

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Civil

“DESARROLLO DEL INFORME TÉCNICO DE ANÁLISIS DE  
ESTABILIDAD DE DEPÓSITO DE RELAVES MINERO  
UBICADO EN EL DEPARTAMENTO DE PUNO”

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título  
profesional de:

INGENIERO CIVIL

**Autor:**

Brecks Ferdinand Torres Gonzales

Asesor:

Mg. Ing. José Ordoñez Guevara

Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9184-6711>

Lima - Perú

## **DEDICATORIA**

A mis padres, por estar a mi lado, por enseñarme a crecer y a que si tropiezo debo levantarme,  
por apoyarme y guiarme, por ser las bases que me ayudaron a llegar hasta aquí.

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento se dirige a quien ha forjado mi camino y ha dirigido por el sendero correcto, a Dios y a mis padres, que en todo momento están ayudándome a aprender de mis faltas y errores para no volver a cometerlos.

## Tabla de contenidos

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>6</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA .....</b>	<b>39</b>
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS .....</b>	<b>112</b>
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMEDADIONES.....</b>	<b>129</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>133</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>135</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>137</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos de la empresa .....	10
Tabla 2 Coordenadas de Ubicación – Zona 19S .....	41
Tabla 3 Ubicación de las Auscultaciones con el Penetrómetro Dinámico Ligeró – UTM WGS84 – 19S .....	43
Tabla 4 Coordenada de ubicación de las calicatas - Zona 19 S .....	56
Tabla 5 Resumen de datos obtenidos en campo .....	59
Tabla 6 Coordenada de ubicación de los puntos de control.....	61
Tabla 7 Coordenadas de ubicación de las líneas tomográficas. ....	66
Tabla 8 Longitudes de Tomografía Eléctrica.....	70
Tabla 9 Resumen de los parámetros de resistencia.....	73
Tabla 10 Parámetros de validez del Depósito de Relaves Minero.....	73
Tabla 11 Características del material del Depósito de Relaves Minero.....	74
Tabla 12 Definición de anomalías .....	80
Tabla 13 Interpretación para las zonas de terraplén y de revestimiento .....	81
Tabla 14 Parámetros para mapa de isovalores en planta – WGS 84 Zona 19S .....	83
Tabla 15 Niveles piezométricos al 13 de julio de 2020 .....	104
Tabla 16 Parámetros efectivos de Resistencia .....	111
Tabla 17 Resumen de resultado de las auscultaciones con Penetrómetro.....	119
Tabla 18 Análisis de Sensibilidad, parámetro cohesión material “recrecimiento” .....	125

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Organigrama de Clean Technology S.A.C. ....	19
Figura 2 Esquema del equipo PANDA 2.....	21
Figura 3 Principio de control de compactación empleando un penetrómetro dinámico ligero a energía variable 26	
Figura 4 Elementos más relevantes de un UAV multicoptero.....	27
Figura 5 Levantamiento fotogramétrico.....	30
Figura 6 Tipos de Superficies potenciales de falla en deslizamientos rotacionales.....	33
Figura 7 Esquema del análisis de estabilidad de taludes por el método de Fellenius.....	35
Figura 8 Esquema de las fuerzas que actúan en la $\eta^{ma}$ dovela, de acuerdo al método de Fellenius.....	36
Figura 9 Análisis de Estabilidad de Taludes por el Método de Bishop.....	37
Figura 10 Diagrama del factor $f_0$ utilizado en el método de Janbú.....	38
Figura 11 Mapa de ubicación del Depósito de Relaves Minero.....	42
Figura 12 Ubicación de ensayos de Penetración Dinámica Ligera.....	44
Figura 13 Evaluación de campo y condiciones climáticas.....	44
Figura 14 Penetrómetro Dinámico Ligero de Energía Variable modelo Panda.....	45
Figura 15 Instalación final del penetrómetro.....	49
Figura 16 Retiro del tren de barras del suelo.....	49
Figura 17 Ejecución del ensayo EP_1 con el penetrómetro.....	50
Figura 18 Lectura final del ensayo EP_1 con el penetrómetro.....	50
Figura 19 Ejecución del ensayo EP_2 con el penetrómetro.....	51
Figura 20 Lectura final del ensayo EP_2 con el penetrómetro.....	51
Figura 21 Ejecución del ensayo EP_3 con el penetrómetro.....	52
Figura 22 Lectura final del ensayo EP_3 con el penetrómetro.....	52
Figura 23 Ejecución del ensayo EP_4 con el penetrómetro.....	53
Figura 24 Lectura final del ensayo EP_4 con el penetrómetro.....	53
Figura 25 Ejecución del ensayo EP_5 con el penetrómetro.....	54
Figura 26 Lectura final del ensayo EP_5 con el penetrómetro.....	54
Figura 27 Ejecución del ensayo EP_6 con el penetrómetro.....	55
Figura 28 Lectura final del ensayo EP_6 con el penetrómetro.....	55
Figura 29 Ubicación de Calicatas.....	57
Figura 30 Excavación de calicatas con maquinaria.....	59
Figura 31 Vista de la calicata CA-1.....	60
Figura 32 Vista de la calicata CA-4.....	60
Figura 33 Vista de la calicata CA-5.....	61
Figura 34 Ubicación de las dianas.....	62
Figura 35 Colocación de la diana con sus respectivas coordenadas.....	64
Figura 36 Instalación de la base del DRONE.....	65
Figura 37 Inicio del vuelo del DRONE.....	65
Figura 38 Toma de fotos y videos del DRONE en vuelo.....	65

Figura 39 Ubicación de las líneas tomográficas .....	67
Figura 40 Instalación de cable potencial sobre la línea TE-01 .....	71
Figura 41 Ubicación de línea TE-07.....	71
Figura 42 Instalación de electrodo TE-08.....	72
Figura 43 Introducción de los sondeos al software GeoSprint .....	75
Figura 44 Ubicación de los sondeos en coordenadas cartesianas .....	75
Figura 45 Penetrograma el ensayo de campo EP_2.....	77
Figura 46 Terraplén creado del ensayo EP_1 .....	77
Figura 47 Penetrograma del ensayo EP_1 .....	78
Figura 48 Penetrograma característico para un material homogéneo definido .....	82
Figura 49 Alisado del penetrograma del ensayo EP_2 .....	82
Figura 50 Introducción de hoja Excel a ArcGis - Planta .....	83
Figura 51 Cuadro para ordenar los parámetros y la zona de georreferencia.....	84
Figura 52 Interfaz para exportar la data de los ensayos.....	85
Figura 53 Cuadro para guardar el shape de los puntos del ensayo .....	85
Figura 54 Ensayos de compactación georreferenciados en ArcMap .....	86
Figura 55 Visualización de imagen de SAS Planet en la interfaz.....	86
Figura 56 Delimitación de área de influencia .....	87
Figura 57 Cuadro del interfaz de la herramienta IDW.....	87
Figura 58 Cuadro de environment para seleccionar el área de influencia del dique.....	88
Figura 59 Raster de colores según el rango de valores de resistencia qd1 (MPa) .....	89
Figura 60 Cuadro de propiedades para cambiar la transparencia de la imagen TIFF.....	90
Figura 61 Imagen TIFF según el rango de valores de resistencia qd1 (MPa).....	90
Figura 62 Formato Excel para introducir al ArcMap.....	91
Figura 63 Formatos del Data Frame .....	91
Figura 64 Introducción de hoja Excel a ArcGis - Secciones .....	92
Figura 65 Cuadro para ordenar los parámetros y la zona de georreferencia.....	93
Figura 66 Interfaz para exportar la data de los ensayos.....	93
Figura 67 Cuadro para guardar el shape de los puntos del ensayo .....	94
Figura 68 Profundidad de sección del ensayo de compactación georreferenciados en ArcMap .....	94
Figura 69 Área de trabajo de la sección del ensayo de compactación .....	95
Figura 70 Cuadro del interfaz de la herramienta IDW.....	96
Figura 71 Cuadro de environment para seleccionar el área de trabajo de la sección del ensayo .....	96
Figura 72 Interfaz de la imagen TIFF en el polígono creado.....	97
Figura 73 Intervalos de los valores de resistencia qd1 (MPa) .....	97
Figura 74 Sección de isovalores del ensayo de compactación EP_6.....	98
Figura 75 Leyenda generada por los intervalos de los valores de resistencia qd1 (MPa).....	99
Figura 76 Grupo de fotografías tomadas en campo .....	99
Figura 77 Coordenadas de las dianas dejadas en campo .....	100
Figura 78 Interfase del software PhotoScan .....	100

Figura 79 Fotografía de la Diana P7 .....	101
Figura 80 Fotografía de la Diana P6.....	102
Figura 81 Fotografía de la Diana P5 .....	102
Figura 82 Fotografía de la Diana P2.....	103
Figura 83 Vista en planta de los ejes de corte del Depósito de Relaves Minero.....	104
Figura 84 Modelo geotécnico estructural integrado al registro de piezómetros instalados en el depósito de relaves Minero .....	105
Figura 85 Perfil geo eléctrico Sección AA’ del depósito de relaves minero .....	106
Figura 86 Perfil geo eléctrico Sección BB’ del depósito de relaves minero.....	106
Figura 87 Perfil geo eléctrico Sección CC’ del depósito de relaves minero.....	107
Figura 88 Perfil geo eléctrico Sección DD’ del depósito de relaves minero .....	107
Figura 89 Perfil geo eléctrico Sección EE’ del depósito de relaves minero .....	108
Figura 90 Sección de análisis A-A’ .....	108
Figura 91 Sección de análisis B-B’ .....	109
Figura 92 Sección de análisis C-C’ .....	109
Figura 93 Sección de análisis D-D’ .....	110
Figura 94 Sección de análisis E-E’ .....	110
Figura 95 Penetrograma del ensayo EP_1 .....	113
Figura 96 Penetrograma del ensayo EP_2 .....	114
Figura 97 Penetrograma del ensayo EP_3 .....	115
Figura 98 Penetrograma del ensayo EP_4 .....	116
Figura 99 Penetrograma del ensayo EP_5 .....	117
Figura 100 Penetrograma del ensayo EP_6.....	118
Figura 101 Plano de isovalores en planta .....	119
Figura 102 Plano de isovalores en sección .....	120
Figura 103 Superficie topográfica actualizada .....	121
Figura 104 Ortofoto georreferenciada actual.....	121
Figura 105 Análisis de Estabilidad Sección A-A’ – Condición Estática .....	122
Figura 106 Análisis de Estabilidad Sección B-B’ – Condición Estática.....	123
Figura 107 Análisis de Estabilidad Sección C-C’ – Condición Estática.....	123
Figura 108 Análisis de Estabilidad Sección D-D’ – Condición Estática .....	124
Figura 109 Análisis de Estabilidad Sección E-E’ – Condición Estática .....	124
Figura 110 Estabilización Física del depósito de relaves minero en la Sección B-B’, que considera el reforzamiento con un Contrafuerte .....	127
Figura 111 Análisis de Estabilidad Sección B-B’ – Condición Pseudo Estática .....	128
Figura 112 Análisis de Estabilidad Sección B-B’ – Condición Pseudo Estática .....	128

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente Trabajo de Suficiencia Profesional se elaboró mediante mi experiencia en el Proyecto de Actualización del Estudio de Estabilidad Física del Depósito de Relaves minero en Puno, el cual, ejecutó la Empresa de Clean Technology S.A.C. donde desempeñé el cargo de Bach. Ing. Civil y fui el responsable de ejecutar, procesar y analizar los ensayos de compactación con el nuevo equipo Penetrómetro Dinámico Ligero a Energía Variable PANDA.

El objetivo propuesto fue el de verificar, evaluar y determinar las condiciones actuales de estabilidad física del Depósito de Relaves Minero, con el fin de prevenir la ocurrencia de posibles fallas y/o pérdida de su estabilidad física.

Para lograr el objetivo propuesto se planificó el trabajo de campo mediante un cronograma de actividades para ejecutar y culminar satisfactoriamente los Ensayos de compactación, Estudio de Mecánica de Suelos, Estudio geofísicos con tomografía eléctrica y Fotogrametría de vuelo con Dron Phantom 4 RTK. Luego de finalizar los trabajos de campo se procedió a evaluar y analizar los parámetros hallados mediante los softwares GeoSprint y ArcGis (Compactación), Agisoft (Fotogrametría), RES2DINV Geotomo (Geofísica), Rocscience Slide (Análisis de Estabilidad) y Civil 3D (Topografías).

Los resultados obtenidos posterior al procesamiento de datos fueron que en la sección de análisis B-B', este no supera los factores de seguridad mínimos en la condición actual con los datos obtenidos de campo, en conclusión, el depósito de relaves no es estable.

Finalmente, se propone incorporar alrededor de la sección de análisis B-B' un relleno Contrafuerte sobre el talud actual, este además considera dos muros de gaviones con terramesh, ubicados a la mitad del talud y al pie del talud y así logren superar los factores de seguridad mínimos para que aseguren la estabilidad física del depósito de relaves minero.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1. Antecedentes

Clean Technology S.A.C. tiene más de 19 años de experiencia en el desarrollo de estudios de impacto ambiental, se encuentra autorizada y registrada en el SENACE mediante la Resolución Directoral N° 158-2017-SENACE/DRA, para realizar consultoría en el desarrollo de estudios ambientales; asimismo cuenta con autorización para desarrollar Planes de Cierre de Minas mediante R.D. 474-2015-MEM/DGAAM, emitido por el SENACE y Ministerio de Energía y Mina.

Clean Technology S.A.C. es una empresa peruana que brinda servicios de asesoría y consultoría de calidad en temas ambientales, ingeniería y social, a empresas de los Sectores Industria, Minería, Construcción, Energía, Vivienda, Transporte e Hidrocarburos a nivel nacional. Nuestra visión es ser reconocidos por nuestros clientes como el Socio Estratégico en el mercado local e internacional.

Clean Technology S.A.C. cuenta con un equipo de especialistas y consultores de las más variadas disciplinas que han desarrollado investigaciones especializadas en campos de la ingeniería civil, minera y ambiental.

Datos de la empresa

**Tabla 1**

*Datos de la empresa*

RAZON SOCIAL	Clean Technology S.A.C
DOMICILIO LEGAL	Av. De Las Artes Sur N° 607- San Borja-Lima
RUC N°	20503009782
GERENTE GENERAL	Liz Raquel Lazo Corillocla
DNI	20045418
TELEFONO CELULAR	RPC: 997592760, RPM: #945044042

TELEFONO LOCAL	(51-1) 2267406
FICHA REGISTRAL	Partida N° 11315708 del Registro de Personas Jurídicas de la Zona Registral N° IX – Sede Lima

*Nota.* Fuente: Clean Technology S.A.C.

## **2. Objetivos de Sistema Integrado de Gestión**

- Posicionar a Clean Technology S.A.C. frente a sus clientes potenciales, como una Empresa que contribuye a su desarrollo.
- Desarrollar una oferta de valor representada en el costo de nuestros servicios que responda a las necesidades del mercado.
- Disponer de recursos humanos calificados para realizar las actividades de manera continua para lograr la confiabilidad de los resultados de los servicios.
- Contar con los recursos necesarios para mantener y mejorar continuamente el sistema de calidad.
- Implementar de manera continua un sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo, cumpliendo con la legislación vigente de seguridad y salud en el trabajo con la finalidad de proteger la salud y seguridad de todos los miembros de la organización y terceros que estén involucrados con las actividades de Clean Technology S.A.C.
- Velar por el cumplimiento de los estándares ambientales en nuestras operaciones.

## **3. Campo de acción**

### **3.1. Gestión de autorizaciones**

- Autorización de vertimiento.
- Permiso de uso de agua.
- Autorización de ejecución de estudios de aprovechamiento hídrico para obtención de licencia de uso de agua superficial o subterránea.
- Obtención de Certificado de Inexistencia de Restos Arqueológicos (CIRA).

- Planta de Beneficio.
- Inicio de operaciones mineras.
- Certificado de Operación Minera.
- Autorización de uso de explosivos (DISCAMEC)
- Declaración anual de residuos.
- Declaración anual de vertimientos.

### ***3.2. Fiscalización y Supervisión***

- CLEAN TECHNOLOGY S.A.C. se encuentra registrada en el Organismo Superior de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN y OEFA) como empresa Supervisora Externa en los temas de Seguridad e Higiene Minera y Protección y Conservación del Ambiente entre otras obligaciones.

### ***3.3. Estudios Sociales***

- Proponemos soluciones para ampliar las oportunidades de desarrollo integral de la población de influencia directa e indirecta del proyecto. A fin de lograr los objetivos, el primer paso es la búsqueda de la información del entorno, grupos y actores sociales, siendo posteriormente transformada en conocimiento plasmados en el estudio de impacto social.

### ***3.4. Estudios Geotécnicos y Geomecánicos***

- Contamos con experiencia en diseños de geotecnia, investigaciones geotécnicas para excavaciones y cimentaciones de todo tipo de construcciones, análisis de estabilidad de excavaciones superficiales y subterráneas, diseño y modelamiento geomecánico 3D, estudios de estabilidad de taludes y ensayos de campo y laboratorio para los respectivos análisis geotécnicos.

### ***3.5. Instrumentos de Gestión Ambiental***

- Estudios de línea de base ambiental.
- Estudios de impacto ambiental (EIA, EIA<sub>sd</sub>, DIA)

- Planes de cierre.
- Planes de manejo ambiental.
- Planes de remediación ambiental.
- Programas de monitoreo (aire, agua y suelos).
- Estudios de remediación y mitigación ambiental.
- Gestión de residuos.
- Gestión de calidad de aguas 1 calidad de aire/suelos.
- Manejo de recursos naturales y culturales.
- Diseño y evaluación de redes de monitoreo ambiental.
- Diseño e Implementación de Sistemas de Seguridad y Protección en ambientes de trabajo.
- Obtención de permisos y licencias, evaluaciones de impacto social y arqueología.

### ***3.6. Monitoreos Ambientales***

- Monitoreo Ambiental de la Calidad del Aire.
- Monitoreo Ambiental de Calidad de Agua y Efluentes.
- Monitoreo Ambiental de la Calidad del Suelo.
- Monitoreo de Emisiones Atmosféricas, Gases.
- Modelos de Dispersión.
- Monitoreo de Ruido.
- Monitoreos Biológicos e Hidrobiológicos.

### ***3.7. Servicios de Ingeniería***

- Planes de minado y planos de cierre.
- Diseño de componentes industriales.
- Estudios hidrológicos y de hidrogeología.
- Estudios de fotogrametría y levantamiento topográficos con drones.

- Estudios geofísicos y de riesgo sísmico.
- Estudio de ventilación de minas.

#### 4. Misión

Somos una empresa peruana que brinda servicios de asesoría y consultoría de calidad en temas ambientales, ingeniería y social, a empresas de los Sectores Industria, Minería, Construcción, Energía, Vivienda, Transporte e Hidrocarburos a nivel nacional. Buscamos atraer, retener y desarrollo el mejor talento del mercado, así como exceder las expectativas de crecimiento y rentabilidad de nuestros accionistas. Cumpliendo con los estándares de seguridad, preservación del ambiente y responsabilidad social.

#### 5. Visión

Ser reconocidos por nuestros clientes como el Socio Estratégico en el mercado local e internacional por brindar servicios de calidad en ingeniería, construcción civil, geología, geotecnia, estudios ambientales y sociales, con una cultura organizacional basada en la confianza, responsabilidad y conducta ética de nuestros profesionales y la satisfacción de sus accionistas, comprometida con el desarrollo sostenible y con un claro sentido de responsabilidad social.

#### 6. Principios y valores

- **Confianza:** Trabajamos con autonomía porque confiamos en nuestra gente, hacemos nuestro trabajo con convicción y compromiso.
- **Compañerismo:** Nos sentimos una gran familia. Respetamos y valoramos las características y estilos de cada uno. Nos trazamos objetivos comunes y nos apoyamos para lograrlos.
- **Excelencia:** Buscamos la excelencia en todo lo que hacemos, entendiéndola como resultados extraordinarios producto de los altos estándares de calidad, seguridad, salud y medio ambiente de nuestros servicios.

- **Integridad:** Somos consecuentes en lo que pensamos, decimos y hacemos. Nos guiamos por nuestros valores personales y corporativos. Actuamos con la verdad y consultamos con nuestros líderes.
- **Flexibilidad:** Nuestro equipo multidisciplinario y experiencia nos permite adaptarnos a diferentes tipos de problemas y clientes.

## 7. Calidad

Para Clean Technology S.A.C. la calidad es resultado del trabajo planificado y convencido de que se inicia con la comprensión de la necesidad de nuestros clientes. Motivo por el cual, antes de comprometernos con ellos:

- Establecemos los requisitos aplicables y valoramos nuestra capacidad de cumplimiento.
- Planeamos y evidenciamos como vamos a cumplir con los requisitos.

La gestión de la calidad nos compromete a cumplir con los requisitos del cliente, considerando:

- Mejorar en forma continua el servicio de asesoramiento, ingeniería y consultoría ambiental, integrando el conocimiento científico, los cambios tecnológicos y las exigencias de la comunidad para el perfeccionamiento permanente de nuestras herramientas de gestión.
- La participación de todos los niveles de la organización.
- Mejorar en forma continua en relacionamiento con nuestros clientes y exceder sus expectativas de servicios ambientales, ingeniería, profundizando nuestras comunicaciones y el seguimiento de sus nuevos emprendimientos y desarrollos empresariales.
- La toma de decisiones en base a mediciones objetivas y no a percepciones.
- Las relaciones mutuamente beneficiosas con nuestros proveedores.
- Satisfacer las necesidades de nuestros clientes a partir del conocimiento de sus necesidades y el desarrollo de un relacionamiento de cooperación estable con objetivos comunes.

## 8. Responsabilidad social

Partiendo del hecho que todo proyecto empresarial genera impactos ambientales y sociales directos, ofrecemos nuestra experiencia en la implementación de estrategias de corto y largo plazo para mantener la armonía con su entorno social.

Proponemos soluciones para ampliar las oportunidades de desarrollo integral de la población de influencia directa e indirecta del proyecto.

## **9. Sistema de gestión**

Clean Technology S.A.C. es una empresa peruana, dedicada a aportar soluciones a sus clientes, realizando servicios de ingeniería, consultoría ambiental, de seguridad, salud ocupacional e inspecciones técnicas especializadas, bajo rigurosos estándares de calidad. Para realizar estas actividades comienza planificando en gabinete las tareas asignadas, luego controlando los procesos y tiempos de las actividades y supervisando la correcta ejecución de estas. En su proceso de mejora continua ha implementado en su Sistema de Gestión Políticas de Calidad, Política de Seguridad y Salud Ocupacional en el trabajo, Políticas de Medio Ambiente y Planes de Contingencia para realizar los trabajos en condiciones óptimas y seguras.

## **10. Relación de proyectos ejecutados**

- PROYECTO:

“Monitoreo Ambiental 2017-2018 de las Centrales de Generación de HIDRANDINA S.A., y la elaboración del Informe Anual 2017 sobre el cumplimiento de la Legislación Ambiental vigente”

ENTIDAD FINANCIERA: HIDRANDINA S.A.

MONTO CONTRATADO: S/. 71,689.72

FECHA DE ENTREGA: 30 de agosto del 2018

- PROYECTO:

“Diseño del Depósito de Relaves - Proyecto Julia - 80 TPD”

ENTIDAD FINANCIERA: COMPAÑÍA MINERA SUMAC QAPAQ E.I.R.L

MONTO CONTRATADO: \$50,000.00

FECHA DE ENTREGA: 30 de setiembre del 2017

- PROYECTO:

“Cuarta Modificación del Plan de Cierre de Minas de la Unidad Minera Aruntani”

ENTIDAD FINANCIERA: ARUNTANI S.A.C.

MONTO CONTRATADO: \$22,000.00

FECHA DE ENTREGA: 30 de setiembre del 2017

- PROYECTO:

“Monitoreo de ECA de suelos-elaboración del informe de identificación de sitios contaminados en las instalaciones de HIDRANDINA S.A.”

ENTIDAD FINANCIERA: HIDRANDINA S.A.

MONTO CONTRATADO: S/. 287,160.02

FECHA DE ENTREGA: 30 de junio del 2017

- PROYECTO:

“Plan de Minado del Proyecto Cruz de Oro”

ENTIDAD FINANCIERA: Cruz de Oro S.A.C.

MONTO CONTRATADO: \$ 42,276.00

FECHA DE ENTREGA: 21 de mayo del 2017

- PROYECTO:

“Estudio de Selección de Área”, “Evaluación Ambiental Preliminar (EVAP) y Estudio de Impacto Ambiental Semidetallado (EIA sd)”, “Diseño de Ingeniería del Relleno de Seguridad”, “Monitoreo de calidad (agua, aire, ruido y aire) del área del Proyecto”, Estudio Hidrológico e Hidrogeológico Conceptual del Proyecto”, “Levantamiento topográfico del área del Proyecto” y “Elaboración del Estudio Geotécnico y Geológico del área del Proyecto”

ENTIDAD FINANCIERA: ECO SOLUTIONS S.A.C.

MONTO CONTRATADO: S/. 115,227.00

FECHA DE ENTREGA: 5 de junio del 2017

- PROYECTO:

“Contratación de servicio de alquiler de instrumentos de medición para Supervisión de Ventilación de Mina Subterránea”

ENTIDAD FINANCIERA: OSINERGMIN

MONTO CONTRATADO: S/. 80.000.00

- PROYECTO:

“Modificación del Plan de Cierre de Minas de la Ex Unidad Carolina N°1”

ENTIDAD FINANCIERA: SOCIEDAD MINERA CORONA S.A.

MONTO CONTRATADO: \$ 34,114.00

FECHA DE ENTREGA: 30 de mayo del 2017

- PROYECTO:

“Elaboración del Plan de Compensación Ambiental e Informe que incluye medidas de Manejo Ambiental a implementar en la operación de Línea de Transmisión en 60 kV S.E. Pomabamba – S.E. Huari, incluida la Subestación Huari”

ENTIDAD FINANCIERA: HIDRANDINA S.A.

MONTO CONTRATADO: S/. 19,800.00

FECHA DE ENTREGA: 22 de setiembre del 2017

## **11. Experiencia profesional en la empresa**

El presente informe tiene como objetivo dar a conocer el desarrollo de mis funciones y actividades laborales como Bachiller de Ingeniería Civil en el Área Técnica de la empresa Clean Technology S.A.C. Esta área esta encargada de desarrollar los trabajos de ingeniería enfocadas en la rama de geotécnica, hidrología, topografía y minas.

