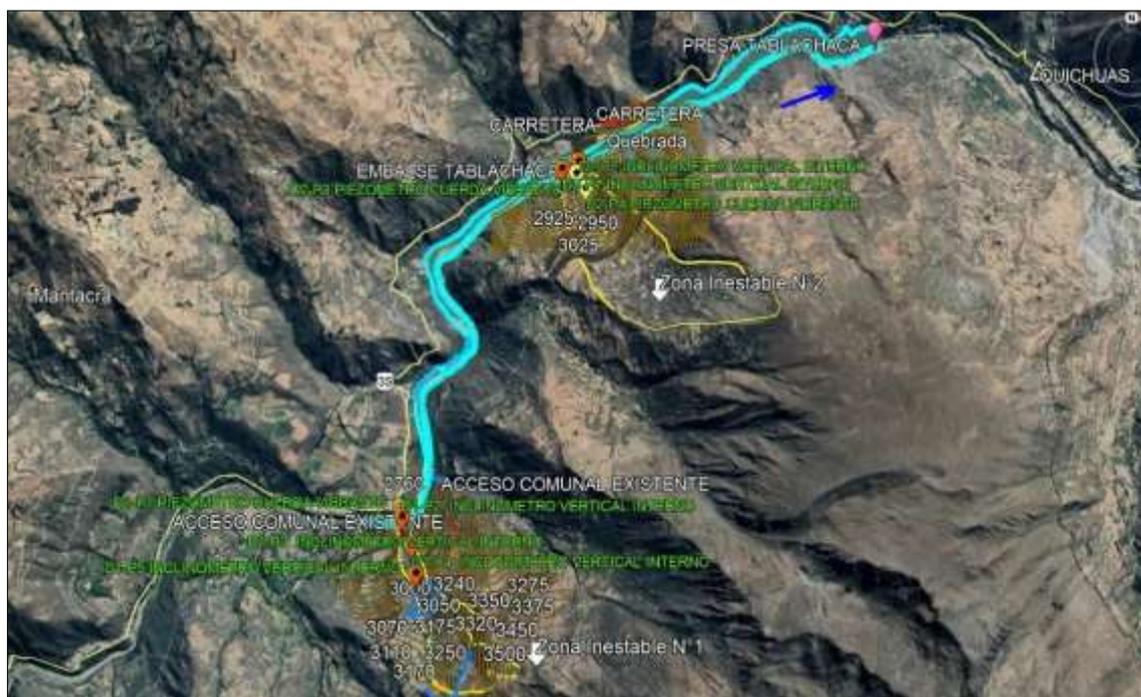


Figura N° 19 Imagen Satelital de las zonas inestables N° 1 y 2

Fuente: Elaboración propia, vinculada de Google earth-Pro

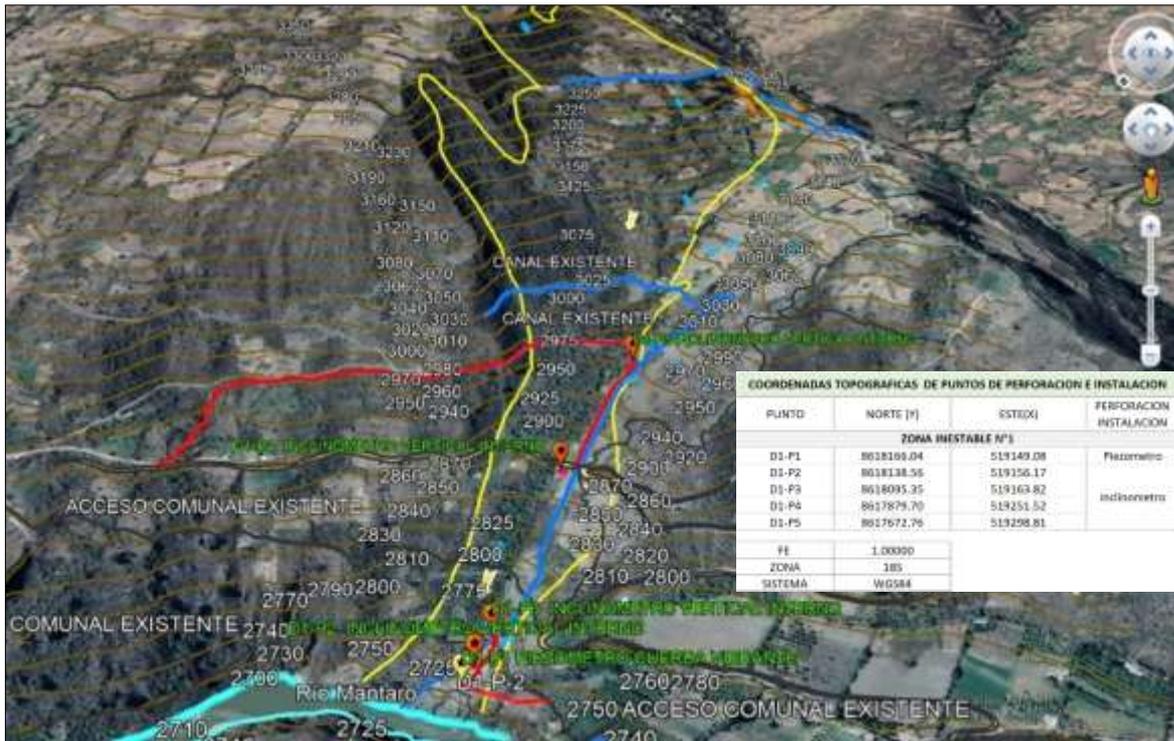


Figura N° 20 Imagen Satelital 3D, línea amarilla borde de las zona inestable N°1

Fuente: Elaboración propia, vinculada de Google earth-Pro



Figura N° 21 Imagen Satelital 3D, línea amarilla borde de las zona inestable N°2

Fuente: Elaboración propia, vinculada de Google earth-Pro

3.2. Perforación diamantina en las zonas inestables N° 1 y 2

Tabla N° 9 Máquinas y métodos de perforación y utilizado en el proyecto (sombreado gris)

Item	Maquina	Aplicación	Métodos de perforación Drilling Methods	Ventajas	Consideraciones
1	Tripode con bloque y aparejo o cabrestante motorizado	Por Pozo avanzado	Agujero avanzado cortando mientras se refuerzan las varillas y se lava con agua circulada por bomba	Requiere solo mano de obra mínima	Funcionamiento lento, especialmente por debajo de 10 m
		Perforaciones exploratorias para estudios preliminares		Casi cualquier lugar accesible al equipo ligero y portátil	Penetración difícil en suelos fuertes e imposible en la roca
		Agujeros para algunos tipos de pruebas in situ	Comúnmente llamado método de lavado aburrido		Difícil quitar la grava de caja, conduce a muestras deficientes
2	Taladros Rotativos Montado sobre patines Montado en camión Montado en remolque Montado en riel	Adquirir todo tipo de muestras de suelo y roca	pozos de avanzada con el extremo motorizado y una varilla de perforación giratoria a la que se aplica presión hidráulicamente	Relativamente rápida	El muestreo de UD es difícil excepto en suelos blandos por falta de reacción
		Varios agujeros para muchos tipos de pruebas in situ		Puede penetrar todo tipo de materiales	El equipo presenta dificultad en acceso en terreno pantanosos o terreno accidentado, colocar esquí o oruga
		Perforación inclinada de pozos en el suelo o la roca para desagües horizontales o anclajes	Agujero normalmente retenido por lechada de barro	Apto para todo tipo de muestras	Requiere sendero o camino
3	Barreno de giro continuo, espiral ("Auger")	Taladrar de pequeño a tamaño moderado del pozo y continuo pero con muestras perturbadas	Rotación continua con giros de sinfines helicoidales	Procedimiento rápido para pozos exploratorios, suelos de alta cohesión y roca blanda	El agujero colapsa cuando la barrena está retirado del suelo cohesivo débil o suelos granulares sin cohesión, lo que limita la profundidad, generalmente cerca del nivel freático
		Otras muestras posibles normalmente obtenidas en suelo cohesivo y con adecuada fuerza para prevenir colapso de pozo	Eliminación de todos los giros, permite el examinar suelo directamente	Muestreo SPT posible cuando el pozo permanece abierto después de extracción del barreno	Muestras de barrena alteradas
					Métodos de muestreo limitados
4	Barreno de vástago hueco	Taladrar de pequeño a agujeros de tamaño moderado para muestreo de suelo	Similar al giro sin fin, excepto por el vástago hueco que actúa como carcasa al atomizarse durante su giro en el suelo	Método rápido en suelos débiles o moderadamente fuertes	Penetración dificultosa en suelos fuertes y para profundidades significativas a través de capas de grava y no rocas
				SPT y UD muestreo posible	Puede haber una perturbación considerable desde la barrena
5	Sinfines de gran diámetro Sifin de canchones Barrena de disco Sifin helicoidal	Taladro de gran diámetro para agujeros (de 4 pies) para exámenes de muestras perturbadas y estratos de suelo cohesivos donde el agujero permanece abierto	Giratorio de gran diámetro, el barreno corta el suelo para formar un agujero	Método rápido	Profundidad limitada por agua subterránea
				Permite cerrar examen de suelo subsuperficial	Profundidad limitada por las condiciones del agua subterránea y las rocas.
					La máquina grande requiere acceso fácil
6	Taladros de percusión (herramienta de cable o batir-perforar)	Comúnmente utilizado para perforar pozos de agua	Los pedazos pesados se levantan y se dejan caer para romper materiales y formar un lodo que es eliminado por balines o bombas de arena retirando la carcasa del agujero	Relativamente económico método para hacer perforaciones largas de pozos a través de cualquier material (hasta 2 pies (60 cm))	Equipo grande y engorroso
		Recuperación por lavado de muestras en balines o bomba			Progreso lento en suelos fuertes y rocas.
		Define la profundidad de la roca			La perturbación alrededor de la broca por impacto de alta energía afecta seriamente los valores de SPT
7	Taladros de martillo	Para Pozos de agua	Similar a la percusión		La extracción de muestras de roca y UD no posible
		para pozos exploratorios a través de adoquines y rocas	Hincado de pilotes Diesel martillo usado para conducir carcasa de doble pared mientras circulando aire a través anillo para soplar cortes del cañón interior	Relativamente rápido en penetración a través adoquines y rocas	Similar a los ejercicios de percusión, excepto que el progreso es mucho más rápido
8	Taladro de percusión neumático sondas de seguimiento	Perforación de pozos			Las muestras son solo pequeñas virutas No se utilizan para muestreo.
		Para anclas de roca	Virutas de roca de percusión y aplasta la roca con martillo, golpea como un poco en el giro. Chips eliminados por presión del aire	Procedimiento rápido para pozos de poco diámetro en piedra dura	Es posible perder todo el vástago de perforación en rocas sueltas y fracturadas, vetas de arcilla, lutitas húmedas, etc.
		Voladura			El mejor uso es la roca maciza dura
9	Taladro de impacto	Perforación rápida de pozo exploratorio en roca (Un caso: pozo de 640 pies, 6.5 pulg. Diámetro perforado en 24 h)	Energizado neumáticamente broca de carburo de tungsteno martillo roca dura, con una tasa alta como 700 golpes / min	Muy rápido penetración en masas de roca. Podría ser usado para perforar pilotes pozos a sustancial profundidades, para túnel en estudios y núcleo de roca a profundidades críticas con métodos rotativos	Limitada a las masas de roca
					Sin recuperación de muestra
					Peligro de cierre de orificios en zonas de rocas sueltas, fracturadas o con mantos (podría corregirse mediante inyección de cemento y nueva perforación)

Fuente: Hunt, R. E. (2007). Elaboración propia

Los puntos definidos para perforación están ubicados estratégicamente en sectores de la parte central y baja de las zonas inestables donde previo análisis de las condiciones del desplazamiento registrarán los efectos de movimientos de la masa de terreno en dirección del cauce del río Mantaro embalse aguas arriba de la presa Tablachaca. Se construyen accesos de aproximadamente tres metros de ancho y en el mismo punto a perforar, plataformas estables con dimensiones aproximadas de cinco por diez metros donde se posicionará la máquina. Se ejecutaron perforaciones diamantinas (avance por rotación), por requerimiento del cliente y en relación a las condiciones del terreno y las profundidades a alcanzar. Ver Tabla N° 9. Utilizado maquinas con capacidad en roca de NQ 575 m, HQ 375 m y en material de derrumbe HQ 80 m motorización de 92-110HP@1300-2500RPM. Y otras con capacidad en roca de NQ, 850m, HQ 535m y en material de derrumbe HQ 160M, motorización de 92-110HP@1300-2500RPM, winche propio y capacidad de transporte en esquí u orugas. Usando para ello maquinas perforadoras del tipo y modelo BOYLES BROSS-JKSBB37, LON YEAR-44 y HENG YANG-XY4L. Brocas tritono, de rodillo, "Hughes" y brocas corona con dientes de carburo de tungsteno. Ver Figura N° 22. Muestreadores de tubo triple para la recuperación (que permite tener un promedio mayor igual al 90%) y equipos complementarios como bomba de lodos 10-15HP, mezclador-agitador para lechada de cemento y motobomba de 7HP.

Para la instalación de piezómetros de cuerda vibrante, se tuvo en consideración un diámetro mínimo de perforación de 76 mm y para los inclinómetros de 100 mm. Suárez, J (2009) Cap.11. DCDMA utilizan un sistema de dos o tres letras; la primera letra de los estándares de la DCDMA (E, A, o N) indican el diámetro aproximado de la perforación. La segunda letra (X o W) es un grupo de diámetros claves para la estandarización de las dimensiones que afectan la intercambiabilidad. Por ejemplo, la designación W es una tubería más pesada y las roscas son más gruesas que la designación X, la cual es relativamente menos pesada. Ver Anexos B, C y Tabla N° 10.

Tabla N° 10 Denominación y tamaño de la perforación para los diferentes diámetros utilizados en sondeos geotécnicos

Letra	Diámetro del hueco en milímetros	Diámetro del hueco en pulgadas
R	25	1
E	40	1.5
A	50	2
B	65	2.5
N	75	3
K	90	3.5
H	100	4
P	125	5
S	150	6
U	175	7
Z	200	8

Fuente: Diamond Core Drill Manufactures Association – DCDMA – 1991



Figura N° 22 Varios tipos de brocas, de izquierda a derecha: Brocas de corte de tierra de tres hojas, Brocas de corte de roca con rodillo tricónico, brocas de dientes de carbolog tipo corona para cortar roca blanda y broca de diamante para perforación de roca.

Fuente: Hunt, R. E. (2007)

- Instalación de máquina de perforación: Se instala en el punto, se ajusta la ubicación con tacos y comba de mano, se nivela la máquina por medio de la tornamesa y sus cuatro soportes hidráulicos apoyados sobre vigas de madera y se coloca a punto con el nivel de mano. Se asegura y se fija cada esquina con anclajes, estabilizadores o templadores para evitar movimientos durante la perforación Ver Figura N° 23. Luego se eleva la torre mástil y se asegura con sus grapas hidráulicas o pasadores de sujeción, se instala la poza de agua se conecta al punto de rotación y se termina conectando la bomba de lodos a la máquina perforadora.
- Proceso de perforación: Se instala el seguro whipcheck (anti latigazo) a la manguera de 1” asegurándola la conexión a la bomba de hidráulica, y luego hacia el corebarrel. Se acopla el cable de 5/8” a la bomba conexión mediante un grillete (colocando pasador y seguro). Se realiza el izaje a través del cable de 5/8” de la bomba de conexión por medio del block elevador conjuntamente con corebarrel acoplado todo el sistema superior hacia la unidad de rotación. Se hace pasar el corebarrel por la unidad de rotación, se cierra y asegura el Chuck subiendo la unidad de rotación con el corebarrel a una altura de 1 metro. Una vez que el corebarrel haya pasado por la unidad de rotación se asegura el tubo con el Chuck hacia el Reaming Shell (acople de acero) y broca. Se abre el Chuck y desliza corebarrel hasta una altura aproximada de 60 – 80 cm de la grampa de pie, se cierra Chuck y queda listo para la perforación. Ver Figuras N° 23 al 26.

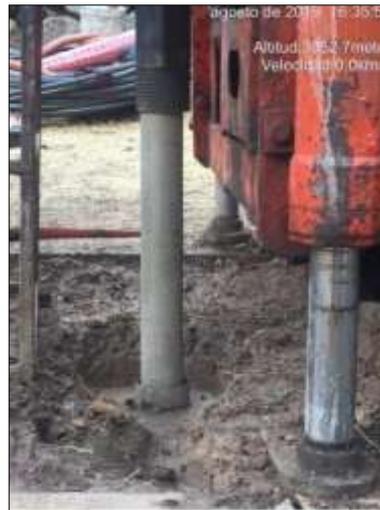


Figura N° 23 Instalación y nivelación de tornamesa

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

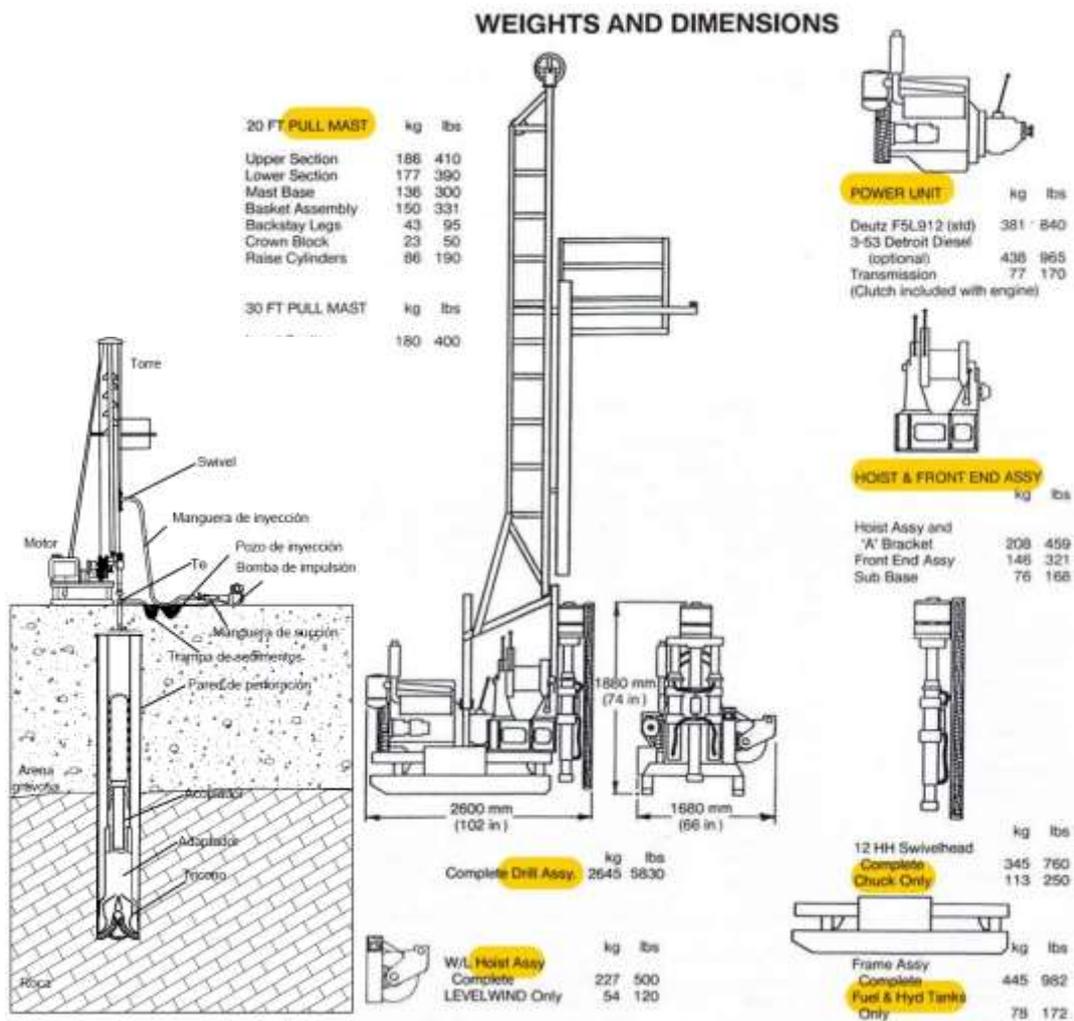


Figura N° 24 Partes estándar de máquina perforadora diamantina

Fuente: Catálogo de fabricante, JKS BOYLES. Suárez, J (2009)



Figura N° 25 Máquina perforadora y montaje

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

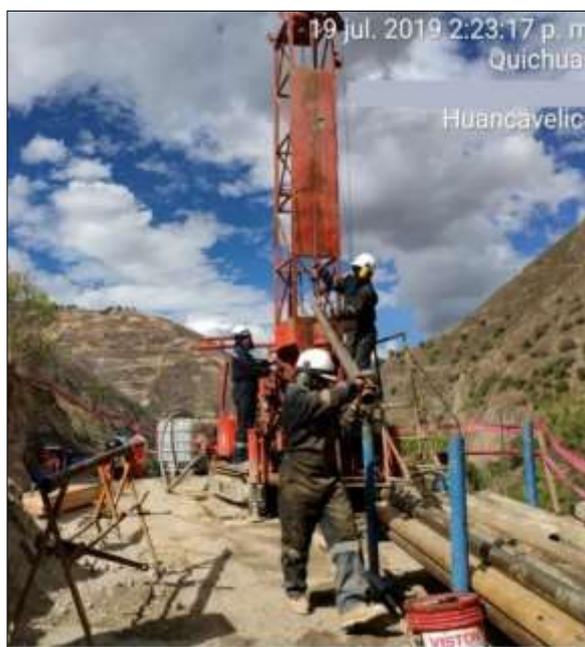


Figura N° 26 Máquina perforadora y montaje

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

Y durante la perforación se repite los pasos hasta el desenroscado de la tubería ya introducida en el pozo, se coloca la mordaza o abrazadera hidráulica en nivel en el que se quedó para evitar rote o se mueva, seguido se enrosca la tubería (NQ para abrir paso en la perforación y HQ para ampliar el pozo) hacia la bomba conexión para volver a bajarla por medio del sistema de rotación hacia la tubería que quedo introducida en el pozo de perforación. En caso la tubería quede con torque o demasiado ajustada se deberá golpear la unión de los tubos con una comba de 6 u 8 libras. Se repiten los pasos anteriores desarrollando una columna de perforación hasta llegar a la profundidad que en los inclinómetros verticales deberá procurar se extienda por lo menos 3 m en suelo firme o roca, guardando relación con los tramos de tubería que se utilizan de 3 m; se busca que la curva de deformación del inclinómetro muestre la diferencia entre la zona anclada que no se mueve y la que muestra movimiento. Ver Figura N° 26. Para evitar que el pozo se derrumbe durante la perforación se puede usar según sea necesario dosificación de cemento, bentonita o aditivos para desarrollar un revestimiento evitando colapsos.

GEOKON. Manual de Instrucciones Modelo 6400. (E,5/06/2018). “La perforación del pozo tiene que ser lo más vertical posible, preferiblemente dentro de un grado”. Para ello se utiliza niveles de mano imantados en dos direcciones, durante las corridas (avances de perforación) que se hacen aproximadamente cada metro. Ver Figuras N° 27 al 30. Además, al inicio y fin de cada jornada se verifica con topografía la verticalidad sobre las marcas en el sistema de rotación, para que la misma no afecte la verticalidad y al final de la perforación se encuentre dentro los rangos indicados líneas arriba.

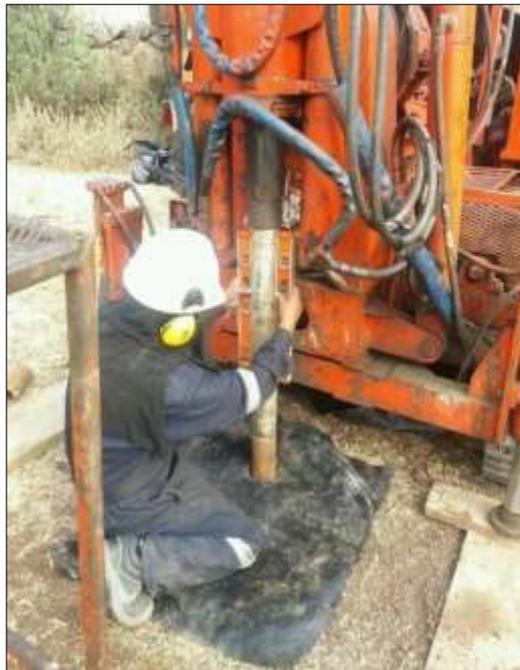


Figura N° 27 Control de verticalidad con niveles de mano certificados nuevos e imantados

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo



Figura N° 28 Control de verticalidad con niveles de mano certificados nuevos, certificados e imantados

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo



Figura N° 29 Control Topográfico de verticalidad en la perforación para piezómetros de cuerda vibrante y en especial para inclinómetros verticales

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo



Figura N° 30 El ratio de avance en la perforación y el cambio de presión requerida puede ayudar a identificar los cambios de estrato. Las pérdidas o ganancias de agua permiten definir presiones piezométricas y el flujo a través de las capas investigadas. La medida del nivel freático al final de un día e inicio del siguiente, permite cuantificar las permeabilidades e identificar aguas estáticas.