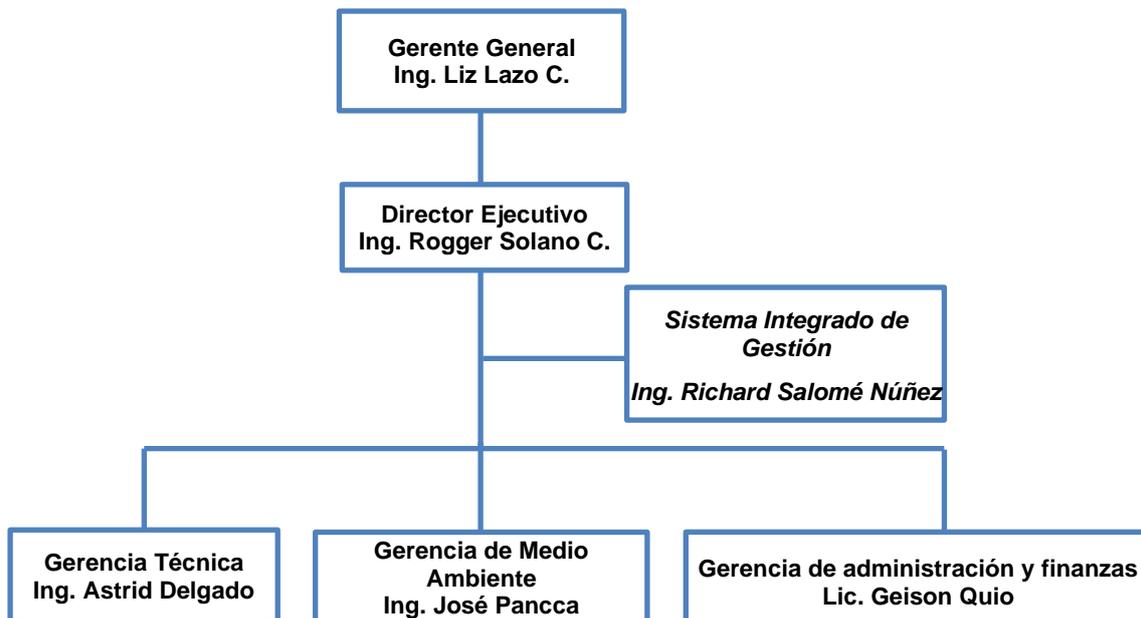
Las actividades que realizo dentro de la empresa se vinculan a la carrera de Ingeniería Civil, por lo que aplico lo aprendido en mi vida de estudiante de ingeniería demostrando conocimiento, destreza e iniciativa al momento de desarrollar o liderar proyectos.

En el área técnica tengo el cargo de Especialista 1 para desarrollar y las funciones que desempeño son las siguientes: diseño coronación y derivación para componentes mineros, elaboración de costos y presupuesto para cierres de minas, metrados de componentes mineros, elaboración de cronogramas de ejecución de actividades, elaboración de Propuestas técnicas y económicas para licitaciones, Supervisor S3 de campo para fiscalizaciones mineras por parte de Osinergmin y Responsable de ensayos de compactación en campo.

## 12. Organigrama

**Figura 1**

*Organigrama de Clean Technology S.A.C.*



*Nota.* Fuente: Clean Technology S.A.C.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 1. Compactación

Según Armas y Gonzales (2008) en su publicación “Criterios sobre la compactación de suelos y el control de calidad de terraplenes” concluyó que se define la compactación como un proceso mecánico (energía) con el cual se obtiene una disminución del índice de poros,  $e$ , y un incremento del peso específico seco,  $\gamma_d$ , de cualquier suelo. Se parece a la consolidación por cuanto disminuye el índice de poros, pero la diferencia entre ambos es que la consolidación es un proceso natural, que es función del tiempo que se aplica la carga y que genera la expulsión de aire y agua de los poros del suelo.

#### *1.1. Penetrómetro Dinámico Ligero a Energía Variable*

Según Lopez, Benz y Moustan (2019) en su publicación “Comparación de los ensayos de penetración de cono dinámico (DCP) y penetrómetro de cono dinámico de energía variable PANDA®” concluyo que los ensayos de penetración dinámica justifican su fundamento de análisis en la penetración que produce una punta al hincarla en el suelo, mediante la acción de una masa de golpeo, la cual puede ser constante o variable. El empleo del penetrómetro dinámico PANDA, ha sido diverso, siendo empleado principalmente para el control de obras de infraestructura vial, control geotécnico de estructuras mineras, caracterización geotécnica de suelos y más actualmente en análisis de suelos agrícolas.

El Penetrómetro Dinámico Ligero de Energía Variable PANDA XP P 94-105 es un penetrómetro ampliamente usado en Francia y es cada vez más empleado en el resto de Europa y algunos países de Asia y Sudamérica. (AFNOR, 2000)

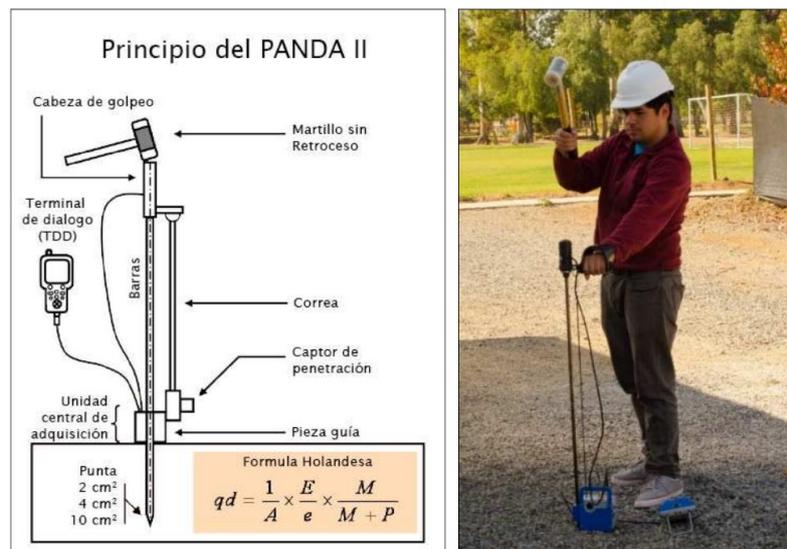
Debido a que basa su funcionamiento en hinca mediante energía variable, el equipo permite la ejecución de ensayos de penetración en suelos con densidades en las cual el equipo DCP no es aplicable, por lo que su empleo se ha masificado a otras áreas de la

ingeniería tales como la minería, análisis de estabilidad de suelos, caracterización geomecánica de suelos, entre otras aplicaciones. (Lopez, Benz y Moustan, 2019)

El equipo PANDA es un penetrómetro que mide la resistencia del suelo a la penetración inducida por una punta cónica de 2, 4 y hasta 10 cm<sup>2</sup>. Es accionado mediante el golpe de un martillo sobre un cabezal instrumentado con captores especialmente dispuestos para la medición la energía de cada golpe. El cabezal es colocado en un tren de barras. Los datos son almacenados en un equipo de registro y análisis de datos (TDD) que nos permite la visualización y análisis de los resultados de forma inmediata (Lopez, Benz y Moustan, 2019).

**Figura 2**

*Esquema del equipo PANDA 2*



*Nota.* Fuente: Comparación de los ensayos de penetración de cono dinámico (DCP) y penetrómetro de cono dinámico de energía variable PANDA® (p. 1555), por Lopez, Benz y Moustan, 2019.

Cada golpe ejecutado durante el sondeo para el hincado de la punta (e), genera una energía que es registrada y procesada de forma inmediata. Estos datos nos permiten calcular la resistencia dinámica de punta mediante la fórmula holandés de hincado donde

$e$  = Penetración de punta,  $A$  = sección de punta,  $M$  = Masa del martillo,  $P$  = Masa del conjunto hincado (penetrómetro: punta, barra y cabezal) y  $V$  = Velocidad de impacto.  
(Frazer, 1971)

## ***1.2. Control de compactación con penetrómetro dinámico ligero***

Según el Instituto Nacional de Normalización INN Chile (2012), los penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable son una buena alternativa para verificar el control de compactación de depósitos de relaves, mientras estos se encuentren en la fase de operación o construcción.

El uso de los penetrómetros dinámicos ligeros tiene como finalidad determinar el grado de compactación resultante del proceso empleado, para la construcción de un depósito de relaves. (INN Chile, 2012)

Con penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante, el martillo de masa normalizada impacta a la cabeza de golpeo desde una altura de caída constante, generando una energía de hincado teóricamente constante. De esta forma se obtiene la resistencia del suelo a la penetración, expresada como el índice de resistencia a la penetración ( $N$ ), que corresponde al número de golpes promedio necesarios para penetrar un intervalo de profundidad previamente establecido, dependiendo del tipo de equipamiento empleado. (INN Chile, 2012)

Según el Instituto Nacional de Normalización INN Chile (2012) en depósitos de relaves los penetrómetros dinámicos ligeros se pueden emplear para:

- a) control de calidad, control de compactación de una capa recientemente compactada;
- b) control de aseguramiento, control de compactación post-construcción en profundidad de un conjunto de capas compactadas. Este control sólo es aplicable utilizando penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable;

- c) en el caso de realizar controles de compactación a profundidades que superen el alcance de un penetrómetro en particular, se deberá realizar una excavación o antepozo que nos permita alcanzar la profundidad necesaria.

### ***1.3. Realización del ensayo con penetrómetro dinámico ligero***

#### **1.3.1. Preparación del ensayo**

Según el Instituto Nacional de Normalización INN Chile (2012) se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones para realizar el ensayo.

##### ***1.3.1.1. Inspección visual***

Según el Instituto Nacional de Normalización INN Chile (2012) antes de comenzar el ensayo se deben realizar las siguientes verificaciones:

- a) examen visual de la rectitud de las barras a emplear en el ensayo;
- b) angularidad de las puntas seleccionadas;
- c) estado óptimo de los hilos extremos de las barras.

##### ***1.3.1.2. Posicionamiento de los puntos de ensayo***

Según el Instituto Nacional de Normalización INN Chile (2012) el posicionamiento de los puntos de ensayo se debe definir considerando un sistema de referencia fijo, existente en el muro resistente de un depósito de relaves (por ejemplo, sistema de empalizado o estacado fijo) o bien mediante el empleo de algún sistema de geo-referenciación.

##### ***1.3.1.3. Estado particular de la capa a controlar***

Según el Instituto Nacional de Normalización INN Chile (2012) en el caso que las capas a controlar presenten una condición irregular, producto de la culminación del proceso de compactación, antes de ejecutar el ensayo se debe excavar un antepozo y proceder a nivelar con el objeto de obtener una superficie horizontal.

#### **1.3.2. Ensayo**

a) Ejecución del proceso de hincado

Según el Instituto Nacional de Normalización INN Chile (2012) para la correcta ejecución del proceso de hincado se deben verificar los aspectos siguientes:

- que la barra portapunta se encuentre en la dirección del ensayo después de cada adición de una barra y durante el proceso de hincado. En el caso que la barra pierda su verticalidad, el ensayo se detiene y se reinicia en un punto cercano. La inclinación máxima aceptada es de  $10^\circ$  con relación a la dirección establecida al inicio del ensayo;
- que las barras sean correctamente atornilladas hasta su bloqueo;
- que, en el caso de los penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable, la energía de hincado sea controlada de tal manera que la penetración por golpe se encuentre entre el rango de 0,10 cm y 2 cm;

b) Detención del hincado

Según el Instituto Nacional de Normalización INN Chile (2012) el hincado se detiene cuando se alcanza alguna de las condiciones siguientes:

- una vez que se alcanza la profundidad máxima de penetración previamente establecida;
- en un punto duro, la penetración máxima por golpe es menor que 1 mm durante cinco golpes consecutivos, para el caso de penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable;

c) Inspección visual posterior al ensayo

Según el Instituto Nacional de Normalización INN Chile (2012) luego de la extracción del tren de barras del suelo, examinar visualmente la correcta rectitud de las barras, estado de los extremos de las barras y de los hilos, además del atornillado.

### 1.3.3. Resultados

### ***1.3.3.1. Trazado del penetrograma***

Para el trazado del penetrograma, la escala vertical descendente está graduada en unidades de longitud (metros o centímetros), con graduaciones intermediarias adaptadas a la profundidad máxima de ensayo. La escala horizontal de la resistencia dinámica de punta ( $q$ ) es logarítmica y creciente de derecha a izquierda. (INN Chile, 2012)

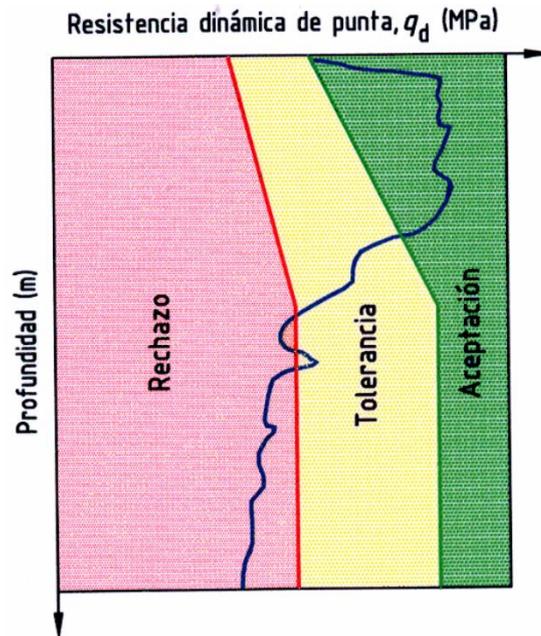
### **1.3.4. Interpretación de los resultados**

El grado de compactación que resulta de la metodología y proceso de construcción empleado cumplirá con las especificaciones técnicas previamente establecidas, dependiendo de su posición en relación a las curvas de valor límite de resistencia dinámica de punta ( $qdL$ ) y del valor de referencia de resistencia dinámica de punta ( $qdR$ ). Para tal efecto se definen las tres zonas siguientes: de aceptación, de tolerancia y de rechazo. (INN Chile, 2012)

- a) zona de aceptación, se encuentra a la derecha de la curva de valor de referencia de resistencia dinámica de punta ( $qdR$ ). Si el penetrograma se encuentra en esta zona el grado de compactación es mayor o igual que el valor especificado.
- b) zona de tolerancia, está comprendida entre valor límite de resistencia dinámica de punta ( $qdL$ ) y el valor referencia de resistencia dinámica de punta ( $qdR$ ). Si el penetrograma se encuentra en esta zona el grado de compactación se considera adecuado.
- c) zona de rechazo, se encuentra a la izquierda de la curva de valor de referencia de resistencia dinámica de punta ( $qdR$ ). Si el penetrograma es inferior al valor límite de resistencia dinámica de punta ( $qdL$ ) el grado de compactación es insuficiente.

**Figura 3**

*Principio de control de compactación empleando un penetrómetro dinámico ligero a energía variable*



*Nota.* Fuente: Deposito de Relaves - Control de compactación con penetrómetro dinámico ligero (p. 19), por Instituto Nacional de Normalización de Chile, 2012.

## 2. Vuelo con Drones

### 2.1. Uso de Drones

Según Del Río et al. (2020) en su artículo “Análisis comparativo de levantamiento topográfico tradicional y tecnología de Drones” concluyo que, los estudios fotogramétricos con el uso de drones han representado un apoyo significativo, debido a que, en materia de tiempo y costos es relativamente inferior a un levantamiento topográfico, en consecuencia, de esta forma genera productos geospaciales de gran precisión y contenido.

Según Ruiz, Corominas y Hürlimann (2017) en su artículo “Experiencias con drones para el estudio de movimientos de ladera” concluyo que, el uso de los drones para la obtención de fotografías, en conjunto con las técnicas recientes de fotogrametría digital, permiten la generación y obtención de una diversa variedad de productos cartográficos,

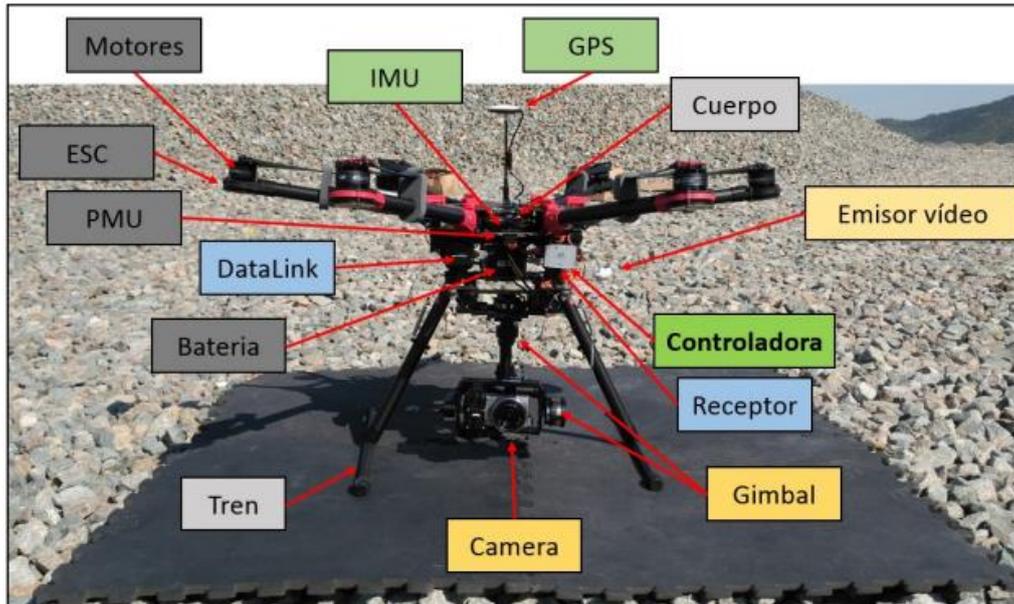
geométricos y gráficos que facilitan el estudio en ciencias e ingenierías del entorno físico. La baja altura de vuelo permite altas resoluciones y la obtención de ortofotos de muy buena calidad con la periodicidad deseada. Además de ortofotos de gran calidad, se obtiene una nube de puntos 3D, una malla 3D texturizada y un modelo de elevaciones del terreno en formato raster del que se pueden generar curvas de nivel, perfiles del terreno, mapas de pendientes, de orientaciones, etc. A partir de la nube de puntos se pueden generar subproductos como nubes de puntos por orientación, buzamiento, o tratamientos geométricos sobre las nubes de puntos como la medida de distancias euclidianas en 3D, o separando las componentes X, Y y Z, así como la medida de áreas, volúmenes, o la generación de perfiles del terreno.

## ***2.2. Conceptos generales de drones y fotogrametría***

Según Ruiz, Corominas y Hürlimann (2017) en su artículo “Experiencias con drones para el estudio de movimientos de ladera” concluyo que, existen dos grandes tipologías de drones: los de ala fija y los multirrotores. Los multirrotores, aunque tienen menor tiempo de vuelo que los de ala fija, pueden ser preferibles al poder mantenerse quietos en el aire y trasladarse lateralmente realizando fotografías frontales y oblicuas, además de las cenitales.

### **Figura 4**

*Elementos más relevantes de un UAV multicóptero*



*Nota.* Fuente: Experiencias con Drones para el Estudio de movimientos de ladera (p. 582) por Ruiz, Corominas y Hürlimann, 2017.

Un sistema receptor permite pilotear a través de una emisora programable de 2,4 GHz, mientras que un segundo sistema de comunicación (como el DataLink), permite el control para vuelos que se programan desde un ordenador o una Tablet. Finalmente, la cámara o sensor que se desee utilizar será la pieza más importante del dron, siendo esta la fuente para obtener la información. Por este motivo, otro factor importante es el estabilizador de 3 ejes de la cámara (Gimbal). (Ruiz et al., 2017)

La fotogrametría es la técnica cuyo objetivo es el determinar las dimensiones y posición de objetos en el espacio a partir de imágenes fotográficas, esto se obtiene mediante las medidas ejecutadas a partir de la intersección de dos o más fotografías, por medio de la fotogrametría se puede obtener modelos digitales de la zona de estudio que pueden ser utilizados para el diseño de vías. (Del Río et al.,2020)

Los programas de tratamiento de imágenes mediante fotogrametría digital, como el VisualSFM, Agisoft PhotoScan, PIX4D, Accute3D u otros, permiten la generación de una gran cantidad de información espacial. Todos ellos dependen de la calidad de las

imágenes, de su enfoque, claridad, y dependiendo de la distancia al objeto, la distancia focal y la dimensión del sensor se obtendrán distintas resoluciones. (Thoeni et al 2014)

La baja altitud de vuelo, menor a los 120 metros sobre el suelo por ley, permite unas resoluciones muy altas, con valores típicos de 3 cm/px a dicha altura (considerando un sensor de 18mm de ancho, con una distancia focal de 15mm e imágenes de 4608 píxeles de ancho). A menor distancia del objeto, la resolución aumenta, con 1 cm/px a 40 metros del objeto de estudio (por ejemplo). La altura de vuelo se debe combinar con la velocidad del vuelo y la frecuencia temporal de disparo para garantizar un correcto solapamiento entre imágenes para permitir la corrección fotogramétrica entre pares de imágenes. (Ruiz et al., 2017)

Además, la escala y la georreferenciación del modelo no se deberían dejar depender exclusivamente de los datos del GPS del dron, con errores de entre 1 a 10 metros en el posicionamiento final del modelo. Dependiendo de la resolución de interés en función de cada caso, se puede considerar oportuno conseguir errores de posicionamiento entre 1 y 5 cm o inferiores. Para ello es necesario utilizar puntos de control de coordenadas conocidas con forma de dianas que puedan ser bien identificadas en las fotografías y de las que se midan sus coordenados con precisión con estación total o GPS-RTK. (Ruiz et al., 2017)

Según Del Rio et al. (2020) en su artículo “Análisis comparativo de levantamiento topográfico tradicional y tecnología de Drones” concluyo que la misión del vuelo fotogramétrico tiene por objeto, el sobrevolar la zona a una altura y velocidad constante, describiendo una serie de trayectorias paralelas entre sí, mediante su control de deriva

Dentro de una pasada, la cámara tomará exposiciones de tal modo que las fotografías cuenten con un traslape considerable para poder realizar la reconstrucción del terreno a medir, esto es, se tendrá un recubrimiento longitudinal prefijado entre

fotogramas adyacentes entre dos pasadas o vuelos consecutivos, generalmente voladas en sentido inverso, existirá otro solape o recubrimiento transversal, previamente fijado, ver la siguiente figura. (Del Río et al.,2020).

## Figura 5

### *Levantamiento fotogramétrico*



*Nota.* Fuente: Análisis comparativo de levantamiento topográfico tradicional y tecnología de Drones (p. 4), por Del Rio et al. 2020.

## 3. Estabilidad de taludes

### 3.1. Nivel freático

Según Flores et al. (2003) en su artículo “Efecto del flujo del agua en la estabilidad de taludes” concluyo que, existen numerosos casos prácticos donde es necesario conocer el efecto de la presencia y flujo del agua en la estabilidad de los taludes de material térreo. Estos taludes pueden ser naturales, tales como los que se tienen en las laderas del vaso de una presa o pueden ser artificiales, como los que se construyen en los terraplenes para una cortina o bordo de una presa.

Los efectos del flujo del agua en los taludes pueden ser:

- a) Erosión interna (tubificación) por remoción o disolución de las partículas de suelo, que puede originar conductos de agua que, al agrandarse rápidamente, pueden dar lugar a una falla de la cortina.
- b) Aumento en las presiones del agua, que conducirá a la disminución de los esfuerzos efectivos y, por tanto, merma de la resistencia al esfuerzo cortante disponible del suelo.
- c) Incremento de las fuerzas de flujo que, aunadas a la mengua del peso propio del suelo, pueden hacer que el factor de seguridad disminuya significativamente hasta alcanzar la falla del terraplén.

### ***3.2. Efectos Ambientales de Fallas de Taludes***

Los Efectos ambientales de una falla de talud constan tanto de efectos directos como indirectos. Los efectos directos comprenden la pérdida inmediata de vida humana, y la destrucción de toda estructura, ya sea vida animal o vegetal por el paso de los relaves y/o desechos liberados. (Rennat y Miller, 1997)

Los efectos indirectos incluyen daños aparentemente menores al medio ambiente. La falla de un depósito de desecho en un cuerpo de agua puede causar también la destrucción de la vida acuática. Asimismo, la falla de taludes en el terreno puede ocasionar impacto a largo plazo en el crecimiento de vegetación y afectar desfavorablemente la calidad de agua subterránea en el área de la falla. (Rennat y Miller, 1997)

### ***3.3. Investigaciones del sitio***

Según Rennat y Miller (1997) en la “Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina” definió los principales objetivos de las investigaciones detalladas deberían incluir que se determine lo siguiente:

- La geología del sitio tanto de depósitos superficiales como de lecho de roca. Esto debería incluir estratigrafía detallada de suelo y de lecho de roca, proporcionando profundidad, espesor, continuidad y composición de cada estrato significativo y un historial de deposición y de erosión;
- La hidrogeología del sitio, incluyendo: definición de acuíferos y acuiclusas, determinar la conductividad hidráulica; determinar sistemas de flujo subterráneo tanto local como regional;
- Las propiedades geotécnicas del suelo y estratos de roca que pueden afectar el diseño de la estructura de la represa de desecho;
- La disponibilidad de materiales de construcción adecuados para la construcción de presas o diques y revestimientos impermeables.

### ***3.4. Análisis de Estabilidad***

Según Sanhueza y Rodríguez (2012) en su artículo “Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales” concluyo que, en general, la estabilidad del talud está determinada por factores geométricos, como su altura e inclinación; factores geológicos; hidrogeológicos; y geotécnicos. De esta manera, la combinación de los 4 factores anteriores puede determinar la condición de rotura del terreno en algún tipo de superficie, permitiendo el movimiento de la masa contenida en dicha superficie.

Por ello, el análisis de la estabilidad de una ladera o talud natural reviste gran importancia al momento de considerar una futura construcción en su entorno. Conocidos son los casos, a nivel nacional e internacional, de desastres ocurridos y que involucran vidas humanas cuando no se han efectuado los análisis correspondientes, que, dependiendo de sus resultados, permitirían tomar medidas correctivas o de estabilización de taludes. (Sanhueza y Rodríguez, 2012)

### ***3.5. Movimientos del terreno***

La forma de clasificar los distintos movimientos de masas de tierra depende si se trata de suelos o rocas. Por otra parte, en estas clasificaciones se considera el mecanismo y tipo de rotura, conjuntamente con otros aspectos, tales como el contenido de agua en el terreno, la velocidad y magnitud del movimiento, entre otros. Los tipos de movimientos se pueden clasificar en: deslizamientos, flujos y desprendimientos. (Sanhueza y Rodríguez, 2012)

### ***3.6. Superficie de rotura en un deslizamiento rotacional***

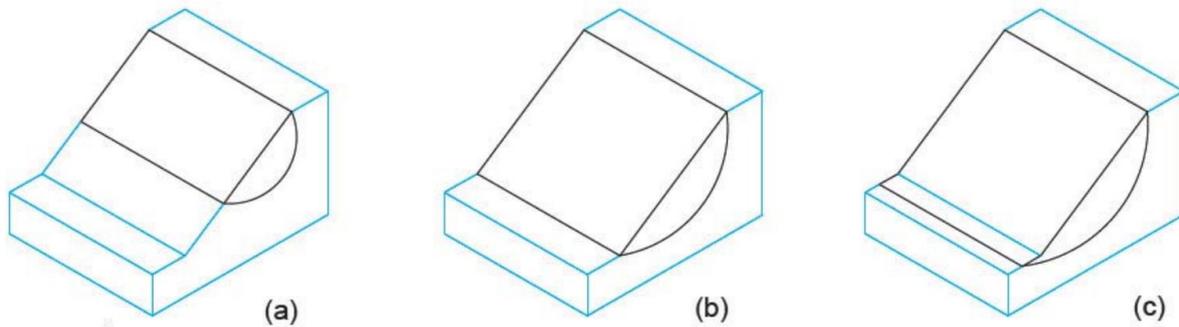
Un deslizamiento rotacional es aquel en que la superficie de rotura es cóncava hacia arriba, por lo que el movimiento resultante se desarrolla en función de un eje de giro paralelo al plano de falla y transversal a la dirección de avance del suelo. Durante su desarrollo es posible observar una serie de grietas concéntricas y cóncavas, ubicadas en la dirección del movimiento. (Suarez, 2012)

En los deslizamientos el movimiento de la masa es el resultado de una falla de corte a lo largo de una o varias superficies. Se presenta en materiales con comportamiento elástico o semielástico. El tipo de superficie de deslizamiento por la cual se produce la falla depende, básicamente, del ángulo de inclinación del talud, de la cohesión y del ángulo de rozamiento interno del suelo. (Sanhueza y Rodríguez, 2012)

Este tipo de falla puede ser de talud (figura 1a), de pie (figura 1b) o profundo (figura 1c).

## **Figura 6**

*Tipos de Superficies potenciales de falla en deslizamientos rotacionales*



*Nota.* Fuente: Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales (p. 20), por Sanhueza y Rodríguez, 2012.

### **3.7. Métodos de análisis de estabilidad de taludes finitos**

Según Sanhueza y Rodríguez (2012) en su artículo “Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales” concluyo que, Los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico-matemático en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras, que actúan sobre el talud y que determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad. Se pueden agrupar en dos: métodos determinísticos, dentro de los cuales están los métodos de equilibrio límite y los tenso-deformacionales; y los métodos probabilísticos.

Los más utilizados son los métodos de equilibrio límite, los cuales analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y consisten en comparar las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una determinada superficie de rotura. Se basan en la selección de una superficie teórica de rotura en el talud; el criterio de rotura de Mohr-Coulomb; y la definición de un factor de seguridad. (Sanhueza y Rodríguez, 2012)

#### **3.7.1. Teorías de equilibrio límite: método de las dovelas**

Según Sanhueza y Rodríguez (2012) en su artículo “Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales” concluyo que,

los problemas de estabilidad de taludes son estáticamente indeterminados, y para su resolución es preciso considerar una serie de hipótesis de partida diferentes según los métodos. Con dichas condiciones, se establecen las ecuaciones de equilibrio entre las fuerzas que inducen el deslizamiento y las resistentes. Los análisis proporcionan el valor del FS del talud para la superficie analizada, referido al equilibrio estricto o límite entre las fuerzas que actúan.

Una vez evaluado el FS de la superficie supuesta, es necesario analizar otras superficies de rotura, cinemáticamente posibles, hasta encontrar aquella que tenga el menor FS, la cual se admite como SPF del talud y dicho FS como el correspondiente al talud en cuestión. (Sanhueza y Rodríguez, 2012)

En general, este tipo de método considera las siguientes hipótesis:

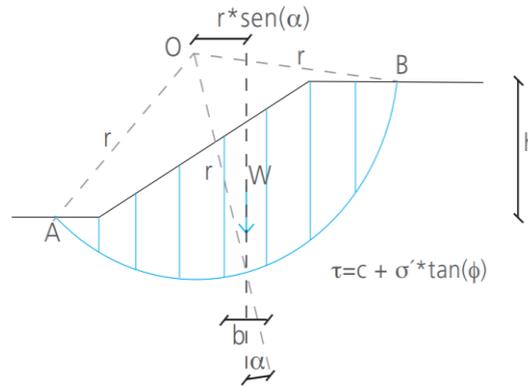
- El FS asociado a un determinado talud, es constante para toda la superficie de falla,
- La resistencia al corte del suelo estudiado satisface el criterio de Mohr - Coulomb, y
- Al momento de la falla la resistencia al corte del suelo se desarrolla con una magnitud constante en toda la superficie de rotura.

### **3.7.2. Método ordinario o de Fellenius**

En la siguiente figura se muestra un talud con una superficie potencial de falla definida con el arco AB. La masa de suelo que se encuentra dentro de esta superficie de rotura es dividida en varias dovelas. El talud considerado debe ser una sección transversal representativa del talud real, el que será estudiado por cada metro lineal. (Sanhueza y Rodríguez, 2012)

## **Figura 7**

*Esquema del análisis de estabilidad de taludes por el método de Fellenius*



*Nota.* Fuente: Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales (p. 21), por Sanhueza y Rodríguez, 2012.

Las fuerzas que actúan sobre el talud se pueden apreciar en la siguiente figura, donde se toma la  $\eta^{\text{ma}}$  dovela como ejemplo:

$W$  : Resultante peso dovela

$R$  : Fuerza que actúa como reacción al peso de la dovela

$N_n$  y  $N_{(n+1)}$  : Fuerzas normales que actúan en cada lado de la dovela

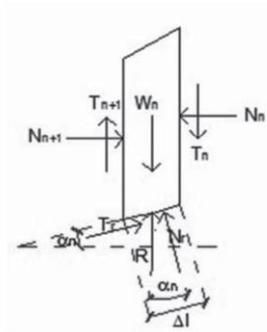
$T_n$  y  $T_{(n+1)}$  : Fuerzas tangenciales que actúan en cada lado de la dovela

$N_r$  : Componente normal de la reacción  $R$

$T_r$  : Componente tangencial de la reacción  $R$

### Figura 8

*Esquema de las fuerzas que actúan en la  $\eta^{\text{ma}}$  dovela, de acuerdo al método de Fellenius*



*Nota.* Fuente: Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales (p. 22), por Sanhueza y Rodríguez, 2012.

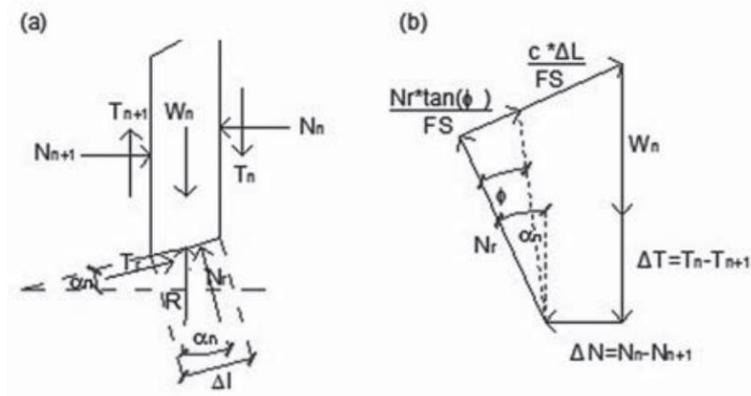
### 3.7.3. Método de Bishop simplificado

El método propuesto por Bishop en 1955 analiza la estabilidad de un talud con SPF del tipo circular, tomando en cuenta el efecto de las fuerzas entre dovelas.

Al tratarse de un Método de Dovelas, la masa de suelo deslizante debe ser dividida en  $d$  fajas verticales (figura a), de manera de estudiar las fuerzas (figura b) y momentos involucrados en cada una de las rebanadas definidas y determinar así el FS asociado al caso. (Sanhueza y Rodríguez, 2012)

**Figura 9**

*Análisis de Estabilidad de Taludes por el Método de Bishop*



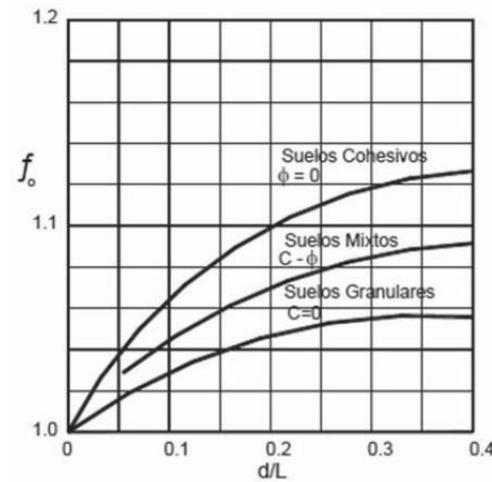
*Nota.* Fuente: Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales (p. 22), por Sanhueza y Rodríguez, 2012.

### 3.7.4. Método de Janbú

La principal consideración de este método es que las fuerzas entre dovelas son solo horizontales, no tomando en cuenta las fuerzas cortantes. A diferencia de los métodos anteriores, en este caso la SPF no debe ser obligatoriamente circular. Esto se refleja en la aplicación de un factor de corrección  $f_0$ , el que depende netamente del nivel de curvatura que presente la superficie de rotura. (Sanhueza y Rodríguez, 2012)

**Figura 10**

*Diagrama del factor  $f_0$  utilizado en el método de Janbú*



*Nota.* Fuente: Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales (p. 23), por Sanhueza y Rodríguez, 2012.

#### 4. Limitaciones

Las limitaciones que se presentaron para la ejecución del proyecto fueron diversas, desde las condiciones climáticas como las intensas lluvias, neblina, tormentas eléctricas y granizadas, puesto que, esto interfería con la funcionalidad de los equipos además de limitar las jornadas de trabajo. Otra limitación fue la altura de 4300 msnm porque dificultaba el transporte manual de los equipos por falta de oxigenación en los operadores. También la topografía accidentada que posee el área del proyecto, debido a que dificultaba el acceso a ciertas áreas de trabajo donde no se podía ingresar con las camionetas. Finalmente, la poca conectividad y redes de los equipos como celulares o laptops, ya que solo había un operador de redes de smartphones disponible y se tuvo que emplear radios de comunicación, además, de solo contar con redes de internet mediante cableado desde la oficina de operaciones y no se disponía de red wifi para el uso de todos los integrantes del equipo de trabajo.

### CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

Durante mi etapa de egresado de la carrera de Ingeniería Civil tuve la oportunidad de presentarme a la convocatoria que realizó la empresa CLEAN TECHNOLOGY S.A.C. para el puesto de Asistente de Ingeniería en el Área Técnica. Me entrevistó el Ingeniero de Minas Rogger Solano Contreras – Director Ejecutivo el día 8 de octubre del año 2019. Inicialmente se me encomendó realizar la tarea de metrados de planos estructurales, electromecánicos y civiles del Componente Ore Sorting de la Unidad Minera de Puno. Desarrolle esta tarea inicial de metrados para el desarrollo del Plan de Cierre de Minas de la Unidad Minera de Puno, con el objetivo que se iba a necesitar la cuantificación de los trabajos y partidas para Desmantelar, Demoler, asegurar la Estabilidad Física, Estabilidad Geoquímica, Estabilidad Hidrológica, Reconformación del terreno y Revegetación de la zona con especies nativas. Estas actividades son mencionadas en la “Guía para la elaboración de Planes de Cierre de Minas” proporcionado por el Ministerio de Energía y Minas.

#### 1. Personas asignadas en el proyecto

En el año 2020 se nos asignó el trabajo de campo para el **Proyecto de Actualización del Estudio de Estabilidad Física del Depósito de Relaves minero – Puno.**

Se conformo un grupo especializado para desarrollar este trabajo en campo y gabinete los cuales son los siguientes:

- Ingeniero de Minas: Rogger Solano Contreras (Coordinador y Supervisor del equipo de trabajo)
- Geólogo: José Agostinelli (Responsable del Grupo de Campo - Calicatas)
- Ingeniero Civil: David Ccama Flores (Fotogrametría)
- Geofísico: Walter Atiquipa (Tomografía eléctrica)
- Bach. Ingeniero Civil: Brecks Torres Gonzales (Ensayo de Compactación)
- Ingeniero de Minas: Richard Salomé Núñez (Responsable del Grupo en Gabinete)

## **2. Funciones en el proyecto**

### **2.1. Campo**

La función principal que se me encargó en este proyecto fue la de ejecutar los ensayos de compactación en puntos estratégicos del Depósito de Relaves Minero. Para ejecutar esta acción en campo fui el responsable del nuevo equipo Penetrómetro Dinámico Ligero a Energía Variable – PANDA. Además también se me asignó dar apoyo a los demás integrantes, por ejemplo, apoyar en la colocación de los puntos de control e instalación de la base en el punto georreferenciado para realizar los trabajos de vuelo con el DRONE PHANTOM 4 RTK, apoyar en la programación y ejecución con maquinaria pesada de las calicatas en los puntos establecidos y anotar los datos obtenidos en campo y recoger las muestras en las bolsas impermeables y por último apoyar en la instalación del cableado y electrodos para ejecutar la tomografía eléctrica.

### **2.2. Gabinete**

En gabinete se me asignó desarrollar el Informe Técnico de compactación del Depósito de Relaves Minero con la data obtenida en campo. Además de apoyar en la obtención de parámetros geotécnicos de los Estudios de Estabilidad anteriores, Expedientes Técnicos, Dossier de Calidad e informes mensuales y semanales. Obtener los perfiles del Depósito de Relaves Minero por cada etapa de recrecimiento con la topografía proporcionada por el levantamiento topográfico con el DRONE y los planos As Built proporcionada por la empresa Minera para el Análisis de Estabilidad con el Programa Rocscience. Por último, desarrollar los planos del Depósito de Relaves con sus respectivas vistas y apoyar en georreferenciar los puntos de control de campo para procesar la fotogrametría obtenida por el DRONE con el Programa Agisoft para obtener la imagen georreferenciada en formato TIFF y las curvas de nivel actuales de la zona del proyecto.

### 3. Antecedentes del proyecto

La Unidad Minera ha dispuesto la siguiente información básica, con fines de evaluación y caracterización de las condiciones geométricas, condiciones de construcción y evaluación comparativa de los parámetros geotécnicos de los materiales de construcción:

- Estudio de Ingeniería de Detalle para la sobre Elevación de la Presa elaborado por Geoservice Ingeniería S.A.C., con fecha mayo del 2013.
- Estudio de estabilidad Física del Depósito de Relaves Minero al nivel de cota 4332.0 msnm elaborado por Geoservice Ingeniería S.A.C. con fecha Setiembre del 2018.
- Estudio Geofísico mediante el Método de Tomografía Eléctrica del Depósito de Relaves Minero – 2019 elaborado por Geoscience S.A.C.
- Aseguramiento y Control de Calidad del Proyecto: “Recrecimiento de la Presa de Relaves Minero en una Altura de 6 m a la Cota 4332.0 msnm”. Geoservice Ambiental S.A.C., septiembre de 2018.

### 4. Ubicación del Proyecto

El depósito de relaves minero se ubica en el distrito de Quiaca, Provincia de Sandía, departamento de Puno, a altitudes entre 4200 a 4900 metros sobre el nivel del mar.

**Tabla 2**

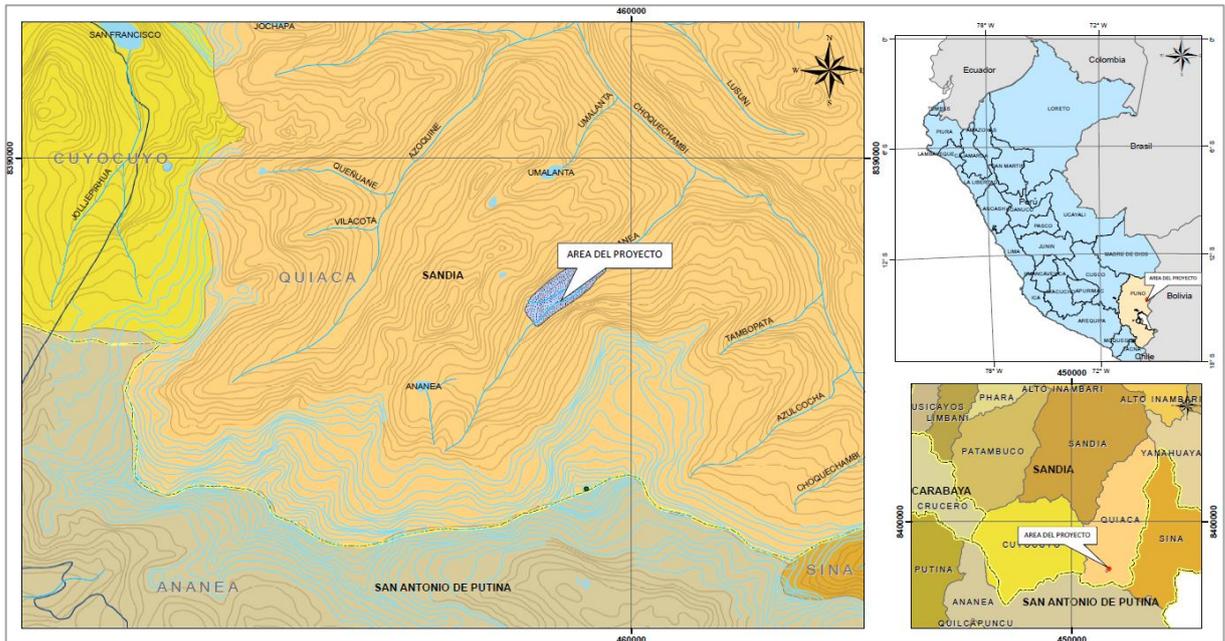
*Coordenadas de Ubicación – Zona 19S*

ID	Coordenadas (WGS-84)		Cota (msnm)
	Norte	Este	
PT-1	8387474.43	458295.01	4372.01
PT-2	8388203.12	459087.84	4312.96
PT-3	8387951.00	459292.00	4266.44
PT-4	8387282.17	458566.49	4318.03

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 11**

*Mapa de ubicación del Depósito de Relaves Minero*



*Nota.* Fuente: Clean Technology S.A.C.

## 5. Objetivo del Proyecto

Verificar, evaluar y determinar las condiciones actuales de estabilidad física del Depósito de Relaves Minero, con el fin de prevenir la ocurrencia de posibles fallas y/o pérdida de su estabilidad física.

## 6. Desarrollo del Proyecto

Luego de programar las actividades y llegar al campamento de la Unidad Minera, nos dirigimos a la oficina de SSOMA para la respectiva charla de inducción para la seguridad y salud en el trabajo.

## 7. Trabajo de Campo

### 7.1. Ensayos de Compactación

#### 7.1.1. Marco de Referencia

- Norma NFP 94-105: Control de la calidad de la compactación – Método con el penetrómetro dinámico ligero a energía variable.

- Norma NCH 3261-2012: Depósito de relaves – Control de compactación con Penetrómetro Dinámico Ligero.
- Fascicule 70 - Ouvrages d’assainissement.

### 7.1.2. Reconocimiento del Área de trabajo

El equipo se acercó a los puntos programados para realizar los trabajos de campo, para validar o descartar lo que se programó en gabinete mediante imágenes satelitales u ortofotos. Por lo tanto, se validaron los siguientes puntos de ensayo de compactación.

Para la verificación de la compactación del dique principal del Depósito de Relaves Minero, se realizaron seis (06) ensayos con el penetrómetro dinámico ligero de energía variable, de los cuales se realizaron a lo largo del pie del talud.

**Tabla 3**

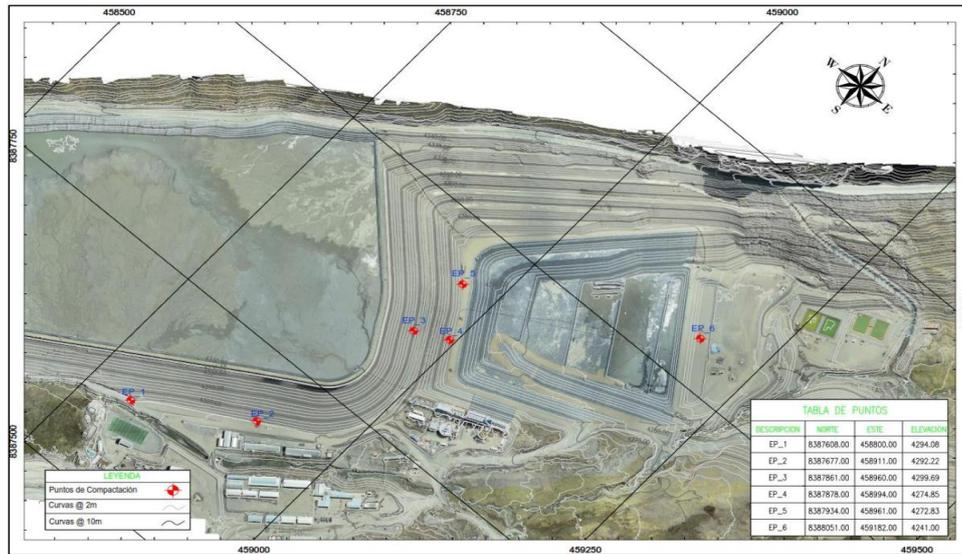
*Ubicación de las Auscultaciones con el Penetrómetro Dinámico Ligero – UTM WGS84 – 19S*

Punto	Norte	Este	Cota	Ubicación
EP_1	8387608.00	458800.00	4294.083	Pie del talud
EP_2	8387677.00	458911.00	4292.217	Pie del talud
EP_3	8387861.00	458960.00	4299.689	Banco del dique
EP_4	8387878.00	458994.00	4274.853	Banco del Dique
EP_5	8387934.00	458961.00	4272.827	Banco del Dique
EP_6	8388051.00	459182.00	4241.000	Dique de presa de relave filtrado

*Nota.* Fuente: Clean Technology

**Figura 12**

*Ubicación de ensayos de Penetración Dinámica Ligera*



*Nota.* Fuente: Clean Technology S.A.C.

### 7.1.3. Condiciones climáticas

Luego de validar los puntos de ensayo en campo se procedió a analizar los horarios de trabajo ya que estos dependían de las condiciones climáticas, por la frecuencia de las lluvias, granizadas y tormentas eléctricas en temporada seca. Se estableció horarios de trabajo desde las 7:00 am hasta las 16:30 pm para evitar incidentes y proteger al equipo de posibles daños.

**Figura 13**

*Evaluación de campo y condiciones climáticas*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

#### 7.1.4. Personal de apoyo

Se gestionó con la oficina central el apoyo de 02 obreros asistentes para el desarrollo de estos ensayos. Se completo sus formatos IPERC (Identificación de Peligros, Evaluación de Riesgos y Controles) antes de cada jornada de trabajo y se les oriento en una breve capacitación sobre el uso correcto y las restricciones del penetrómetro. Conociendo los parámetros anteriores se procedió a la ejecución de los ensayos programados.

#### Figura 14

*Penetrómetro Dinámico Ligero de Energía Variable modelo Panda*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

#### 7.1.5. Metodología y procedimientos de ensayo

##### a) Principio del Ensayo

El ensayo para el control de compactación con el uso del penetrómetro dinámico de energía variable consiste en perforar el suelo con un conjunto de barras mediante la energía proporcionada por el impacto de un martillo. La distancia de penetración varía en función de la resistencia del suelo a la penetración dinámica.

La metodología aplicada comprende el uso de los gráficos de resistencia a la penetración (penetrogramas) para las siguientes funciones:

- Función A: las diferencias en la variación de la resistencia a la penetración dinámica en la transición entre capas son utilizadas para evaluar los espesores compactados.

- **Función B:** se compara el penetrograma obtenido in-situ con una curva límite de resistencia dinámica de punta ( $q_{dL}$ ) y una curva de valor de referencia de resistencia dinámica de punta ( $q_{dR}$ ), ambas obtenidas a partir de la calibración en laboratorio del equipo a utilizar.

De acuerdo con el objetivo del presente informe, se utilizará la metodología correspondiente a la "Función B" del Penetrómetro, la cual será aplicada en cumplimiento de las siguientes condiciones:

- Se conocen la densidad de las partículas sólidas, la distribución granulométrica, la densidad máxima seca compactada, la humedad óptima de compactación y el estado hídrico de los materiales al momento de realizar el ensayo in-situ.
- Las curvas de valor límite de resistencia dinámica de punta ( $q_{dL}$ ) y de valor referencia de resistencia dinámica de punta ( $q_{dR}$ ) para los materiales depositados son definidas.

#### **b) Consideraciones**

- Verificar la granulometría máxima y el tipo de suelo en el cual puede ser utilizado el penetrómetro de acuerdo con lo especificado por el fabricante.
- No utilizar el penetrómetro en materiales tratados con aglomerantes hidráulicos (por ejemplo, grava de cemento, grava de emulsión, grava de asfalto, mezcla en calientes, etc) o en materiales de tipo lastre para evitar un desgaste y daños del equipo que podrían afectar la precisión de las mediciones posteriores.
- En suelos blandos, la energía de martilleo deberá reducirse significativamente, mientras que en suelos que presenten hundimientos sin martillar, la profundidad registrada no se registra y la prueba se interrumpe.

#### **c) Aplicación de la Metodología**

- **Procesos Preliminares:**

- Lectura de las características físicas requeridas para el ensayo, que serán proporcionadas de los estudios de diseño, especificaciones técnicas o estabilidad física de los componentes a supervisar.
- Determinar el tipo de cono o punta a utilizar, el cual dependerá esencialmente de la fricción lateral a lo largo de las varillas y la resistencia del suelo encontrado.
- Cono de 2 cm<sup>2</sup>, se atornilla al extremo hembra de la varilla. Se llama “fijo” porque sube con el tren de barras después del ensayo. Recomendado para sondajes de hasta 1.5 m de profundidad.
- Cono de 4 cm<sup>2</sup>, requiere el uso de un soporte de cono. Se llama “sacrificio” porque permanece en el fondo del pozo. Recomendado para sondajes de hasta 7.0m de profundidad.
- Antes de comenzar el ensayo se debe verificar y registrar en la ficha de ensayo (Anexo A) tanto la rectitud de las barras, el diámetro y peso de la punta a emplear y el estado de las roscas de los tornillos de montaje en los extremos de la barra.

Al crear la auscultación en el dispositivo digital del equipo, se debe verificar que:

- El número de serie de la unidad central de adquisición (CAU) sea ingresado correctamente al equipo utilizado.
- El número de serie del sensor del yunque sea ingresado correctamente al equipo utilizado.
- Se deben identificar los puntos de ensayo, emplazados habitualmente en el eje de coronamiento y en talud aguas debajo del componente, los cuales deben ser georreferenciados y registrados según formato de la ficha de ensayo.

- **Durante el Ensayo:**

- Durante el proceso de hincado se debe verificar que se mantenga la dirección de sondaje prevista. En el caso que la barra pierda su verticalidad, el ensayo es detenido y reiniciado

en un punto cercano. La inclinación máxima aceptada es de  $10^{\circ}$  en relación a la dirección establecida previamente para el sondaje.

- Las barras deben ser cuidadosamente atornilladas hasta su bloqueo.
- La energía de hincado debe ser regulada de manera que la penetración por golpe se encuentre entre 0.10 (cm) y 2.0 (cm).
- El rozamiento lateral entre el suelo y el tren de barras debe ser tolerable. A partir de 2.0 (m) de profundidad, para cada barra adicionada, el tren de barras debe ser rotado de manera manual en  $360^{\circ}$  o mediante una llave dinamométrica y el valor del par máximo debe ser registrado.

- **Fin del Ensayo:**

El hincado es detenido cuando una de las siguientes condiciones es alcanzada:

- Una vez alcanzada la profundidad máxima de penetración previamente establecida.
- En un punto “duro”, la penetración máxima por golpe es inferior a 1.0 (mm) durante cinco golpes sucesivos, para el caso de penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable.
- El rozamiento lateral es excesivo entre el material depositado y el tren de barras (imposibilidad de girar el tren de barras de manera manual). Si la verificación es realizada mediante una llave dinamométrica, los valores máximos son establecidos por el fabricante.
- Una vez finalizada la extracción del tren de barras, la rectitud de las barras debe ser controlada por examen visual, además de su atornillado (estado de los extremos de las barras).