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

3.3. Ensayo de permeabilidad LEFRANC

3.3.1. Procedimiento de campo

La ubicación de la profundidad del ensayo fue estimada con la aproximación previa a la visualización y ocultación del material extraído y recuperado constantemente de la perforación diamantina observándose un estrato constante posiblemente permeable que este próximo al suelo firme o roca y posible ubicación de la superficie de deslizamiento, fallamiento o discontinuidad. Ver Figura N° 31. Se realizó un ensayo de permeabilidad Lefranc por cada punto de perforación de zona inestable. Cinco para la zona inestable N° 1 y cuatro para la zona inestable N° 2. Dependiendo de cuan permeable sea el tramo de prueba se realiza el ensayo de permeabilidad a carga constante o carga variable. Para ambos casos es necesario saber la profundidad del nivel freático, la profundidad de la perforación, diámetro interior y exterior del tubo de perforación y la longitud del tramo de prueba. Asimismo, se utilizó la mesa de medidor de caudal. Ver Anexo D.



Figura N° 31. Por ejemplo, para el punto D1-P5 de la zona inestable N° 1, se observa que antes de ingresar a suelo firme o roca, se presenta un estrato posiblemente permeable donde se pueda estar desarrollando la superficie de deslizamiento, discontinuidad y falla progresiva. Por ello la profundidad del ensayo se desarrolla entre los 19.55m y 21.15 m.

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

3.3.2. Ensayo de permeabilidad a carga constante

Para este ensayo es necesario saber el caudal de consumo del agua en el tramo de prueba, este se logra vertiendo agua dentro del tubo de perforación hasta llenarlo. Ver Figura N° 32. Inmediatamente después se reduce la cantidad de agua vertida con el fin de que el nivel de agua se mantenga constante, una vez logrado este equilibrio se cuantifica la cantidad de agua que se vierte con la ayuda de un medidor de caudal de agua cada cierto intervalo de tiempo. Ver Figura N° 33.

Durante la ejecución del ensayo es necesario la utilización de un cronometro, y registrar como primer dato de volumen de agua acumulado justo cuando se da inicio el cronometro, después de un intervalo de tiempo se vuelve a tomar el nuevo registro de volumen acumulado, este proceso se repite hasta que se considere que ya no es necesario la toma de datos adicionales generalmente de diez a once anotaciones, se recomienda que los intervalos de tiempo sean iguales. Ver Figura N° 34.



Figura N° 32 Llenando de agua al interior de tubería de casing de acero en pozo perforado

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo



a)



b)

Figura N° 33 a) Estructura metálica donde se coloca el medidor de caudal de agua y accesorios adicionales. b) Medidor de volumen de agua

Fuentes: Elaboración propia, tomada en campo



Figura N° 34 Toma de datos durante la ejecución del ensayo de permeabilidad Lefranc a carga constante

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

3.3.3. Ensayo de permeabilidad a carga variable

Hubo puntos de perforación donde el nivel de consumo de agua fue muy pequeño para que el medidor de volumen de agua lo pudiera detectar. En estos casos se realizaron ensayos de permeabilidad a carga variable, el cual consiste en llenar con agua la tubería de perforación, cortar el suministro de agua y empezar a medir el descenso del nivel agua tomando tiempo. Ver Figura N° 35. Para realizar este ensayo es necesario la utilización de un medidor sonda de nivel de agua. Ver Figuras N° 36 y 37.



Figura N° 35 Toma de datos como el tiempo y medición del volumen de agua en relación con los niveles de agua en el interior de tubería de casing de acero en pozo perforado

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo



a)

b)

Figura N° 36 a) Medidor sonda de nivel de agua. b) Toma de datos del descenso del nivel de agua durante la ejecución del ensayo de permeabilidad Lefranc a carga variable.

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo



Figura N° 37 Etapa de registros del ensayo de permeabilidad Lefranc a carga variable, el ensayo dura aproximadamente una hora.

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

3.4. Cálculos de los ensayos de permeabilidad LEFRANC

Para el cálculo del caudal es necesario que a todos los datos de volumen acumulados tomados durante el ensayo, restarles el primer dato, es decir el dato que se tomó justo cuando se dio inicio al cronometro, para obtener el volumen de agua acumulada durante la ejecución del ensayo. Sabiendo estos datos se grafican en el plano cartesiano el volumen acumulado versus el tiempo en que fueron tomados dichos datos, luego se realiza una regresión lineal por el método de mínimos cuadrados para obtener la pendiente, cuyo valor numérico es el caudal bombeado durante el ensayo.

- Para el cálculo del ensayo de permeabilidad a carga constante

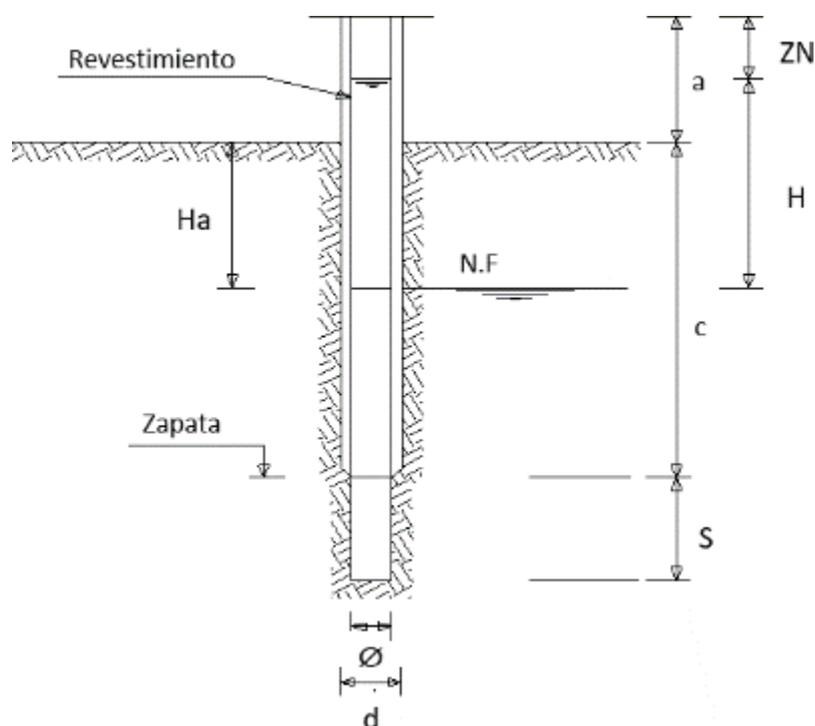


Figura N° 38 De la figura N° 9, se deduce las dimensiones completaría que son registradas de campo

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de coeficiente de permeabilidad “K”, se deduce de la ecuación N° 2, ensayo a carga constante, las siguientes ecuaciones que están en relación al Cociente S (longitud de tramo de prueba) /Ø (diámetro del tramo de prueba, sondeo) :

$$\text{Cociente } S/\phi < 2 \quad K = \frac{Q}{\pi \phi H}$$

Ecuación N° 4 Se deduce de la ecuación N°2, si $S/\phi < 2$

$$\text{Cociente } S/\phi = 2 \quad K = \frac{Q}{2 \pi \phi H \sqrt{\frac{S}{\phi} + \frac{1}{4}}}$$

Ecuación N° 5 Se deduce de la ecuación N°2, si $S/\phi = 2$

$$\text{Cociente } S/\phi > 2 \quad K = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{2S}{\phi}\right)}{2 \pi H S}$$

Ecuación N° 6 Se deduce de la ecuación N°2, si $S/\phi > 2$

Fuente Ecuación N° 4 ,5 y 6: Hvorslev. (1948). Elaboración propia

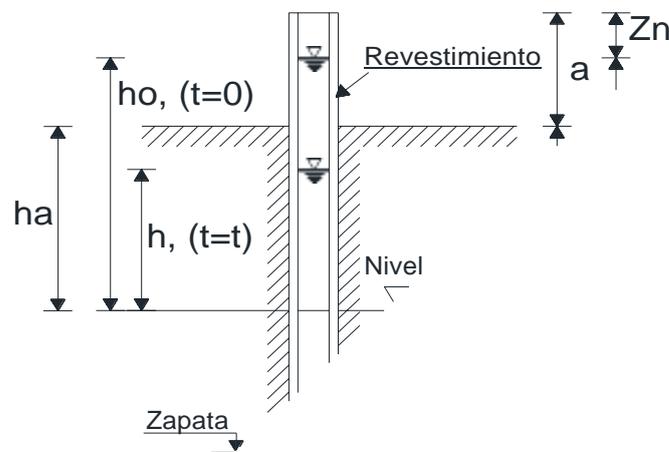


Figura N° 39 De la figura N° 9, se deduce las dimensiones completaría que son registradas de campo

Fuente: Elaboración propia

Se deduce de la ecuación N° 3, ensayo a carga variable para el cálculo de coeficiente de permeabilidad “K”. lo siguiente:

Ecuación N° 7 Viene de la ecuación N° 3, se puede expresar de la siguiente manera:

$$-\frac{k \cdot 8 \cdot S \cdot t}{d^2 \cdot \ln \frac{2 \cdot S}{\phi}} = \ln \frac{h}{h_0} \quad \text{a)}$$

En la ecuación a) se identifican varias constantes y se las puede agrupar en una sola.

$$P = \frac{-8 \cdot S}{d^2 \cdot \ln \frac{2 \cdot S}{\phi}} \quad \text{b)}$$

Reemplazando la ecuación b) en a), se obtiene:

$$k \cdot P \cdot t = \ln \frac{h}{h_0} \quad \text{c)}$$

Tomando en cuenta que k y P son constantes, se las puede agrupar en una sola.

$$m = P \cdot k \quad \text{d)}$$

Reemplazando la ecuación d) en c), se obtiene la siguiente ecuación:

$$m \cdot t = \ln \frac{h}{h_0} \quad \text{e)}$$

Como el primer miembro de la ecuación tiene un comportamiento lineal, el segundo miembro también tendrá el mismo comportamiento. Entonces para el cálculo de la permeabilidad es fundamental establecer el h_0 en el t_0 , y luego calcular todos los $\ln(h/h_0)$, una vez logrado esto se puede graficar en el plano cartesiano todos los $\ln(h/h_0)$ versus el tiempo, y realizar el ajuste lineal por el método de los mínimos cuadrados. Y conociendo la pendiente “m”, se puede calcular el coeficiente de permeabilidad con la siguiente ecuación:

$$K = \frac{m}{P} \quad \text{f)}$$

m: pendiente de la línea de ajuste

K: permeabilidad

Fuente: Elaboración propia

3.4.1. Zona inestable N°1

- **D1-P1 Carga constante**

Tabla N° 11 Registro y cálculo de S/Ø

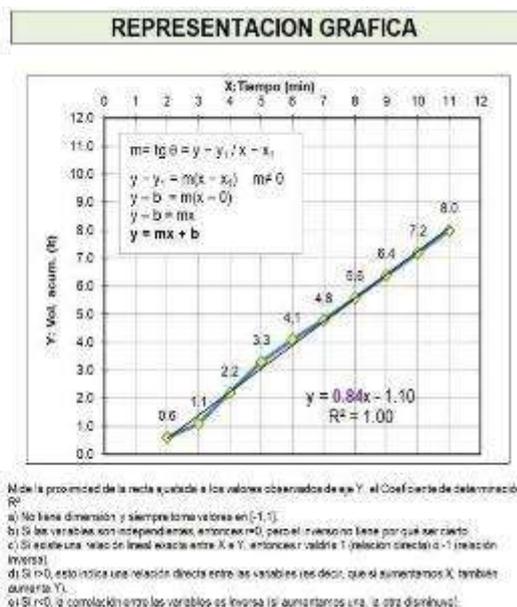
Ensayo Realizado		Tipo	
Abajo del nivel freático N.F	X	Infiltración	X
Arriba del nivel freático N.F	-	Bombeo	-
Profundidad de Ensayo			
21.50 m	a	22.50 m	
Datos-1			
Zn = Profundidad del agua en el Revestimiento	0.30 m	30	cm
S= Longitud de ensayo	0.50 m	50	cm
H= Sobrecarga Hidráulica= Ha+a-Zn	8.75 m	875	cm
Datos-2			
a=	0.30 m		
c=	8.50 m		
ha=	5.89 m		
d = ø int. Tubo	7.50 cm		
ø = ø sondeo	8.80 cm		
Inclinación con horizontal	90°		
Cálculo del Cociente S/Ø			
S/ø =	5.7		

Fuente: SAI. Elaboración: Propia

Tabla N° 12 Datos del medidor de caudal de agua para el D1-P-1, el caudal calculado a partir de la regresión lineal

TIPO DE ENSAYO : CARGA CONSTANTE					
t (min)	Medidor de Vol (m3)	Medidor de Vol (lt)	Vol. parcial (lt)	Vol. acum (lt)	
x	2.5730	2573.0		y	
1	2.5760	2576.0	3.00		
2	2.5766	2576.6	0.60	0.6	
3	2.5771	2577.1	0.50	1.1	
4	2.5782	2578.2	1.10	2.2	
5	2.5793	2579.3	1.10	3.3	
6	2.5801	2580.1	0.80	4.1	
7	2.5808	2580.8	0.70	4.8	
8	2.5816	2581.6	0.80	5.6	
9	2.5824	2582.4	0.80	6.4	
10	2.5832	2583.2	0.80	7.2	
11	2.5840	2584.0	0.80	8.0	
b. intersepto con el eje Y [En excel: INTERSECCIÓN.EJ.E(valores x; valores y)]					
R² [En excel: COEF. DE CORREL. (valores x; valores y)]					
m. CAUDAL [En excel: PENDIENTE/CONOCIDO y. DONOCIDO x]					
CAUDAL:			0.84	lt/min	
CAUDAL:			14	cm³/s	0.84 x 1000/60

Se utilizaron todos los datos tomados en campo para calcular el caudal menos el del minuto 1, por lo que este dato no fue plotado.



Fuente: SAI. Elaboración: Propia

Tabla N° 13 Resultado del coeficiente de permeabilidad “K” del D1-P-1

CALCULO DE K	
<input type="checkbox"/>	Cociente S/Ø < 2 $K = \frac{Q}{\pi \phi H}$
<input type="checkbox"/>	Cociente S/Ø = 2 $K = \frac{Q}{2 \pi \phi H \sqrt{\frac{S}{\phi} + \frac{1}{4}}}$
<input checked="" type="checkbox"/>	Cociente S/Ø > 2 $K = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{2S}{\phi}\right)}{2 \pi H S}$
K (nivel constante) = 1.23E-04 cm/s	

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

- **D1-P2 Carga constante**

Tabla N° 14 Registro y cálculo de S/Ø

Ensayo Realizado		Tipo	
Abajo del nivel freatico N.F	X	Infiltración	X
Arriba del nivel freatico N.F	-	Bombeo	-
Profundidad de Ensayo			
9.50 m	a	11.30 m	
Datos-1			
Zn = Profundidad del agua en el Revestimiento		0.01 m	1 cm
S= Longitud de ensayo		1.80 m	180 cm
H= Sobrecarga Hidraulica= Ha+a-Zn		10.18 m	1018 cm
Datos-2			
a=		0.10 m	
c=		9.50 m	
ha=		10.09 m	
d = ø int. Tubo		7.50 cm	
Ø = ø sondeo		8.80 cm	
Inclinación con horizontal		90 °	
Calucio del Cociente S/Ø			
S/ø =		20.5	

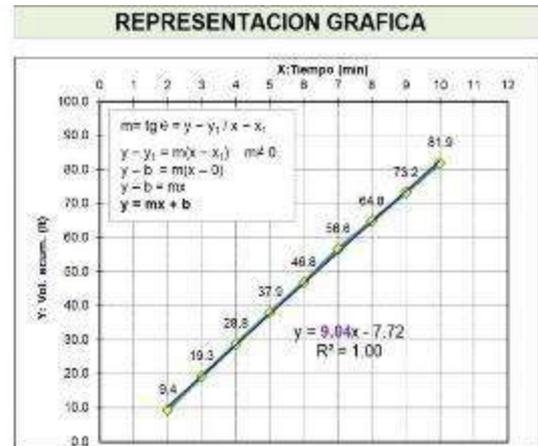
Fuente: SAI

Elaboración: Propia

Tabla N° 15 Datos del medidor de caudal de agua para el D1-P-2, el caudal calculado a partir de la regresión lineal

TIPO DE ENSAYO : CARGA CONSTANTE						
t (min)	Medidor de Vol (m ³)	Medidor de Vol (lt)	Vol. parcial (lt)	Vol. acum (lt)	-	-
x	2.9500	2950.0		y	-	-
1	3.0062	3006.2	56.20		-	-
2	3.0156	3015.6	9.40	9.4	-	-
3	3.0255	3025.5	9.90	19.3	-	-
4	3.0350	3035.0	9.50	28.8	-	-
5	3.0441	3044.1	9.10	37.9	-	-
6	3.0530	3053.0	8.90	46.8	-	-
7	3.0628	3062.8	9.90	56.6	-	-
8	3.0710	3071.0	8.20	64.8	-	-
9	3.0794	3079.4	8.40	73.2	-	-
10	3.0881	3088.1	8.70	81.9	-	-
b. Intersepto con el eje Y (En excel): INTERSECCIÓN EJ (valores x; valores y)						
R ² (En excel): COEF. DE CORREL. (valores x; valores y)						
m. CAUDAL (En excel): PENDIENTE (CONOCIDO y; CONOCIDO x)						
CAUDAL:			9.04	lt/min		
CAUDAL:			151	cm ³ /s	9.04 x 1000/60	

Se utilizaron todos los datos tomados en campo para calcular el caudal menos de minuto 1.



Mide la proximidad de la recta ajustada a los valores observados de eje Y. El Coeficiente de determinación (R²)

- No tiene dimensión y siempre toma valores en [-1, 1]
- Si las variables son independientes, entonces R² = 0, pero el inverso no tiene por qué ser cierto
- Si existe una relación lineal exacta entre X e Y, entonces: R² = 1 (relación directa) o -1 (relación inversa).
- Si R² = 0, esto indica una relación directa entre las variables, (es decir, que al aumentar X, también aumenta Y).
- Si R² = -1, la correlación entre las variables es inversa (si aumentamos una, la otra disminuye).

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

Tabla N° 16 Resultado del coeficiente de permeabilidad “K” del D1-P-2

CALCULO DE K	
<input type="checkbox"/>	Cociente S/Ø < 2 $K = \frac{Q}{\pi \phi H}$
<input type="checkbox"/>	Cociente S/Ø = 2 $K = \frac{Q}{2 \pi \phi H \sqrt{\frac{S}{\phi} + \frac{1}{4}}}$
<input checked="" type="checkbox"/>	Cociente S/Ø > 2 $K = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{2S}{\phi}\right)}{2 \pi H S}$
K (nivel constante) = 4.86E-04 cm/s	

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

- **D1-P3 Carga constante**

Tabla N° 17 Registro y cálculo de S/ϕ

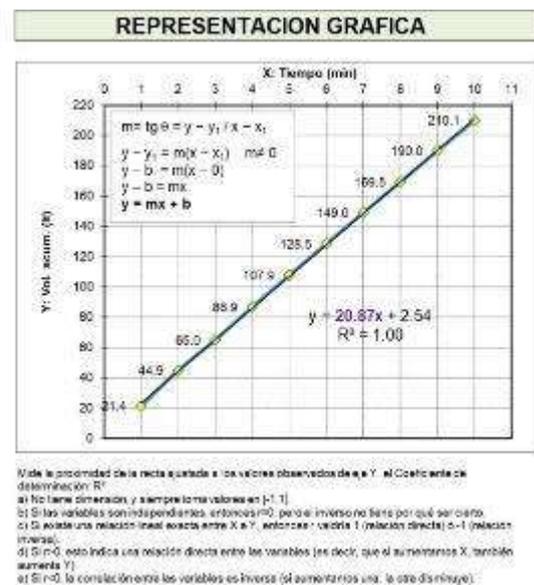
Ensayo Realizado		Tipo	
Abajo del nivel freático N.F	X	Infiltración	X
Arriba del nivel freático N.F	-	Bombeo	-
Profundidad de Ensayo			
23.40 m	a	23.90 m	
Datos-1			
Zn = Profundidad del agua en el Revestimiento	0.01 m	1	cm
S= Longitud de ensayo	0.50 m	50	cm
H= Sobrecarga Hidráulica= Ha+a-Zn	20.06 m	2006	cm
Datos-2			
a=	0.40 m		
c=	23.40 m		
ha=	19.67 m		
d = ø int. Tubo	7.60 cm		
ø = ø sondeo	8.90 cm		
Inclinación con horizontal	90°		
Cálculo del Cociente S/ø			
S/ø =	5,6		

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

Tabla N° 18 Datos del medidor de caudal de agua para el D1-P-3, el caudal calculado a partir de la regresión lineal

TIPO DE ENSAYO : CARGA CONSTANTE				
t (min)	Medidor de Vol (m ³)	Medidor de Vol (lit)	Vol. parcial (lit)	Vol. acum (lit)
x	5.0780		5078.0	
y	21.4		21.4	
1	5.0994	5099.4	21.4	21.4
2	5.1229	5122.9	23.50	44.9
3	5.1430	5143.0	20.10	65.0
4	5.1649	5164.9	21.90	86.9
5	5.1859	5185.9	21.00	107.9
6	5.2065	5206.5	20.60	128.5
7	5.2270	5227.0	20.50	149.0
8	5.2475	5247.5	20.50	169.5
9	5.2680	5268.0	20.50	190.0
10	5.2881	5288.1	20.10	210.1
b. Intersección con el eje Y (En excel): INTERSECCIÓN EJE (valores x, valores y)				
R ² (En excel): COEF. DE CORREL. (valores x, valores y)				
m: CAUDAL (En excel): PENDIENTE (CONOCIDO y, CONOCIDO x)				
CAUDAL: 20.87 l/min				
CAUDAL: 348 cm ³ /s 20.87 x 1000/60				



Fuente: SAI

Elaboración: Propia

Tabla N° 19 Resultado del coeficiente de permeabilidad “K” del D1-P-3

CALCULO DE K	
<input type="checkbox"/>	Cociente S/Ø < 2 $K = \frac{Q}{\pi \phi H}$
<input type="checkbox"/>	Cociente S/Ø = 2 $K = \frac{Q}{2 \pi \phi H \sqrt{\frac{S}{\phi} + \frac{1}{4}}}$
<input checked="" type="checkbox"/>	Cociente S/Ø > 2 $K = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{2S}{\phi}\right)}{2 \pi H S}$
K (nivel constante) = 1.34E-03 cm/s	

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

- D1-P4 Carga constante**

Tabla N° 20 Registro y cálculo de S/Ø

Ensayo Realizado		Tipo	
Abajo del nivel freatico N.F	X	Infiltración	X
Arriba del nivel freatico N.F	-	Bombeo	-
Profundidad de Ensayo			
18.70 m	a	19.70 m	
Datos-1			
Zn = Profundidad del agua en el Revestimiento	0.01 m	1 cm	
S= Longitud de ensayo	1.00 m	100 cm	
H= Sobrecarga Hidraulica= Ha+a-Zn	14.88 m	1488 cm	
Datos-2			
a=	0.74 m		
c=	18.70 m		
ha=	14.15 m		
d = ø int. Tubo	7.60 cm		
Ø = ø sondeo	8.90 cm		
Inclinación con horizontal	90 °		
Calculo del Cociente S/Ø			
S/ø =	11.2		

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

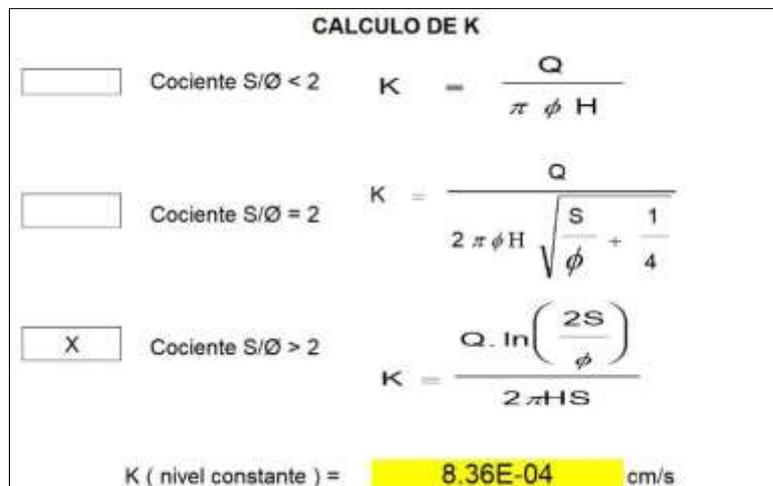
Tabla N° 21 Datos del medidor de caudal de agua para el D1-P-4, el caudal calculado a partir de la regresión lineal



Fuente: SAI

Elaboración: Propia

Tabla N° 22 Resultado del coeficiente de permeabilidad “K” del D1-P-4



Fuente: SAI

Elaboración propia

• **D1-P5 Carga constante**

Tabla N° 23 Registro y cálculo de S/ϕ

Ensayo Realizado		Tipo	
Abajo del nivel freático N.F	X	Infiltración	X
Arriba del nivel freático N.F	-	Bombeo	-
Profundidad de Ensayo			
19.55 m	a	21.15 m	
Datos-1			
Zn = Profundidad del agua en el Revestimiento	0.04 m	4	cm
S= Longitud de ensayo	1.60 m	160	cm
H= Sobrecarga Hidráulica= Ha+a-Zn	12.15 m	1215	cm
Datos-2			
a=	0.55 m		
c=	19.55 m		
ha=	11.64 m		
d = ø int. Tubo	7.60 cm		
ø = ø sondeo	8.90 cm		
Inclinación con horizontal	90°		
Cálculo del Cociente S/ø			
S/ø =	18.0		

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

Tabla N° 24 Datos del medidor de caudal de agua para el D1-P-5, el caudal calculado a partir de la regresión lineal

TIPO DE ENSAYO : CARGA CONSTANTE					
t (min)	Medidor de Vol (m3)	Medidor de Vol (lt)	Vol. parcial (lt)	Vol. acum (lt)	
x				y	
1	9.4616	9461.6	11.6	11.6	
2	9.4754	9475.4	13.80	25.4	
3	9.4883	9488.3	12.90	38.3	
4	9.5014	9501.4	13.10	51.4	
5	9.5148	9514.8	13.20	64.6	
6	9.5282	9528.2	13.60	78.2	
7	9.5439	9543.9	15.70	93.9	
8	9.5576	9557.6	13.70	107.6	
9	9.5726	9572.6	15.00	122.6	
10	9.5856	9585.6	13.00	135.6	
11	9.6013	9601.3	15.70	151.3	
12	9.6164	9616.4	15.10	166.4	
b. intersepto con el eje Y (En excel: INTERSECCIÓN.EJE(valores x; valores y))					
R^2 (En excel: COEF.DE.CORREL(valores x; valores y))					
m CAUDAL (En excel: PENDIENTE(CONOCIDO_y; CONOCIDO_x))					
CAUDAL:		14.05	lt/min		
CAUDAL:		234	cm ³ /s	14.05 x 1000/60	

Se utilizaron todos los datos tomados en campo para calcular el caudal.