**Figura 15**

*Instalación final del penetrómetro*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 16**

*Retiro del tren de barras del suelo*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

### 7.1.6. Ejecución de los ensayos programados de compactación

- **EP\_1:** El ensayo in-situ se realizó en el pie del talud hasta una profundidad alcanzada de 0.559 m alcanzando una Resistencia de punta ( $Q_d$ ) de 129.28 MPa con una penetración final de 1.05 mm en el último golpe.

#### Figura 17

*Ejecución del ensayo EP\_1 con el penetrómetro*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

#### Figura 18

*Lectura final del ensayo EP\_1 con el penetrómetro*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**EP\_2:** El ensayo in-situ se realizó en el pie del talud hasta una profundidad alcanzada de 2.746 m alcanzando una Resistencia de punta (Qd) de 144.13 MPa con una penetración final de 1.17 mm en el último golpe.

**Figura 19**

*Ejecución del ensayo EP\_2 con el penetrómetro*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 20**

*Lectura final del ensayo EP\_2 con el penetrómetro*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

- **EP\_3:** El ensayo in-situ se realizó en el banco del dique hasta una profundidad alcanzada de 0.58 m alcanzando una Resistencia de punta ( $Q_d$ ) de 99.38 MPa con una penetración final de 0.99 mm en el último golpe.

**Figura 21**

*Ejecución del ensayo EP\_3 con el penetrómetro*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 22**

*Lectura final del ensayo EP\_3 con el penetrómetro*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

- **EP\_4:** El ensayo in-situ se realizó en el banco del dique hasta una profundidad alcanzada de 0.822 m alcanzando una Resistencia de punta (Qd) de 130.81 MPa con una penetración final de 3.39 mm en el último golpe.

**Figura 23**

*Ejecución del ensayo EP\_4 con el penetrómetro*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 24**

*Lectura final del ensayo EP\_4 con el penetrómetro*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

- **EP\_5:** El ensayo in-situ se realizó en el banco del dique hasta una profundidad alcanzada de 0.81 m alcanzando una Resistencia de punta (Qd) de 191.79 MPa con una penetración final de 12.05 mm en el último golpe.

**Figura 25**

*Ejecución del ensayo EP\_5 con el penetrómetro*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 26**

*Lectura final del ensayo EP\_5 con el penetrómetro*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

- **EP\_6:** El ensayo in-situ se realizó en el dique de presa de relave filtrado hasta una profundidad alcanzada de 0.75 m alcanzando una Resistencia de punta (Qd) de 66.02 MPa con una penetración final de 2.69 mm en el último golpe.

**Figura 27**

*Ejecución del ensayo EP\_6 con el penetrómetro*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 28**

*Lectura final del ensayo EP\_6 con el penetrómetro*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

## 7.2. Ensayos de Mecánica de Suelos – Calicatas

### 7.2.1. Reconocimiento del Área de trabajo

El equipo se acercó a los puntos programados para realizar los trabajos de campo, para validar o descartar lo que se programó en gabinete mediante imágenes satelitales u ortofotos. Por lo tanto, se validaron los siguientes puntos de ensayo de mecánica de suelos.

**Tabla 4**

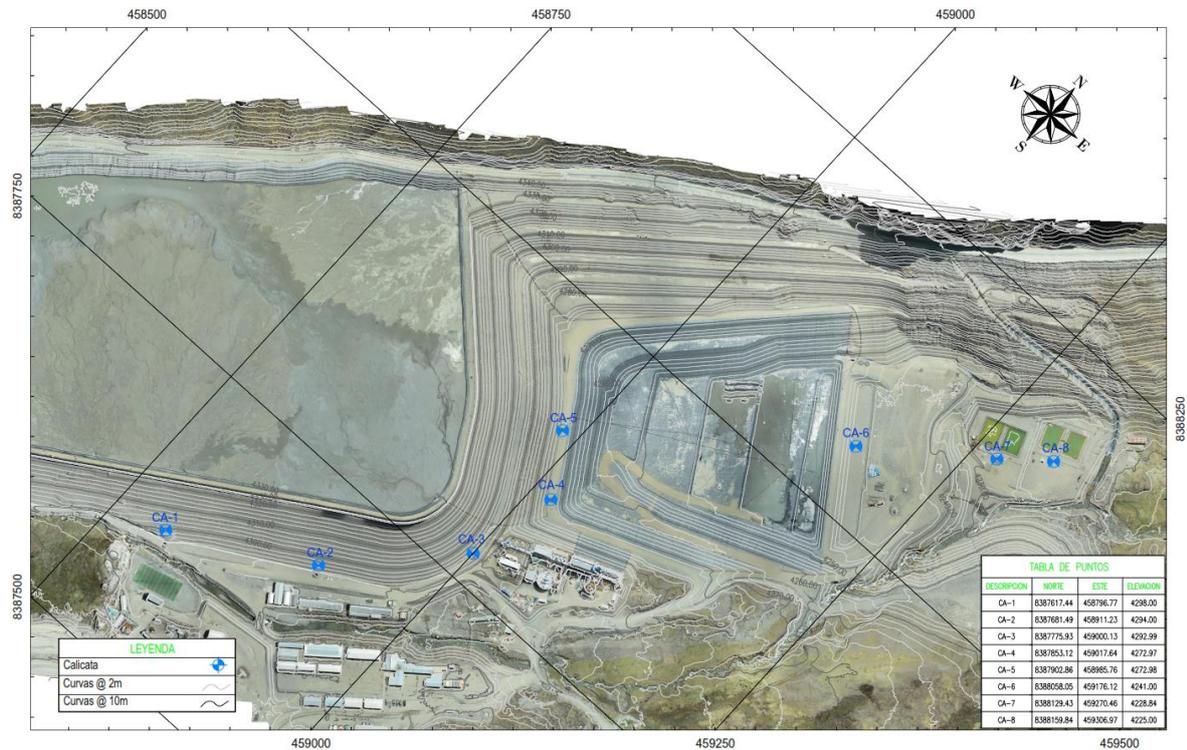
*Coordenada de ubicación de las calicatas - Zona 19 S*

Sector	Calicata	Coordenadas (WGS-84)		Cota (msnm)	Profundidad (m)
		Norte	Este		
Dique	CA-1	8387609.22	458803.78	4293.98	1.80
Dique	CA-2	8387674.45	458915.30	4291.10	1.95
Dique	CA-3	8387775.93	459000.13	4292.99	1.95
Dique	CA-4	8387853.12	459017.64	4272.97	2.10
Dique	CA-5	8387902.86	458985.76	4272.98	2.05
Dique	CA-6	8388058.05	459176.12	4241.00	2.10
Dique	CA-7	8388129.43	459270.46	4228.84	1.90
Dique	CA-8	8388159.84	459306.97	4225.00	2.10

*Nota.* Fuente: Clean Technology

**Figura 29**

*Ubicación de Calicatas*



*Nota.* Fuente: Clean Technology

**7.2.2. Personal de apoyo**

Se gestiona con la oficina central el apoyo de 01 excavadora con su conductor y 02 obreros asistentes para el desarrollo de estos ensayos. Se completó sus formatos IPERC (Identificación de Peligros, Evaluación de Riesgos y Controles) antes de cada jornada de trabajo y se les informó sobre los puntos marcados para realizar las calicatas.

**7.2.3. Metodología y procedimientos del ensayo**

- Se mantendrá la delimitación de la zona de trabajo con la cinta de seguridad amarilla, el letrero de hombres trabajando usados para la ejecución de la calicata.
- Se realizará la Identificación de Peligros, Evaluación de Riesgos y Controles mediante el formato IPERC, hasta asegurar que los riesgos hayan sido eliminados, antes, durante y después de la ejecución de la tarea.

- El ejecutor del ensayo ubicará y nivelará la balanza en un lugar cercano a la calicata.
- El ejecutor de la tarea descenderá a la base de la calicata, ubicará el platillo de acero galvanizado en un lugar nivelado e iniciará la excavación del agujero (punta y comba), el material excavado será almacenado en una bolsa y pesado después de excavado los 15 cm.
- Se procederá a instalar el cono metálico sobre el platillo y se iniciará el llenado del agujero con la arena calibrada, luego de llenado el agujero y el cono, se procederá a pesar la arena que queda en la botella de arena calibrada, Se pesará la arena que queda en la botella, los pesos obtenidos se registrarán en la libreta o cuaderno de notas.
- Se registrarán fotografías de las actividades del ensayo, se usará la pizarra o tablero donde figuren la fecha, código de la calicata y ensayo de campo.
- Finalizado el ensayo, se devolverá el material extraído hasta conformar nuevamente a su forma original.
- Se tomarán muestras de los estratos identificados en la calicata y se almacenarán estas en bolsas impermeables.
- Informar a la supervisión de nivel superior la culminación del ensayo de campo.

#### **7.2.4. Restricciones**

- Examen de salud ocupacional.
- Inducción de seguridad y salud ocupacional.
- Autorización mediante formato IPERC.

#### **7.2.5. Ensayos de densidad in situ**

Durante el trabajo de campo realizado en Julio del 2020, se ejecutaron ensayos de densidad in situ, para determinar sus características físicas siguiendo la Norma ASTM D-1556-A. Las características físicas observadas en campo indican que el talud de la presa de relaves está conformado con grava limosa y grava arcillosa mientras que el vaso está conformado por material Limo Arcilloso.

**Tabla 5**

*Resumen de datos obtenidos en campo*

Sector	Calicata	Profundidad (m)	Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad Seca (kN/cm <sup>3</sup> )
Pie dique presa	CA-1	1.80	1.93	19.30
Pie dique presa	CA-2	1.95	2.03	20.30
Dique presa	CA-3	1.95	1.83	18.30
Dique presa	CA-4	2.10	2.05	20.50
Dique presa	CA-5	2.05	1.83	18.30
Dique presa	CA-6	2.10	2.10	21.00
Dique presa	CA-7	1.90	1.91	19.10
Dique presa	CA-8	2.10	1.94	19.40

*Nota.* Fuente: Clean Technology

**Figura 30**

*Excavación de calicatas con maquinaria*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 31**

*Vista de la calicata CA-1*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 32**

*Vista de la calicata CA-4*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 33**

*Vista de la calicata CA-5*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

### 7.3. Fotogrametría y levantamiento topográfico con DRONE

#### 7.3.1. Reconocimiento del Área de trabajo

El equipo se acercó a los puntos programados para realizar los trabajos de campo, para validar o descartar lo que se programó en gabinete mediante imágenes satelitales u ortofotos. Por lo tanto, se validaron los siguientes puntos de control con dianas para la fotogrametría.

**Tabla 6**

*Coordenada de ubicación de los puntos de control*

Sector	Diana	Coordenadas (WGS-84) Zona 19S		Cota (msnm)
		Norte	Este	
Corona de dique	P1	8387996.08	458800.75	4331.372
Corona de dique	P2	8387668.14	458420.22	4338.901
Corona de dique	P3	8387414.92	458394.18	4332.473
Taller del campamento	P4	8387311.78	458503.19	4320.011
Acceso a oficinas	P5	8387450.92	458572.48	4308.274

Sector	Diana	Coordenadas (WGS-84) Zona 19S		Cota (msnm)
		Norte	Este	
Corona de dique	P6	8387623.22	458719.83	4331.021
Pie del Talud	P7	8387677.09	458920.02	4291.604
Presa de relave filtrado	P8	8388026.67	459119.10	4243.622
Acceso inferior	P9	8387867.63	459149.92	4278.310
Pozas de tratamiento	P10	8388185.29	459305.91	4225.021
Ladera norte	P11	8388198.67	459114.91	4297.991

*Nota.* Fuente: Clean Technology

### Figura 34

*Ubicación de las dianas*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

### **7.3.2. Personal de apoyo**

Se gestiono con la oficina central el apoyo de 01 topógrafo asistentes para el desarrollo de estos ensayos. Este apoyo es requerido para identificar sus puntos base aprobados de topografía con grado mínimo de 3<sup>er</sup> orden para instalar la base del DRONE. Además de proporcionar la información topográfica actualizada.

### **7.3.3. Metodología y procedimientos del ensayo**

- Este procedimiento aplica para cualquier tipo de levantamiento Topográfico.
- Reconocimiento de campo
- Programación de vuelos mediante el programa pix4D y Google Earth.
- Identificación de puntos de control (georeferencia) en la zona del levantamiento topográfico.
- Calibrar IMU de la cámara y los sensores horizontales y verticales del dron.
- Se procede a realizar los vuelos con el dron, para obtener las imágenes georeferenciadas. Tener en consideración que los vuelos deben cubrir toda la zona requerida y solo se deben realizar en condiciones climáticas favorables (vientos bajos y sin lluvias).
- Los trabajos en gabinete consistirán en ordenar y depurar las fotos duplicadas por vuelo. Posteriormente se procesa las fotos clasificadas, mediante el programa Agisoft, para obtener las ortofotos y curvas de nivel de la topografía.

### **7.3.4. Restricciones**

- El personal de Clean Technology no realizará trabajos si no cuenta con su examen médico ocupacional y su formato de IPERC.
- Previo a los trabajos se debe realizar una charla de 5 minutos al personal en campo.
- Suspender las actividades en caso de emergencias tales como: Incendios forestales, lluvias y tormenta eléctrica.
- Evitar tener contacto cuando el dron se encuentra en vuelo.

### 7.3.5. Vuelo del DRONE

Durante el trabajo de campo realizado en Julio del 2020, se ejecutaron los vuelos programados, para obtener la ortofoto georreferenciada y la superficie topográfica del Área de Estudio de la Unidad Minera.

#### Figura 35

*Colocación de la diana con sus respectivas coordenadas*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 36**

*Instalación de la base del DRONE*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 37**

*Inicio del vuelo del DRONE*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 38**

*Toma de fotos y videos del DRONE en vuelo*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

#### **7.4. Tomografía eléctrica**

##### **7.4.1. Reconocimiento del Área de trabajo**

El equipo se acercó a las líneas programadas para realizar los trabajos de campo, para validar o descartar lo que se programó en gabinete mediante imágenes satelitales u ortofotos evaluando la accesibilidad y los riesgos/peligros que puedan suscitarse. Por lo tanto, se validaron las siguientes líneas para la tomografía eléctrica:

**Tabla 7**

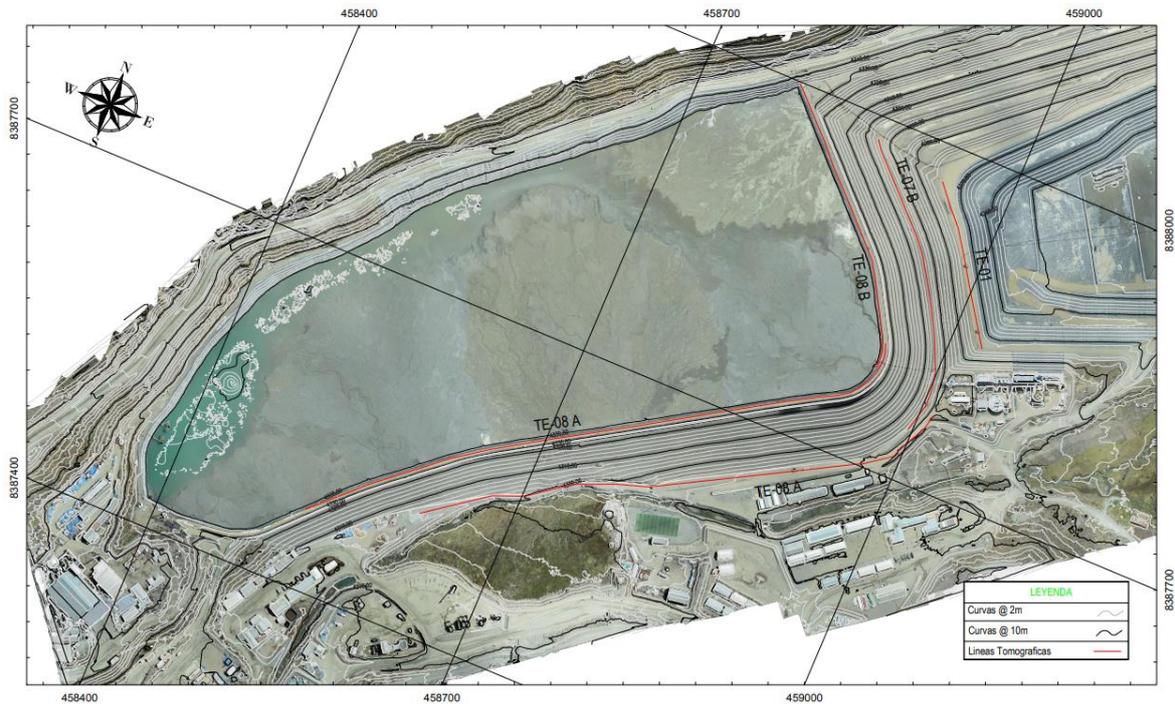
*Coordenadas de ubicación de las líneas tomográficas.*

Sistema de Coordenadas UTM-WGS84 Zona 19S				
Línea	Coordenada Inicial		Coordenada Final	
	Este	Norte	Este	Norte
TE-01	459023.55	8387835.85	458911.04	8387987.32
TE-07A	458591.57	8387473.12	458996.60	8387734.79
TE-07B	458999.53	8387782.95	458867.68	8387977.10
TE-08A	458489.38	8387434.46	458951.15	8387789.77
TE-08B	458939.75	8387765.81	458793.08	8387994.74

*Nota.* Fuente: Clean Technology

**Figura 39**

*Ubicación de las líneas tomográficas*



*Nota.* Fuente: Clean Technology

#### **7.4.2. Personal de apoyo**

Se gestionó con la oficina central el apoyo de una cuadrilla de 05 obreros asistentes para el desarrollo de esta actividad. Se completo sus formatos IPERC (Identificación de Peligros, Evaluación de Riesgos y Controles) antes de cada jornada de trabajo y se les oriento en una breve capacitación sobre el uso de los materiales y la actividad que iba a realizar cada obrero los cuales consistían en el traslado y tendido de los cables, la instalación de los electrodos y el traslado de cubetas en la ubicación de los electrodos. Conociendo los parámetros anteriores se procedió a la ejecución de la actividad programada.

#### **7.4.3. Metodología y procedimientos de la actividad**

El proceso metodológico constó de cuatro fases principales, la primera relacionada con una revisión y análisis de información secundaria sobre los temas de interés de la investigación. La segunda consistió en la selección y delimitación de la zona de estudio. La tercera contempla

el diseño y ejecución de la exploración geoelectrica de campo. La cuarta fase correspondió a la interpretación de los resultados arrojados, y la elaboración del informe definitivo.

Con la fase inicial se enmarca el estado del arte donde se recopila información asociada con el tema de la exploración geoelectrica aplicada a la investigación geotécnica. Teniendo presente las características de ubicación, y en particular las condiciones geológicas y geomorfológicas del área de estudio.

Para la segunda fase se definió el tipo de ensayo geoelectrico y el arreglo a implementar, teniendo en cuenta las características topográficas, del relieve y las formaciones y depósitos superficiales. Para este estudio se ejecutaron los métodos de tomografía eléctrica.

La tomografía eléctrica es la técnica por la cual se miden la resistividad en numerosos puntos de un perfil y se interpolan e interpretan los datos para conseguir un perfil de resistividad que permite hacer un verdadero corte eléctrico del terreno. Si las condiciones son adecuadas, es una herramienta muy potente para llevar a cabo correlaciones entre resistividad y tipo de material en terrenos ocultos.

Con las mediciones adquiridas se construye una sección en dos dimensiones (2D) que muestra una primera aproximación de los cambios en el subsuelo. Posteriormente, se aplica un algoritmo de inversión para obtener la distribución real de resistividades o imagen eléctrica. Este procedimiento consiste en efectuar iteraciones que acerquen nuestro modelo del terreno al modelo real. El paso clave está en la construcción de sucesivas secciones geoelectricas, que se comparan con la información obtenida en el trabajo de campo. El fin del proceso iterativo, será en el momento en que simulemos una toma de datos (no sobre el campo, sino sobre la sección que hemos creado), y cuyo resultado sea lo más parecido posible a los datos obtenidos del trabajo de campo.

La última fase consistió en la interpretación de los registros obtenidos en campo, cuyo objetivo por un parte era dar una interpretación de los materiales constituyentes a partir de las

resistividades aparentes medidas, y por otra obtener imágenes unidimensionales y bidimensionales de la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo.

- **Instalación de Equipos y Cables.** Este proceso permite ubicar el equipo adecuado, según el número de tendidos previamente planificado. Asimismo, se procede a instalar los cables y los equipos de medición (electrodos) en campo. Cabe señalar que los puntos de adquisición podrán modificarse conforme se adquiere los datos con la intención de mejorar la adquisición.
- **Toma de Datos.** El operador del equipo (Resistivímetro), el geofísico de campo, define y califica la calidad de los datos conforme se van adquiriendo, indicando repeticiones o cambio de fuentes de energía o posición de electrodos, según sea conveniente o necesario para el levantamiento sobre superficie.
- **Circuito de emisión,** integrado por una fuente de energía, un amperímetro para medir la intensidad de la corriente, puntos de emisión (A y B) consistentes en electrodos metálicos de 0,5 a 1 m de largo y 20 mm de diámetro y cables de transmisión. El amperímetro permite registrar hasta 10 A, con una precisión del 1% y resolución de 0,1 mA. El cable de transmisión tiene una sección de 1 mm.
- **Circuito de recepción,** compuesto por un milivoltímetro electrónico de alta impedancia (Resistivímetro) y dos electrodos para la medición del potencial (M y N) impolarizables.
- **Finalización de Toma de Datos.** En este proceso, culminada todos los ensayos realizados durante el día, el operador del equipo (Resistivímetro), comunica al personal el recojo de todos los equipos para la movilización a otro punto. Cabe señalar que al finalizar el levantamiento el responsable de grupo verifica y visualiza la zona de trabajo con la intención de cerciorarse si todo el equipo fue recogido y si no hay restos contaminantes. Caso se presentará, el personal tiene la obligación y responsabilidad ambiental de mitigar el efecto.

La reducción de datos de la tomografía eléctrica para la elaboración de los perfiles de resistividad fue netamente en gabinete.

#### **7.4.4. Descripción de la actividad para ejecutar las líneas tomográficas**

Para realizar eficazmente esta actividad nos dividimos en dos cuadrillas la cual el geofísico encargado dirigía la dirección del tendido de los cables mientras que yo supervisaba la ubicación e instalación correcta de los electrodos.

En campo se ejecutaron 5 líneas de tomografía eléctrica, obteniéndose las siguientes longitudes.

**Tabla 8**

*Longitudes de Tomografía Eléctrica.*

Estación	Longitud (m)
TE-01	200
TE-07A	500
TE-07B	300
TE-08A	600
TE-08B	300

*Nota.* Fuente: Clean Technology

**Figura 40**

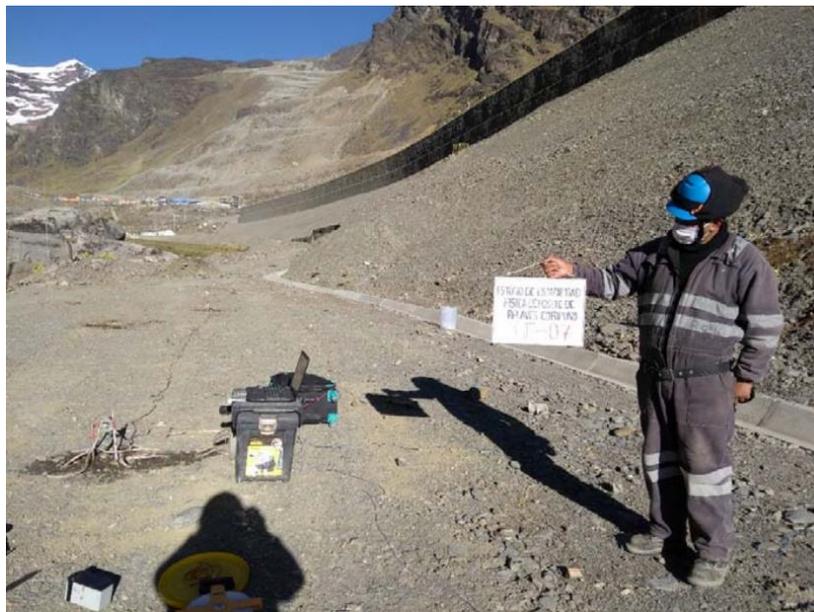
*Instalación de cable potencial sobre la línea TE-01*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 41**

*Ubicación de línea TE-07*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 42**

*Instalación de electrodo TE-08*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

## **8. Trabajo de gabinete**

Una vez culminados los trabajos de campo establecidos en el cronograma de actividades, se procedió a recopilar la información necesaria para procesar los datos obtenidos en campo mediante los ensayos de compactación con el penetrómetro dinámico ligero a energía variable.

### ***8.1. Recopilación de los parámetros de resistencia para el ensayo de compactación***

La grava limosa conforma el cuerpo de la presa la cual proviene de la Cantera Quillapata y la Cantera Yanet. El material ha sido clasificado mediante el sistema SUCS como GM, SM, GP-GM, GP-GC con densidades en  $\text{kN/m}^3$ , presentando como propiedades la cohesión en kPa y ángulo de fricción en grados.

En la siguiente tabla, se presentan los parámetros de resistencia del material que compone el dique principal del Depósito de Relaves Minero.

**Tabla 9**
*Resumen de los parámetros de resistencia*

Material	Clasificación	$\gamma_{Total}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Parámetros de Resistencia	
			C' (kPa)	$\phi'$
Grava limosa	GM	18.30	8.22	32.30°
Arena limosa	SM	19.20	9.56	41.14°
Grava limosa mal gradada	GP - GM	19.30	12.18	39.71°
Grava arcillosa mal gradada	GP - GC	20.75	0.00	40.95°

*Nota.* Fuente: Clean Technology

De acuerdo con la información proporcionada por la Unidad Minera, se ha identificado los parámetros de validez para la realización de los ensayos. De estos tenemos que el grado de compactación considerado como óptimo es de 95%, el material a auscultar es del Grava arcillosa pobremente graduada (según clasificación SUCS), con un porcentaje de finos con rango entre 10% y 15%.