Fuente: SAI. Elaboración: Propia



Tabla N° 25 Resultado del coeficiente de permeabilidad “K” del D1-P-5

CALCULO DE K	
<input type="checkbox"/>	Cociente S/Ø < 2 $K = \frac{Q}{\pi \phi H}$
<input type="checkbox"/>	Cociente S/Ø = 2 $K = \frac{Q}{2 \pi \phi H \sqrt{\frac{S}{\phi} + \frac{1}{4}}}$
<input checked="" type="checkbox"/>	Cociente S/Ø > 2 $K = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{2S}{\phi}\right)}{2 \pi H S}$
K (nivel constante) = 6.87E-04 cm/s	

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

3.4.2. Zona inestable N°2

- **D2-P1 Carga variable**

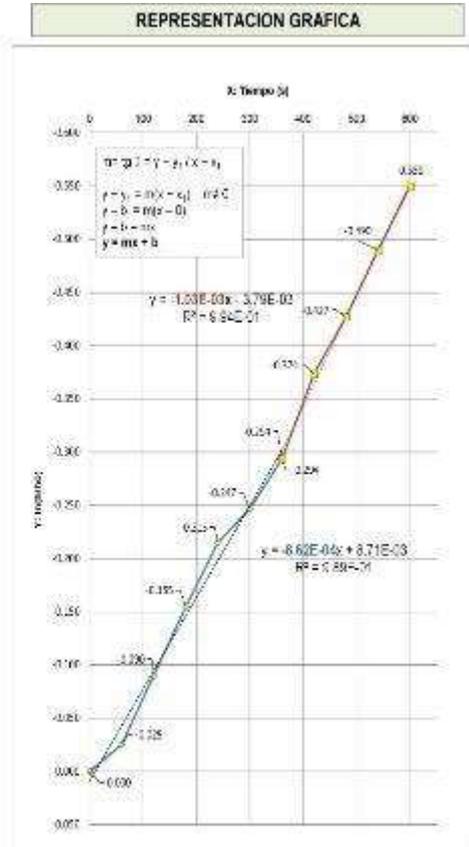
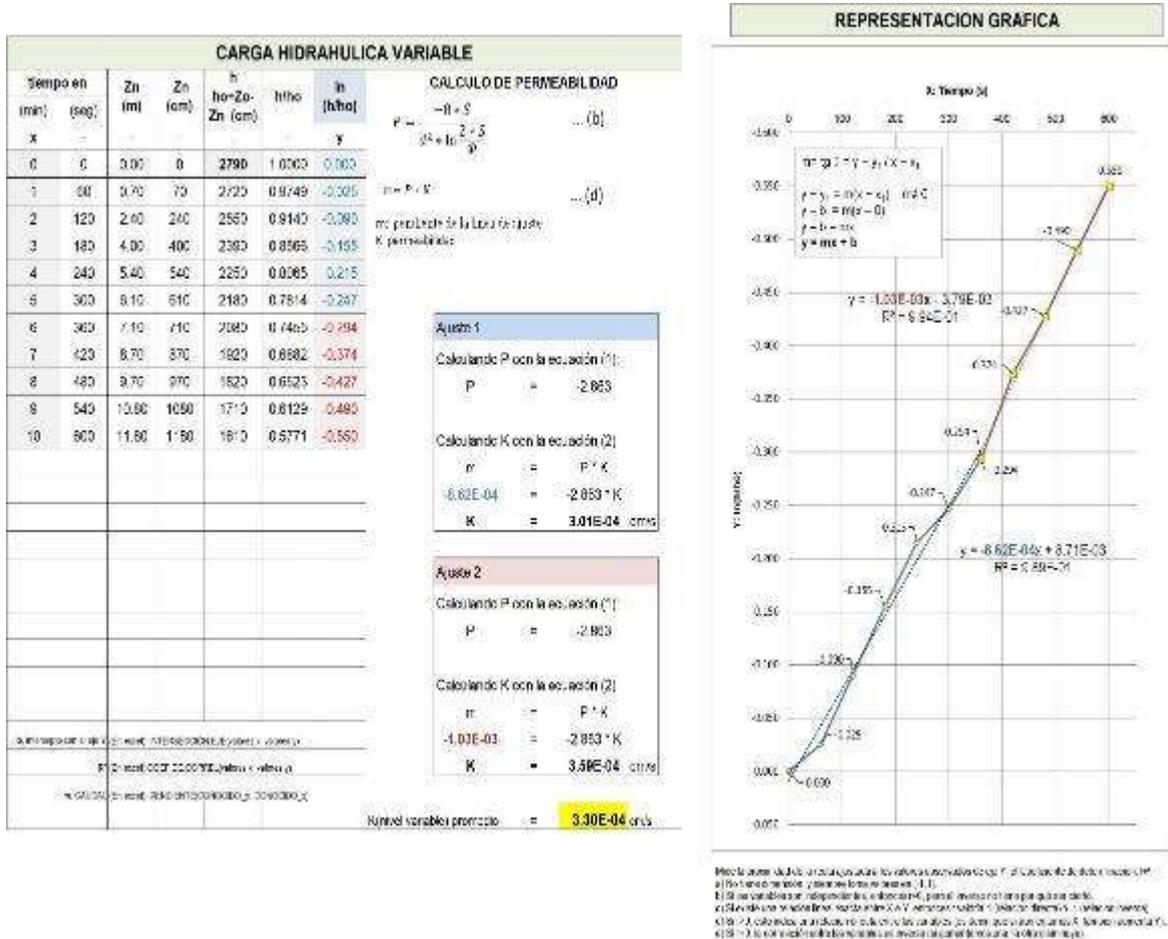
Tabla N° 26 Registro y cálculo de h_0 y h

Ensayo Realizado	Tipo	
Abajo del nivel freatico N.F	-	Infiltración
Arriba del nivel freatico N.F	X	Bombeo
DATOS		
a : Altura de tubería saliente	0.15 m	
c : Long. de tubería en el interior del taladro	27.50 m	
Zo : Profundidad inicial del ensayo	0.01 m	
S : Tramo de ensayo	0.50 m	
ha : Profundidad nivel freatico	5.00 m	
d : Diametro interior del tubo de perforacion	7.60 cm	
ø : Diametro del sondeo	8.90 cm	
β : Inclinacion con la horizontal	90 °	
h ₀ : Sobrecarga hidraulica, en el tiempo = 0 "h=h ₀ "	27.89 m	
h _n =h _a + a - Z _n , para prueba abajo del NF	-	
h _n =0.5 * S + c + a- Z _n , Para prueba arriba del NF	-	
H = Sen β x h _n	-	
Z _n : lectura de la sonda de nivel de agua en el taladro	0.01 m	
Cociente S/Ø =	5.62	

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

Tabla N° 27 Datos registrados con el medidor de agua de la variación del nivel de agua para el D2-P-1, cálculo de la permeabilidad utilizando la expresión “b)” y cálculo del coeficiente de permeabilidad “K” utilizando la expresión “d)” ambas deducidas de la ecuación N°7; y grafico de la pendiente “m” para realizar los ajustes lineales en base al tiempo “t” en segundos y “ln (h/h₀)”.



Intente hacer el ajuste de la ecuación de la ley de Darcy para encontrar el coeficiente de permeabilidad (K) y el coeficiente de permeabilidad (P) de la muestra de suelo. El resultado del ajuste de la ecuación de la ley de Darcy para encontrar el coeficiente de permeabilidad (K) y el coeficiente de permeabilidad (P) de la muestra de suelo es el siguiente:

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

• **D2-P2 Carga constante**

Tabla N° 28 Registro y cálculo de S/ϕ

Ensayo Realizado		Tipo	
Abajo del nivel freático N.F	X	Infiltración	X
Arriba del nivel freático N.F	-	Bombeo	-
Profundidad de Ensayo			
43.45 m	a	43.95 m	
Datos-1			
Zn = Profundidad del agua en el Revestimiento	0.01 m	1 cm	
S= Longitud de ensayo	0.50 m	50 cm	
H= Sobrecarga Hidráulica= Ha+a-Zn	24.47 m	2447 cm	
Datos-2			
a=	0.55 m		
c=	43.45 m		
ha=	23.93 m		
d = ø int. Tubo	5.80 cm		
ø = ø sondeo	6.90 cm		
Inclinación con horizontal	90°		
Cálculo del Cociente S/ø			
S/ø =	7.2		

Fuente: SAI. Elaboración: Propia

Tabla N° 29 Datos del medidor de caudal de agua para el D2-P-2, el caudal calculado a partir de la regresión lineal.

TIPO DE ENSAYO : CARGA CONSTANTE					
t (min)	Medidor de Vol (m ³)	Medidor de Vol (lt)	Vol. parcial (lt)	Vol. acum (lt)	
x			y		
1	145.9120	145912.0	2.5	2.5	
2	145.9145	145914.5	2.50	5.0	
3	145.9170	145917.0	2.70	7.7	
4	145.9197	145919.7	2.7	10.4	
5	145.9224	145922.4	2.6	13.0	
6	145.9250	145925.0	2.6	15.6	
7	145.9276	145927.6	2.9	18.5	
8	145.9305	145930.5	2.9	21.4	
9	145.9334	145933.4	2.7	24.1	
10	145.9361	145936.1	2.9	27.0	
11	145.9390	145939.0	2.9	29.9	
12	145.9419	145941.9	2.8	32.7	
12	145.9447	145944.7			
b. intersección con el eje Y			[En excel: INTERSECCIÓN EJE(valores x; valores y)]		
R ²			[En excel: COEF. DE CORREL(valores x; valores y)]		
m: CAUDAL			[En excel: PENDIENTE(CONOCIDO y, CONOCIDO x)]		
CAUDAL:	2.76	lt/min			
CAUDAL:	46	cm ³ /s	2.76 x 1000/60		

Se utilizaron todos los datos tomados en campo para calcular el caudal.

Fuente: SAI. Elaboración propia

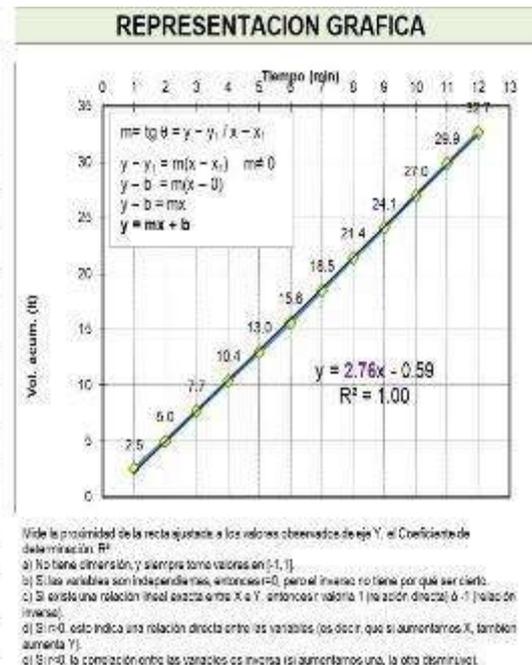


Tabla N° 30 Resultado del coeficiente de permeabilidad “K” del D2-P-2

CALCULO DE K	
<input type="checkbox"/>	Cociente $S/\phi < 2$ $K = \frac{Q}{\pi \phi H}$
<input type="checkbox"/>	Cociente $S/\phi = 2$ $K = \frac{Q}{2 \pi \phi H \sqrt{\frac{S}{\phi} + \frac{1}{4}}}$
<input checked="" type="checkbox"/>	Cociente $S/\phi > 2$ $K = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{2S}{\phi}\right)}{2 \pi H S}$
K (nivel constante) = 1.60E-04 cm/s	

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

- D2-P3 Carga constante**

Tabla N° 31 Registro y cálculo de S/ϕ

Ensayo Realizado		Tipo	
Abajo del nivel freatico N.F.	X	Infiltración	X
Arriba del nivel freatico N.F.	-	Bombeo	-
Profundidad de Ensayo			
39.50 m	a	40.00 m	
Datos-1			
Zn = Profundidad del agua en el Revestimiento	0.01 m		1 cm
S= Longitud de ensayo	0.50 m		50 cm
H= Sobrecarga Hidraulica= Ha+a-Zn	18.85 m		1885 cm
Datos-2			
a=	0.50 m		
c=	39.50 m		
ha=	18.36 m		
d = ø int. Tu	7.60 cm		
ø = ø sonda	8.90 cm		
incinacion con horizontal	90 °		
Calucio del Cociente S/ø			
S/ø =	5.6		

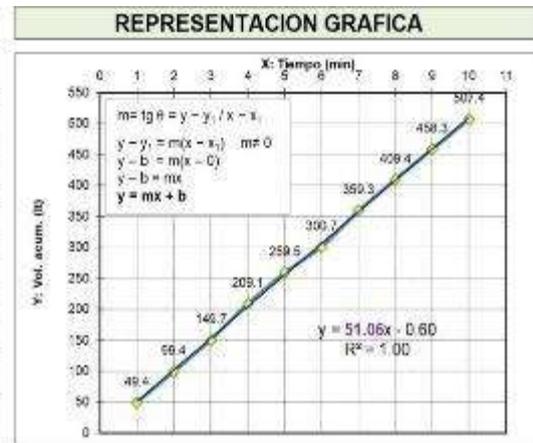
Fuente: SAI

Elaboración: propia

Tabla N° 32 Datos del medidor de caudal de agua para el D2-P-3, el caudal calculado a partir de la regresión lineal.

TIPO DE ENSAYO : CARGA CONSTANTE					
t (min)	Medidor de Vol (m3)	Medidor de Vol (lit)	Vol. parcial (lit)	Vol. acum (lit)	
	10.1799	10179.9			
1	10.2293	10229.3	49.4	49.4	
2	10.2793	10279.3	50.00	99.4	
3	10.3296	10329.6	50.30	149.7	
4	10.3690	10369.0	59.40	209.1	
5	10.4394	10439.4	50.40	259.5	
6	10.4806	10480.6	41.20	300.7	
7	10.5392	10539.2	58.60	359.3	
8	10.5893	10589.3	50.10	409.4	
9	10.6382	10638.2	48.90	458.3	
10	10.6873	10687.3	49.10	507.4	
b. Intersepto con el eje Y (En eje Y: INTERSECCIÓN EJE (valores x: valores y))					
R² (En eje X: COEF. DE CORREL. (valores x: valores y))					
m: CAUDAL (En eje X: PENDIENTE/CONOCIDO_x, CONOCIDO_y)					
CAUDAL:			51.06	lit/min	
CAUDAL:			851	cm³/s	51.06 x 1000/60

Se utilizaron todos los datos tomados en campo para calcular el caudal.



Véase la proximidad de la recta ajustada a los valores observados de eje Y, el Coeficiente de determinación R²

- No tiene dimensión, y siempre toma valores en [-1, 1].
- Si las variables son independientes, entonces R=0, pero el inverso no tiene por qué ser cierto.
- Si existe una relación lineal exacta entre X e Y, entonces R=1 (relación directa) ó -1 (relación inversa).
- Si R=0, esto indica una relación directa entre las variables (es decir, que si aumentamos X, también aumenta Y).
- Si R=0, la correlación entre las variables es inversa (si aumentamos una, la otra disminuye).

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

Tabla N° 33 Resultado del coeficiente de permeabilidad “K” del D2-P-3

CALCULO DE K	
<input type="checkbox"/>	Cociente S/Ø < 2 $K = \frac{Q}{\pi \phi H}$
<input type="checkbox"/>	Cociente S/Ø = 2 $K = \frac{Q}{2\pi\phi H \sqrt{\frac{S}{\phi} + \frac{1}{4}}}$
<input checked="" type="checkbox"/>	Cociente S/Ø > 2 $K = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{2S}{\phi}\right)}{2\pi HS}$
K (nivel constante) = 3.48E-03 cm/s	

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

- **D2-P4 Carga variable**

Tabla N° 34 Registro y cálculo de h_o y h

Ensayo Realizado		Tipo	
Abajo del nivel freatico N.F	X	Infiltración	X
Arriba del nivel freatico N.F	-	Bombeo	-
DATOS			
a : Altura de tubería saliente	0.60 m		
c : Long. de tubería en el interior del taladro	39.50 m		
Zo : Profundidad inicial del ensayo	0.00 m		
S : Tramo de ensayo	0.50 m		
ha : Profundidad nivel freatico	20.44 m		
d : Diametro interior del tubo de perforacion	7.60 cm		
Ø : Diametro del sondeo	8.90 cm		
β : Inclinacion con la horizontal	90 °		
ho : Sobrecarga hidraulica, en el tiempo = 0 "h=ho"	21.04 m		
hn=ha + a - Zn, para prueba abajo del NF	-		
hn=0.5 * S + c + a - Zn, Para prueba arriba del NF	-		
H = Sen β x hn	-		
Zn : lectura de la sonda de nivel de agua en el taladro	0.00 m		
Cociente S/Ø =	5.62		

Fuente: SAI. Elaboración: Propia

Tabla N° 35 Datos registrados de la variación del nivel de agua para el D2-P-4 con el medidor de agua, cálculo de la permeabilidad utilizando la expresión “b”) y cálculo del coeficiente de permeabilidad “K” utilizando la expresión “d”) ambas deducidas de la ecuación N° 7; y grafico de la pendiente “m” para realizar los ajustes lineales en base al tiempo “t” en segundos y $\ln(h/h_o)$ ”.

CARGA HIDRAULICA VARIABLE						
tiempo en (min)	(seg)	Zn (m)	Zn (cm)	ha+Zo-Zn (cm)	hiho	ln(h/ho)
0	0	0.000	0.0	21.04	1.0000	0.0000
1	60	0.050	5.0	20.99	0.9960	-0.0038
2	120	0.100	10.0	20.94	0.9920	-0.0075
3	180	0.150	15.0	20.89	0.9880	-0.0112
4	240	0.200	20.0	20.84	0.9840	-0.0149
5	300	0.250	25.0	20.79	0.9800	-0.0186
6	360	0.300	30.0	20.74	0.9760	-0.0223
7	420	0.350	35.0	20.69	0.9720	-0.0260
8	480	0.400	40.0	20.64	0.9680	-0.0297
9	540	0.450	45.0	20.59	0.9640	-0.0334
10	600	0.500	50.0	20.54	0.9600	-0.0371

Ajuste 1

Calculando P con la ecuación (1):

$$P = \frac{-B + S}{d^2 + \frac{2 \cdot c \cdot S}{d}}$$

... (b)

Calculando K con la ecuación (2):

$$K = \frac{P \cdot h}{L}$$

... (d)

Ajuste 2

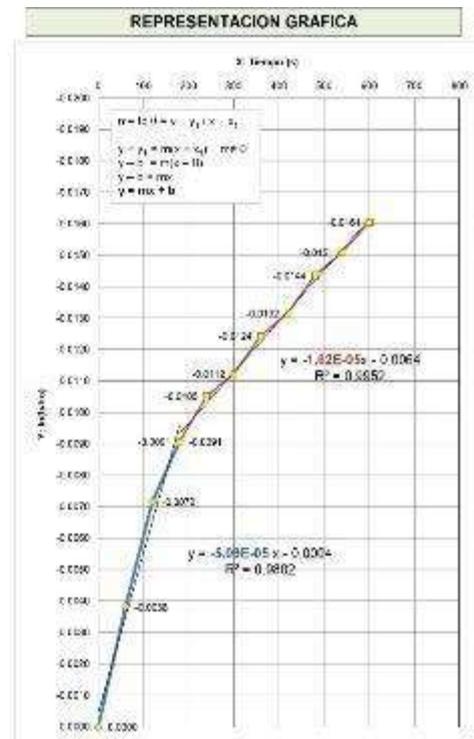
Calculando P con la ecuación (1):

$$P = \frac{-B + S}{d^2 + \frac{2 \cdot c \cdot S}{d}}$$

Calculando K con la ecuación (2):

$$K = \frac{P \cdot h}{L}$$

K (coeficiente de permeabilidad) = **1.17E-05**



Fuente: SAI. Elaboración: Propia

3.5. Instalación de tubería piezométrica e inclinométrica

Terminada la perforación y con toda la tubería de acero NQ, PQ o HQ colocada hasta fondo del pozo según corresponda los diámetros mínimos para inclinómetro o piezómetro, se procede a la instalación de la tubería. Ver Tabla N° 36.

Tabla N° 36 *Resumen de Instalaciones de tubería*

Zona Inestable N°	Tipo de Instrumento	Punto	Metrado Estimado Perforación (m)	Profundidad Final (m)	Tipo de Tubería	Diámetro ext.
1	Piezometro VW	D1-P-01	20.00	20.00	PVC SCH.40 SOLID WALL PIPE ASTM D1784, ASTM D1785, ASTM D2665 FHA UM 79a (roscadas de acuerdo a la norma ASTM F480 y ranuradas a Slot 40 (1.00mm), color blanco.	Ø2" x 3.0m y 2.0m; ciegas y ranuradas Min. Ø:50.8mm
	Inclinometro Vertical	D1-P-02	20.00	27.10	Modelo 6400 Glue-Snap ABS	70 mm (2.75 ")
	Inclinometro Vertical	D1-P-03	20.00	41.60		
	Inclinometro Vertical	D1-P-04	30.00	23.30		
	Inclinometro Vertical	D1-P-05	40.00	23.00		
2	Inclinometro Vertical	D2-P-01	35.00	49.00	Modelo 6400 Glue-Snap ABS	70 mm (2.75 ")
	Inclinometro Vertical	D2-P-02	35.00	55.00		
	Piezometro VW	D2-P-03	40.00	40.00	PVC SCH.40 SOLID WALL PIPE ASTM D1784, ASTM D1785, ASTM D2665 FHA UM 79a (roscadas de acuerdo a la norma ASTM F480 y ranuradas a Slot 40 (1.00mm), color blanco.	Ø2" x 3.0m y 2.0m; ciegas y ranuradas Min. Ø:50.8mm
	Piezometro VW		D2-P-04	40.00		
VW: CUERDA VIBRANTE						
Si fuese el caso, para perforaciones que superen los 40m, se utiliza :			PVC SCH.80 PIPE ASTM D1784, ASTM D1785, PVC 1120 NSF STANDARD NO.14AND61, color gris.			