En la siguiente tabla, se presenta un resumen de los principales parámetros de validez considerados como input para los ensayos con penetrómetro:

**Tabla 10**
*Parámetros de validez del Depósito de Relaves Minero*

PARAMETROS	GM	SM	GP - GM	GP - GC
Grado de compactación:	95%	95%	95%	95%
% de finos:	12.4%	15.1%	11.7	11.05
$\gamma_{a\acute{m}ax}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	1.830	1.920	1.930	2.075
Wop (%):	6.59	4.99	5.74	5.61
Altura capas compactadas	0.25	0.25	0.25	0.25
Gravedad específica:	2.70	2.74	2.68	2.66

*Nota.* Fuente: Clean Technology

Asimismo, durante la visita al campo y antes de realizar las auscultaciones con el penetrómetro, se ha identificado características del material de construcción de dique que son esenciales para la obtención de los resultados del ensayo. En la siguiente tabla se presenta el detalle de las características del material identificados en los seis (06) puntos de control:

**Tabla 11**

*Características del material del Depósito de Relaves Minero*

Punto	Tipo de Material	Valores especificados	Estado
		Grado de compactación	hídrico
EP_1	GM (SM)	95%	Medio
EP_2	GM (GP-GM)	95%	Medio
EP_3	GM (GM)	95%	Medio
EP_4	GM	95%	Medio
EP_5	GM (GP-GM)	95%	Medio
EP_6	GM	95%	Medio

*Nota.* Fuente: Clean Technology

## **8.2. Penetrogramas de los ensayos de compactación con GeoSprint V.1.1.5.**

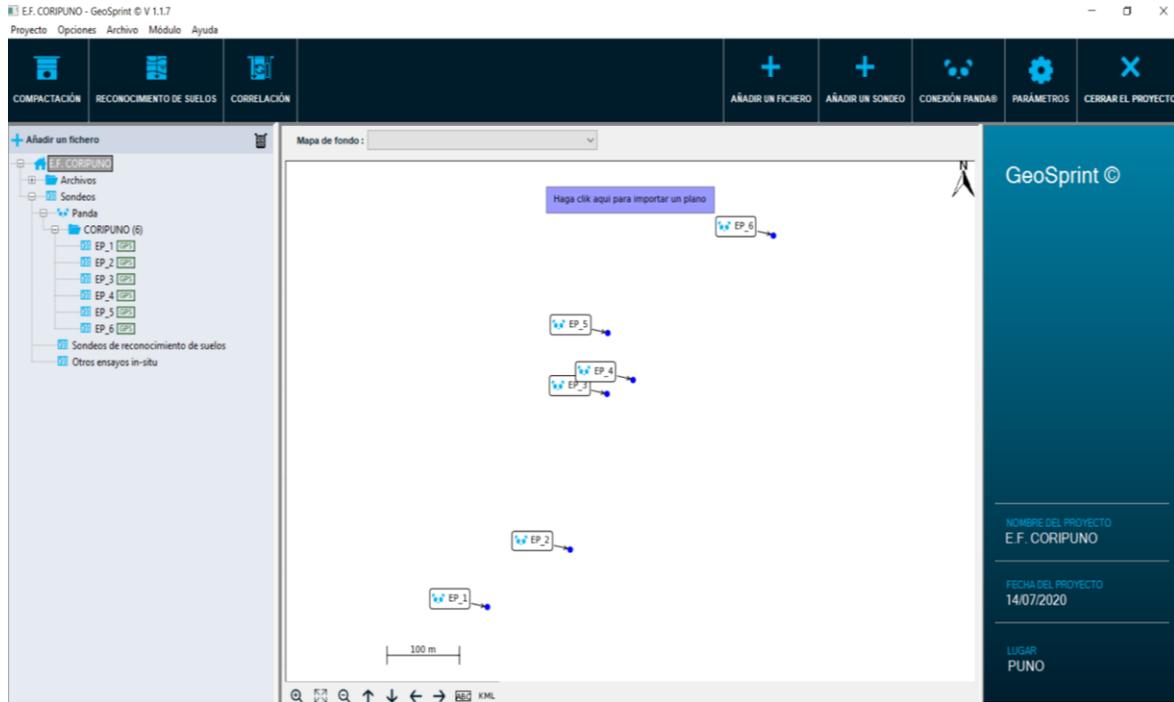
### **8.2.1. Introducción de los sondeos al software**

Luego de haber obtenido los parámetros necesarios de los estudios anteriores y los ensayos de mecánica de suelos actuales se procedió a introducir la información al software GeoSprint. Este software es un complemento del equipo, ya que ambos son proporcionados por el proveedor del penetrómetro.

Para introducir los datos son necesarios exportar los sondeos del tablero de control hacia un USB. Estos archivos se encuentran en formato PDA. En la siguiente figura se observa la interfaz del software con los sondeos introducidos.

**Figura 43**

*Introducción de los sondeos al software GeoSprint*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la imagen los sondeos ya se encuentran georreferenciados en el espacio, ya que el penetrómetro posee un GPS integrado que recolecta la ubicación del sondeo en coordenadas geográficas que son latitud y longitud en grados decimales.

**Figura 44**

*Ubicación de los sondeos en coordenadas cartesianas*

Propiedades del sondeo ×

Propiedades Información

Nombre del sondeo :

Lat. :  N

Long. :  E

Altitud (m) :

Pre-perforación (m) :

Comentarios :

Agrega una foto :

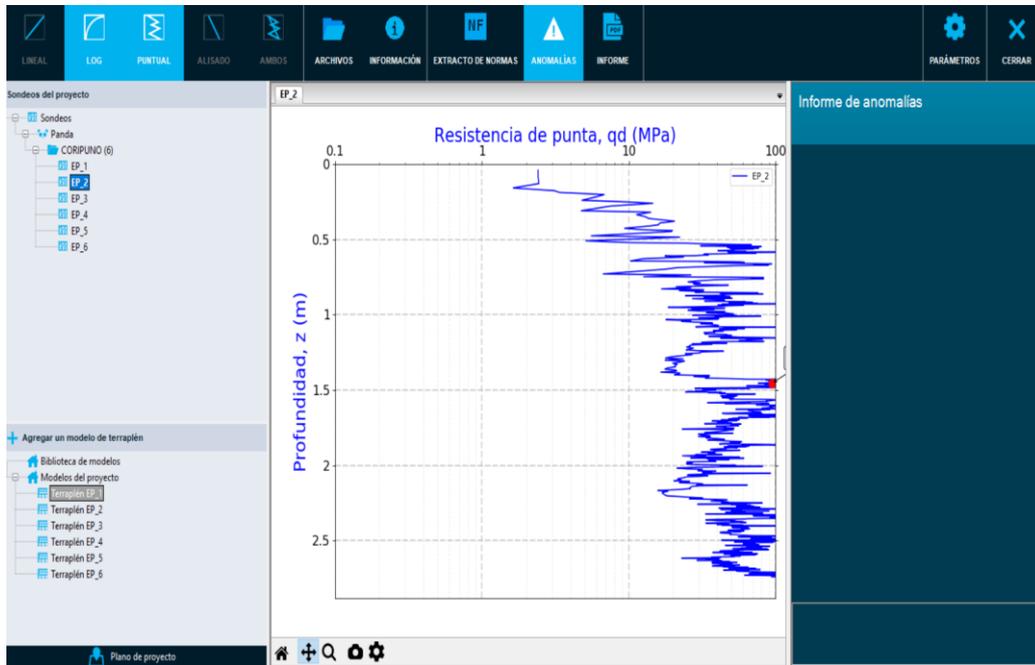
*Nota.* Fuente: Elaboración propia

### 8.2.2. Creación de los terraplenes según la información los estudios anteriores y de campo

Luego de haber ingresado los parámetros y corroborar las coordenadas en el plano se procede a ir a la opción de compactación del programa. En esta nueva interfaz se puede visualizar cada uno de los penetrogramas de los sondeos o ensayos ejecutados en campo. Se procede a crear los terraplenes de cada uno de los sondeos de acuerdo con la información obtenida del estudio de mecánica de suelos de las calicatas realizadas y la información de los estudios anteriores. Estos terraplenes generan dos curvas para dar una interpretación a cada ensayo.

**Figura 45**

*Penetrograma el ensayo de campo EP\_2*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 46**

*Terraplén creado del ensayo EP\_1*

Definición de un modelo de terraplén

Nombre del modelo de terraplén:

Espesor del terraplén (m):

Naturaleza de la red:

Clasificación:

+ Añadir una capa - Eliminar una capa

Espesor (m)	Controlada	Material	Estado hídrico	Calidad	Revestimiento
0.9	X	SM	Medio	95%OPM	

+ Añadir una canalización - Eliminar una canalización

Nombre	Prof. generatriz sup. (m)	Diámetro (mm)	
			principal

SMm  
95%OPM

Guardar en la biblioteca de modelos    Guardar como modelos del proyecto    Cancelar

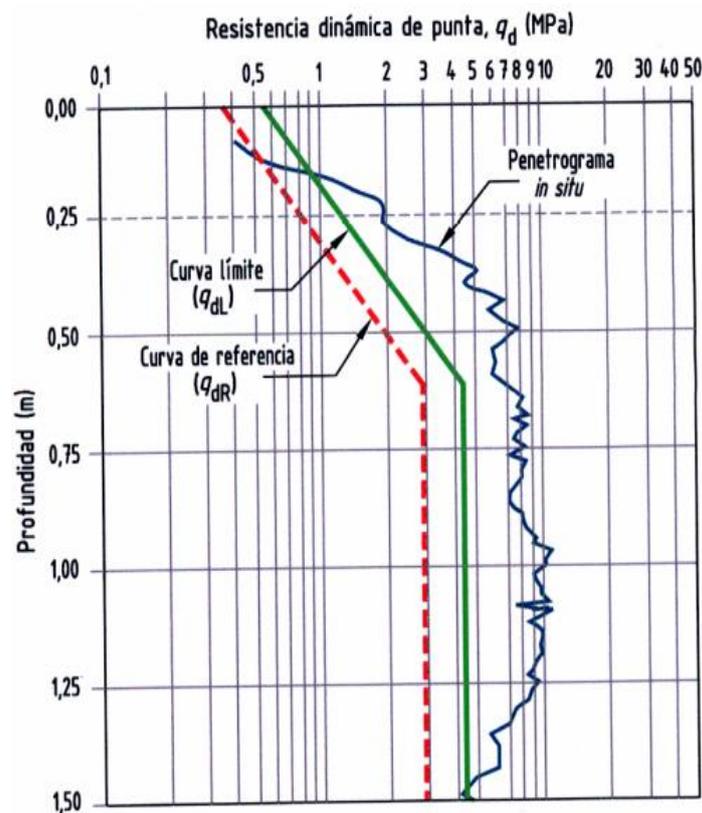
*Nota.* Fuente: Elaboración propia

### 8.2.3. Curvas de valor límite ( $q_{dL}$ ) y curvas de valor de referencia ( $q_{dR}$ )

Al haber creado un terraplén para cada ensayo de campo se procede a aplicar cada uno de estos a sus respectivos penetrogramas para identificar las anomalías que se generan a lo largo de cada ensayo. Las anomalías que aparecen en algunos ensayos se producen por la ubicación de las curvas de valor límite (verde) y las curvas de valor de referencia (rojo). Cada anomalía tiene una interpretación diferente de acuerdo con la interacción del penetrograma con las curvas de valor límite y de valor de referencia.

**Figura 47**

*Modelo de penetrograma*



*Nota.* Fuente: Deposito de Relaves - Control de compactación con penetrómetro dinámico ligero (p. 20), por Instituto Nacional de Normalización de Chile, 2012.

#### **8.2.4. Interpretación de los resultados según tipo de programación**

Para el caso de la metodología denominada "Función A" la cual puede emplear en el caso de ensayos verticales. La interpretación de los resultados se efectúa a partir de los penetrogramas obtenidos in-situ, y consiste en determinar los espesores de las capas depositadas a partir de las morfologías de señal penetrométrica obtenida, para posteriormente compararlos con los valores establecidos en las especificaciones técnicas de construcción.

Para el caso de la metodología denominada "Función B", la interpretación de resultados se realiza a partir de la comparación de penetrogramas obtenidos in-situ y las curvas de valor límite de resistencia dinámica de punta y de valor de referencia de resistencia dinámica de punta, asociadas a las características físicas de los materiales depositados, al grado de compactación especificado y al estado hídrico al momento de realizar el ensayo.

El grado de compactación resultante de la metodología de construcción empleada (Función A / B) cumplirá con las especificaciones técnicas previamente definidas, dependiendo de su posición en relación con las curvas de valor límite de resistencia dinámica de punta ( $q_{dL}$ ) y del valor de referencia de resistencia dinámica de punta ( $q_{dR}$ ). Para tal efecto se definen las tres zonas siguientes:

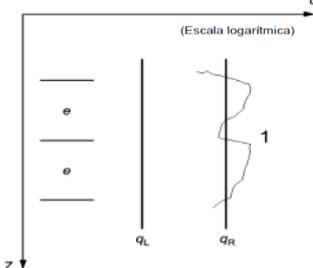
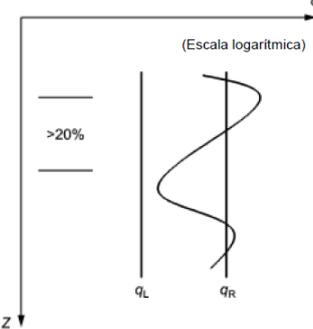
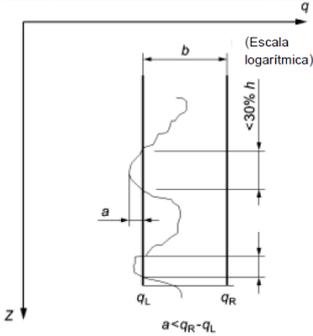
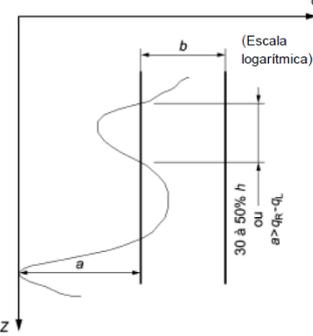
- Zona de aceptación, se encuentra a la derecha de la curva de valor límite de resistencia dinámica de punta ( $q_{dL}$ ). Si el penetrograma se encuentra en esta zona el grado de compactación es mayor o igual que al valor especificado.
- Zona de tolerancia, está comprendida entre valor límite de resistencia dinámica ( $q_{dL}$ ) y el valor de referencia de resistencia dinámica de punta ( $q_{dR}$ ). Si el penetrograma se encuentra en esta zona el grado de compactación se considera adecuado.
- Zona de rechazo, se encuentra a la izquierda de la curva de valor de referencia de resistencia dinámica de punta ( $q_{dR}$ ). Si el penetrograma se encuentra en esta zona el grado de compactación es insuficiente.

### 8.2.5. Criterios de aceptación:

Para verificar el cumplimiento de la compactación se considerarán los siguientes criterios de aceptación de acuerdo con la Norma NF P 94-105.

**Tabla 12**

*Definición de anomalías*

Tipo de anomalía	Definición	Ejemplo de resultado
Sin anomalía	El penetrógramo está siempre en excedente de $q_L$ Los espesores de capa se ajustan a las prescripciones.	
Anomalía de tipo 1	El penetrógramo está siempre en excedente de $q_L$ Los espesores de capa son sistemáticamente más de un 20% superiores a los valores prescritos.	
Anomalía de tipo 2	El penetrógramo es una distancia “a” inferior a la distancia “b” entre $q_L$ y $q_R$ y al total sobre una altura de menos de un 30% de la profundidad controlada “h”.	
Anomalía de tipo 3	El penetrograma tiene una distancia “a” superior a la distancia “b” entre $q_L$ y $q_R$ o al total sobre una altura de más de un 30% a un 50% de la profundidad controlada “h”, independientemente de la importancia del excedente.	

Tipo de anomalía	Definición	Ejemplo de resultado
Anomalía de tipo 4	El penetrógramo es inferior a $q_L$ en más del 50% de la profundidad controlada “h”.	

*Nota.* Fuente: Norma NF P 94-105 – Definición de las anomalías

Asimismo, de acuerdo con el Fascicule 70 – Aceptabilidad, se considerará la siguiente interpretación para las zonas de terraplén y de revestimiento

**Tabla 13**

*Interpretación para las zonas de terraplén y de revestimiento*

Tipo de anomalía	Zona de terraplén	Zona de revestimiento
Sin anomalía	Sondeo aceptable	Sondeo aceptable
Anomalía de tipo 1	Sondeo aceptable	Sondeo aceptable
Anomalía de tipo 2	Sondeo aceptable	Sondeo no aceptable
Anomalía de tipo 3	Sondeo no aceptable	Sondeo no aceptable
Anomalía de tipo 4	Sondeo no aceptable	Sondeo no aceptable

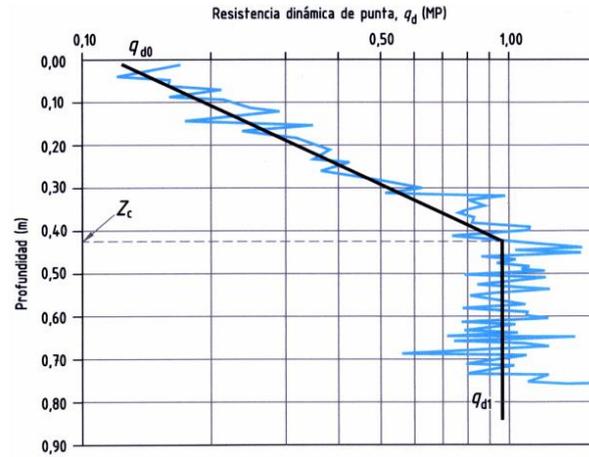
*Nota.* Fuente: Fascicule 70 - Aceptabilidad

### 8.2.6. Resistencia dinámica en la punta a profundidad promedio ( $q_{d1}$ ) y profundidad crítica ( $Z_c$ )

Para hallar estos parámetros que van a ser importantes para desarrollar los planos de isovalores son necesarios obtener los datos de la cantidad de golpes efectuados por cada ensayo, la profundidad de hundimiento en el terreno que generó cada golpe y la resistencia de punta (MPa) que generó cada golpe. Esto lo obtenemos mediante la exportación de los datos de cada sondeo y el alisado de cada penetrógramo.

**Figura 48**

*Penetrograma característico para un material homogéneo definido*



Nota. Fuente: Elaboración propia

**Figura 49**

*Alisado del penetrograma del ensayo EP\_2*



Nota. Fuente: Elaboración propia

### 8.3. Mapa de isovalores en planta con ArcGis

#### 8.3.1. Introducción de datos

Para elaborar estos planos se necesitan los siguientes parámetros de cada ensayo los cuales son:

- Código del ensayo

- Coordenadas UTM – WGS84 (Este y Norte)
- Cota del ensayo
- Resistencia dinámica en la punta a profundidad promedio

**Tabla 14**

*Parámetros para mapa de isovalores en planta – WGS 84 Zona 19S*

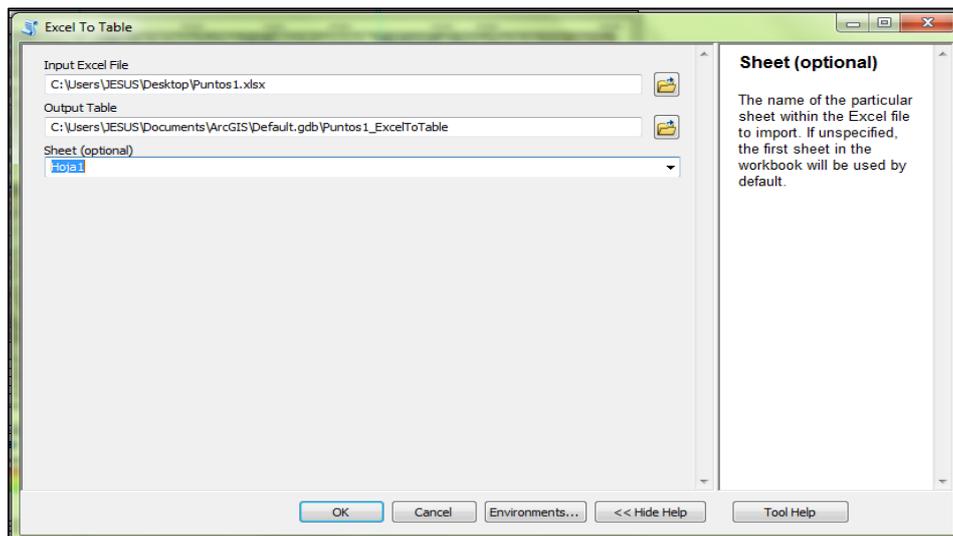
Ensayo de penetración	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Resistencia a la penetración (qd1)
EP_1	458800	8387608	4294.083	62.66
EP_2	458911	8387677	4292.217	55.08
EP_3	458960	8387861	4299.689	59.17
EP_4	458994	8387878	4274.853	94.51
EP_5	458961	8387934	4272.827	85.06
EP_6	459182	8388051	4241.002	69.01

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Seleccionamos nuestra hoja Excel con los parámetros establecidos y lo introducimos al software ArcGis para mediante la herramienta Excel to Table

**Figura 50**

*Introducción de hoja Excel a ArcGis - Planta*



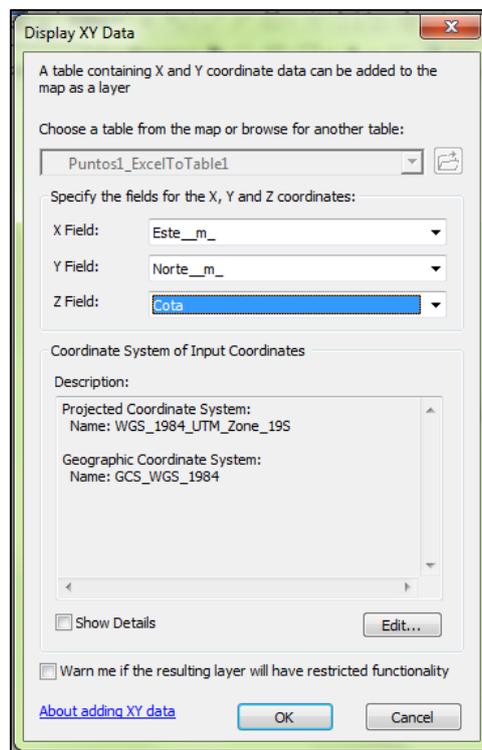
*Nota.* Fuente: Elaboración propia

### 8.3.2. Georreferenciar los puntos de los ensayos de compactación

Una vez cargada la hoja Excel en el ArcMap se procedió a georreferenciarlo y convertirlo a shape. Se abre una ventana donde se colocó los siguientes datos X Field = Este / Y Field = Norte / Z Field = Cota. En Edit se seleccionó el sistema de coordenada de la zona de estudio (Ejm: WGS 1984 UTM Zone 19S).

**Figura 51**

*Cuadro para ordenar los parámetros y la zona de georreferencia*

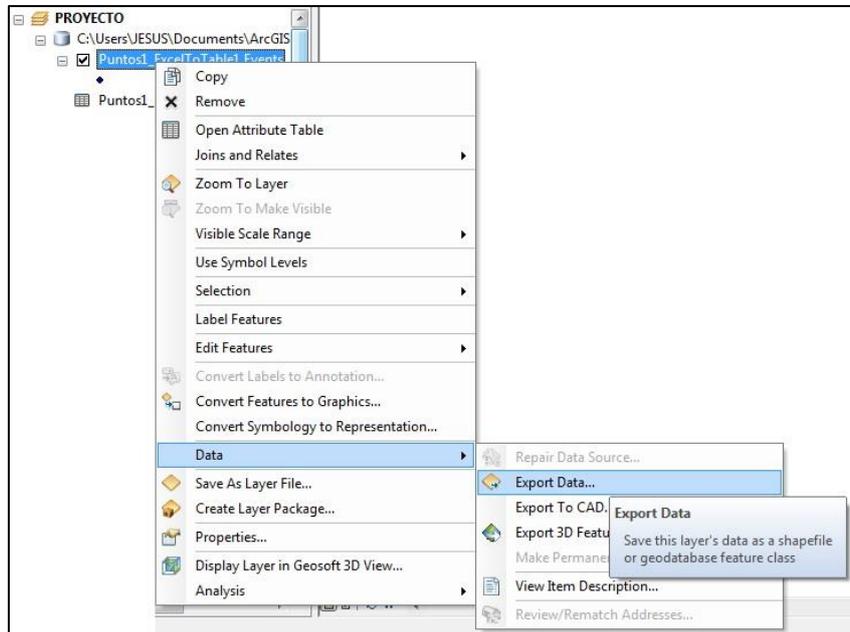


*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Se creó un archivo temporal y luego se va a la opción Data/Export Data para exportar el archivo en shape. Se agrega una dirección de carpeta donde se guardará el shape de la ubicación de los puntos de los ensayos. *Ver Figura 52 y Figura 53*

**Figura 52**

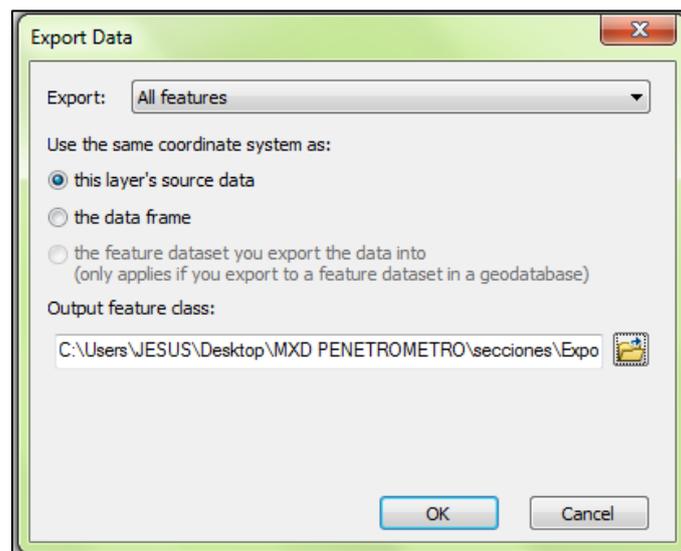
*Interfaz para exportar la data de los ensayos*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 53**

*Cuadro para guardar el shape de los puntos del ensayo*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Por defecto se genera un shape de puntos de ubicación de ensayos y se cambia la simbología de acuerdo con el formato que establecí para homogenizar este tipo de planos.

**Figura 54**

*Ensayos de compactación georreferenciados en ArcMap*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

### 8.3.3. Colocación de la imagen satelital

Se colocó una imagen satelital de fondo y para esto hay 2 opciones las cuales son la imagen satelital por defecto que ofrece el ArcMap y la otra opción es insertar una imagen satelital georreferenciada del programa SAS Planet. Para este caso se eligió la imagen satelital de SAS Planet porque la imagen satelital que ofrecía el ArcMap era muy antigua y no se podía apreciar correctamente la ubicación de los ensayos.

**Figura 55**

*Visualización de imagen de SAS Planet en la interfaz*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

### 8.3.4. Delimitación del área de influencia de los ensayos de compactación

Se creó un shape de polígono y se dibujó el contorno del dique con el fin de generar una delimitación al momento de interpolar los datos de resistencia de cada ensayo.

**Figura 56**

*Delimitación de área de influencia*



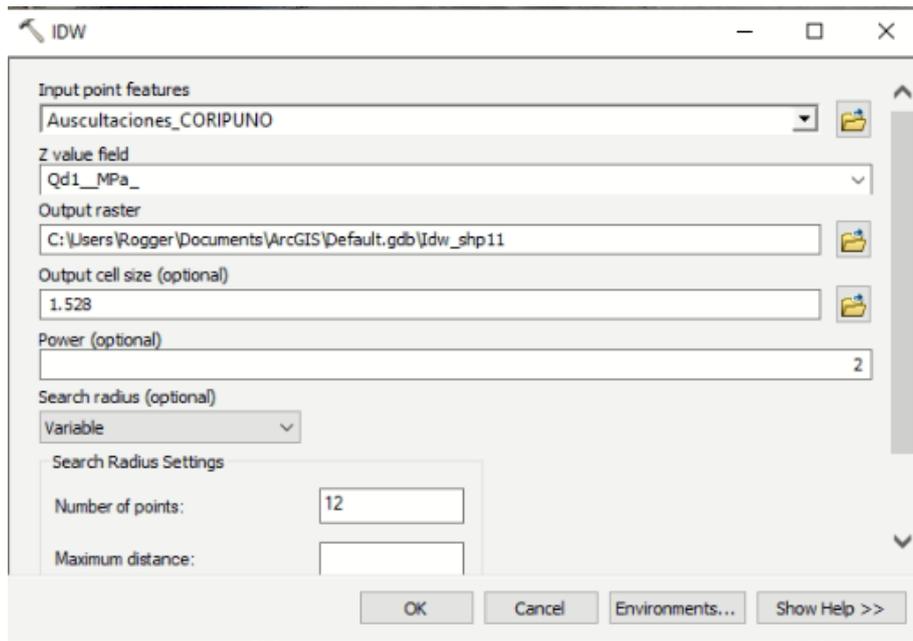
*Nota.* Fuente: Elaboración propia

### 8.3.5. Imagen TIFF de isovalores de los ensayos de compactación en planta

Con la herramienta IDW se realizó la interpolación de los datos. Se selecciono el shape de la tabla de los ensayos para que sean los datos de salida. Luego se escogió los valores de Z, que serían los datos de resistencia  $q_{d1}$  (MPa). Luego se escoge el shape de polígono (dique) que se había generado.