Fuente: SAI.

Elaboración: Propia

- Instalación tubería piezométrica de cuerda vibrante: Se coloca una cama de arena gruesa (gravosa más grava fina) de un espesor mayor o igual a 50cm en el pozo perforado, y antes de introducir la tubería piezométrica para cuerda vibrante ranurada ciega se envuelve con geotextil, se sujeta con nylon y cinta en la parte superior e inferior en un tramo de 1.0 m longitud, parte ranurada por donde se filtra agua hacia al interior del tubo formando una columna de agua mH₂O generada por la presión de poros del nivel freático, presión igual a cero. Seguido se enrosca su tapón de fondo, se asegura la unión con cinta quedando listo el primer tramo para su instalación. Ver Figura N° 39.



Figura N° 40 Tubería ranurada con geotextil y tapa de fondo

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

Se verifica que el casing de acero y la línea de perforación este sujetado correctamente con la abrazadera hidráulica, se baja la tubería piezométrica acoplada (en las uniones de rosca se coloca una cinta para proteger y asegurar la unión) cuidando que no escape hacia el fondo de la perforación para ello desde estar sujeta por un operador y de cuerdas tensadas y abrazadera manual (el mismo proceso para tubería inclinométrica). Ver Figura N° 41 y 42.

Luego se rellena entre la línea de perforación casing de acero y tubería piezométrica con arena pasante N° 20 y retenido en el N° 40 hasta alcanzar cerca de los 2 m medidos desde la cama de arena gruesa. Posteriormente se debe sellar la perforación mediante una capa o tapón de pells o bentonita granulada y humedecida de por lo menos 1m de altura. Ver Figura N° 42. Y todo el tramo restante hasta el nivel de superficie deberá llenarse con una lechada de cemento 1:3 y por etapas. Se continua progresivamente retirando la línea de perforación en su totalidad. Ver Figuras N° 43 y Anexos J. a), y M.

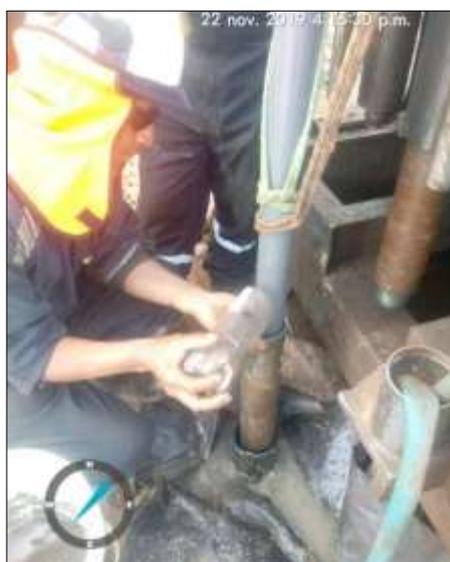


Figura N° 41 Sujeción y vertido de arena N°20-40

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo



Figura N° 42 Vertido de bentonita granulada

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo



a)



b)



c)



d)

Figura N° 43 a), b) y c) Vaciado de lechada por etapas hasta el nivel de superficie d) Verificación vertical de la tubería mientras fragua la lechada

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

- Instalación de tubería inclinométrica: Se debe tener cuidado de exponerlo a superficies inadecuadas a sobrepesos y temperaturas elevadas durante el día por mucho tiempo debido a que deforma la tubería. Antes de introducir la tubería se alinea la muesca de la tapa con la ranura de la tubería, se engancha completamente la muesca y la llave, se escuchará un "chasquido" de engroche cuando el anillo de bloqueo esté asentado y asegurar visualmente el montaje correcto sellando la junta con cinta adhesiva de dos pulgadas. Ver Figuras N° 44 y 45.



Figura N° 44 a), b) y c) Colocación de tapa de fondo de tubería inclinométrica

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

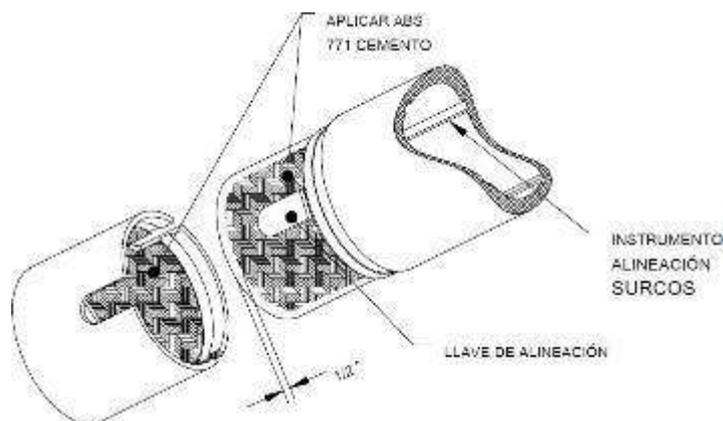


Figura N° 45 Acople de tapa de fondo

Fuente: GEOKON. Manual de Instrucciones Modelo 6400. (E,5/06/2018)

Verificada la abrazadera Hidráulica para la línea de perforación se coloca la abrazadera especial manual para sujeción de la tubería inclinométrica, asegura que la misma no escape y caiga al fondo de la perforación y presente giro durante la instalación. Ver Figura N° 46. Se continúa con el ensamble de cada tramo de tubería alineando (la tubería viene con línea segmentada negra en el exterior para no perder la referencia) e instalando el extremo hembra (female end) hacia arriba. Tener en cuenta que los extremos hembra de la tubería tienen tres ranuras (relief cuts). Estos son cortes de alivio de tensión, que facilitan la inserción del extremo macho (male end) de la sección de la tubería posterior. Se escuchará un chasquido de engroche del botón, se verifica el buen acople y se encinta para proteger la junta y evitar también que la lechada de cemento ingrese al interior; no se usa pegamento para evitar que filtre hacia el interior de la tubería, lo que potencialmente puede bloquear las ranuras biaxiales. Ver Figuras N° 47 al 49.



Figura N° 46 Introducción de tubería inclinométrica

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

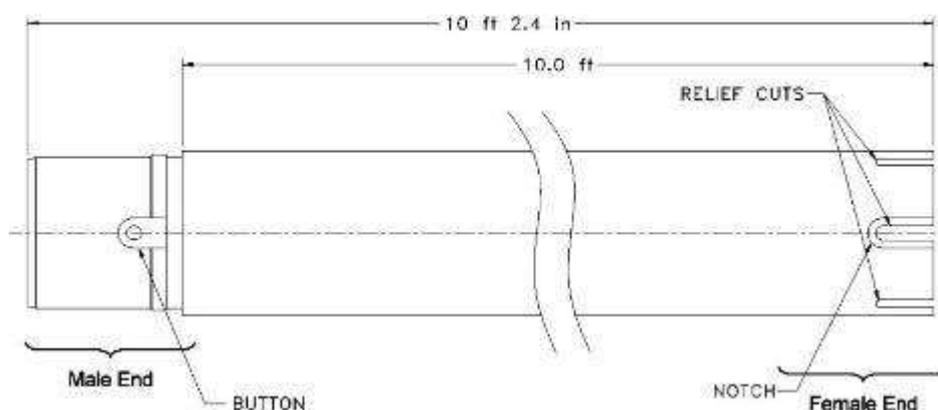


Figura N° 47 Tubería inclinométrica alineada

Fuente: GEOKON. Manual de Instrucciones Modelo 6400. (E,5/06/2018)

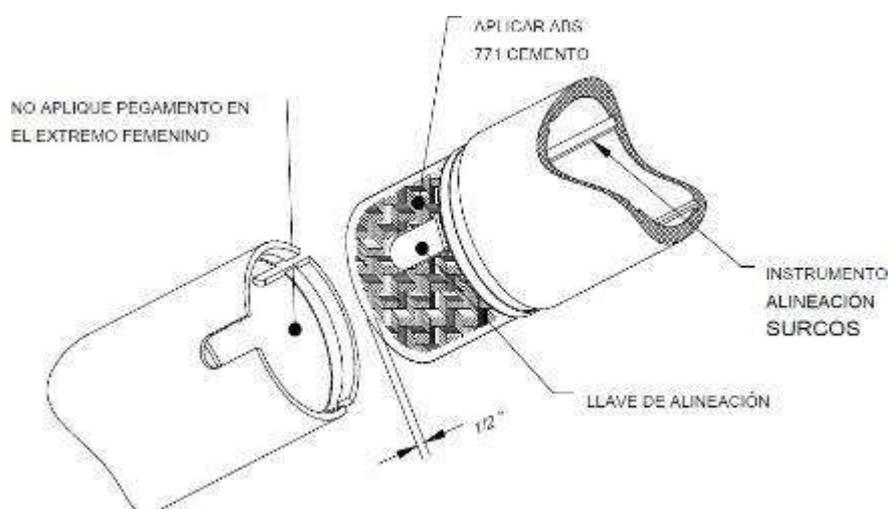


Figura N° 48 Acople entre segmentos de tubería inclinométrica

Fuente: GEOKON. Manual de Instrucciones Modelo 6400. (E,5/06/2018)

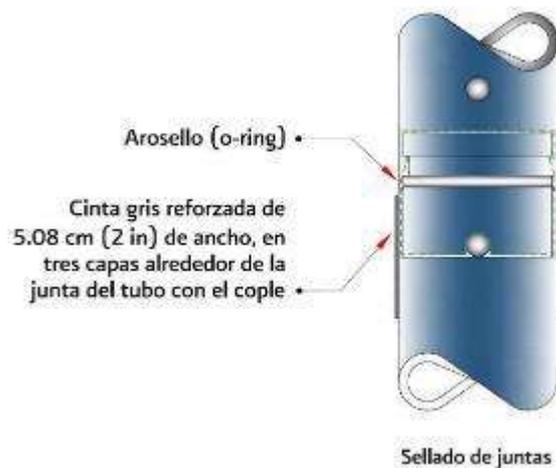


Figura N° 49 Junta de acople asegurada

Fuente: CONAGUA. (2012)

Una vez introducida la tubería hacia el fondo de la perforación se orienta un par de sus ranuras hacia la dirección del desplazamiento que sigue la zona inestable, se asegura sin forzar en ningún momento la alineación de la dirección, la misma debe mantenerse durante toda la instalación, y evitar introducir torsión en la tubería inclinométrica, que pueda provocar formación de espirales de las ranuras. No debe empujarse la tubería desde la parte superior ni girarla durante la instalación. Ver Figura N° 50. Luego se inyecta por el espacio de casing de acero y la pared del sondeo con la tubería inclinométrica introducida en el pozo (conforme vayan fraguando las etapas se va retirando la línea de perforación casing de acero), la lechada de cemento desde el fondo hasta lograr los 3m, que es la zona anclada al suelo firme o roca, se continua con la lechada hasta llegar a la superficie con proporción en peso de cemento - agua y bentonita 1:2.5:0.3 y evaluando las condiciones de campo (el cemento dará estabilidad dimensional). Ver Figura N° 51. Este procedimiento se debe hacer por etapas, permitiendo que fragüe (un buen fraguado evita la separación de los sólidos y el agua, por lo que debe estar libre de grumos y en la relación correcta. La lechada también debe tener la viscosidad adecuada, lo que permitirá que se bombee fácilmente) por etapas entre capa y capa; para evitar que la tubería casing de acero colapse y la tubería inclinométrica presente flotabilidad, si se presentará lo segundo el fabricante GEOKON. Manual de Instrucciones Modelo 6400. (E,5/06/2018). Recomienda tener en cuenta que, en muchos casos, es una práctica estándar colocar un peso en la parte superior de la tubería para contrarrestar los efectos de flotabilidad de la tubería inclinométrica. En situaciones en las que la tubería de revestimiento se inserta en un pozo recién inyectado, estas fuerzas de flotabilidad pueden ser significativamente grandes. Geokon advierte contra el uso de un peso demasiado grande, ya que puede fallar la junta en la tapa inferior o en otra parte de la tubería inclinométrica, por ello es fundamental realizar por etapas la colocación de la lechada. Durante el proceso y al final de la colocación de la lechada de cemento más bentonita, siempre se tiene cuidado que la tubería inclinométrica este lo más centrada posible dentro del pozo perforado. Ver Anexos J.b), K, L y Figura N° 51. Se verifica la verticalidad mientras continua el fraguado, así como la orientación de un par de ranuras en el sentido del desplazamiento definido en campo al inicio de la instalación. Ver Figuras N° 50 al 53.



Figura N° 50 Ranuras orientadas y tubería centrada

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo, GEOKON. Manual de Instrucciones Modelo 6400. (E,5/06/2018)



Figura N° 51 Dosificación de cemento más bentonita mezclado en el agitador

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo



Figura N° 52 Se debe verificar siempre que la tubería inclinométrica se encuentre centrada y con la lechada cemento-agua bentonita hasta el nivel de superficie.

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo



Figura N° 53 Verifica verticalidad y orientación al termino de inyección y construcción de caja de protección.

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

3.6. Puesta en marcha

3.6.1. Inclínómetro vertical

Terminada la instalación de tubería y caja de protección. La periodicidad con la que se midieron y recolectaron datos de los inclinómetros de la zona inestable N° 1 y 2 fueron a los cero días (Línea base), a los 15 y 30 días aproximadamente.

Proceso de medición: Se utilizaron los equipos DGSI (Durham Geo Slope Indicator) y plataforma Digitilt AT del Software Digipro2 donde se registran (extensión. dux: Dux es la abreviación de “DigiPro Uniform Exchange”. Ver Figura N° 54) y visualizan las mediciones y gráficos de desplazamiento acumulados. Antes de introducir la sonda (cuenta con certificado. Ver Anexo E) se ingresa su orientación de la tubería (azimut calculado con topografía de las ranuras alineadas en dirección del deslizamiento de las zonas inestables), coordenadas topográficas de referencia, la constante de instrumento en sistema métrico de la plataforma Digitilt AT igual a 100000, el intervalo de medición cada 50 cm y profundidad total del pozo instalado. Se espera unos 10 minutos aproximadamente para que se estabilice la temperatura y las lecturas sean consistentes. Se orienta hacia el A+ con su componente +B que está grabada en la sonda y se ingresa lentamente hacia el interior por las ranuras marcadas que definen la orientación del desplazamiento, se coloca la guía donde descansará el cable cada 50 cm y esperando que los acelerómetros de la sonda y cable de control se estabilice, aparecerá un mensaje en el lector portátil iPad con los mensajes “WAIT” espera y luego “PULL” graba y halar, continuando con este proceso hacia el fondo del pozo; de regreso es igual cada 50 cm “WAIINT” y “PULL” ahora hacia su retorno a la salida de la tubería.



Figura N° 54 Software Digipro2

Fuente: DGSI (2020)

A la salida de la sonda luego de haber registrado las medidas en el eje A, se gira 180° para tomar las medidas A- y su componente B- repitiendo los pasos anteriormente mencionados en su recorrido por las mismas ranuras hacia el fondo del pozo. Todo el proceso de A+, B+ y A- y B- se repite para tener dos grupos de lecturas del cual el programa promedia para una mayor precisión y obtener resultante final en el eje A y B. Ver Figuras N° 55 al 59.



Figura N° 55 Equipos utilizados para la medición de la puesta en marcha

Fuente: DGSI. (2020)



Figura N° 56 Ingreso del sensor en el A+

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo



Figura N° 57 Ingreso del sensor en el A-

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

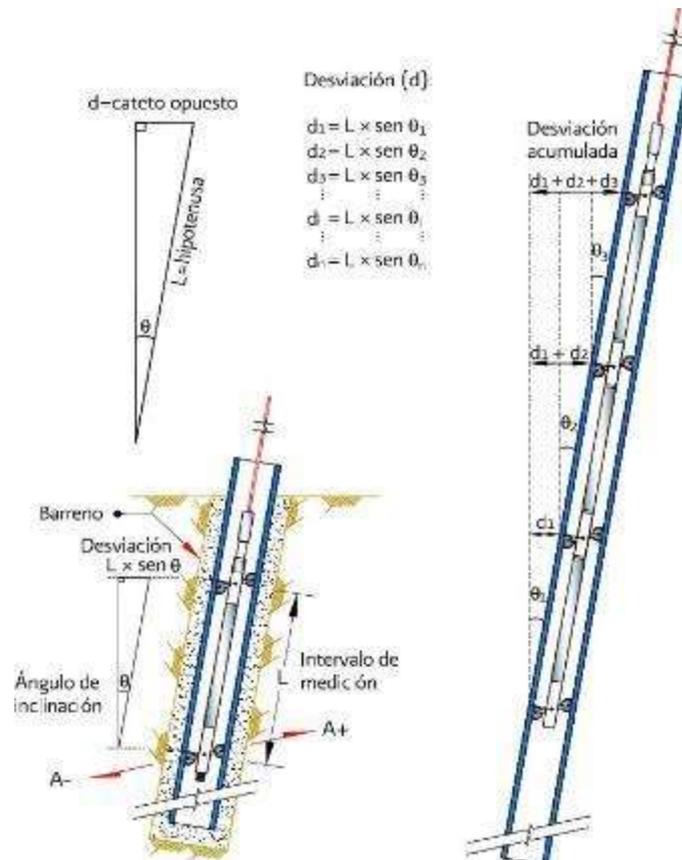


Figura N° 58 A y B en sus unidades clásicas de “sen θ ”

Fuente: CONAGUA. (2012)

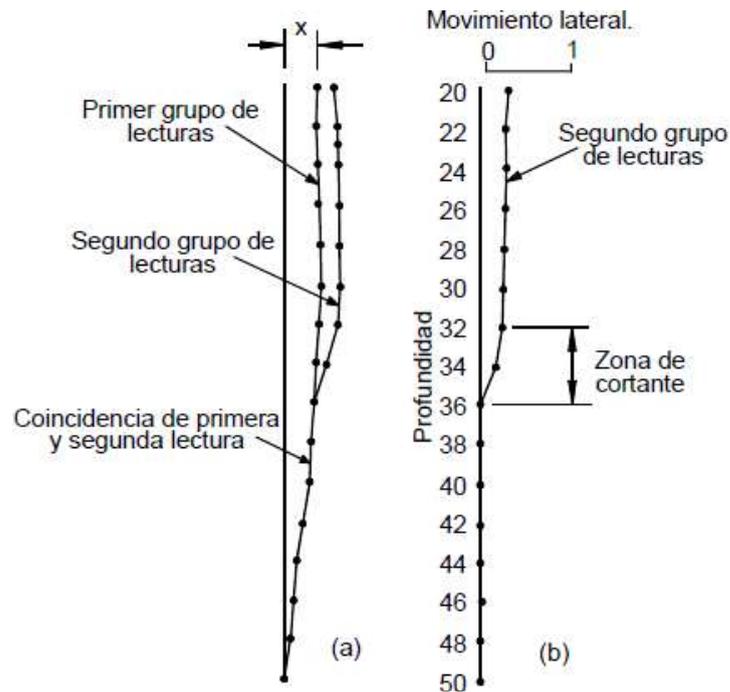


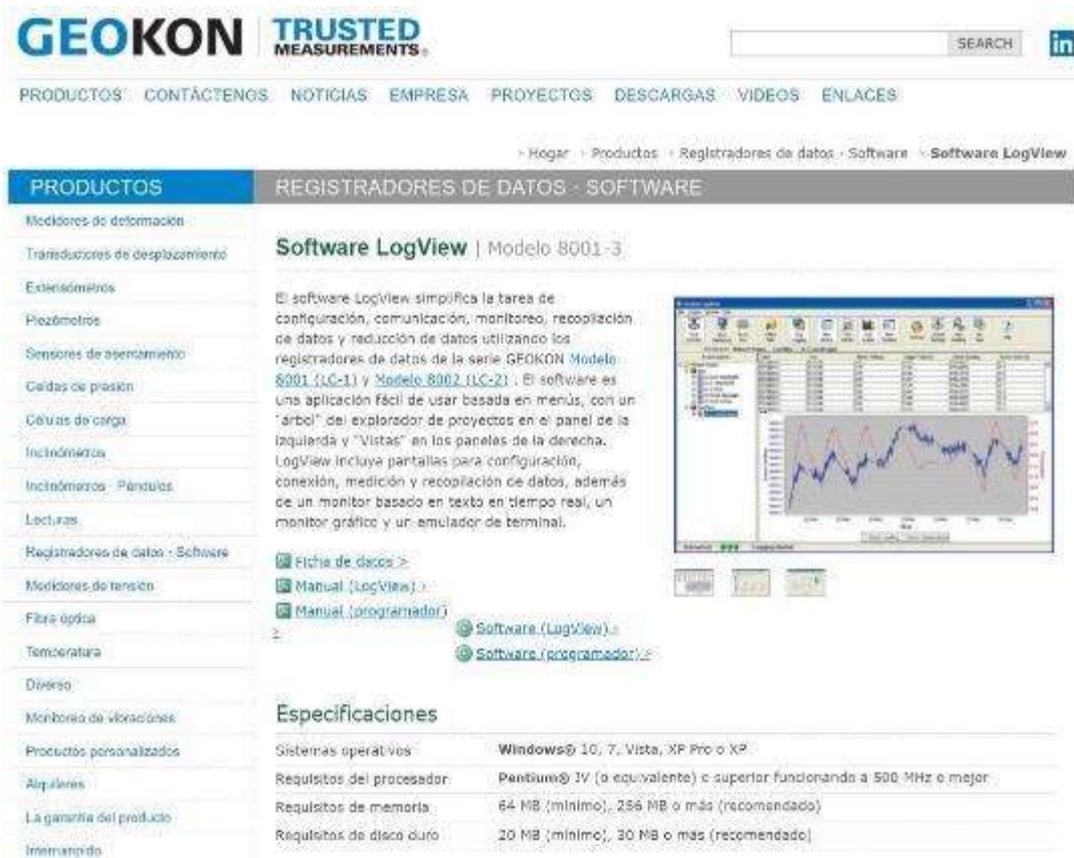
Figura N° 59 Ejemplo de datos del inclinómetro de movimientos acumulados resultante en el eje a y b

Fuente: (Cornforth, 2005)

3.6.2. Piezómetros de cuerda vibrante VW

Realizadas las pruebas de fábrica y suministro con todos los documentos que certifican los parámetros de fabricación y operatividad. Se hace una segunda corroboración, pero en campo antes de su instalación verificando su operatividad y buen funcionamiento bajo los parámetros de fabricante y requerimientos de cliente.

Proceso de Instalación: Se utilizó la plataforma del fabricante Geokon software LogView. Ver Figura N° 60. (extensión LDVE: Donde se realizan las la configuración e interconexiones bajo parámetros de fábrica y requerimientos de cliente entre los equipos Transductor del piezómetro VW, Lab-3 y Datalogger). Se deja el Transductor sumergido en agua unas horas antes para eliminar todas las posibles burbujas de aire atrapadas en el diafragma e interior del Transductor, se continúa la instalación en campo con una laptop verificando que las mediciones del Transductor den cero y se anota en una libreta, luego se ingresan los parámetros de calibración de fabricante que se proporcionan para cada Transductor con una lectura cero a una temperatura y presión atmosférica específica. Ver Figuras N° 61 y 62. Se ingresa la sonda medidora de nivel de columna de agua mH₂O al interior del pozo piezométrico se anota su altura para luego ser ingresado en la configuración y comience su medición y registro a partir de esta columna de agua, tener presente que a toda la longitud de cable más Transductor se le descuenta los 30 cm de la barra de acero que es el contrapeso. Ver Figura N° 63.



PRODUCTOS | CONTACTENOS | NOTICIAS | EMPRESA | PROYECTOS | DESCARGAS | VIDEOS | ENLACES

Hogar | Productos | Registradores de datos | Software | **Software LogView**

PRODUCTOS | REGISTRADORES DE DATOS · SOFTWARE

Medidores de deformación
Transductores de desplazamiento
Extensómetros
Piezómetros
Sensores de asentamiento
Celdas de presión
Células de carga
Inclinómetros
Inclinómetros · Péndulos
Lecturas
Registradores de datos · Software
Medidores de tensión
Fibra óptica
Temperatura
Diverso
Monitoreo de vibraciones
Productos personalizados
Alquileres
La garantía del producto
Inmigrando

Software LogView | Modelo 8001-3

El software LogView simplifica la tarea de configuración, comunicación, monitoreo, recolección de datos y reducción de datos utilizando los registradores de datos de la serie GEOKON Modelo 8001 (LC-1) y Modelo 8002 (LC-2). El software es una aplicación fácil de usar basada en menús, con un "árbol" del explorador de proyectos en el panel de la izquierda y "Vistas" en los paneles de la derecha. LogView incluye pantallas para configuración, conexión, medición y recolección de datos, además de un monitor basado en texto en tiempo real, un monitor gráfico y un emulador de terminal.

[Ficha de datos >](#)
[Manual \(LogView\) >](#)
[Manual \(programador\) >](#)
[Software \(LogView\) >](#)
[Software \(programador\) >](#)

Especificaciones

Sistemas operativos:	Windows® 10, 7, Vista, XP Pro o XP
Requisitos del procesador:	Pentium® IV (o equivalente) o superior funcionando a 500 MHz o mejor
Requisitos de memoria:	64 MB (mínimo), 256 MB o más (recomendado)
Requisitos de disco duro:	20 MB (mínimo), 30 MB o más (recomendado)

Figura N° 60 Software LogView

Fuente: GEOKON. (2020)



Figura N° 61 Verificación y calibración de transductor en conexión con Datalogger

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

GEOKON								
Calibración del Transductor de Presión de Cuerda Vibrante								
Modelo Número: 4500S-100			Rango de Presión: 100 psi					
Número de Serie: 48056			Número de Fabr.: 8-3275					
Cliente:			Temperatura: 21.1°C					
ID del Cliente #: n/a			Presión Barométrica: 998.1 mbar					
Trabajo Número: 13063			Fecha: Nov. 7, 1998					
Control Estándar de Calidad: 183.468			Técnico: (Firma)					
Presión (psi)	Lectura 1er Ciclo	Presión (psi)	Lectura 2º Ciclo	Presión Promedio	Lectura Promedio	Cambio	Linealidad (%FS)	Ajuste Polinómico (%FS)
0	9136	0	9141	0	9139		0.18	-0.04
20	8453	20	8455	20	8455	684	0.03	0.08
40	7772	40	7774	40	7773	692	-0.19	-0.01
60	7085	60	7083	60	7084	689	-0.15	-0.01
80	6392	80	6390	80	6391	693	-0.08	-0.03
100	5694	100	5687	100	5691	701	0.25	0.03
Factor Lineal del Medidor (G): 0.029021 (psi/dígito)			Regresión Cero: 9145					
Factores Polinómicos del Medidor: A: -1.40E-07			B: -0.026943			C: 257.8828		
Factor Térmico (K): -0.004326 (psi/°C)								
Presiones Calculadas: Lineal, $P = G(R_0 - R_1) + K(T_1 - T_0) - (S_1 - S_0)$ Polinómico, $P = AR_1^2 + BR_1 + C + K(T_1 - T_0) - S_1 - S_0$ ** No se requiere compensación barométrica con el transductor con ventilación								
Lectura Cero de Fábrica: GK-401 Pos. B o F(R ₀): 9128 Temp(T ₀): 21.8 °C Baro(S ₀): 1001.4 mbar Fecha: En 27 1997								
*Se le aconseja al usuario establecer las condiciones cero en el campo registrando la lectura a una temperatura y presión barométrica conocidos. Código de Cableado: Rojo y Negro: Medidor Blanco y Verde: Termistor Neutro: Blindaje								
El instrumento antes mencionado se ha calibrado mediante comparación con los estándares del Inst. de Estándares y Tec. (NIST) en cumplimiento con ANSI 2540-1								

Figura N° 62 Ejemplo de hoja de parámetros de calibración del Transductor, las lecturas cero en el sitio deben coincidir con las lecturas de fábrica contenidos en los 20 dígitos después de efectuar las correcciones atmosféricas y de temperatura.

Fuente: GEOKON. Manual de Instrucciones Serie Modelo 4500. Piezómetro de Cuerda Vibrante. Documento revisión (V7/13).



Figura N° 63 Ingreso de Transductor configurado, con de barra de 30 cm (contrapeso evitará que flote)

Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

Ingresado el Transductor al fondo de la tubería se establece el ID de conectividad con el Datalogger que registrara las lecturas cada hora o cada día en la variación del nivel de columna de agua y temperatura del termistor incorporado en el Transductor. Luego se continúa ingresando los parámetros para el Type/Tipo, Model/Modelo y el método de conversión (GEOKON. Manual de Instrucciones Serie Modelo 4500. Piezómetro de Cuerda Vibrante. Documento revisión (V7/13). De no linealidad y el uso de un Polinomio de Segundo Grado para mejorar la exactitud de la presión calculada en relación con sus coeficientes, temperatura inicial y Output units en meter H2O. Ver Figuras N° 64 y 65.



Figura N° 64 Ejemplo de ID de conectividad

Fuente: SAI

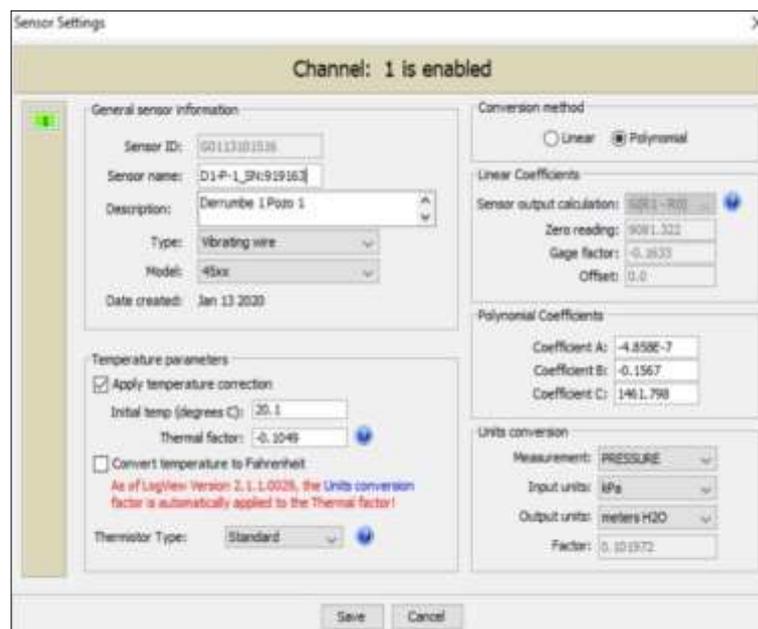


Figura N° 65 Ejemplo de Sensor Setting

Fuente: SAI

Terminada la conectividad y setting entre Transductor y Datalogger, se Interconectan al Tablero pararrayos de GEOKON. Manual de Instrucciones Modelo 4999-12L/LE(LAB3). Tablero pararrayos. Documento revisión (I,18/09/2017) con salida de puesta a tierra dando por terminado su instalación de todo el componente. Ver Figura N° 66 y Tabla N° 37. Tener presente que el cálculo de la presión se hará en digits, convirtiendo dígitos a presión. GEOKON. Manual de Instrucciones Serie Modelo 4500. Piezómetro de Cuerda Vibrante. Documento revisión (V7/13).

$$\text{Digits} = \left(\frac{1}{\text{Period}} \right)^2 \times 10^{-3} \quad \text{ir} \quad \text{Digits} = \frac{\text{Hz}^2}{1000}$$

Ecuación N° 8 Cálculo de dígitos

Fuente: GEOKON. Manual de Instrucciones Serie Modelo 4500. Piezómetro de Cuerda Vibrante. Documento revisión (V7/13)

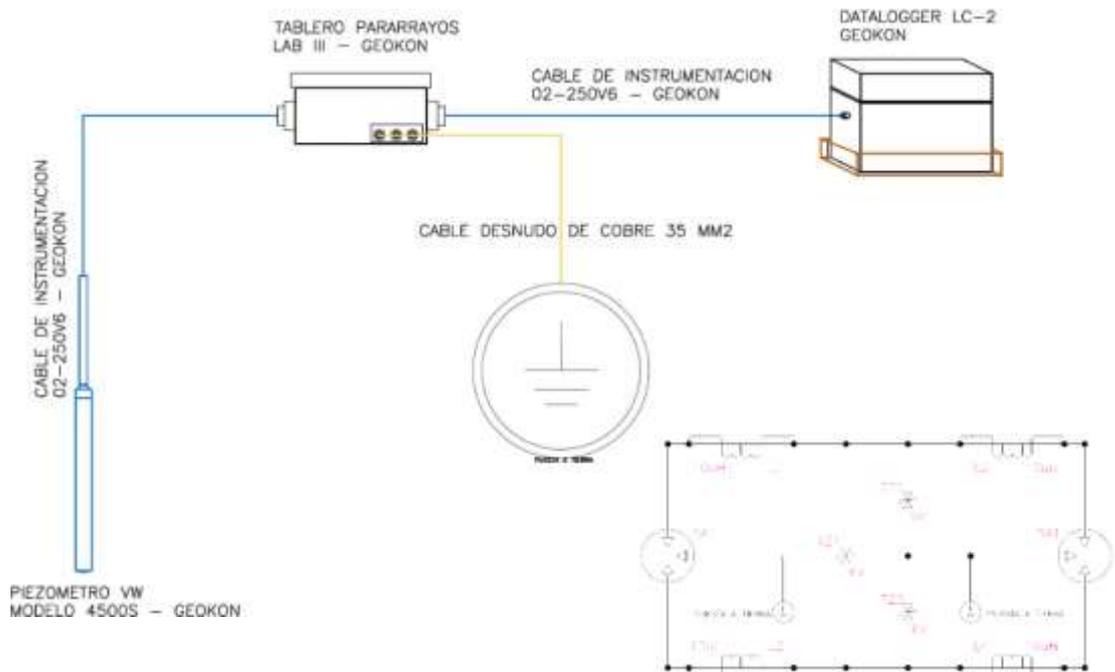


Figura N° 66 Esquema de conexión y puesta en marcha para piezómetro de cuerda vibrante VW

Fuente: SAI

Tabla N° 37 Información de los piezómetros automatizados

Punto	Piezometro de cuerda vibrante	Coordenadas Topograficas		Temperatura	Digits(Dg)	Presión calculada mH ₂ O(Columna de agua)	Ecuación Polinomial		
		Este (X)	Norte (Y)	(°C)			punto de partida	A	B
Zona Inestable 1									
1	D1-P-1	519149.08	8618166.04	20	8849.26	3.87m	-4.86E-07	-0.1567	1461.798
Zona Inestable 2									
2	D2-P-3	520623.47	8620819.73	20.1	7948.10	19.63m	-4.01E-07	-0.1603	1491.996
3	D2-P-4	520695.48	8620690.23	19.6	8176.63	15.65m	-4.07E-07	-0.1594	1486.351

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. Resultado del objetivo específico 1

La técnica y procedimiento empleado en el aseguramiento de ensayos geotécnicos con perforación diamantina e instalación de tubería piezométrica de cuerda vibrante e inclinométrica vertical en las zonas inestables N° 1 y N° 2 permiten alcanzar y superar en varios puntos las profundidades estimadas de perforación e instalación cumpliendo con los requerimientos de cliente y verificando que los mayores metrados necesarios para cumplir con la parte técnica de empotramiento o anclaje de 3m en suelo firme o roca para inclinómetros, este dentro de los rangos de porcentaje en relación al contrato. Como se muestra en la Tabla N° 38. Para la zona N° 1 de su total, tiene un +4% de metraje estimado que equivale a tener 3.54 metros más perforados e instalados y para la Zona N°2 de su total, tiene un +25% del metraje estimado que equivale a 24.04 m.

Tabla N° 38 Resultados de perforación e instalación de tubería

Zona Inestable N°	Tipo de Instrumento	Punto	Metrado Estimado Perforación (m)	Profundidad Final (m)	Tubería Instalada	Metrado Resultante (m)	Mayor Metrado Perforación (m)	Menor Metrado Perforación (m)	Mayor Metrado Perforado (%)	Menor Metrado Perforado (%)	Desviación Estandar
1	Piezometro VW	D1-P-01	20.00	20.00	20.00	20.00	0.00	0.00	0%	0%	0.00
	Inclinometro Vertical	D1-P-02	20.00	27.10	27.10	20.00	7.10	0.00	36%	0%	5.02
	Inclinometro Vertical	D1-P-03	20.00	41.60	41.60	20.00	21.60	0.00	108%	0%	15.27
	Inclinometro Vertical	D1-P-04	30.00	23.30	23.30	23.30	0.00	6.70	0%	22%	4.74
	Inclinometro Vertical	D1-P-05	40.00	23.00	23.00	23.00	0.00	17.00	0%	43%	12.02
2	Inclinometro Vertical	D2-P-01	35.00	49.00	49.00	35.00	14.00	0.00	40%	0%	12.02
	Inclinometro Vertical	D2-P-02	35.00	55.00	55.00	35.00	20.00	0.00	57%	0%	14.14
	Piezometro VW	D2-P-03	40.00	40.00	40.00	40.00	0.00	0.00	0%	0%	0.00
	Piezometro VW	D2-P-04	40.00	40.00	40.00	40.00	0.00	0.00	0%	0%	0.00
VW: Cuerda Vibrante											
Zona Inestable N°1 Mayor Metrado Perforación (m)			130.00	135.00	135.00	-	28.70	23.70	4% ↑	0%	3.54
Zona Inestable N°2 Mayor Metrado Perforación (m)			150.00	184.00	184.00	-	34.00	0.00	23% ↑	0%	24.04

Fuente: SAI. Elaboración propia

Y en la figura N° 67 se muestra los resultados en diagrama de barras de mayor metrado por punto representado en color naranja D1-P2 +7.10 m, D1-P3 +21.60m.

En color gris el menor metrado, como son los puntos D1-P4 - 6.70 m y D1-P5 - 17 m y en el azul el metraje estimado. En similar con la Figura N° 68.

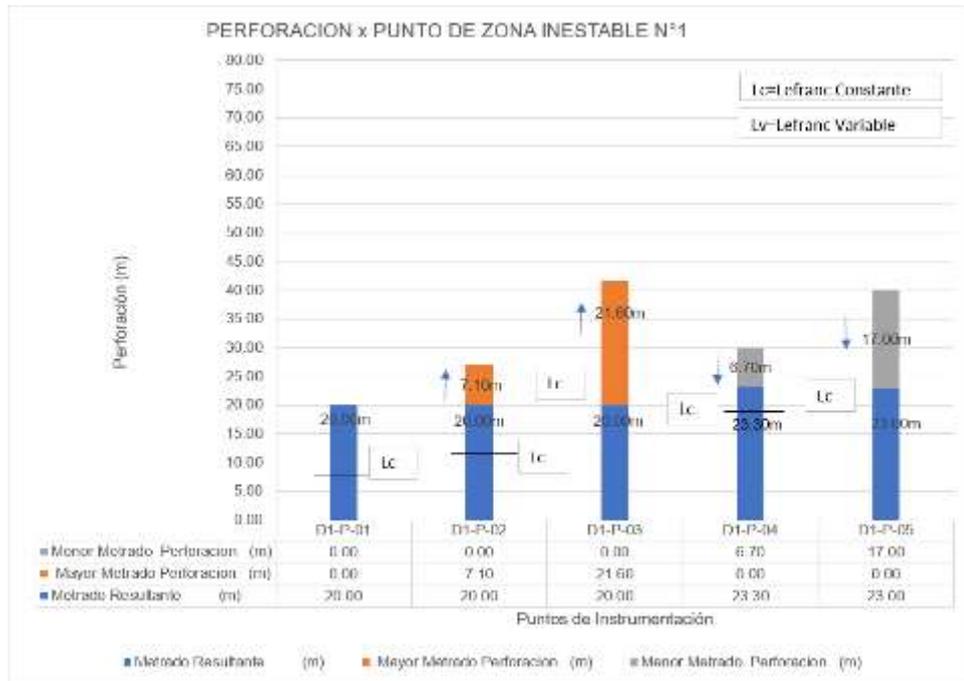


Figura N° 67 Diagrama de barras de perforación e instalación de tubería zona

Fuente: SAI. Elaboración propia

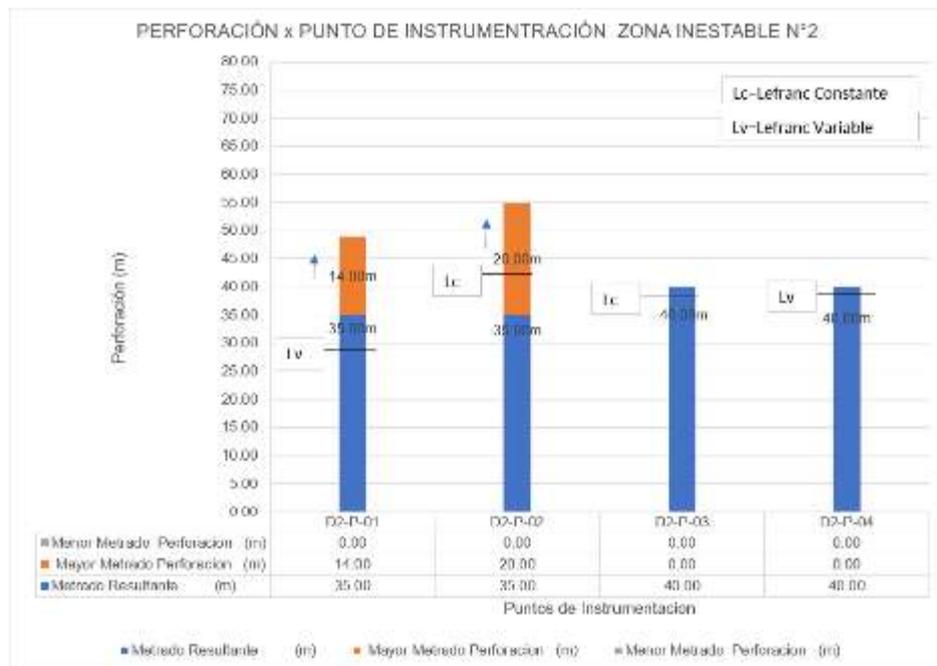


Figura N° 68 Diagrama de barras de perforación e instalación de tubería zona

Fuente: SAI. Elaboración propia

4.2. Resultado del objetivo específico 2

Se logró determinar representativamente el coeficiente de permeabilidad del suelo durante la perforación, mediante el ensayo Lefranc, y estimar el tamaño de las partículas y el tipo de suelo característico por medio del cálculo del coeficiente de permeabilidad de cada uno de los puntos de las zonas inestables N° 1 y N° 2. Tal como se muestra en la Tabla N°38.

Tabla N° 38 *Resultados de coeficiente de permeabilidad*

Zona	Punto de perforación	Tramo de prueba (m)	k (cm/s)	Descripción de Permeabilidad	Tipo de ensayo	D _{max} (mm)	D _{min} (mm)	Tipo de suelo	Drenaje
Zona Inestable N° 1	D1-P-01	8.50- 9.00	1.23 x 10 ⁻⁴	Baja	Carga constante	2	0.005	Arena limosa	Pobre
	D1-P-02	9.50 - 11.30	4.86 x 10 ⁻⁴	Baja	Carga constante	5	0.01	Grava y arena limosa bien gradada	Pobre
	D1-P-03	23.40 a 23.90	1.34 x 10 ⁻³	Baja	Carga constante	2	0.005	Arena limosa	Pobre
	D1-P-04	18.70 a 19.70	8.36 x 10 ⁻⁴	Baja	Carga constante	2	0.005	Arena limosa	Pobre
	D1-P-05	19.55 a 21.15	6.87 x 10 ⁻⁴	Baja	Carga constante	5	0.01	Grava y arena limosa pobre gradada	Pobre
Zona Inestable N° 2	D2-P-01	27.50 a 28.00	3.33 x 10 ⁻⁴	Baja	Carga variable	5	0.01	Grava y arena limosa pobre gradada	Pobre
	D2-P-02	43.45 a 43.95	1.60 x 10 ⁻⁴	Baja	Carga constante	2	0.005	Arena limosa	Pobre
	D2-P-03	39.50 a 40.00	3.48 x 10 ⁻³	Baja	Carga constante	0.25	0.05	Arena fina uniforme	Pobre
	D2-P-04	39.50 a 40.00	1.17 x 10 ⁻⁵	Muy baja	Carga variable	0.05	0.005	Limo uniforme	Pobre

Fuente: SAI

Elaboración: Propia

4.3. Resultado del objetivo específico 3

Se presentan los resultados de la evaluación de la puesta en marcha de la instrumentación geotécnica de las zonas inestables N°1 y 2, en el primero un piezómetro de cuerda vibrante y cuatro inclinómetros verticales y en el segundo dos piezómetros de cuerda vibrante y dos inclinómetros verticales.

4.3.1. Resultados en piezómetros de cuerda vibrante zona N° 1 y 2

- Punto D1-P1: Los resultados se presentan en tiempo aproximado de un mes, mostrando el comportamiento del nivel de agua en metros de columna de agua mH₂O y temperatura en grados Celsius que mide el Transductor y registra y almacena en el Datalogger con lecturas en intervalos de horas tal como se muestra en la Figura N° 69, reportado por medio de la plataforma del fabricante Geokon software LogView.

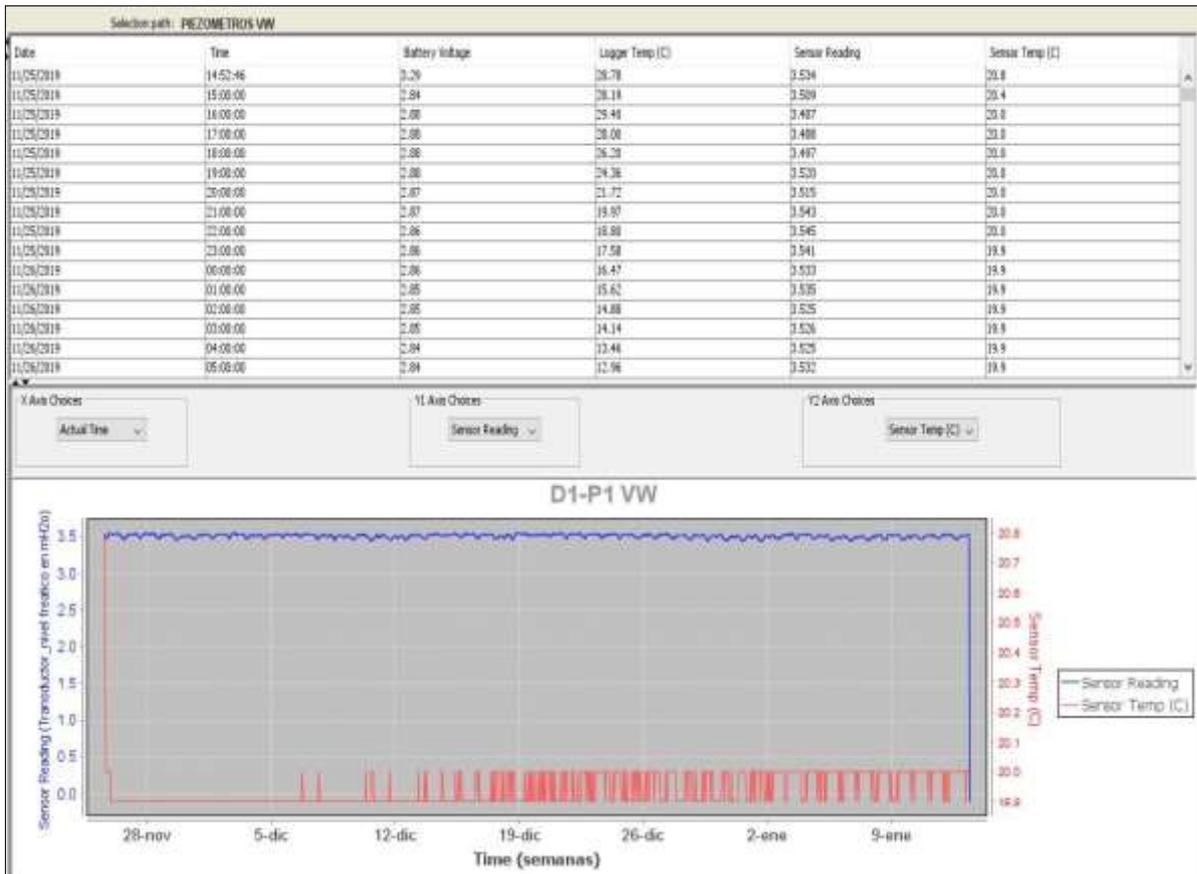


Figura N° 69 Mediciones de la puesta en marcha del piezómetro D1-P1

Fuente: SAI

- Punto D2-P3 y D2-P4: Los resultados se presentan en tiempo aproximado de un mes, mostrando el comportamiento del nivel de agua en metros de columna de agua mH₂O y temperatura en grados Celsius que mide el Transductor y registra y almacena en el Datalogger con lecturas en intervalos diario tal como se muestra en la Figuras N° 70 y 71, reportado por medio de la plataforma del fabricante Geokon software LogView en formato Excel con extensión csv.