**Figura 57**

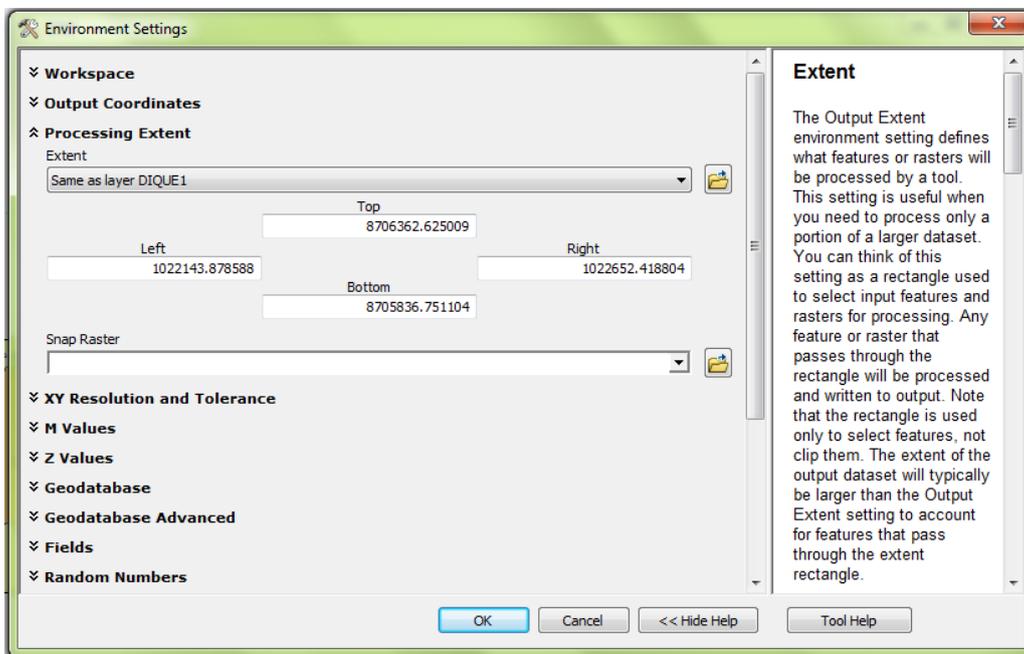
*Cuadro del interfaz de la herramienta IDW*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 58**

*Cuadro de environment para seleccionar el área de influencia del dique*

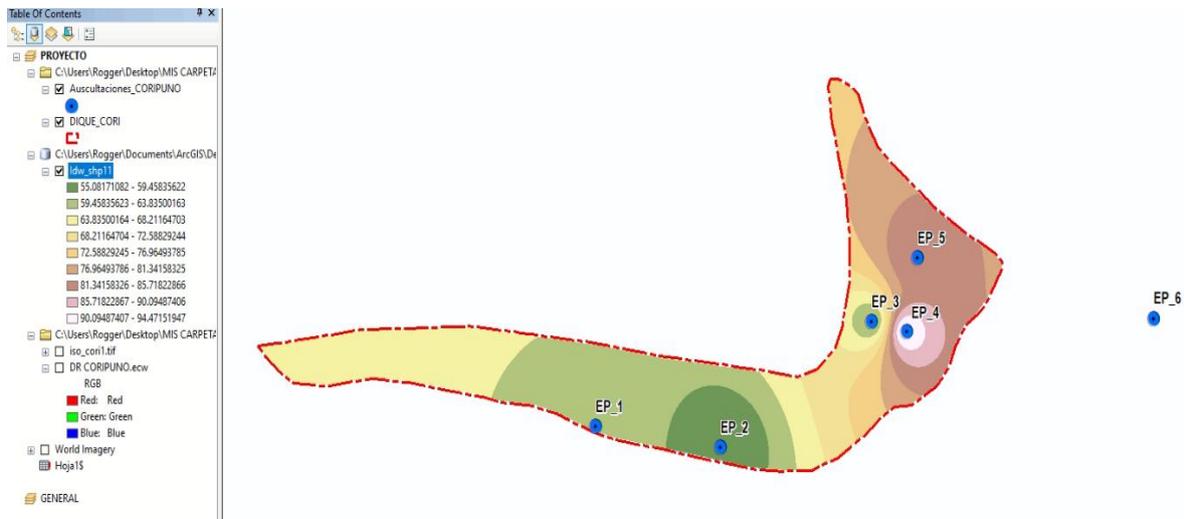


*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Se ubica Raster Analysis, se escoge el shape de polígono (dique) que se había generado para que procese la capa de colores de acuerdo con el rango de valores de resistencia  $q_{d1}$  (MPa).

**Figura 59**

*Raster de colores según el rango de valores de resistencia  $q_{d1}$  (MPa)*

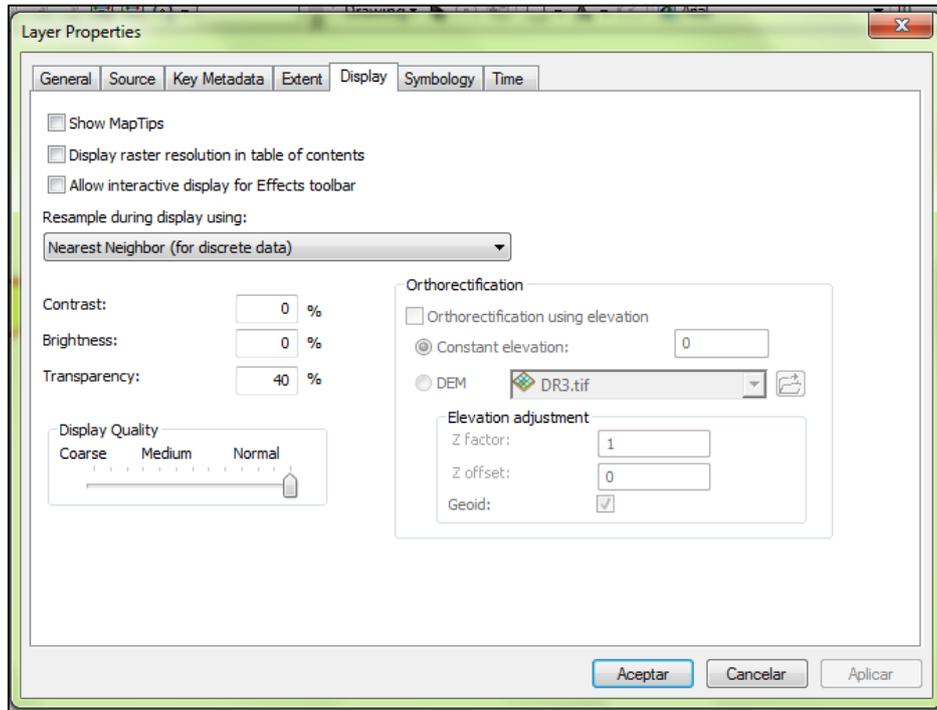


*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Se exporta el archivo de isovalores para obtener una imagen TIFF con la herramienta de Data/Export Data. Se selecciona la carpeta donde se ubicará la imagen TIFF y se le asigna un nombre. Finalmente, se obtiene una imagen TIFF y se desplegará sus opciones para ir a sus propiedades y cambiar la transparencia. En la pestaña Display de las propiedades se escogerá 40% de transparencia (este % es sugerido y podrá ser cambiado adecuando a la escala del mapa). Ver *Figura 60* y *Figura 61*

**Figura 60**

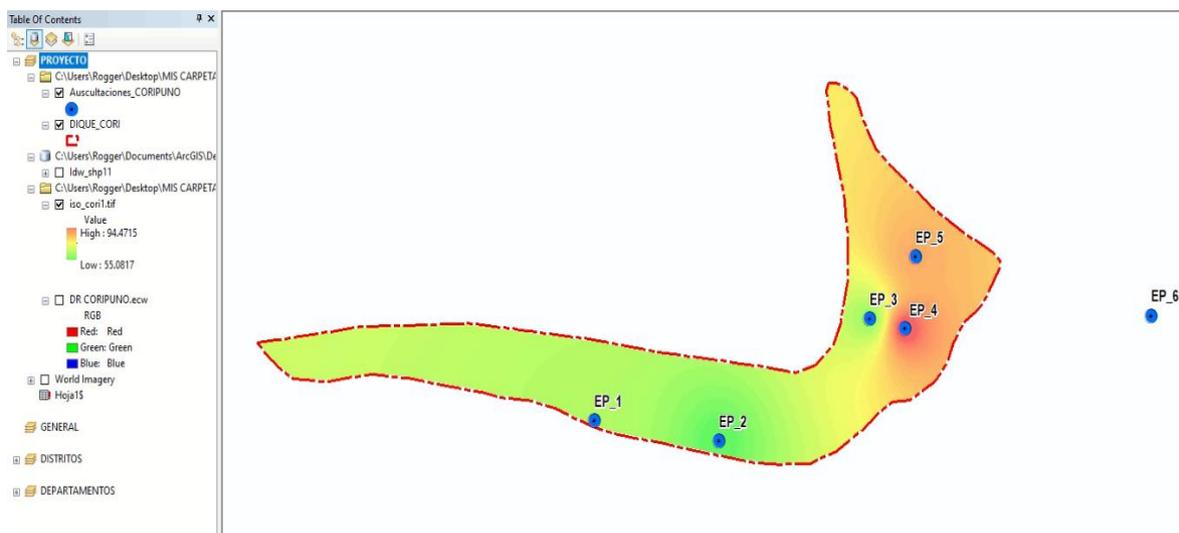
*Cuadro de propiedades para cambiar la transparencia de la imagen TIFF*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 61**

*Imagen TIFF según el rango de valores de resistencia qd1 (MPa)*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

## 8.4. Mapa de isovalores en secciones en ArcGis

### 8.4.1. Introducción de datos

De la data obtenida en campo pasar al Excel (una pestaña por ensayo). Dependiendo de las secciones que se realicen se colocara un dato en X (100, 110, 120, 130, etc); en el caso de Z se tomara el dato de la cota del ensayo menos los valores de profundidad por cada golpe. Con esto tendremos coordenadas relativas y un valor por cada punto en cada ensayo realizado.

**Figura 62**

*Formato Excel para introducir al ArcMap*

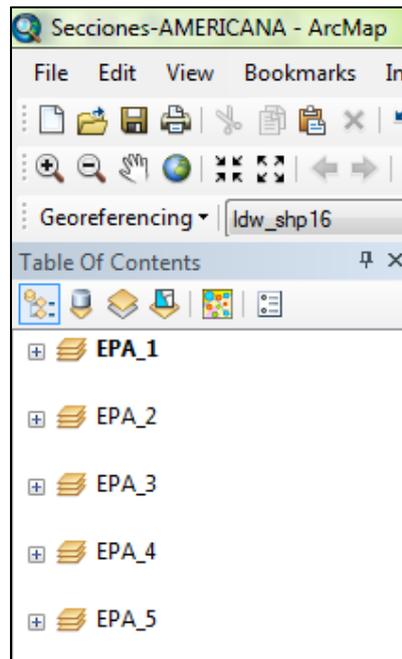
	A	B	C	D	E
1	X	Z	Resistencia de punta		
2	100	4689.96456	11.28		
3	100	4689.96128	40.8		
4	100	4689.95848	43.51		
5	100	4689.95678	67.83		
6	100	4689.95274	30.35		
7	100	4689.94923	36.48		
8	100	4689.94648	45.65		
9	100	4689.94356	47.92		
10	100	4689.94028	48.32		
11	100	4689.93666	40.87		
12	100	4689.93402	59.62		
13	100	4689.93209	74.85		
14	100	4689.92829	46.8		
15	100	4689.92501	47.62		
16	100	4689.92156	47.55		
17	100	4689.91893	59.01		
18	100	4689.91688	74		
19	100	4689.91495	89.98		
20	100	4689.91331	102.3		
21	100	4689.91127	81.5		
22	100	4689.90922	71.58		
23	100	4689.90752	93.07		

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

En ArcMap se creó un Data Frame por cada ensayo realizado, por lo cual, se copió la configuración y propiedades de formato que establecí anteriormente.

**Figura 63**

*Formatos del Data Frame*

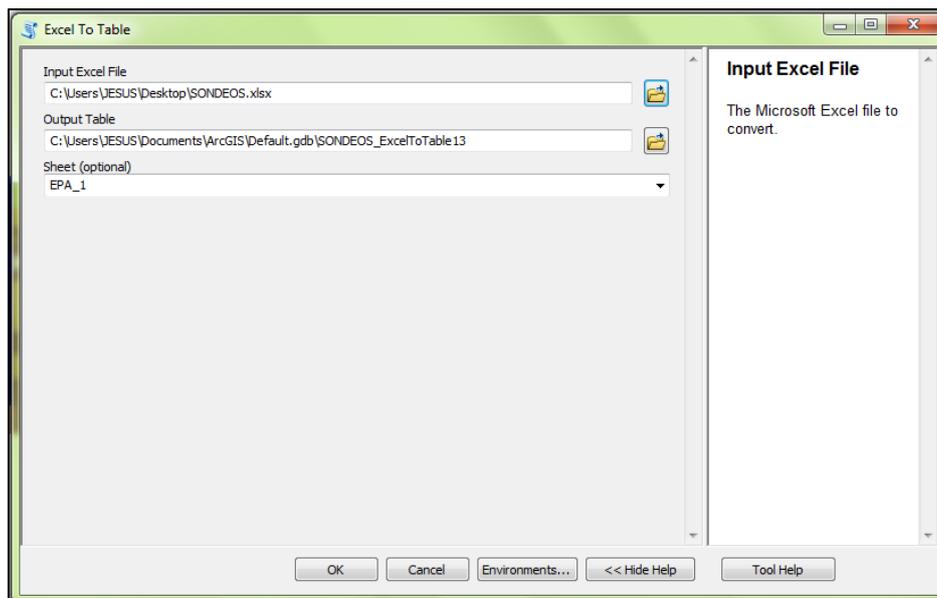


*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Con la herramienta Excel to table se convirtió el Excel de ensayos en datos de ArcMap. Una vez en la interfaz se seleccionó el archivo Excel y se eligió la hoja Excel la cual cada hoja corresponde a cada ensayo realizado.

**Figura 64**

*Introducción de hoja Excel a ArcGis - Secciones*



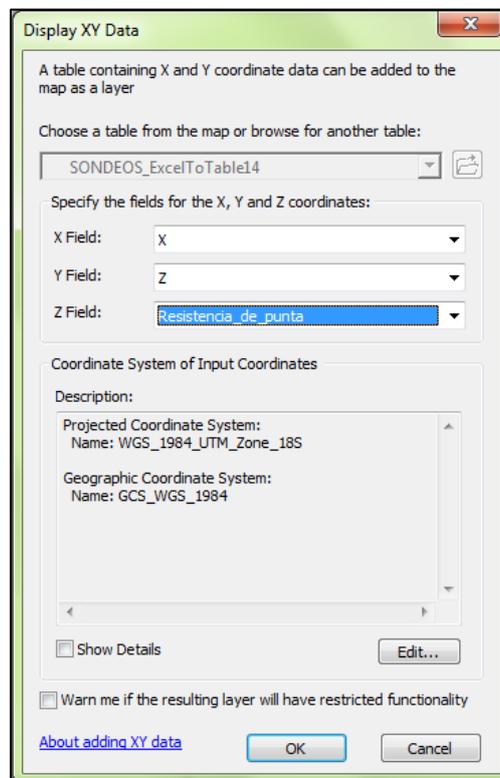
*Nota.* Fuente: Elaboración propia

### 8.4.2. Georreferenciar los puntos de los ensayos de compactación

Una vez cargada la hoja Excel en el ArcMap se procedió a georreferenciarlo y convertirlo a shape. Se abre una ventana donde se colocó los siguientes datos X Field = X / Y Field = Z / Z Field = Resistencia qd1. En Edit se seleccionó el sistema de coordenada de la zona de estudio (Ejm: WGS 1984 UTM Zone 19S).

**Figura 65**

*Cuadro para ordenar los parámetros y la zona de georreferencia*

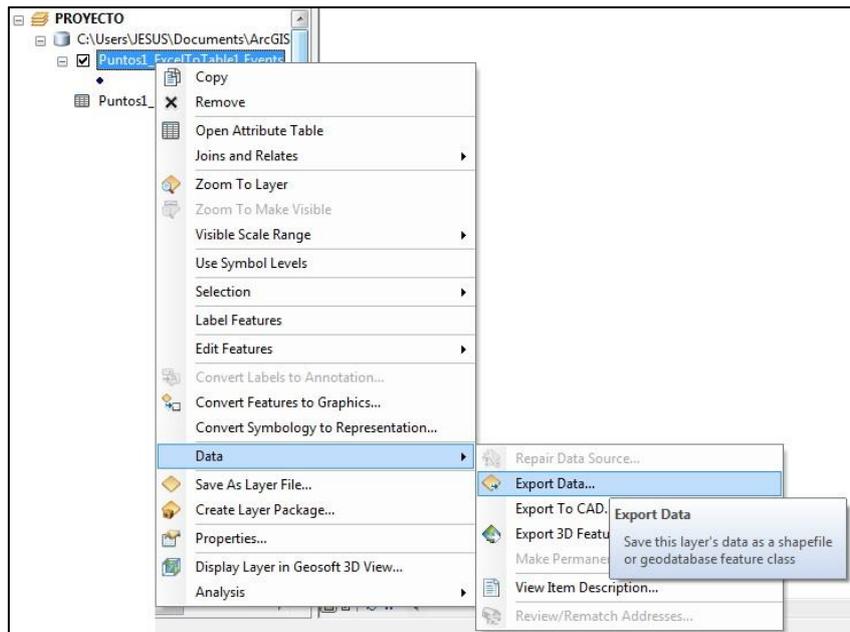


*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Se creó un archivo temporal y con click derecho se va a Data/Export data para exportar el archivo en shape. Se direcciona una ubicación donde se guardó el shape y se da click izquierdo en OK.

**Figura 66**

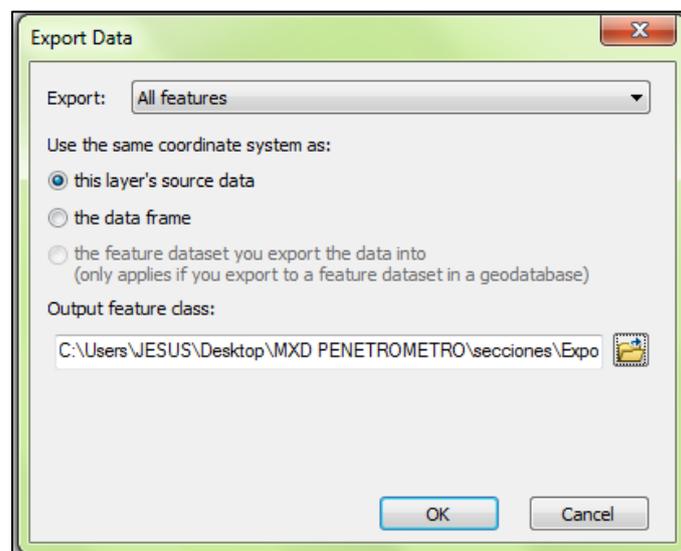
*Interfaz para exportar la data de los ensayos*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 67**

*Cuadro para guardar el shape de los puntos del ensayo*

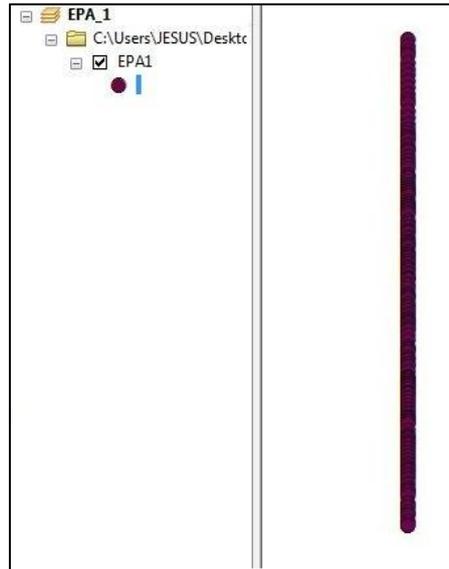


*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Por defecto se genera un shape de puntos de ubicación de ensayos y se cambiara la simbología de acuerdo con el formato que se establecí para homogenizar este tipo de planos.

**Figura 68**

*Profundidad de sección del ensayo de compactación georreferenciados en ArcMap*

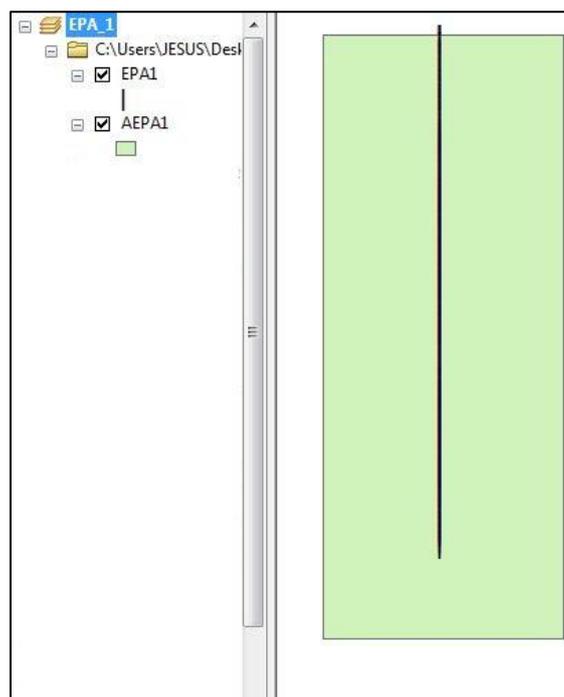


*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Se dibujó un shape de polígono de 1 metro de ancho aproximadamente (dependerá de la profundidad del ensayo, mientras menos profundo menos el ancho y viceversa) con el fin de generar una delimitación al momento de interpolar los datos de resistencia.

**Figura 69**

*Área de trabajo de la sección del ensayo de compactación*



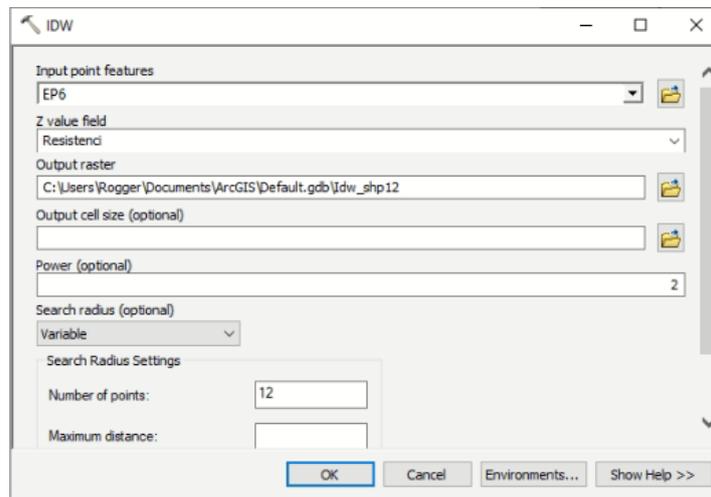
*Nota.* Fuente: Elaboración propia

### 8.4.3. Imagen TIFF de isovalores de los ensayos de compactación en secciones

Con la herramienta IDW se realizó la interpolación de los datos. Se selecciono el shape de la tabla de los ensayos para que sean los datos de salida. Luego se escogió los valores de Z, que serían los datos de resistencia qd1 (MPa). Luego se escoge el shape de polígono (dique) que se había generado.

**Figura 70**

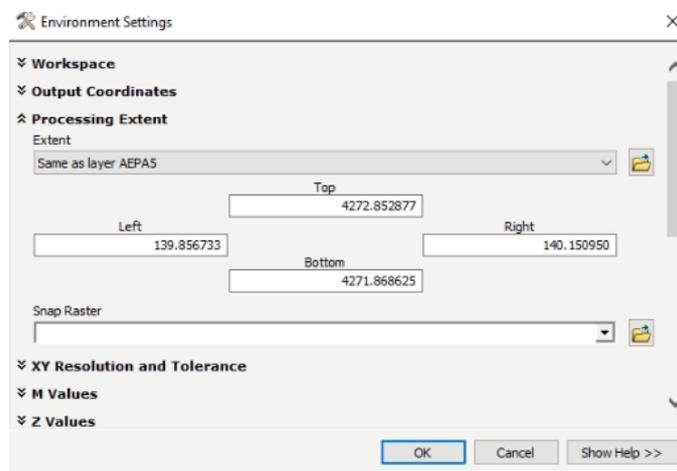
*Cuadro del interfaz de la herramienta IDW*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 71**

*Cuadro de environment para seleccionar el área de trabajo de la sección del ensayo*

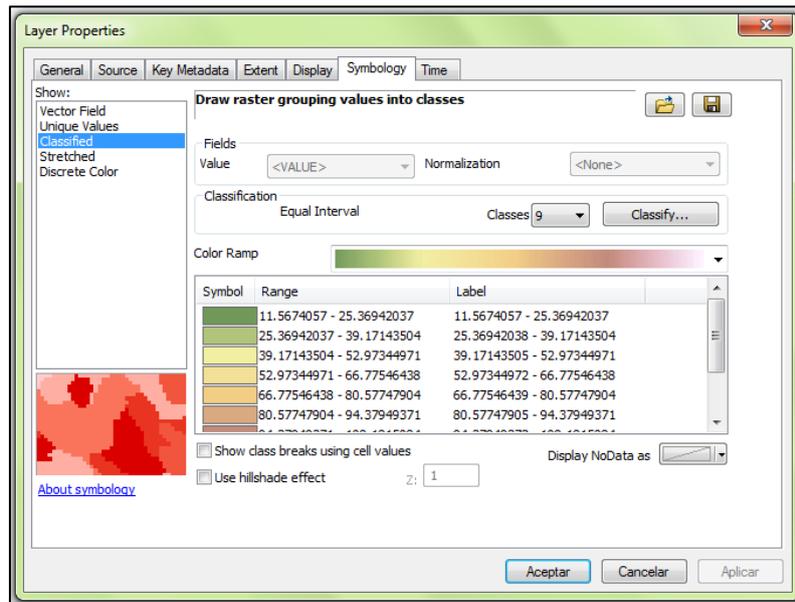


*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Se genera la interpolación dentro del shape de polígono que se había creado. Luego se da clic derecho en la interpolación creada para ir a sus propiedades. Se cambiaron las clases ya que por defecto salen 9, dar clic izquierdo en Classify.