D2-P3 VW										
Descripciones				Datos generales			Logger		Sensor	
id	codigo	año	#	Fecha	Hora	Bateria	Temperatura	mH2o	Temperatura	
D2-P-3_1921341	2019337	2019	337	03/12/2019	18:07:48	3.25	18.86	19.24	19.80	
D2-P-3_1921341	2019338	2019	338	04/12/2019	15:00:00	3.28	20.88	19.24	20.00	
D2-P-3_1921341	2019339	2019	339	05/12/2019	15:00:00	3.28	19.15	19.23	20.00	
D2-P-3_1921341	2019340	2019	340	06/12/2019	15:00:00	3.28	18.79	19.25	20.00	
D2-P-3_1921341	2019341	2019	341	07/12/2019	15:00:00	3.28	16.81	19.25	20.00	
D2-P-3_1921341	2019342	2019	342	08/12/2019	15:00:00	3.28	16.08	19.26	20.70	
D2-P-3_1921341	2019343	2019	343	09/12/2019	15:00:00	3.28	16.54	19.26	20.70	
D2-P-3_1921341	2019344	2019	344	10/12/2019	15:00:00	3.28	17.16	19.27	20.70	
D2-P-3_1921341	2019345	2019	345	11/12/2019	15:00:00	3.29	18.80	19.28	20.70	
D2-P-3_1921341	2019346	2019	346	12/12/2019	15:00:00	3.28	19.52	19.32	20.70	
D2-P-3_1921341	2019347	2019	347	13/12/2019	15:00:00	3.28	20.27	19.36	20.70	
D2-P-3_1921341	2019348	2019	348	14/12/2019	15:00:00	3.28	19.01	19.38	20.40	
D2-P-3_1921341	2019349	2019	349	15/12/2019	15:00:00	3.28	18.42	19.40	20.40	
D2-P-3_1921341	2019350	2019	350	16/12/2019	15:00:00	3.28	20.88	19.40	20.40	
D2-P-3_1921341	2019351	2019	351	17/12/2019	15:00:00	3.29	19.15	19.41	20.40	
D2-P-3_1921341	2019352	2019	352	18/12/2019	15:00:00	3.28	17.79	19.42	20.10	
D2-P-3_1921341	2019353	2019	353	19/12/2019	15:00:00	3.28	16.81	19.42	20.20	
D2-P-3_1921341	2019354	2019	354	20/12/2019	15:00:00	3.29	16.08	19.43	19.75	
D2-P-3_1921341	2019355	2019	355	21/12/2019	15:00:00	3.29	15.54	19.43	19.75	
D2-P-3_1921341	2019356	2019	356	22/12/2019	15:00:00	3.28	15.16	19.44	19.75	
D2-P-3_1921341	2019357	2019	357	23/12/2019	15:00:00	3.29	16.80	19.44	19.75	
D2-P-3_1921341	2019358	2019	358	24/12/2019	15:00:00	3.29	17.52	19.45	19.75	
D2-P-3_1921341	2019359	2019	359	25/12/2019	15:00:00	3.28	17.27	19.46	20.30	
D2-P-3_1921341	2019360	2019	360	26/12/2019	15:00:00	3.29	17.01	19.46	20.30	
D2-P-3_1921341	2019361	2019	361	27/12/2019	15:00:00	3.29	18.56	19.47	20.30	
D2-P-3_1921341	2019362	2019	362	28/12/2019	15:00:00	3.28	20.88	19.47	20.30	
D2-P-3_1921341	2019363	2019	363	29/12/2019	15:00:00	3.29	19.15	19.48	20.30	
D2-P-3_1921341	2019364	2019	364	30/12/2019	15:00:00	3.29	17.79	19.48	20.30	
D2-P-3_1921341	2019365	2019	365	31/12/2019	15:00:00	3.28	16.81	19.49	20.40	
D2-P-3_1921341	2020001	2020	1	01/01/2020	15:00:00	3.28	16.08	19.54	20.40	
D2-P-3_1921341	2020002	2020	2	02/01/2020	15:00:00	3.29	15.54	19.54	20.40	
D2-P-3_1921341	2020003	2020	3	03/01/2020	15:00:00	3.29	15.16	19.54	20.40	
D2-P-3_1921341	2020004	2020	4	04/01/2020	15:00:00	3.28	16.80	19.55	20.40	
D2-P-3_1921341	2020005	2020	5	05/01/2020	15:00:00	3.28	18.95	19.56	20.40	
D2-P-3_1921341	2020006	2020	6	06/01/2020	15:00:00	3.28	18.00	19.56	20.20	
D2-P-3_1921341	2020007	2020	7	07/01/2020	15:00:00	3.28	18.31	19.57	20.20	
D2-P-3_1921341	2020008	2020	8	08/01/2020	15:00:00	3.27	18.11	19.60	20.70	
D2-P-3_1921341	2020009	2020	9	09/01/2020	15:00:00	3.27	20.40	19.62	20.40	
D2-P-3_1921341	2020010	2020	10	10/01/2020	15:00:00	3.27	20.00	19.63	20.40	
D2-P-3_1921341	2020011	2020	11	11/01/2020	15:00:00	3.28	20.20	19.63	20.20	

Gráfica de nivel freático de piezómetro D2-P3



Figura N° 70 Mediciones de la puesta en marcha del piezómetro D2-P3

Fuente: SAI.

Elaboración: Propia

D2-P4 VW										
Descripciones				Datos generales			Logger		Sensor	
id	codigo	año	#	Fecha	Hora	Bateria	Temperatura	mH2o	Temperatura	
D2-P-4_192134	2019337	2019	337	03/12/2019	17:12:39	3.28	19.61	15.25	19.60	
D2-P-4_192134	2019338	2019	338	04/12/2019	15:00:00	3.28	19.40	15.23	19.60	
D2-P-4_192134	2019339	2019	339	05/12/2019	15:00:00	3.27	19.64	15.22	19.60	
D2-P-4_192134	2019340	2019	340	06/12/2019	15:00:00	3.27	19.89	15.21	19.60	
D2-P-4_192134	2019341	2019	341	07/12/2019	15:00:00	3.28	19.81	15.23	20.00	
D2-P-4_192134	2019342	2019	342	08/12/2019	15:00:00	3.28	19.08	15.23	20.50	
D2-P-4_192134	2019343	2019	343	09/12/2019	15:00:00	3.29	18.54	15.24	20.50	
D2-P-4_192134	2019344	2019	344	10/12/2019	15:00:00	3.28	17.18	15.24	20.30	
D2-P-4_192134	2019345	2019	345	11/12/2019	15:00:00	3.29	19.80	15.28	20.00	
D2-P-4_192134	2019346	2019	346	12/12/2019	15:00:00	3.28	19.52	15.34	19.80	
D2-P-4_192134	2019347	2019	347	13/12/2019	15:00:00	3.27	20.27	15.38	19.80	
D2-P-4_192134	2019348	2019	348	14/12/2019	15:00:00	3.27	19.01	15.40	19.60	
D2-P-4_192134	2019349	2019	349	15/12/2019	15:00:00	3.28	18.42	15.39	19.60	
D2-P-4_192134	2019350	2019	350	16/12/2019	15:00:00	3.28	20.88	15.10	20.40	
D2-P-4_192134	2019351	2019	351	17/12/2019	15:00:00	3.29	19.15	15.41	20.40	
D2-P-4_192134	2019352	2019	352	18/12/2019	15:00:00	3.28	17.79	15.42	20.45	
D2-P-4_192134	2019353	2019	353	19/12/2019	15:00:00	3.28	16.81	15.42	20.10	
D2-P-4_192134	2019354	2019	354	20/12/2019	15:00:00	3.29	16.08	15.43	19.80	
D2-P-4_192134	2019355	2019	355	21/12/2019	15:00:00	3.29	15.54	15.43	19.60	
D2-P-4_192134	2019356	2019	356	22/12/2019	15:00:00	3.28	15.18	15.45	19.50	
D2-P-4_192134	2019357	2019	357	23/12/2019	15:00:00	3.3	16.80	15.47	19.75	
D2-P-4_192134	2019358	2019	358	24/12/2019	15:00:00	3.29	17.52	15.49	19.70	
D2-P-4_192134	2019359	2019	359	25/12/2019	15:00:00	3.28	17.27	15.48	20.10	
D2-P-4_192134	2019360	2019	360	26/12/2019	15:00:00	3.29	17.01	15.49	20.10	
D2-P-4_192134	2019361	2019	361	27/12/2019	15:00:00	3.29	18.56	15.50	20.10	
D2-P-4_192134	2019362	2019	362	28/12/2019	15:00:00	3.28	20.88	15.50	20.10	
D2-P-4_192134	2019363	2019	363	29/12/2019	15:00:00	3.29	19.15	15.51	20.30	
D2-P-4_192134	2019364	2019	364	30/12/2019	15:00:00	3.3	17.78	15.52	20.30	
D2-P-4_192134	2019365	2019	365	31/12/2019	15:00:00	3.29	16.81	15.55	20.20	
D2-P-4_192134	2020001	2020	1	01/01/2020	15:00:00	3.28	16.08	15.54	20.20	
D2-P-4_192134	2020002	2020	2	02/01/2020	15:00:00	3.29	15.54	15.56	20.20	
D2-P-4_192134	2020003	2020	3	03/01/2020	15:00:00	3.3	15.18	15.57	20.20	
D2-P-4_192134	2020004	2020	4	04/01/2020	15:00:00	3.28	16.80	15.58	20.40	
D2-P-4_192134	2020005	2020	5	05/01/2020	15:00:00	3.28	18.95	15.58	20.40	
D2-P-4_192134	2020006	2020	6	06/01/2020	15:00:00	3.29	18.00	15.60	20.20	
D2-P-4_192134	2020007	2020	7	07/01/2020	15:00:00	3.28	18.31	15.60	20.30	
D2-P-4_192134	2020008	2020	8	08/01/2020	15:00:00	3.29	18.11	15.60	20.20	
D2-P-4_192134	2020009	2020	9	09/01/2020	15:00:00	3.27	20.40	15.62	20.40	
D2-P-4_192134	2020010	2020	10	10/01/2020	15:00:00	3.28	20.00	15.63	20.40	
D2-P-4_192134	2020011	2020	11	11/01/2020	15:00:00	3.27	19.60	15.65	20.20	

Gráfica de nivel freático de piezómetro D2-P4



Figura N° 71 Mediciones de la puesta en marcha del piezómetro D2-P4

Fuente: SAI.

Elaboración propia

4.3.2. Resultados en inclinómetros verticales de la zona N° 1 y 2

- Puntos D1-P2, D1-P3, D1-P4, D1-P5, D2-P1 y D2-P2: Los resultados registrados solo de la puesta en marcha se reportan por medio de la plataforma del fabricante DGSI Digitilt AT del Software Digipro2 tal como se muestran en las siguientes Figuras N° 72 al 77.

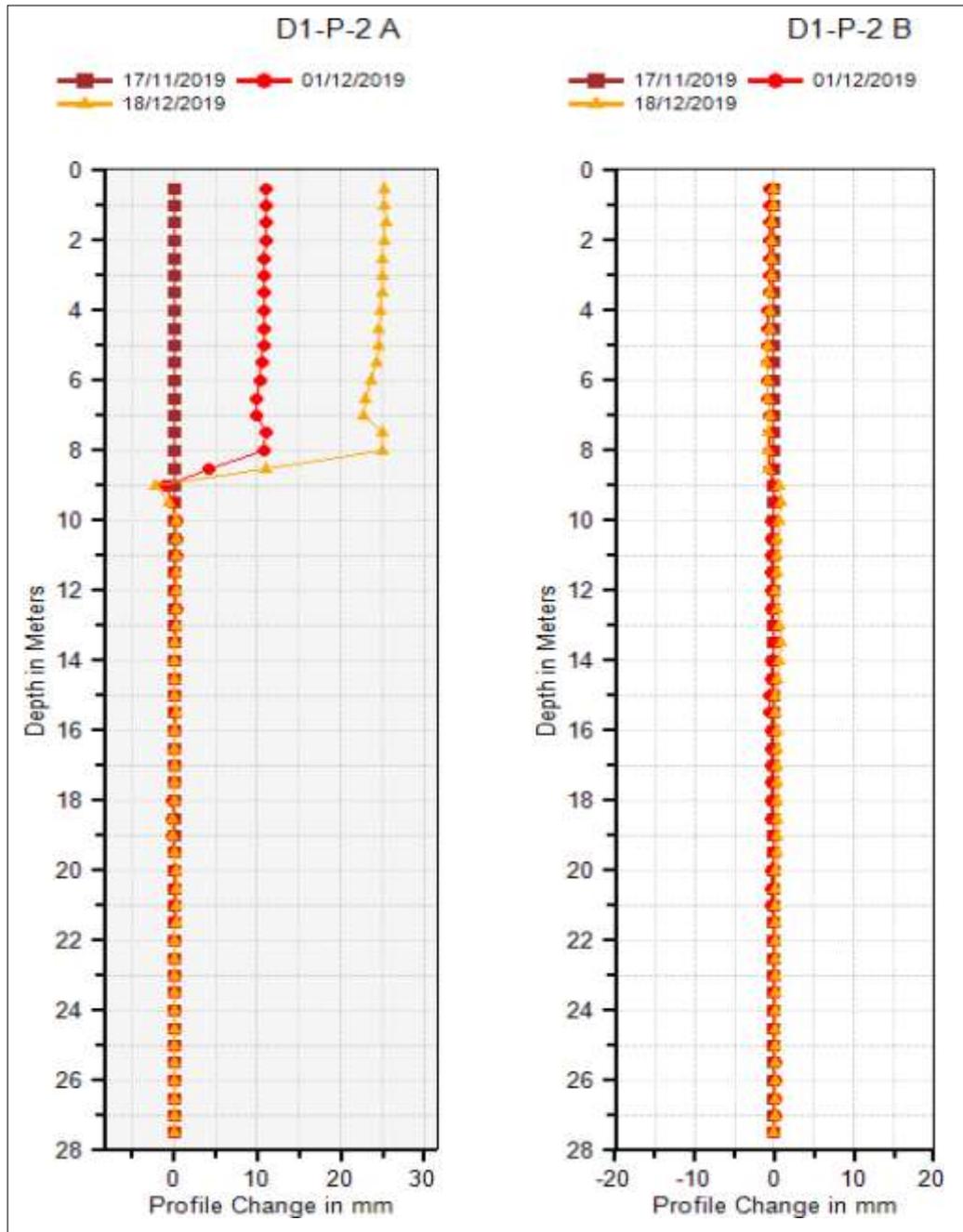


Figura N° 72 D1-P2 Resultado en el eje A de los desplazamientos horizontales acumulados, componente A y B. Dirección del eje ranurado +A de la tubería inclinométrica: Azimut calculado $336^{\circ}13'46''$ según como quedo orientado en la instalación siguiendo el sentido del desplazamiento.

Fuente: SAI

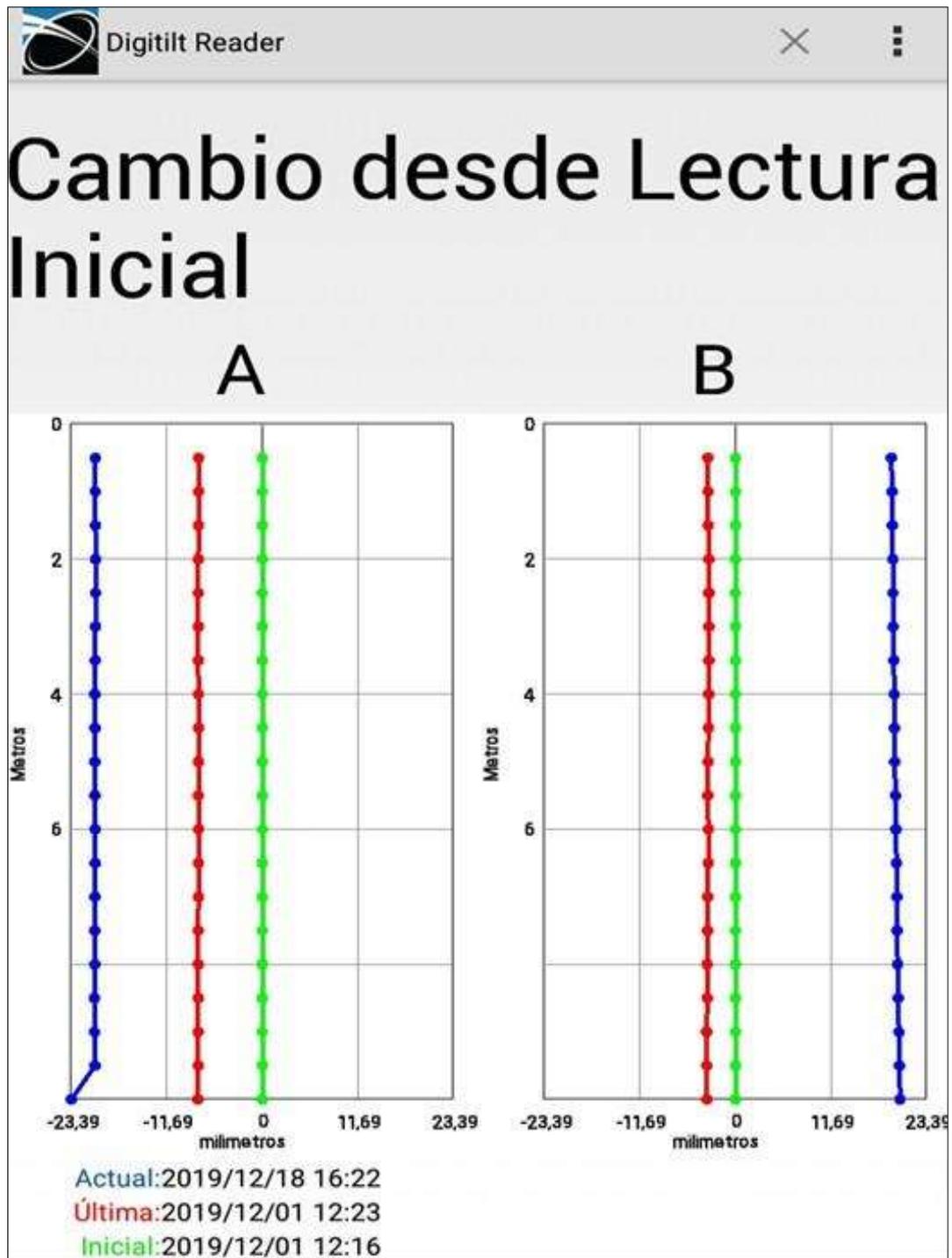


Figura N° 73 D1-P3 Resultado en el eje A de los desplazamientos horizontales acumulados, componente A y B. Dirección del eje ranurado +A de la tubería inclinométrica: Azimut calculado $354^{\circ}52'34''$ según como quedo orientado en la instalación siguiendo el sentido del desplazamiento.

Fuente: SAI

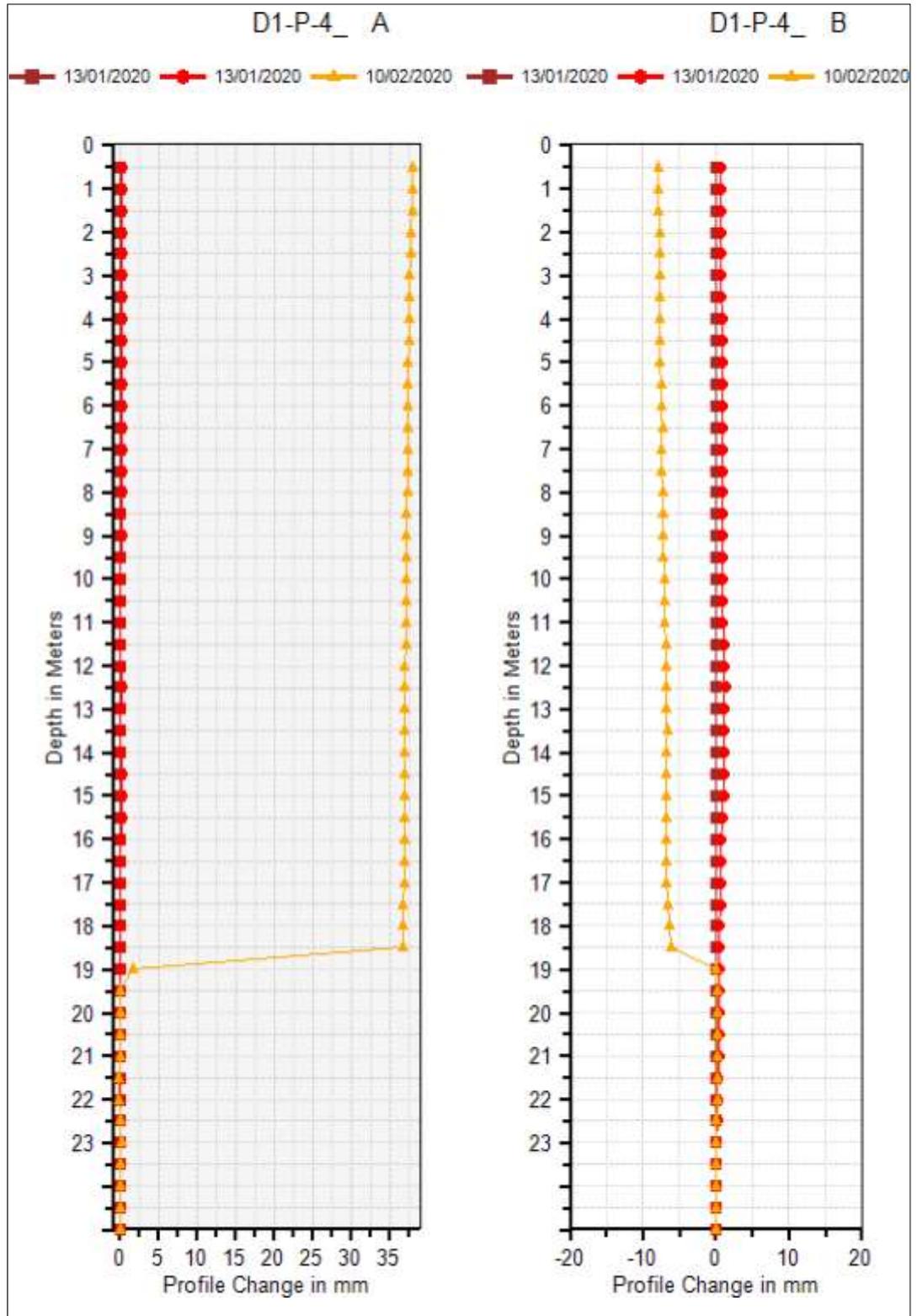


Figura N° 74 D1-P4 Resultado en el eje A de los desplazamientos horizontales acumulados, componente A y B. Dirección del eje ranurado +A de la tubería inclinométrica: Azimut calculado $214^{\circ}12'57''$ según como quedo orientado en la instalación siguiendo el sentido del desplazamiento.

Fuente: SAI

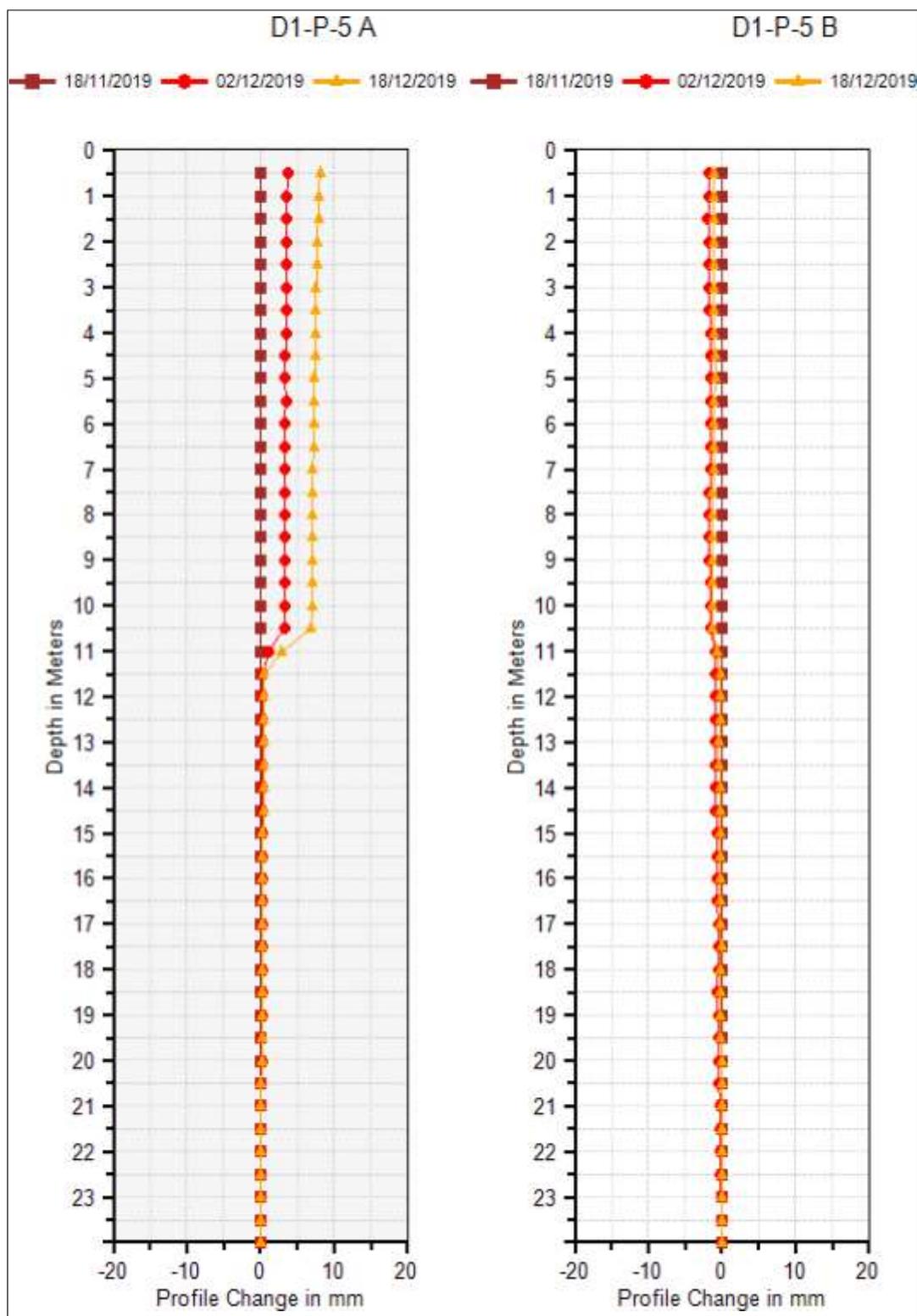


Figura N° 75 D1-P5 resultado en el eje A de los desplazamientos horizontales acumulados, componente A y B. Dirección del eje ranurado +A de la tubería inclinométrica: Azimut calculado $336^{\circ}48'05''$ según como quedo orientado en la instalación siguiendo el sentido del desplazamiento.

Fuente: SAI

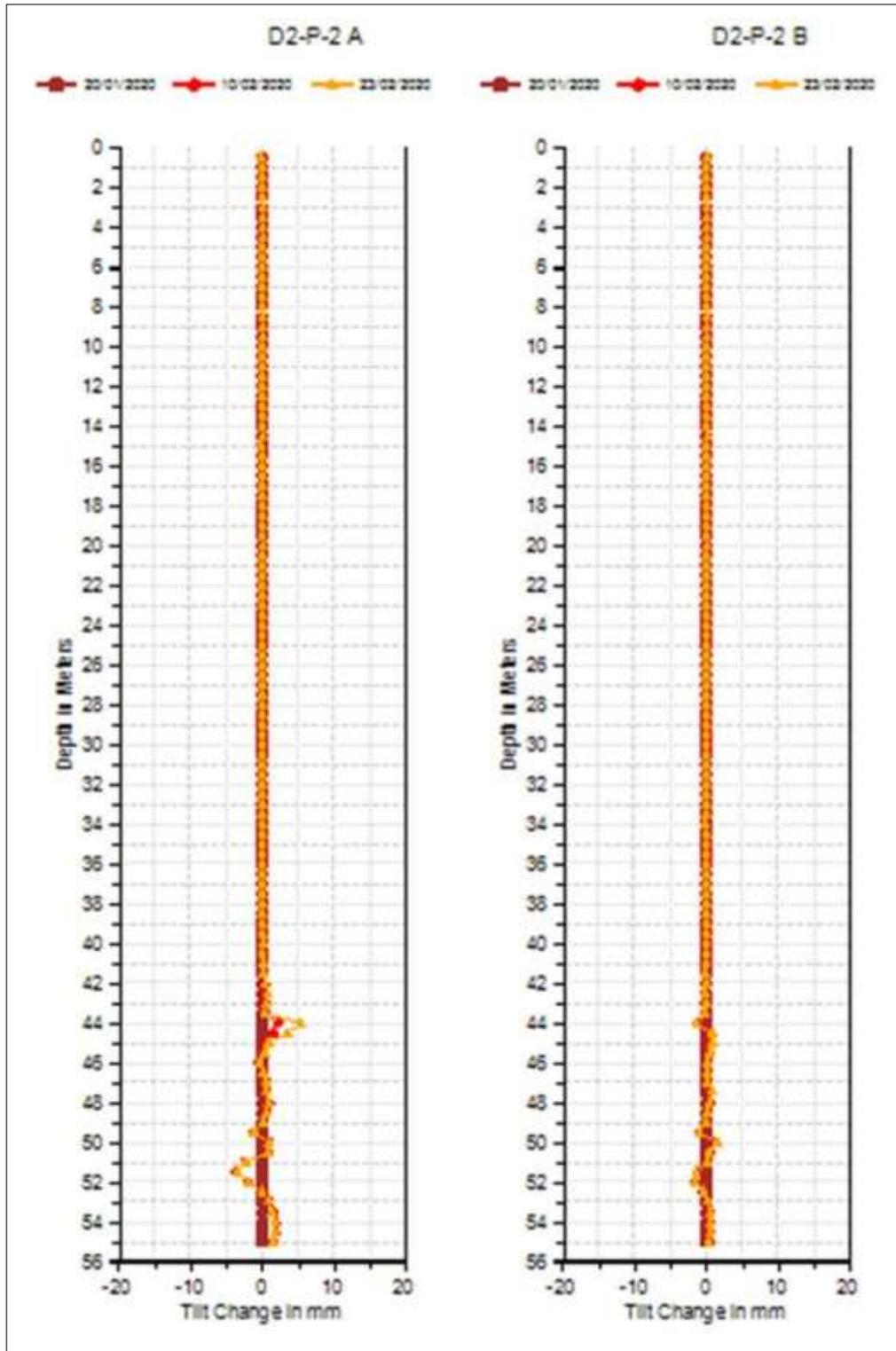


Figura N° 77 D2-P-2 resultado en el eje A de los desplazamientos horizontales acumulados, componente A y B. Dirección del eje ranurado +A de la tubería inclinométrica: Azimut calculado $11^{\circ}35'30''$ según como quedo orientado en la instalación siguiendo el sentido del desplazamiento.

Fuente: SAI

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

- Se concluye que la evaluación de la instrumentación geotécnica por medio de la instalación de inclinómetros verticales y piezómetros de cuerda vibrante en las zonas inestables uno y dos del embalse aguas arriba de la presa Tablachaca, permiten monitorear los desplazamientos de dichas zonas en el tiempo. Evitando ser reactivos y tomar acciones preventivas ante posibles desplazamientos continuos.
- La conclusión del objetivo específico 1: La técnica y procedimiento empleado en el aseguramiento de ensayos geotécnicos con perforación diamantina e instalación de tubería piezométrica para cuerda vibrante e inclinométrica vertical en las zonas inestables N° 1 y N° 2, son efectivas ante la difícil configuración del suelo y el relieve accidentado del embalse aguas arriba de la presa Tablachaca. Logrando alcanzar y superar las profundidades estimadas.
- La conclusión del objetivo específico 2: Es importante determinar representativamente el coeficiente de permeabilidad del suelo durante la perforación, mediante el ensayo Lefranc cuando se tiene algún tipo de filtración e infiltración a través del sustrato de las zonas inestables, y estimar el tamaño de las partículas y el tipo de suelo característico que determinan el tipo de drenajes y que para todos los puntos de las zonas inestables N° 1 y 2, son de drenaje pobre y baja permeabilidad con excepción del D2-P4 muy baja.
- En los resultados de la puesta en marcha para los puntos D1-P1, se observa que el nivel freático en metros de columna de agua mH₂O se mantiene casi constante lo más próximo a los 3.5 m y con temperaturas registradas por el transductor que fluctúa entre los 19.9°C y 20°C. D1-P2, los desplazamientos acumulados están alrededor de los 25 mm a una profundidad entre los 8 y 9 m. D1-P3, los desplazamientos acumulados están alrededor de los 23 mm a una profundidad aproximada de 11 m. D1-P4, los desplazamientos acumulados están alrededor de los 35 mm a una profundidad entre los 18 y 19 m. D1-P5, los desplazamientos acumulados están alrededor de los 8 mm a una profundidad entre los 10 y 11.5 m. D2-P1 y D2-P2 no se registran desplazamientos acumulados durante la puesta en marcha. D2-P3, el nivel freático en metros de columna de agua mH₂O se mantiene casi constante lo más próximo a los 19 m y con temperaturas que fluctúa entre los 19.8°C y 20.7°C. D2-P4, el nivel freático en metros de columna de agua mH₂O inicia con 15.25 m y al mes aproximadamente alcanzo los 15.65 m, con tendencia a seguir incrementándose ligeramente y con temperaturas que fluctúa entre los 19.5°C y 20.4°C. Asimismo, se evidencia en los resultados gráficos de la puesta en marcha (registro de la lectura inicial línea base, no muestra desviaciones en torno a su eje proyectado desde el fondo del pozo hacia la parte superior de la tubería) que todas las perforaciones e instalaciones cumplen con no exceder el grado de desviación en relación a la profundidad que tiene cada pozo. Ver Figura N° 54. Y en la medición inicial de los inclinómetros verticales no se evidencia algún desperfecto en la instalación de la tubería, debido a que el descenso hacia el fondo del pozo por la ranura +A orientadas en el sentido del desplazamiento, no presenta algún tipo de desperfecto. También, durante el periodo de puesta en marcha, las mediciones registradas por los piezómetros de cuerda vibrante no muestran algún tipo de comportamiento errático o picos en la

variación de nivel freático expresado en metros de columna mH₂O, por tanto, se verifica que las conexiones, configuraciones y confiabilidad del registro han sido realizados correctamente según los requerimientos técnicos del cliente.

RECOMENDACIONES

- Para continuar con el programa de monitoreo se recomienda tener cuidado con la compatibilidad de los datos medidos e importados de los inclinómetros verticales. Los datos registrados deben ser compatibles con otros softwares y deben contener los mismos parámetros de constante de instrumento e intervalo de medición, iguales a los de la puesta en marcha para seguir registrando de manera acumulativa las mediciones. Además, la precisión del Sensor torpedo debe ser igual o mejor a $\pm 0,25$ mm por lectura, o ± 6 mm acumulados en 50 lecturas iguales. Y con la información de los piezómetros de cuerda vibrante se recomienda establecer una relación entre lluvias, niveles freáticos y ocurrencia de deslizamientos de las zonas inestables N° 1 y 2. Ver Figura N° 78.

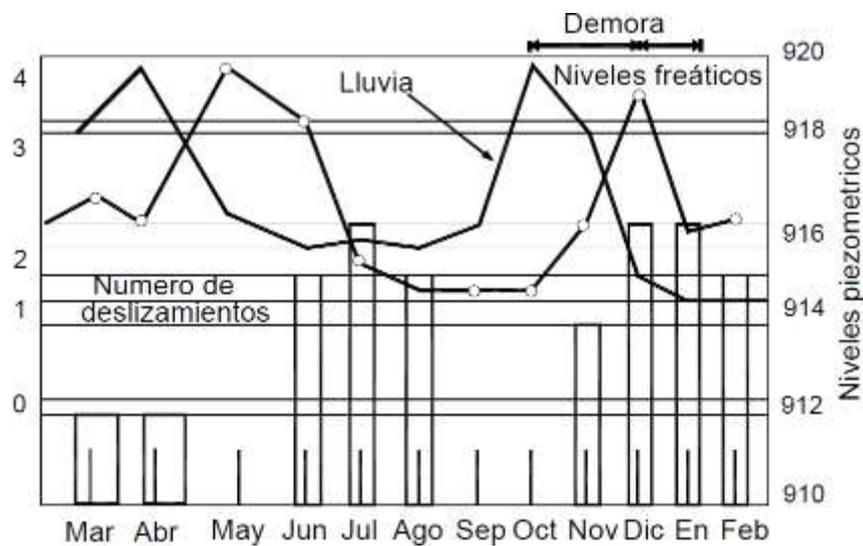


Figura N° 78 lluvias, niveles freáticos

Fuente: (Gómez, 1992)

- Es de importancia contar con equipos de perforación e instalación en perfectas condiciones de mantenimiento, accesorios como tubería (casing de acero en la línea de perforación), bomba de lodos y conexiones de agua, también deben estar en buen estado, con piezas de recambio y supervisados continuamente (horas máquina) para evitar tener retrasos o percances no monitoreados, que afecten la programación de actividades sin estar contemplados en un plan de contingencia o riesgos asumidos o mitigados durante la ejecución.
- Los cálculos de permeabilidad deben ser utilizados a futuro para una reevaluación de la estabilidad de los deslizamientos de las zonas inestables. Asimismo, durante la perforación verificar el buen funcionamiento del Medidor de Caudal Lefranc y asegurar que la cantidad de agua a utilizar sea la suficiente para no detener el ensayo.

- Para los trabajos de instrumentación geotécnica siempre se debe tener asesorías previas con los fabricantes o proveedores certificados de todo los equipos y materiales a utilizar, como se hizo para el presente proyecto en relación directa con los requerimientos de cliente para evitar algún tipo de retraso en las actividades programadas de instalación y puesta en marcha. Así mismo se recomienda que, durante las posteriores campañas de descarga de información de los Datalogger se realice mantenimiento y verificación de su funcionamiento, como nivel de carga de baterías, conectividad y posibles zonas de cortante en la tubería piezométrica e inclinométrica generadas por los posibles desplazamientos de las zonas inestables, y que impida extraer el transductor, bajar hacia fondo del pozo la Sonda torpedo o algún tipo de evento externo como vandalismo que imposibilite continuar con los monitoreos de los desplazamientos horizontales y niveles freáticos.

REFERENCIAS

1. American Psychological Association (s.f.). How do you format a bibliography in APA Style? Recuperado de <http://w.w.w.apastyle.org/learn/faqs/format-bibliography.aspx> [Consulta: 06 de agosto de 2017].
2. Acuña, G. (2016). Instrumentación para producir información geotécnica en proyectos de construcción de túneles viales (Tesis para optar el título profesional de Ingeniero civil). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
3. Abramson L. W., Lee T.S., Sharma S., Boyce G. M. (2002). “Slope stability and stabilization methods”. John Wiley & Sons, Inc. New York. pp 712.
4. Bassett, R. (2012). Una guía de Campo instrumentación en geotecnia. Columbia, MD, Estados Unidos de América: Great book princes.
5. Bru, G., Gascón, B., Camacho, A., Prieto, J., Mallorquí, J., Morales, A., y Fernández, J. (2015). Deslizamiento de Leintz Gatzaga: Instrumentación geotécnica y monitorización del movimiento con técnicas terrestres y espaciales. Ingeniería civil, 180, 1-21.
6. Budhu, M. (2011). Soil Mechanics and Foundations. (3rd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
7. Cabrera, R. (2018). Análisis del sistema de monitoreo para el control de estabilidad de la presa de Relaves, U.M. Yauricocha (Tesis para optar el título profesional de Ingeniero de Minas). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.
8. Cedergren H.R. (1967) “Seepage, Drainage and Flow Nets”. John Wiley, New York.
9. Cisneros, H. (2019). Instrumentación geotécnica e instrumentación para el diseño de construcción e instalación de piezómetros y pozos de drenaje en la mina Pierina (Tesis para optar el título profesional de Ingeniero de Minas). Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo”, Huaraz, Perú.
10. Chuquimango J. (2009). Instrumentación geotécnica en la mina Lagunas Norte/Dique Viscachaz – Alto Chicama, distrito de Santiago de Chuco – Departamento de la Libertad. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/11354>.
11. Comisión Nacional del Agua. CONAGUA. (2012). Manual de mecánica de suelo. Instrumentación y monitoreo del comportamiento de Obras Hidráulicas. México, D.F.: InDesign e Ilustrador CS5.
12. Cornforth D.H., (2005). “Landslides in practice investigation, analysis, and remedial/preventative options in Soils”. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. pp. 596.
13. Consorcio Instrumentación Tablachaca. CIT.SAI. Sierra Alta Ingenieros S.A.C.
14. Custodio, E. (1983) .- Hidráulica de captaciones de agua subterránea. In: Hidrología Subterránea, pp. 969-981. Custodio, E. y M. R. Llamas (Eds.). Omega, 2 tomos, 2350 pp.
15. Delgadillo, A. (2015). Proceso de monitoreo de estructuras a través de inclinómetro profunda (Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil). Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú.
16. Diamond Core Drill Manufacturers Association, Inc., (1991). “DCDMA Technical Manual”.
17. Durham Geo Slope Indicator DGSI (2020). USA. Recuperado de <https://durhamgeo.com/product/digitilt-at-system/>

18. Dunicliff, J. (1988). Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. Recuperado de http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_89.pdf
19. Escalaya, M. y Alva, J. (2011). Instrumentación Geotécnica de la presa Pillones. Recuperado de <https://docplayer.es/79050177-INSTRUMENTACIÓN-GEOTÉCNICA-de-la-presa-pillones.html>
20. Fredlund D. G., Rahardjo H. (1993). “Soil Mechanics for Unsaturated Soils”. Wiley, New York.
21. Gonzales, J. (2011). Proceso de Instrumentación Geotécnica para Túneles construidos en Suelos Blandos. (Trabajo de Grado Título ingeniero civil). Universidad Nacional Autónoma de México.
22. Gómez S. (1992). “Metodologías para la Predicción de Movimientos de Masa Asociados con lluvias en Medios Tropicales” VII Jornadas Geotécnicas. SCI, Bogotá.
23. GEOKON. Manual de Instrucciones Modelo 6400. Carcasa del inclinómetro Glue-Snap. Documento revisión (E,5/06/2018).
24. GEOKON. Manual de Instrucciones Serie Modelo 4500. Piezómetro de Cuerda Vibrante. Documento revisión (V7/13).
25. GEOKON. Manual de Instrucciones Modelo LC-2. Registrador de datos de un solo canal. Documento revisión (GG,1/05/2019).
26. GEOKON. Manual de Instrucciones Modelo 4999-12L/LE(LAB3). Tablero pararrayos. Documento revisión (I,18/09/2017).
27. Hunt, R. E. (2007). Geotechnical Investigation Methods. CRC Press.
28. Hvorslev, M. J. (1949). Time lag in the observation of ground-water levels and pressures US Army Waterways Experiment Station, Rept., 68. Vicksburg, MS.
29. Lambe, T. W. y Whitman, R. V. (1981). Mecánica de Suelos (1ra ed.). Editorial Limusa S. A.
30. Lunne, T., Robertson, P. y Powell, J. (1997). Cone penetration testing in geotechnical practice. Recuperado de, <https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=0UxZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Cone+penetration+testing+in+geotechnical+practice+by&ots=hcoj1Is9tK&sig=fm0JbimJqDPHCVMu3J9GbWyhtUE#v=onepage&q=Cone%20penetration%20testing%20in%20geotechnical%20practice%20by&f=false>
31. Rey, M. (2016). Análisis de la instrumentación y del monitoreo geotécnica en túneles estación e interestación del metro de Santiago (Tesis para optar el título profesional de ingeniero civil): Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
32. Rea, W. (2017). Implementación del sistema de monitoreo geotécnica integral para evaluar el comportamiento de taludes en la mina Antapaccay región Cusco (Tesis para optar el título profesional de ingeniero civil). Universidad Cesar Vallejo, Lima, Perú.
33. Suarez, J. (s.f.). Instrumentación y monitoreo. Recuperado de <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico.html>
34. Suarez, J. (s.f.). Investigación de Deslizamientos. Recuperado de <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico.html>
35. Suarez, J. (s.f.). Efecto del agua. Recuperado de <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico.html>

36. Terzaghi, K. (1950). “Mechanisms of Landslides”. Engineering geology (Berkeley). Volumem Geological Society of America. Boulder, CO, November, pp 83-123.

ANEXOS

Anexo A. Matriz de Consistencia

Título: EVALUACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EN LAS ZONAS INESTABLES DE LA PRESA TABLACHACA, HUANCVELICA 2020.						
Problemas	Objetivos	Variable	Dimensión	Indicadores	Técnicas e instrumentos	Tipo de investigación, población y muestra
General	General	Independiente			Técnicas de recolección de datos Observación y Registros Instrumento Google earth-Pro	Tipo de investigación Descriptivo Cuantitativo Aplicada Población Todas las zonas inestables reconocidas por el cliente, total 9 zonas Inestables Muestra Zona N° 1 y N° 2
¿Cuál fue el resultado de la evaluación de la instrumentación geotécnica de las zonas inestables, del embalse aguas arriba de la presa Tablachaca identificados por cliente Electroperú?	Realizar la evaluación de la instrumentación geotécnica de las zonas inestables uno y dos del embalse aguas arriba de la presa Tablachaca, en la región Huancavelica.	Evaluación de la Instrumentación geotécnica				
Específicos	Específicos	Dependiente			Fichas, protocolos, requerimientos cliente y procedimientos Piezómetro de cuerda vibrante VW	
¿De qué forma se pudo establecer el aseguramiento de ensayos geotécnicos con perforación diamantina e instalación de tubería piezométrica e inclinométrica vertical en las zonas inestables N° 1 y N° 2?	Determinar la técnica y procedimiento en el aseguramiento de ensayos geotécnicos con perforación diamantina e instalación de tubería piezométrica e inclinométrica vertical en las zonas inestables N° 1 y N° 2.	Aseguramiento de Ensayos geotécnicos	Técnicas y procedimientos	- Perforación Diamantina. - Instalación de las tuberías piezométricas e inclinométricas verticales		
¿Cómo se determinaría representativamente el coeficiente de permeabilidad del suelo durante la perforación, en las zonas inestables N° 1 y N° 2?	Determinar representativamente el coeficiente de permeabilidad del suelo durante la perforación, mediante el ensayo Lefranc, y de esta forma estimar el tamaño de las partículas y el tipo de suelo en las zonas inestables N° 1 y N° 2.	Permeabilidad del suelo	Representativa	- Coeficiente de permeabilidad K y caracterización del tipo de suelo	Ensayo de Lefranc: Carga Constante Carga Variable	
¿Cuál fue el resultado de establecer la puesta en marcha de la instrumentación geotécnica en las zonas inestables N° 1 y N° 2?	Evaluación de la puesta en marcha de la instrumentación geotécnica de las zonas inestables N° 1 y N° 2, permitiendo continuar con el monitoreo de los niveles freáticos y desplazamientos en el tiempo.	Lecturas y Mediciones de piezómetros de cuerda vibrante e inclinómetros verticales	Interpretación y comprensión de resultados	- Piezómetro de cuerda vibrante. Variación de presión de poros con respecto a Niveles freáticos - Inclinómetro vertical Desplazamiento en el tiempo de la masa inestable	Piezómetro de cuerda vibrante Software Fabricante: GEOKON Nombre: LOGVIEW Inclinómetro vertical Software Fabricante: DGS Nombre: DIGIPRO2	

Fuente: Elaboración propia

Anexo B. a) Tamaños estándar de herramientas tuberías de perforación

Standard Sizes of Drill Tools*

Size	O.D.		I.D.		Weight		Coupling O.D.	
	in.	mm	in.	mm	lb/ft	kg/m	in.	mm
<i>Drill Rods — Flush Coupled</i>								
E ^b	1 5/16	33.3	7/8	22.2	2.7	4.0	7/16	11.1
A ^b	1 5/8	41.3	1 1/4	28.5	3.7	5.7	9/16	14.3
B ^b	1 7/8	47.6	1 1/4	31.7	5.0	7.0	5/8	15.9
N ^b	2 3/8	60.3	2	50.8	5.2	7.5	1	29.4
EW ^c	1 3/8	34.9	15/16	23.8	3.1	4.7	7/16	11.1
AW ^c	1 3/4	44.4	1 1/4	31.8	4.2	6.5	5/8	15.9
BW ^c	2 1/8	54.0	1 3/4	44.5	4.3	6.7	3/4	19.3
NW ^c	2 5/8	66.7	2 1/4	57.1	5.5	8.4	1 3/8	34.9
HW ^c	3 1/2	88.9	3 1/16	77.8	7.7	11.5	2 3/8	60.3
<i>Casing — Flush jointed</i>								
EW	1 13/16	43.0	1 1/2	38.1	2.76	4.2		
AW	2 1/4	57.2	1 29/32	48.4	3.80	5.8		
BW	2 7/8	73.9	2 3/8	60.3	7.00	10.6		
NW	3 1/2	88.9	3	76.2	8.69	13.2		
HW	4 1/2	114.3	4	101.6	11.35	16.9		
PW	5 1/2	139.7	4 7/8	127.0	15.35	22.8		
SW	6 7/8	168.3	6 1/32	152.4	19.49	29.0		
LW	7 5/8	193.7	7	177.8	23.47	34.9		
ZW	8 5/8	219.1	8 3/32	203.2	27.80	41.4		
<i>Casing — Flush Coupled</i>								
EX	1 13/16	46.0	1 5/8	41.3	1.80	2.7	1 1/2	33.1
AX	2 1/4	57.2	2	50.8	2.90	4.4	1 29/32	48.4
BX	2 7/8	73.0	2 9/16	65.1	5.90	8.8	2 3/8	69.3
NX	3 1/2	83.9	5 3/16	81.0	7.80	11.8	3	76.2
HX	4 1/2	114.3	4 1/8	104.8	8.65	13.6	3 15/16	100.0
<i>Casing — Standard Drive Pipe</i>								
2	2 3/8	60.3	2 1/16	52.4	5.5	8.3	2 7/8	73.0
2 1/2	2 7/8	73.0	2 15/32	62.7	9.0	13.6	3 3/8	85.7
3	3 1/2	88.9	3 1/16	77.8	11.5	17.4	4	101.6
3 1/2	4	101.6	3 9/16	90.5	15.5	23.4	4 5/8	117.3
4	4 1/2	114.3	4 1/32	102.4	18.0	27.2	5 3/16	131.8
<i>Casing — Extra Heavy Drive Pipe</i>								
2	2 3/8	60.3	1 15/16	49.2	5.0	7.6	2 7/32	56.4
2 1/2	2 7/8	73.0	2 21/64	59.1	7.7	11.6	2 5/8	66.7
3	3 1/2	88.9	2 29/32	73.8	10.2	15.4	3 1/4	82.5
3 1/2	4	101.6	3 23/64	85.3	12.5	18.9	3 3/4	95.3
4	4 1/2	114.3	3 53/64	97.2	15.0	22.7	4 1/4	107.8

(a)

Fuente: Hunt, R. E. (2007)

Anexo C. b) Tamaños estándar de herramientas tuberías de perforación

Diamond Core Bits

DCDMA Standards Size	Core Diam. (Bit I.D.)		Hole Diam. (Reaming Shell O.D.)	
	in.	mm	in.	mm
EWX and EWM	0.845	21.5	1.485	37.7
AWX and AWM	1.185	30.0	1.890	48.0
BWX and BWM	1.655	42.0	2.360	59.9
NWX and NWM	2.155	54.7	2.930	75.7
2 3/4 in., 3 7/8 in.	2.690	68.3	3.875	98.4
4 in., 5 1/2 in.	3.970	100.8	5.495	139.6
8 in., 7 3/4 in.	5.970	151.6	7.755	196.8
Wireline Size				
AQ	1 1/16	27.0	1 57/64	48.0
BQ	1 7/16	36.5	2 23/64	60.0
NQ	1 7/8	47.6	2 63/64	75.8
HQ	2 1/2	63.5	3 25/32	96.0
PQ	3 11/32	85.0	4 53/64	122.6

- ^a From Diamond Core Drill Manufacturers Association (DCDMA).
^b Original diamond core drill tool designations.
^c Current DCDMA standards.