**Figura 72**

*Interfaz de la imagen TIFF en el polígono creado*

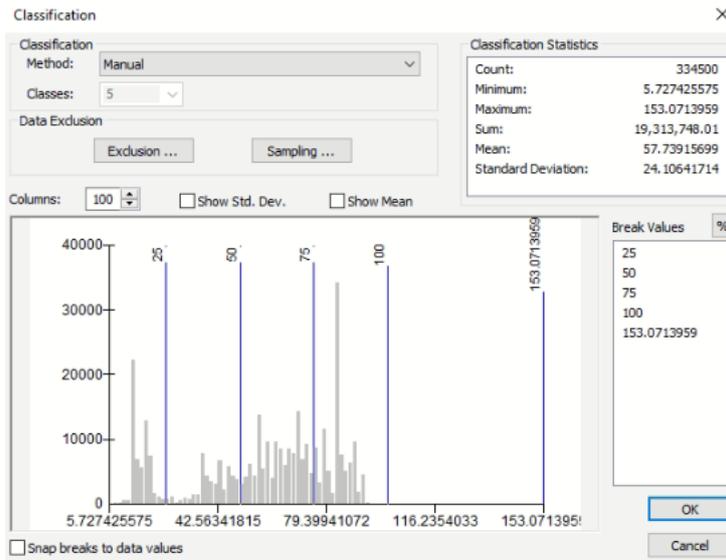


*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Según el formato que establecí se sugiere escoger 5 clases (divisiones). Se cambiaron los valores de cada clase (división), se sugiere colocar los rangos 25, 50, 75, 100 y el valor máximo por defecto.

**Figura 73**

*Intervalos de los valores de resistencia qd1 (MPa)*

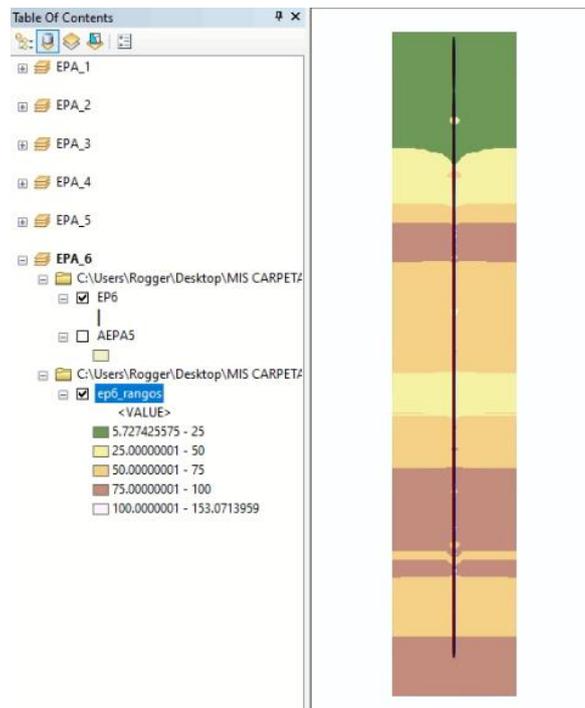


Nota. Fuente: Elaboración propia

Finalmente se dará clic izquierdo en OK y luego en Aceptar y tendremos la sección finalizada. Se realizó los mismos pasos del procedimiento para cada una de las secciones de los ensayos de compactación.

**Figura 74**

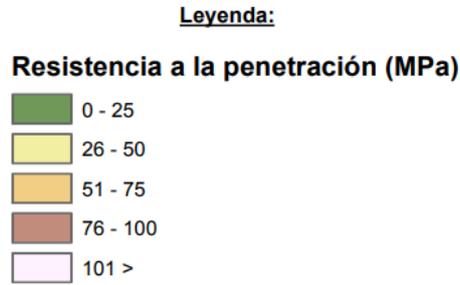
*Sección de isovalores del ensayo de compactación EP\_6*



Nota. Fuente: Elaboración propia

**Figura 75**

*Leyenda generada por los intervalos de los valores de resistencia qd1 (MPa)*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

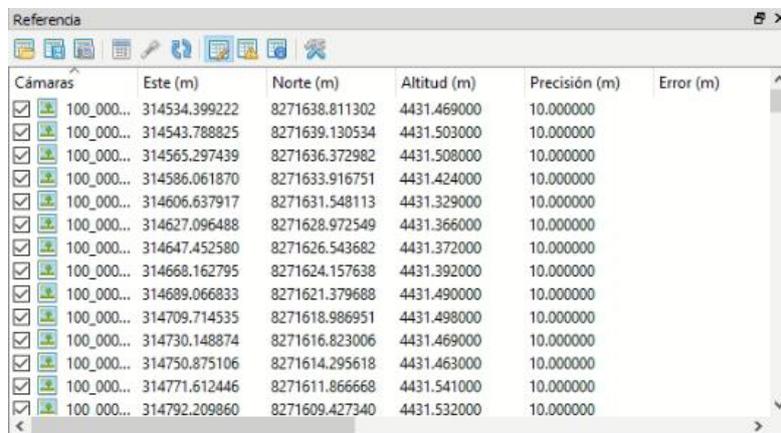
### 8.5. Topografía actualizada y ortofoto georreferenciada con Agisoft PhotoScan

#### 8.5.1. Georreferencia de las dianas

Para la georreferencia de los puntos de control se colocaron dianas de material plástico con medidas de 1.00m x 1.00m para que sean visibles para el DRONE cuando este en pleno vuelo tomando fotografías a los cuadrantes programados. Para esta actividad se descargaron las fotografías tomadas por el DRONE en una carpeta la cual fueron subidas al programa PhotoScan.

**Figura 76**

*Grupo de fotografías tomadas en campo*



Cámaras	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Precisión (m)	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> 100_000...	314534.399222	8271638.811302	4431.469000	10.000000	
<input checked="" type="checkbox"/> 100_000...	314543.788825	8271639.130534	4431.503000	10.000000	
<input checked="" type="checkbox"/> 100_000...	314565.297439	8271636.372982	4431.508000	10.000000	
<input checked="" type="checkbox"/> 100_000...	314586.061870	8271633.916751	4431.424000	10.000000	
<input checked="" type="checkbox"/> 100_000...	314606.637917	8271631.548113	4431.329000	10.000000	
<input checked="" type="checkbox"/> 100_000...	314627.096488	8271628.972549	4431.366000	10.000000	
<input checked="" type="checkbox"/> 100_000...	314647.452580	8271626.543682	4431.372000	10.000000	
<input checked="" type="checkbox"/> 100_000...	314668.162795	8271624.157638	4431.392000	10.000000	
<input checked="" type="checkbox"/> 100_000...	314689.066833	8271621.379688	4431.490000	10.000000	
<input checked="" type="checkbox"/> 100_000...	314709.714535	8271618.986951	4431.498000	10.000000	
<input checked="" type="checkbox"/> 100_000...	314730.148874	8271616.823006	4431.469000	10.000000	
<input checked="" type="checkbox"/> 100_000...	314750.875106	8271614.295618	4431.463000	10.000000	
<input checked="" type="checkbox"/> 100_000...	314771.612446	8271611.866668	4431.541000	10.000000	
<input checked="" type="checkbox"/> 100_000...	314792.209860	8271609.427340	4431.532000	10.000000	

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Luego de haber subido las fotografías se ingresan las coordenadas tomadas en campo (Norte, Este, Altitud) de los puntos de control de las dianas para corregir los posibles errores tomados por el DRONE.

**Figura 77**

*Coordenadas de las dianas dejadas en campo*

MarCADORES	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Precisión (m)	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> P1	458800.750000	8387996.080000	4331.372000	0.005000	
<input checked="" type="checkbox"/> P2	458420.220000	8387668.140000	4338.901000	0.005000	
<input checked="" type="checkbox"/> P3	458394.180000	8387414.920000	4332.473000	0.005000	
<input checked="" type="checkbox"/> P4	458503.190000	8387311.780000	4320.011000	0.005000	
<input checked="" type="checkbox"/> P5	458572.480000	8387450.920000	4308.274000	0.005000	
<input checked="" type="checkbox"/> P6	458719.830000	8387623.220000	4331.021000	0.005000	
<input checked="" type="checkbox"/> P7	458920.020000	8387677.090000	4291.604000	0.005000	
<input checked="" type="checkbox"/> P8	459119.100000	8388026.670000	4243.622000	0.005000	
<input checked="" type="checkbox"/> P9	459149.920000	8387867.630000	4278.310000	0.005000	
<input checked="" type="checkbox"/> P10	459305.910000	8388185.290000	4225.021000	0.005000	
<input checked="" type="checkbox"/> P11	459114.910000	8388198.670000	4297.991000	0.005000	
<b>Error total</b>					
Puntos de ap...					
Puntos de co...					

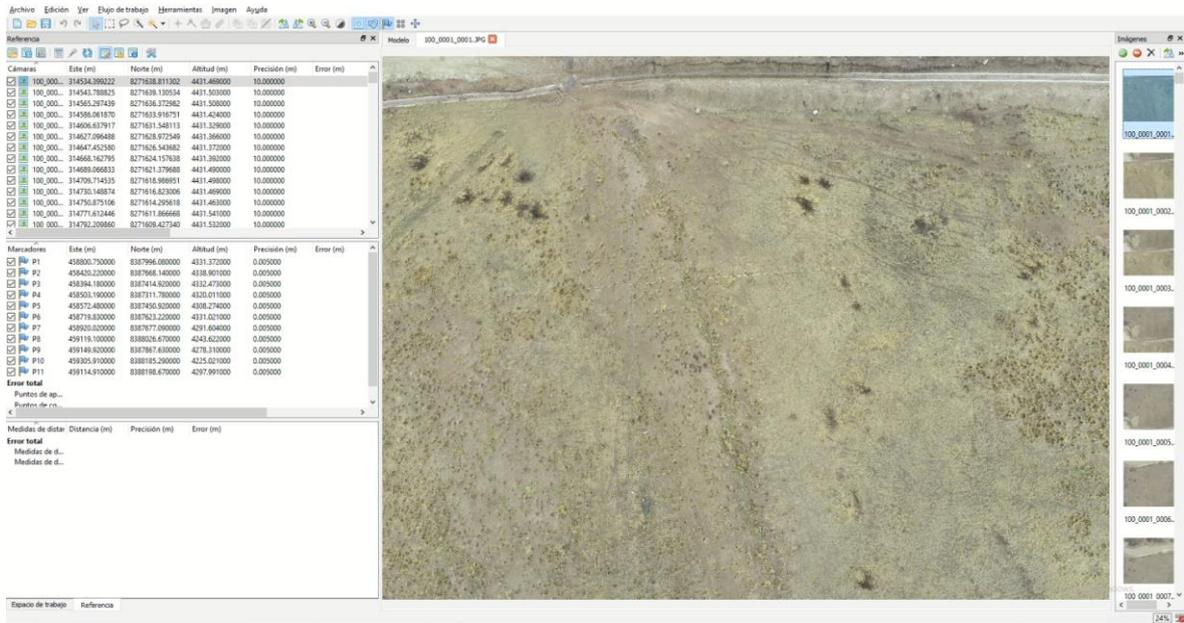
*Nota.* Fuente: Elaboración propia

### 8.5.2. Identificación y filtrado de fotografías del DRONE

Una vez colocado los datos necesarios se procede a filtrar las imágenes con los marcadores (puntos de control de las dianas) obtener el conjunto de fotografías que se encuentran en esa coordenada.

**Figura 78**

*Interfase del software PhotoScan*



Nota. Fuente: Elaboración propia

En esta actividad apoye en georreferenciar las fotografías tomadas por el DRONE con los puntos de control mencionados anteriormente. Ya que cuando el DRONE hace el vuelo programado toma varias fotos de distintos ángulos en cada cuadrante del plan de vuelo.

**Figura 79**

*Fotografía de la Diana P7*



Nota. Fuente: Elaboración propia

**Figura 80**

*Fotografía de la Diana P6*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 81**

*Fotografía de la Diana P5*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 82**

*Fotografía de la Diana P2*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

## **8.6. Análisis de Estabilidad del Depósito de Relaves Minero**

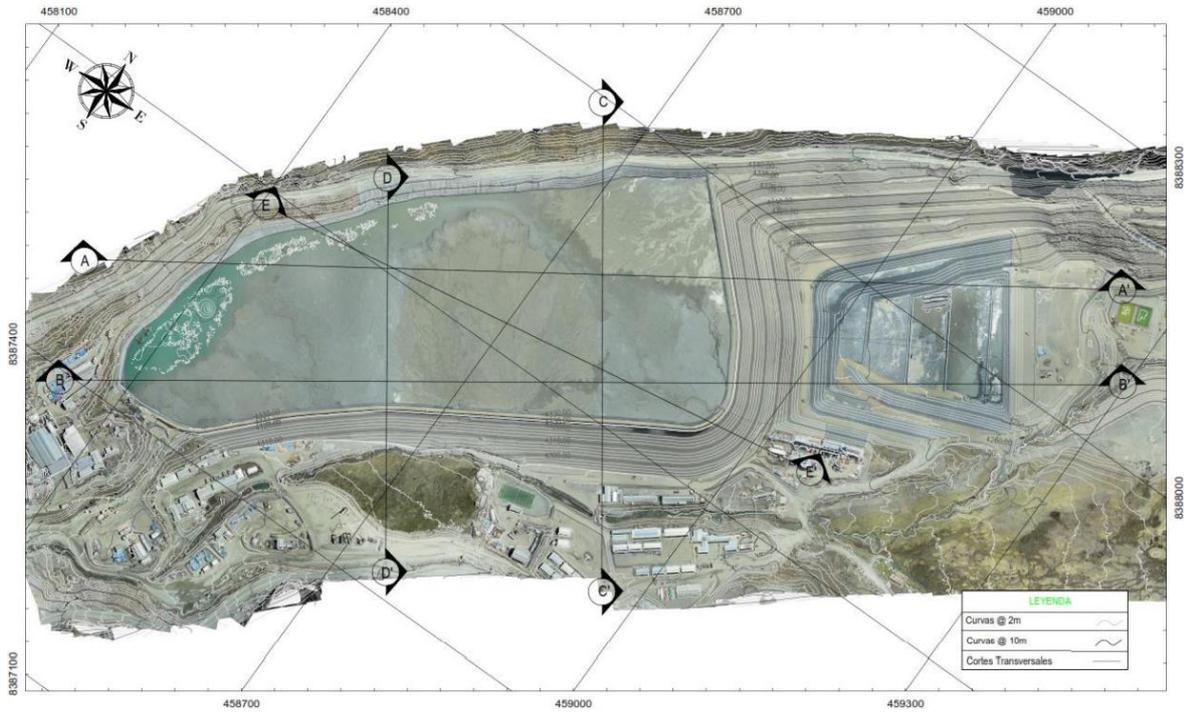
### **8.6.1. Eje de los perfiles de análisis del Depósito de Relaves**

Para desarrollar esta actividad fue necesario recopilar la información de los planos topográficos anteriores en cada etapa de recrecimiento que tuvo el depósito de relaves, ya que, en cada etapa de recrecimiento los parámetros de estudio varían. Estas etapas de recrecimiento se plasman en vistas de perfiles las cuales van una encima de otra para formar un perfil final con la topografía actualizada que generó el DRONE. Los ejes de los perfiles fueron definidos por los líderes del proyecto, por consiguiente, estos perfiles se utilizaron como secciones de análisis de estabilidad.

Los perfiles propuestos son los siguientes: A-A', B-B', C-C', D-D', E-E'.

**Figura 83**

*Vista en planta de los ejes de corte del Depósito de Relaves Minero*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

### 8.6.2. Nivel freático del Depósito de Relaves

- **Información piezométrica:** En campo se midió el nivel del agua de los 6 piezómetros instalados que había en el Depósito de Relaves Minero los cuales fueron tomados el 13 de julio del 2020.

**Tabla 15**

*Niveles piezométricos al 13 de julio de 2020*

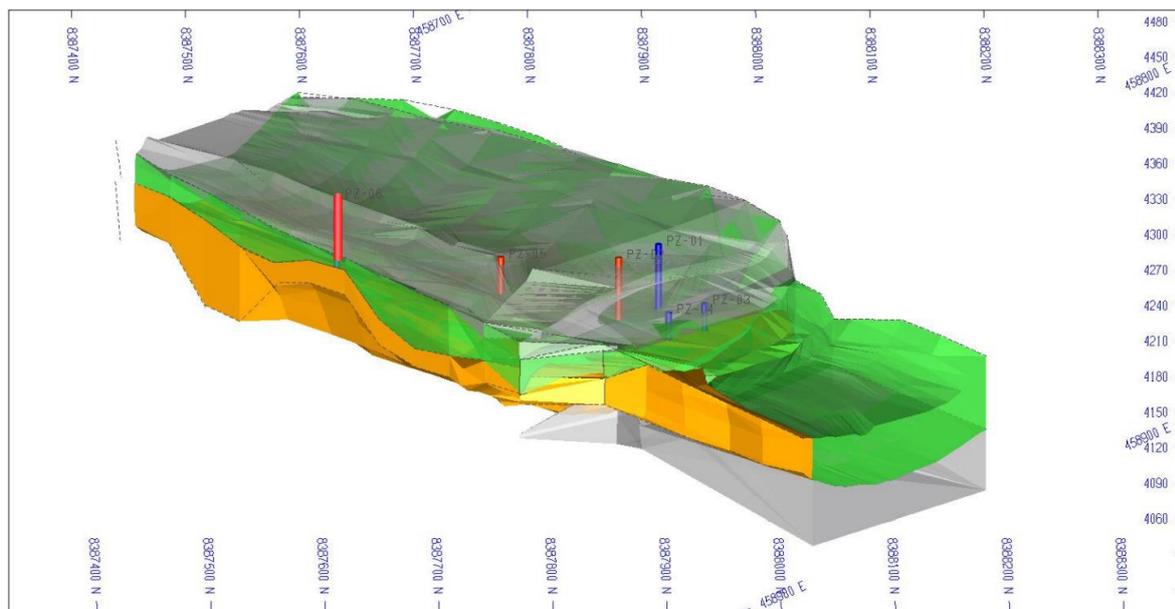
Código	Coordenadas (WGS 84)		Sector	Profundidad instalada (m)	Nivel Piezométrico (m)	Condición
	Este	Norte				
PZ-1	458883.5	8387893	Sector central corona del dique	64.88	-	Seco
PZ-2	458916.6	8387853	Sector central corona del dique	71.77	68.58	Agua
PZ-3	458940.3	8387926.5	Sector central corona del dique	26.01	-	Seco

Código	Coordenadas (WGS 84)		Sector	Profundidad instalada (m)	Nivel Piezométrico (m)	Condición
	Este	Norte				
PZ-4	458965.9	8387890.9	Sector central corona del dique	25.44	-	Seco
PZ-5	458912.5	8387748.1	Estribo derecho del dique	34.11	68.58	Agua
PZ-6	458716.4	8387628.6	Estribo derecho del dique	69.92	36.95	Agua

Nota. Fuente: Clean Technology

### Figura 84

Modelo geotécnico estructural integrado al registro de piezómetros instalados en el depósito de relaves Minero

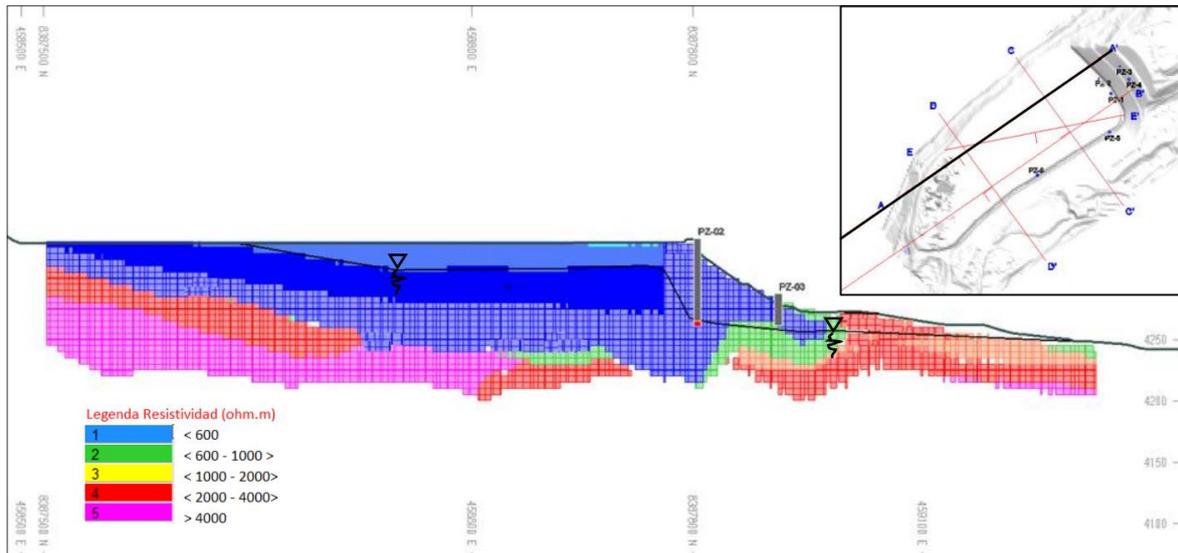


Nota. Fuente: Clean Technology

- Información de la tomografía eléctrica:** Además de la información piezométrica se obtuvo perfiles geoelectrónicos los cuales nos ayudaron a determinar el nivel freático a nivel de secciones en perfiles. Ya que estos estudios nos permiten conocer mediante los niveles o zonas de resistividad, el tipo de material por el cual está conformado estas capas de suelo. Los siguientes perfiles que se muestran a continuación:

**Figura 85**

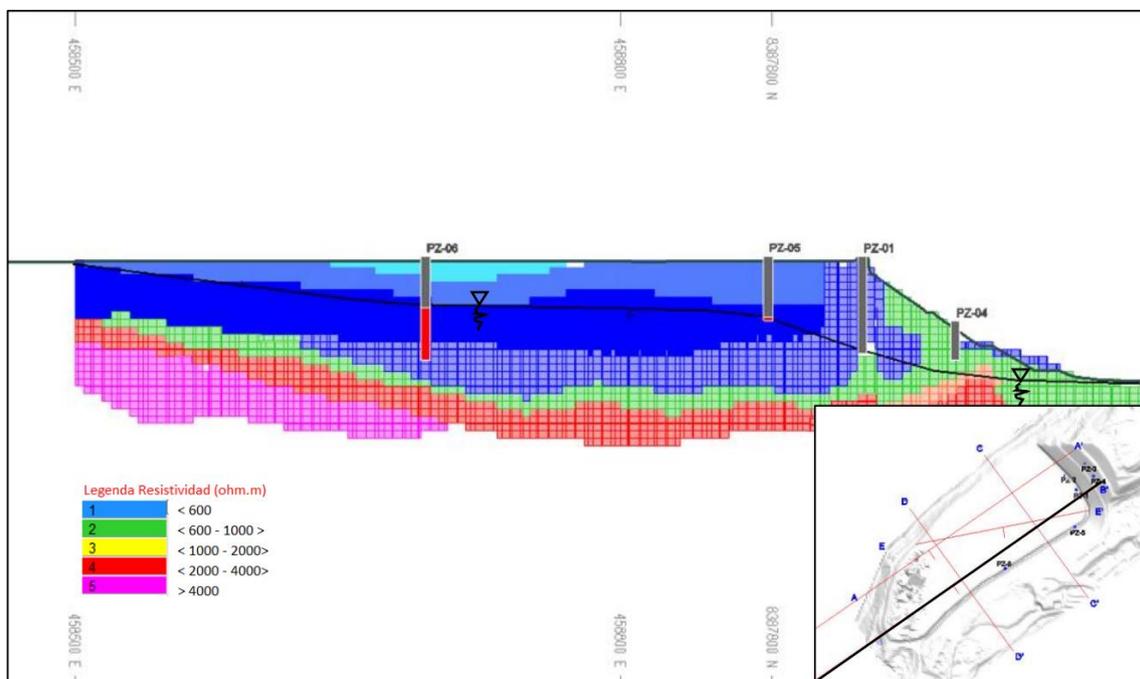
*Perfil geo eléctrico Sección AA' del Depósito de Relaves Minero*



*Nota.* Fuente: Clean Technology

**Figura 86**

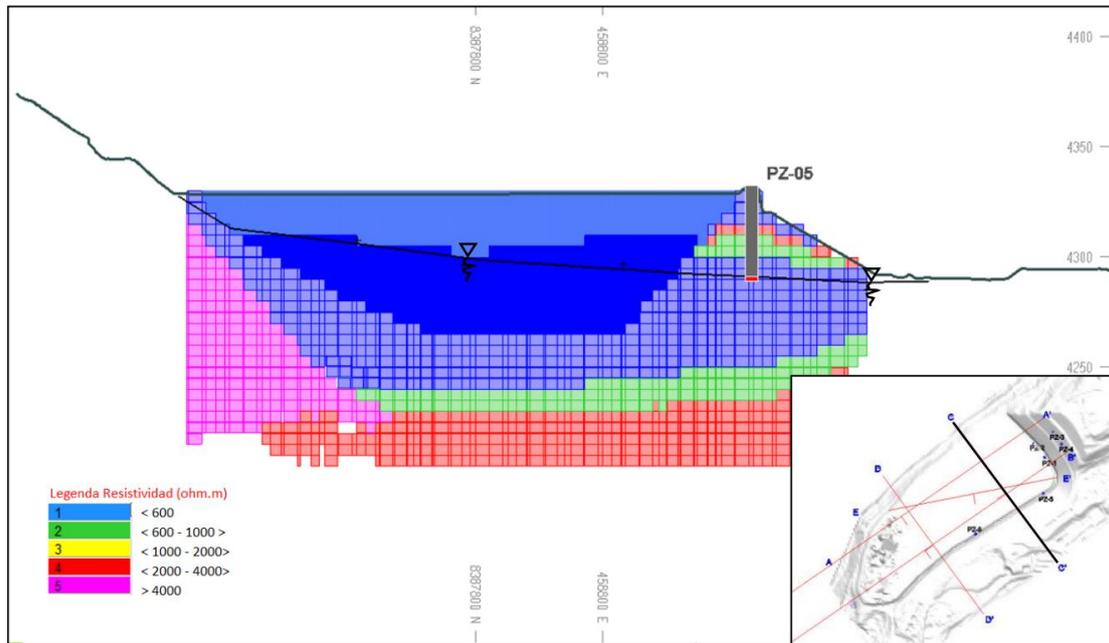
*Perfil geo eléctrico Sección BB' del Depósito de Relaves Minero*