Fuente: Hunt, R. E. (2007)

Anexo D. Certificado de calibración medidor de caudal Lefranc

2.- INSTRUMENTO DE MEDICIÓN : **MEDIDOR DE CAUDAL**
 Marca : VAE ITALY
 Modelo : NO INDICA
 Serie : 18-05-03652
 División de Escala : x 0,0001 ; x 0,001; x 0,01 ; x 0,1
 1m³ = 1000 L

3.- FECHA Y LUGAR DE MEDICIÓN
 Fecha de Calibración : 2019-04-12
 Lugar de Calibración : Laboratorio de Calibraciones

4.- MÉTODO DE CALIBRACIÓN

Determinación de errores de indicación por el método de comparación directa utilizando patrones certificados por el INACAL. Se tomo como referencia el Procedimiento ME-009 para la calibración de Caudalímetros de gases, CEM-España.

5.- PATRON DE CALIBRACIÓN

INSTRUMENTO	MARCA / MODELO	CERTIFICADO	TRAZABILIDAD
CRONÓMETRO	CASIO HS-80TW	LTF-C-065-2019	DM-INACAL
MANOMETRO	CRYSTAL XP2i	LFP-C-011-2019	DM-INACAL
TERMOHIGROMETRO	LUFFT OPUS 20	LH-078-2018	DM-INACAL

6.- CONDICIONES AMBIENTALES

MAGNITUD	INICIAL	FINAL
TEMPERATURA	23,6 °C	23,8 °C
HUMEDAD RELATIVA	66,1 %	66,4 %

7.- OBSERVACIONES

- * Los resultados de las mediciones efectuadas se muestran a partir de la página 02 del presente documento.
- * El valor indicado del equipo que se muestra en la tabla, es el promedio de 5 valores medidos.
- * La incertidumbre de la medición se determinó con un factor de cobertura $k=2$, para un nivel de confianza aproximado de 95%.
- * Con fines de identificación se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación "CALIBRADO".
- * La periodicidad de la calibración depende del uso, mantenimiento y conservación del instrumento de medición.
- * Se utilizó un cronometro patron para estandarizar el periodo de lectura en el procedimiento ejecutado.

Fuente: CIT.SAI

Anexo E. Certificado de calibración del Sensor torpedo Slope Indicador Dgsi_50332510. El equipo de unidades métricas de Slope Indicador proporciona una precisión del sistema de $\pm 0,25$ mm por lectura, o ± 6 mm acumulados en 50 lecturas, La especificación se derivó empíricamente de una gran cantidad de conjuntos de datos e incluye errores aleatorios y sistemáticos para incrementos de 50 lecturas y una sonda de inclinómetro de 2 pies.

SLOPE INDICATOR						
CALIBRATION CERTIFICATE						
Part No.: 50332510			Serial No.: 1939377			
Date: 01 November 2019 10:06:04			Instrument Constant: 100000			
A axis	Zero Offset = -12		Sensitivity = 0.99994 (Accept $\leq 1.000 \pm 0.001$)			
θ	(Ideal)	+ θ (Rdg)	- θ (Rdg)	Diff.	(Ideal)	Linearity (%FS)* (Accept $\leq \pm 0.02\%$ FS)
30°	50000	49988	-49998	99996	100000	0.002
25°	42262	42264	-42266	84522	84524	0.003
20°	34524	34507	-34508	68405	68404	0.002
15°	26786	26887	-26877	51764	51764	0.003
10°	19048	19170	-19162	34722	34720	0.004
5°	11310	11552	-11544	18196	18289	0.011
0°	3572	13925	-13913	37819	27835	0.005
30°	12187	12180	-12184	24379	24374	0.001
25°	10453	10458	-10450	20908	20906	0.003
20°	8710	8720	-8710	17438	17431	0.006
15°	6976	6981	-6972	13958	13951	0.004
10°	5234	5240	-5231	10477	10467	0.004
5°	3490	3495	-3483	6998	6980	0.002
0°	1745	1750	-1741	3491	3490	0.001
B axis	Zero Offset = -24		Sensitivity = 0.99995 (Accept $\leq 1.000 \pm 0.001$)			
θ	(Ideal)	+ θ (Rdg)	- θ (Rdg)	Diff.	(Ideal)	Linearity (%FS)* (Accept $\leq \pm 0.02\%$ FS)
30°	50000	49992	-49994	99996	100000	0.001
25°	42262	42256	-42264	84519	84524	-0.009
20°	34524	34498	-34500	68403	68404	0.002
15°	26786	26878	-26863	51761	51764	-0.006
10°	19048	19340	-19368	34728	34730	0.000
5°	11310	11645	-11646	18191	18287	0.006
0°	3572	13913	-13922	37835	27835	0.002
30°	12187	12183	-12179	24374	24374	0.001
25°	10453	10453	-10454	20911	20906	0.006
20°	8710	8711	-8720	17421	17431	0.001
15°	6976	6974	-6977	13951	13951	0.000
10°	5234	5227	-5241	10468	10467	0.001
5°	3490	3487	-3495	6982	6980	0.002
0°	1745	1741	-1750	3491	3490	0.001
Repeatability and Hysteresis			A ≤ 0.004 %FS		B ≤ 0.002 %FS (Accept $\leq 0.01\%$ FS)	
θ	A11	A2†	A31	B11	B2†	B31
30°	5038	5036	5036	5039	5038	5039
30°	5038	5067	5046	5048	5059	5054
30°	5036	5095	5097	5098	5087	5087
(*) For linearity calculation, best fit straight line range is 0 to 30°						
CERTIFIED BY: DP						
REMARKS:						
This probe has been calibrated with NIST traceable equipment:						
Device	Model	Serial	Manufacturer	Recert. Date		
Rotary Table	SONCE-3523B11	D9102N89042000	Yaskawa	29 November 2019		

Anexo F. Durante la perforación diamantina e instalación



Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

Anexo G. Durante los ensayos de permeabilidad Lefranc



Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

Anexo H. Durante las mediciones inclinométricas y puesta en marcha



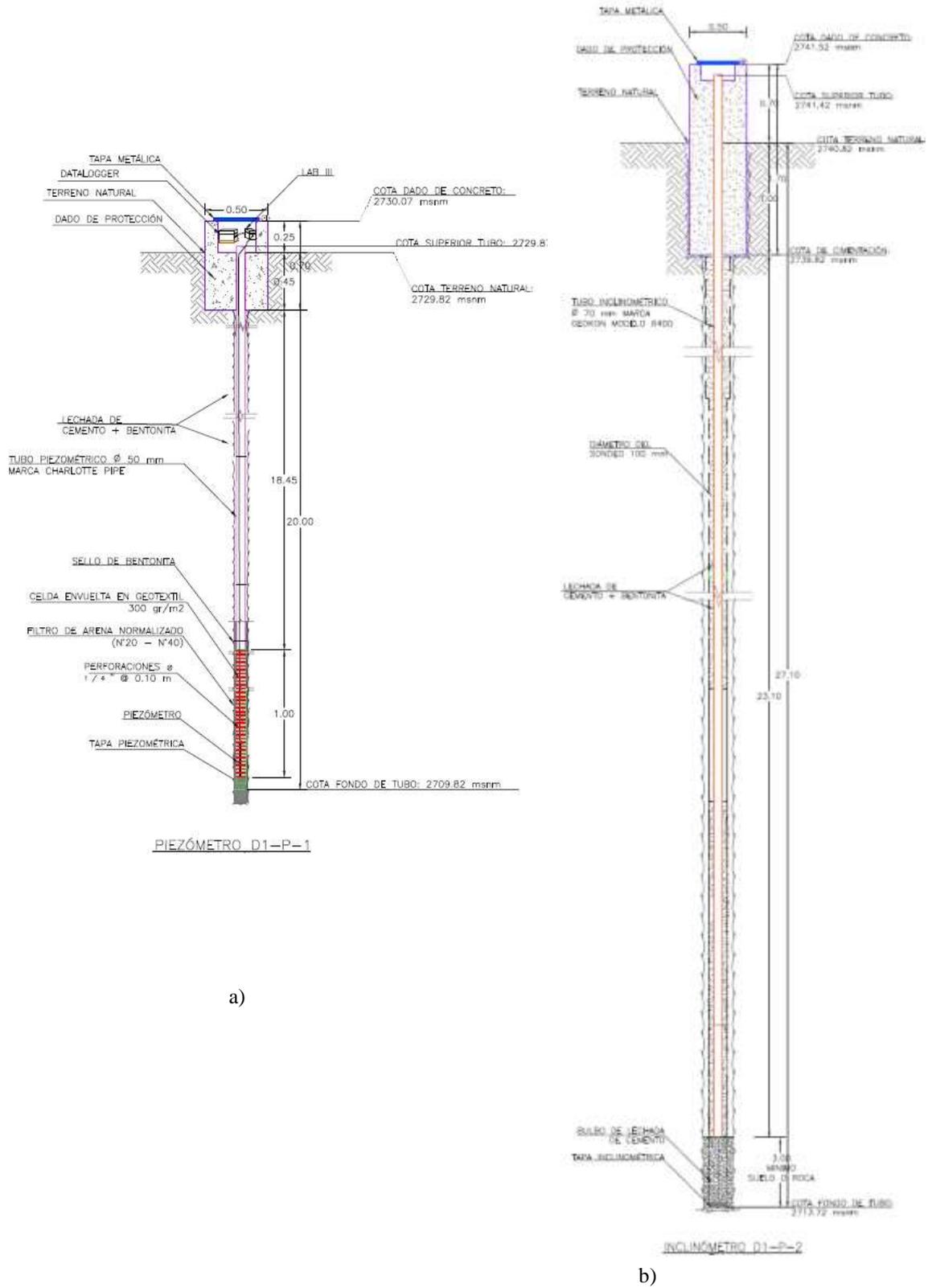
Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

Anexo I. Durante las verificaciones de gabinete



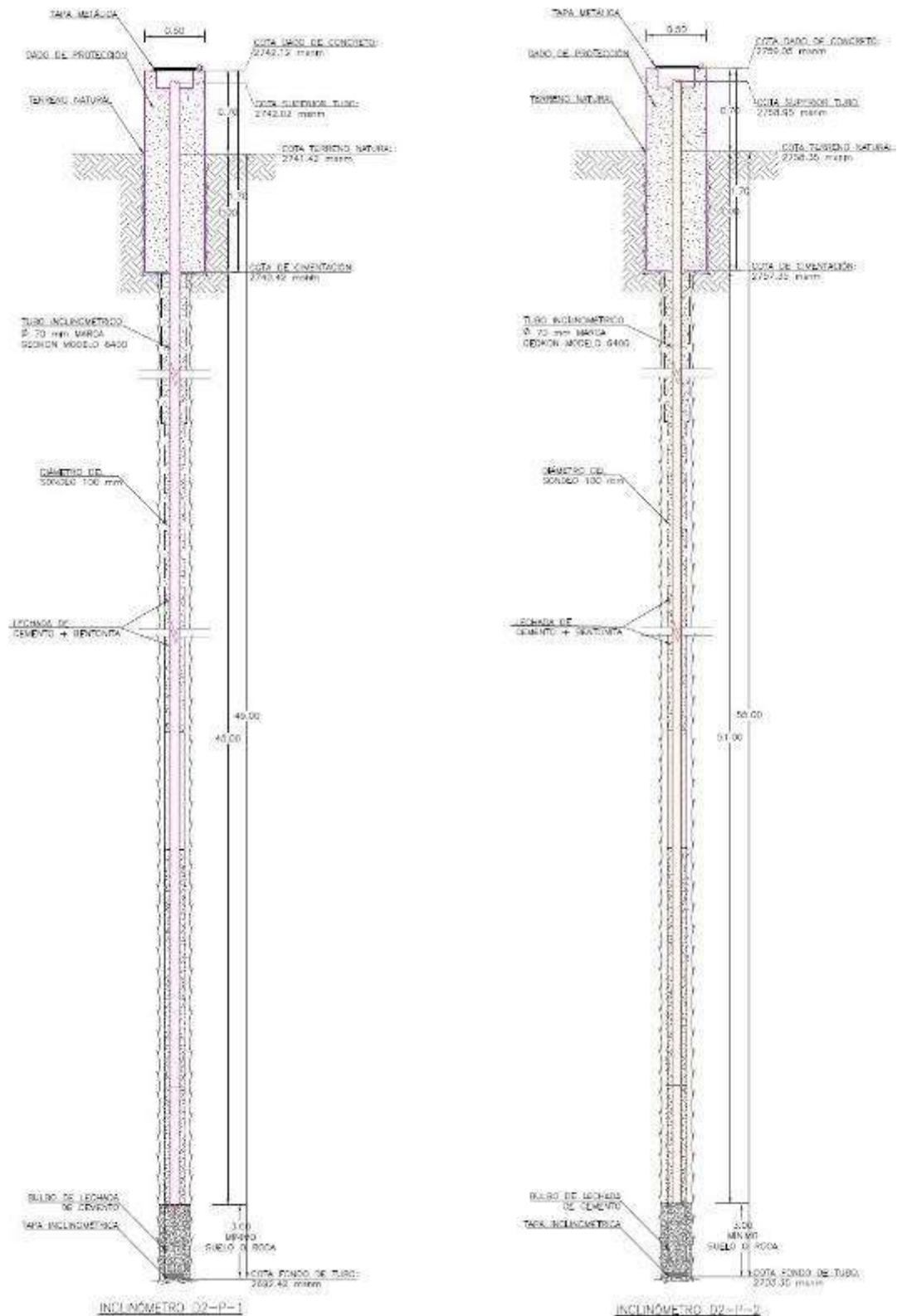
Fuente: Elaboración propia, tomada en campo

Anexo J. a) Piezómetro cuerda vibrante y b) Inclínómetro zona inestable N° 1



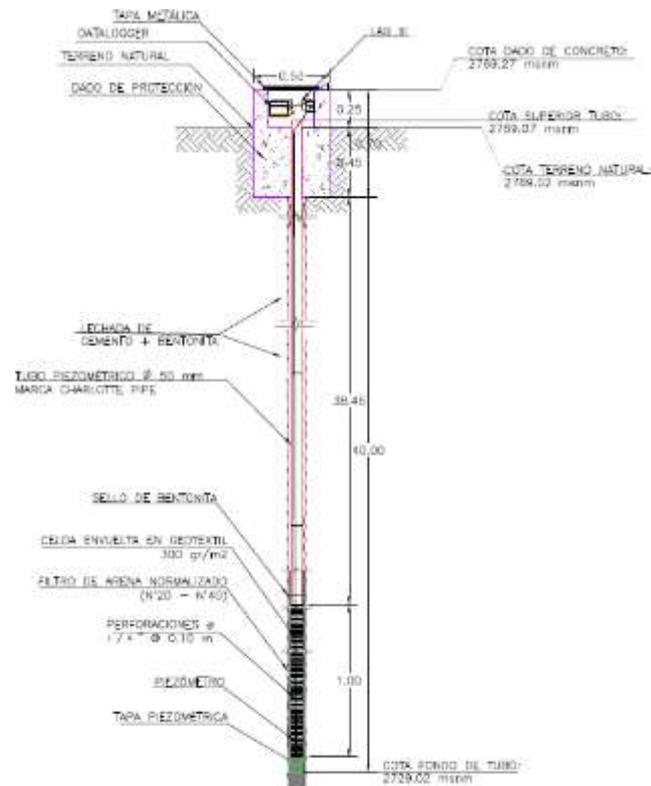
Fuente: SAI

Anexo L. Inclinómetro zona inestable N° 2

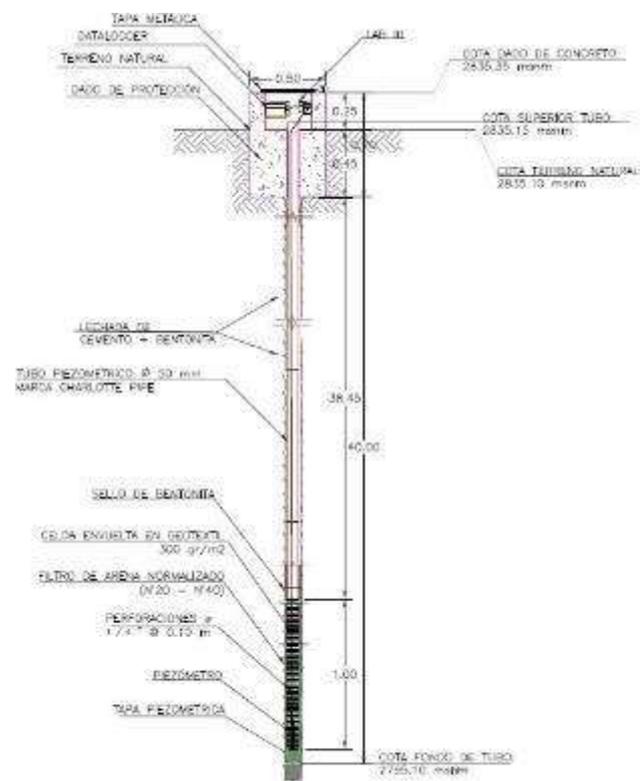


Fuente: SAI

Anexo M. Piezómetro de cuerda vibrante de zona inestable N° 2



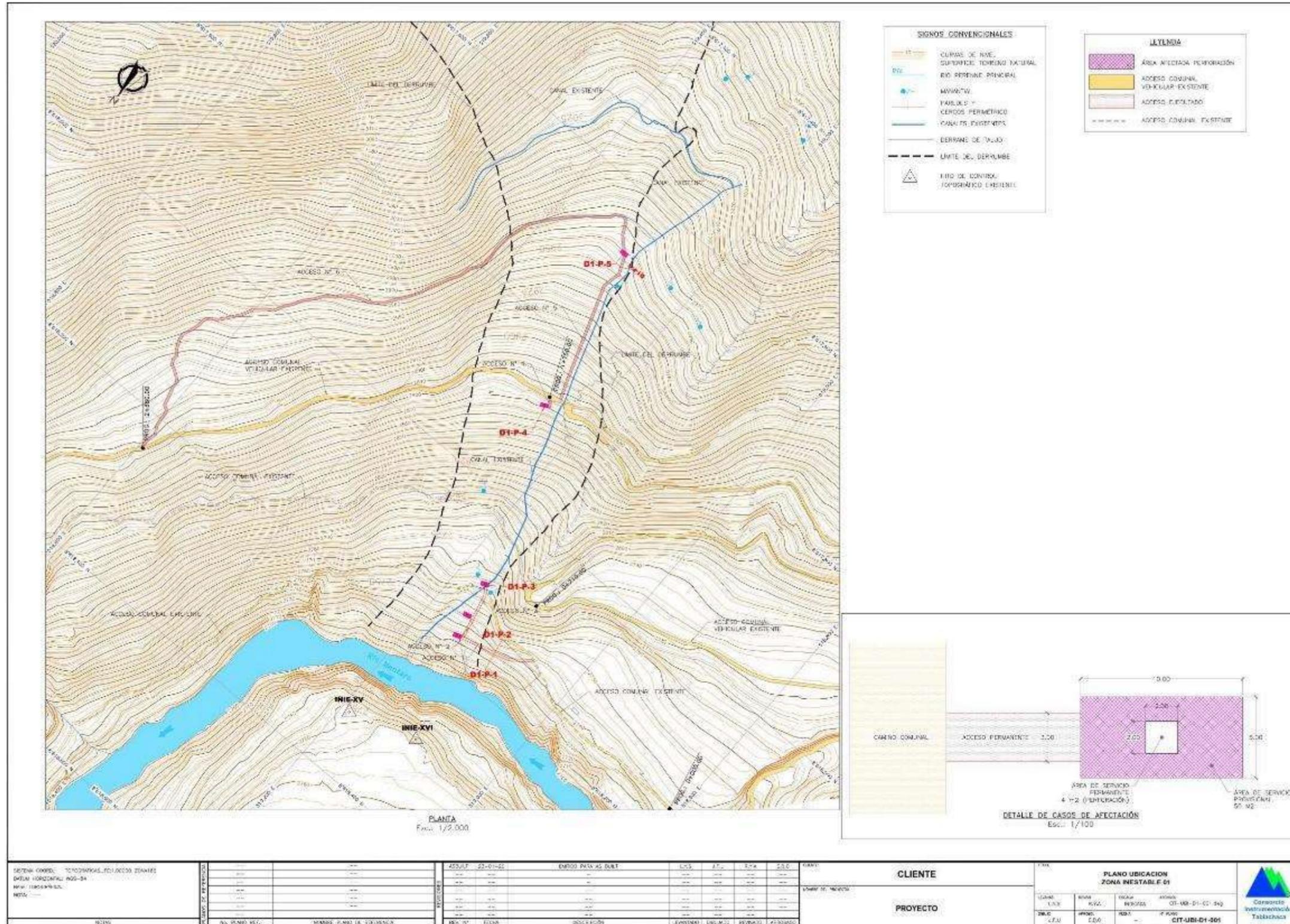
PIEZÓMETRO D2-P-3



PIEZÓMETRO D2-P-4

Fuente : SAI

Anexo N. Plan de ubicación de la zona inestable N° 1



Fuente:SAI

Anexo O. Plan de la zona inestable N°2