*Nota.* Fuente: Clean Technology

**Figura 87**

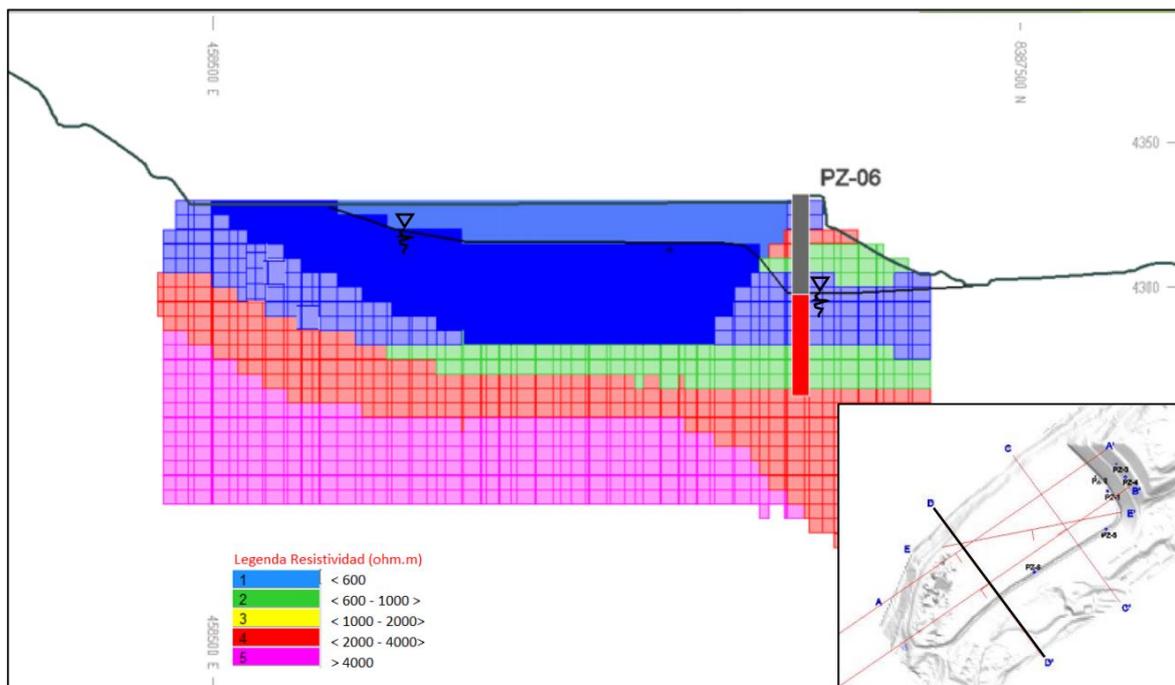
*Perfil geo eléctrico Sección CC' del Depósito de Relaves Minero*



*Nota.* Fuente: Clean Technology

**Figura 88**

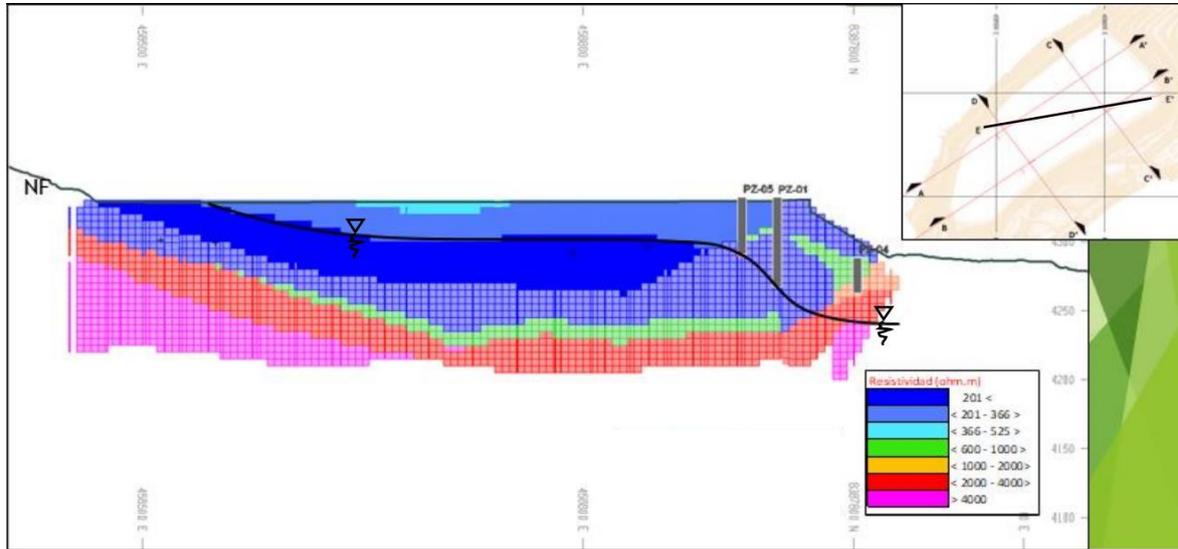
*Perfil geo eléctrico Sección DD' del Depósito de Relaves Minero*



*Nota.* Fuente: Clean Technology

**Figura 89**

*Perfil geo eléctrico Sección EE' del Depósito de Relaves Minero*



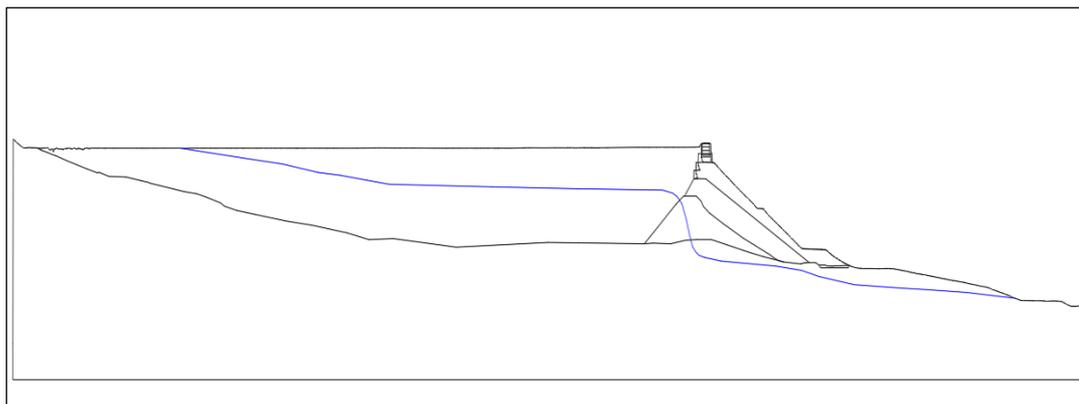
*Nota.* Fuente: Clean Technology

### 8.6.3. Perfil del Depósito de Relaves por etapas de Recrecimiento

Luego de obtener la información sobre los ejes y el nivel freático actual procedí a generar los perfiles en AutoCAD Civil 3D. Estos perfiles fueron elaborados mediante capas específicas que diferencian el material, el contorno y el nivel del agua. Además de exportarlos en Formato DXF para que puedan ser ingresados al software RS2.

**Figura 90**

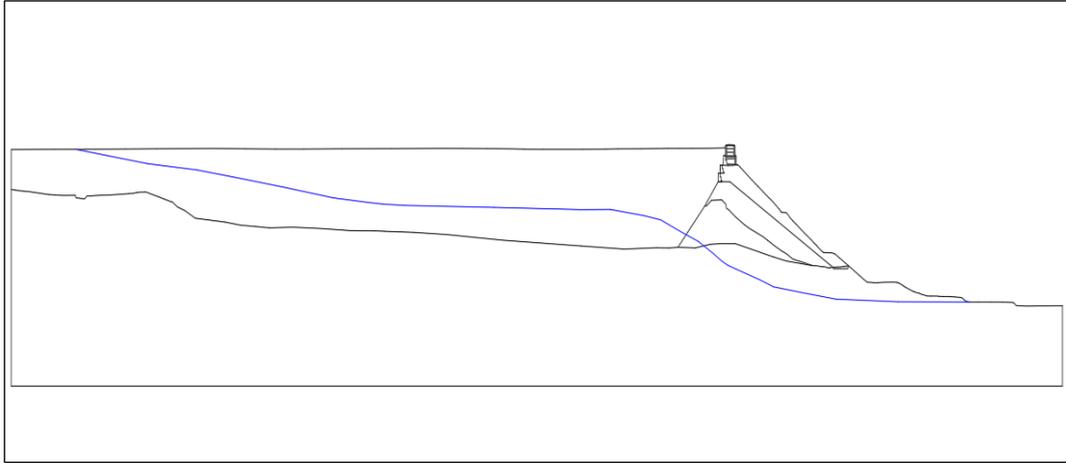
*Sección de análisis A-A'*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 91**

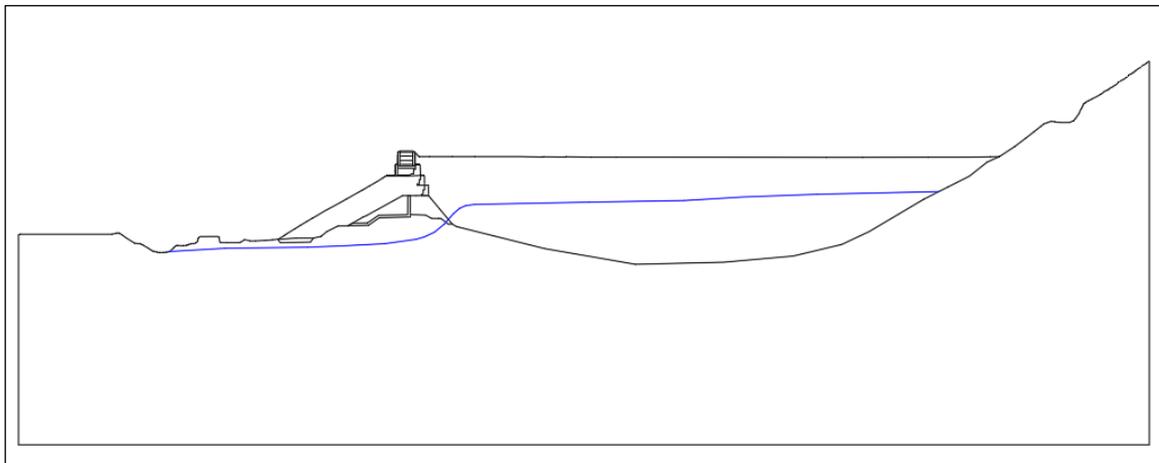
*Sección de análisis B-B'*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 92**

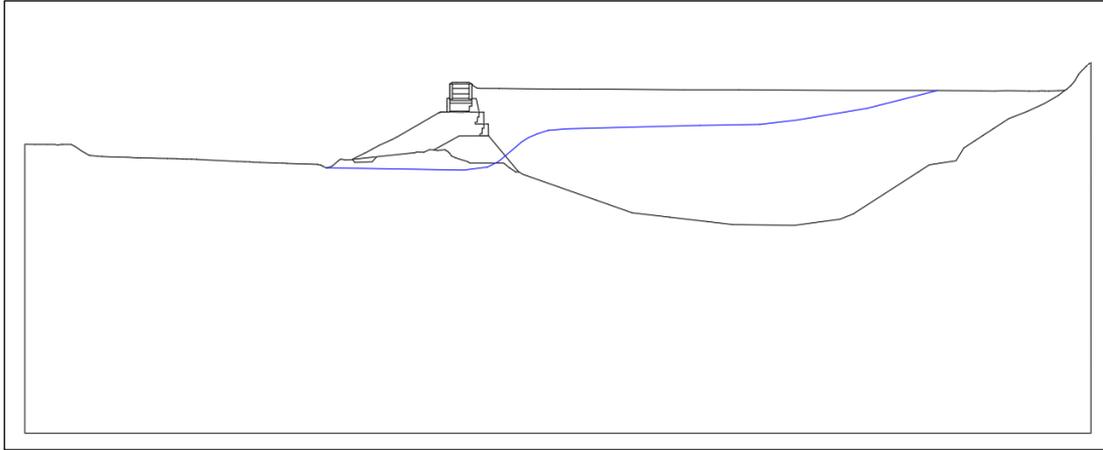
*Sección de análisis C-C'*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 93**

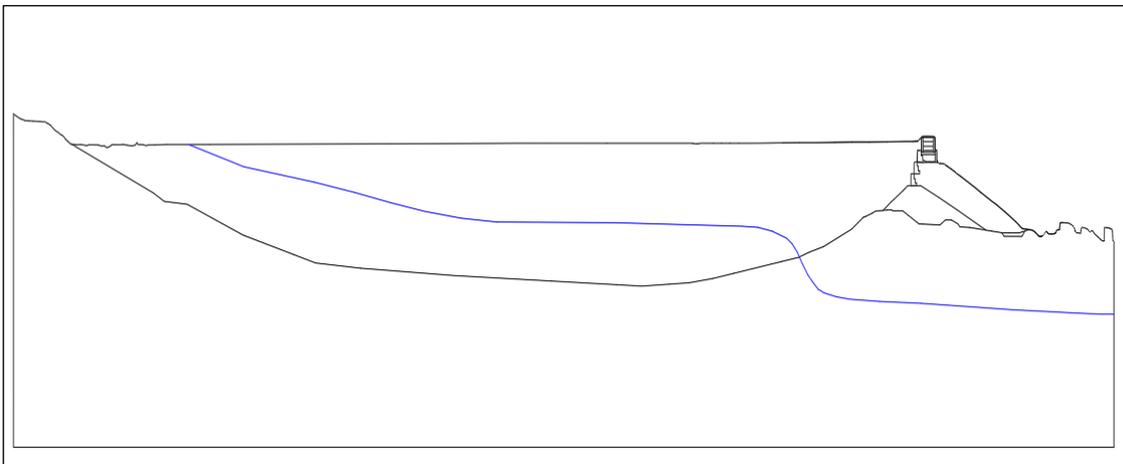
*Sección de análisis D-D'*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 94**

*Sección de análisis E-E'*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

#### **8.6.4. Evaluación de Parámetros geotécnicos**

Finalmente, luego de realizar la búsqueda histórica en los informes, estudios, monitoreos proporcionados por la Unidad Minera y los últimos estudios realizados en la visita a campo las cuales son los estudios de tomografía eléctrica y los estudios de mecánica de suelos se definieron los siguientes parámetros geotécnicos.

**Tabla 16**

*Parámetros efectivos de Resistencia*

Material	(kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión, C' (kpa)	Fricción ϕ(°)
Cimentación	19.27	15.69	40.50
Presa existente	23.00	30.40	41.80
Recrecimiento	19.91	8.22	32.30
Relleno Granular	22.00	0.00	38.00
Relave	14.00	17.23	20.74
Caja gavión	18.00	17.50	40.00
Geomembrana	20.00	1.00	35.00

*Nota.* Fuente: Clean Technology

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del ensayo de compactación con el Penetrómetro PANDA, los resultados del vuelo con el DRONE Phantom 4 RTK y, por último, los resultados del Análisis de Estabilidad del Depósito de Relaves Minero.

### 1. Resultados del ensayo de compactación

#### 1.1. Resultados del penetrograma

Se muestran los resultados obtenidos luego de haber procesado los datos de los ensayos de compactación desde el EP\_1 hasta el EP\_6 con sus respectivas curvas de valor límite y de valor de referencia generadas por cada terraplén asignado.

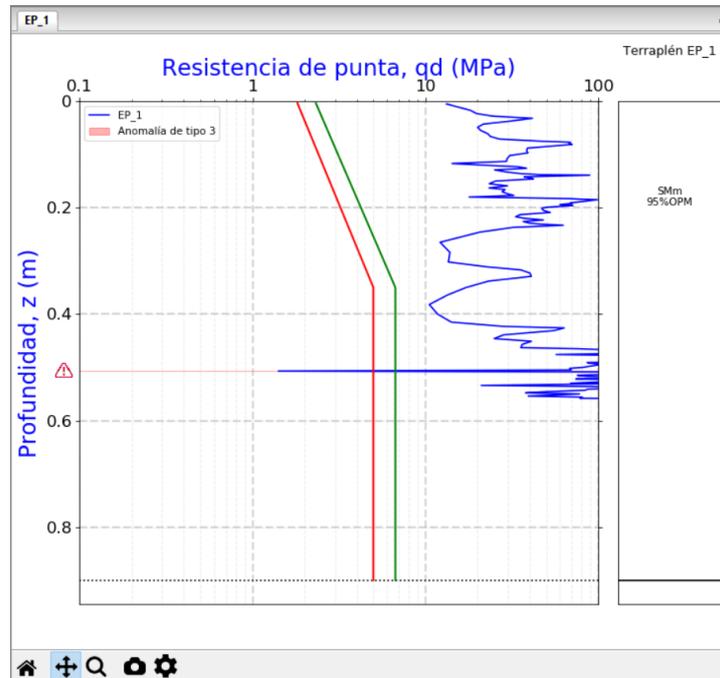
##### 1.1.1. Ensayo EP\_1

El ensayo in-situ se realizó hasta una profundidad alcanzada de 0.559 m, con un estado hídrico (Medio), y grado de compactación al 95% OPM; el penetrograma obtenido  $\log q_d(z)$  nos indica que la señal penetrométrica aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor constante a una determinada profundidad crítica  $Z_c=0.084$  m, asimismo la resistencia de punta estabilizada ( $q_{d1}$ ), determinada como el valor promedio ponderado de la resistencia de punta  $q_d$  entre la profundidad final y la profundidad crítica, es de  $q_{d1}=62.66$  MPa. La posición relativa del penetrograma,  $q_d(z)$ , está ubicado a la derecha con respecto a las curvas  $q_{dR}$  y  $q_{dL}$ , sin embargo, solo en la profundidad  $Z_1= 0.507$  m tiende a ubicarse en la zona de rechazo, además, se aprecia en la gráfica que la distancia de este punto hasta la curva de referencia ( $q_R$ ) es superior a la distancia del espacio entre  $q_{dR}$  y  $q_{dL}$ . Esto indica que se produce una anomalía tipo 3.

Del penetrograma de control respecto a las curvas  $q_{dR}$  y  $q_{dL}$  y la relación experimental entre la densidad, el contenido de humedad (Medio), grado de compactación al 95% OPM; nos indica que la auscultación (EP\_1) realizado no se encuentra dentro de rango de aceptabilidad y de esta manera no se logra el objetivo de compactación deseado.

**Figura 95**

*Penetrograma del ensayo EP\_1*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

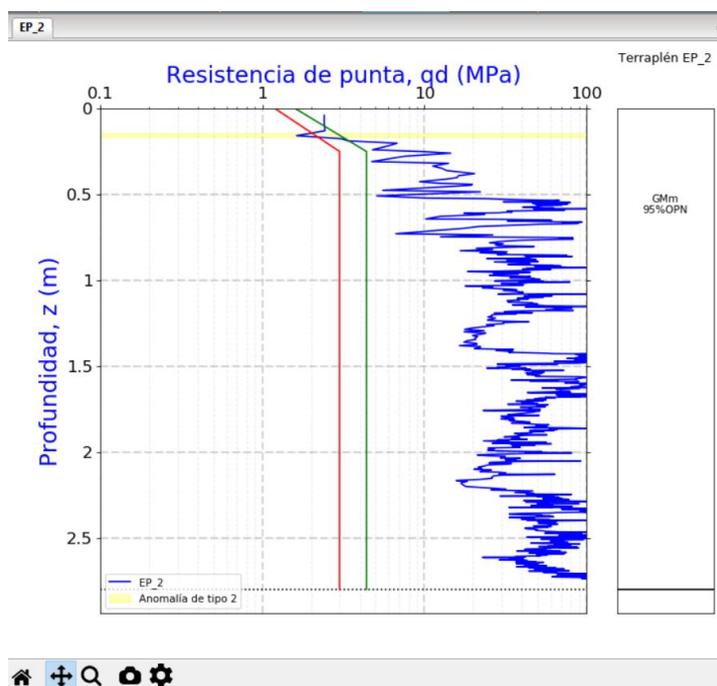
### 1.1.2. Ensayo EP\_2

El ensayo in-situ se realizó hasta una profundidad alcanzada de 2.746 m, con un estado hídrico (Medio), y grado de compactación al 95%OPM; el penetrograma obtenido  $\log q_d(z)$  nos indica que la señal penetrométrica aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor constante a una determinada profundidad crítica  $Z_c=0.582$  m, asimismo la resistencia de punta estabilizada ( $q_{d1}$ ), determinada como el valor promedio ponderado de la resistencia de punta  $q_d$  entre la profundidad final y la profundidad crítica, es de  $q_{d1}=55.08$  MPa. La posición relativa del penetrograma,  $q_d(z)$ , ubicado a la derecha con respecto a las curvas  $q_{dR}$  y  $q_{dL}$ , sin embargo, desde la profundidad  $Z_1=0.158$  m hasta  $Z_2=0.176$  m tiende a ubicarse en la zona de rechazo, además, esta longitud entre estos dos puntos representa una longitud menor del 30% de la altura total, lo cual indica que se produce una anomalía tipo 2.

Del penetrograma de control respecto a las curvas qdR y qdL y la relación experimental entre la densidad, el contenido de humedad (Medio), grado de compactación al 95%OPM; nos indica que la auscultación (EP\_2) realizado se encuentra dentro de rango de aceptabilidad y de esta manera se logra el objetivo de compactación deseado.

## Figura 96

### Penetrograma del ensayo EP\_2



Nota. Fuente: Elaboración propia

### 1.1.3. Ensayo EP\_3

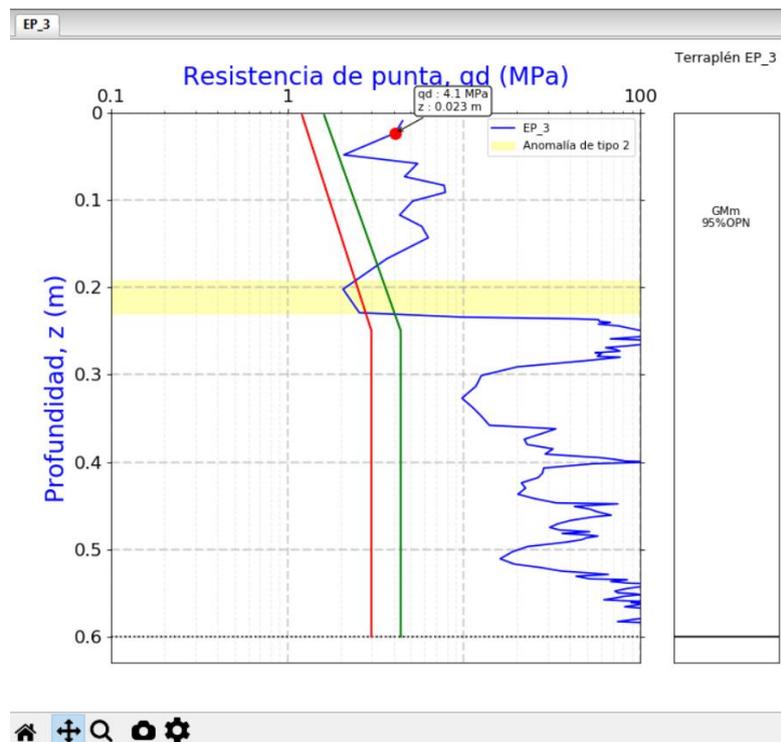
El ensayo in-situ se realizó hasta una profundidad alcanzada de 0.584 m, con un estado hídrico (Medio), y grado de compactación al 95% OPM; el penetrograma obtenido  $\log qd(z)$  nos indica que la señal penetrométrica aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor constante a una determinada profundidad crítica  $Z_c=0.236$  m, asimismo la resistencia de punta estabilizada ( $qd_1$ ), determinada como el valor promedio ponderado de la resistencia de punta  $qd$  entre la profundidad final y la profundidad crítica, es de  $qd_1=59.17$  MPa. La posición relativa del penetrograma,  $qd(z)$ , ubicado a la derecha con respecto a las curvas  $qdR$  y  $qdL$ , sin

embargo, desde la profundidad  $Z1=0.202$  m hasta  $Z2=0.229$  m tiende a ubicarse en la zona de rechazo, además, esta longitud entre estos dos puntos representa una longitud menor del 30% de la altura total, lo cual indica que se produce una anomalía tipo 2.

Del penetrograma de control respecto a las curvas  $qdR$  y  $qdL$  y la relación experimental entre la densidad, el contenido de humedad (Medio), grado de compactación al 95% OPM; nos indica que la auscultación (EP\_3) realizado se encuentra dentro de rango de aceptabilidad y de esta manera se logra el objetivo de compactación deseado.

### Figura 97

Penetrograma del ensayo EP\_3



Nota. Fuente: Elaboración propia

#### 1.1.4. Ensayo EP\_4

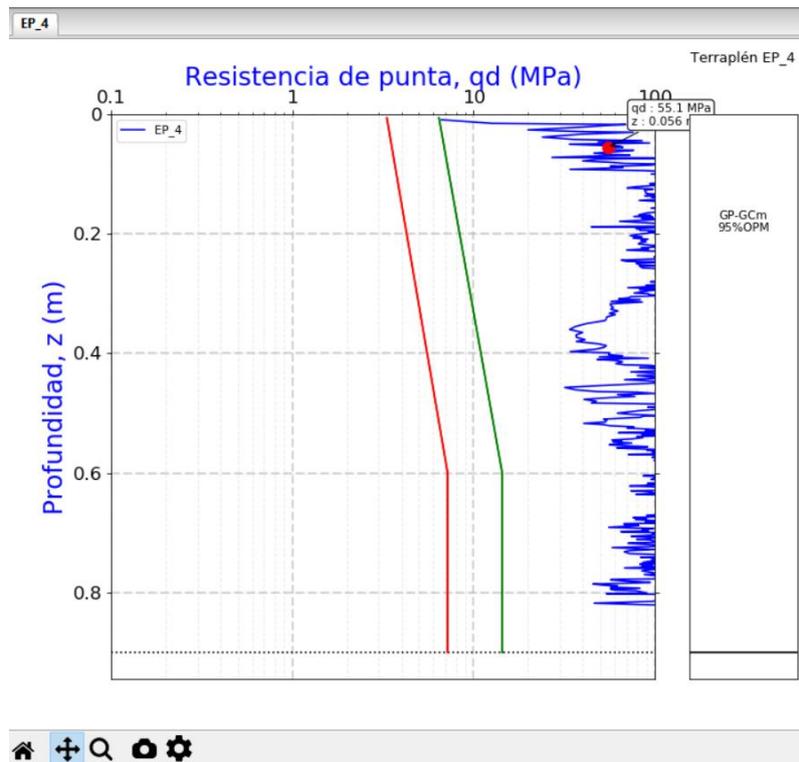
El ensayo in-situ se realizó hasta una profundidad alcanzada de 0.822 m, con un estado hídrico (Medio), y grado de compactación al 95% OPM; el penetrograma obtenido  $\log qd(z)$  nos indica que la señal penetrométrica aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor constante

a una determinada profundidad crítica  $Z_c=0.094$  m, asimismo la resistencia de punta estabilizada ( $q_{d1}$ ), determinada como el valor promedio ponderado de la resistencia de punta  $q_d$  entre la profundidad final y la profundidad crítica, es de  $q_{d1}=94.51$  MPa. La posición relativa del penetrograma,  $q_d(z)$ , ubicado a la derecha con respecto a las curvas  $q_{dR}$  y  $q_{dL}$  indica que no se han detectado anomalías.

Del penetrograma de control respecto a las curvas  $q_{dR}$  y  $q_{dL}$  y la relación experimental entre la densidad, el contenido de humedad (Medio), grado de compactación al 95% OPM; nos indica que la auscultación (EP\_4) realizado se encuentra dentro de rango de aceptabilidad y de esta manera se logra el objetivo de compactación deseado.

**Figura 98**

*Penetrograma del ensayo EP\_4*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

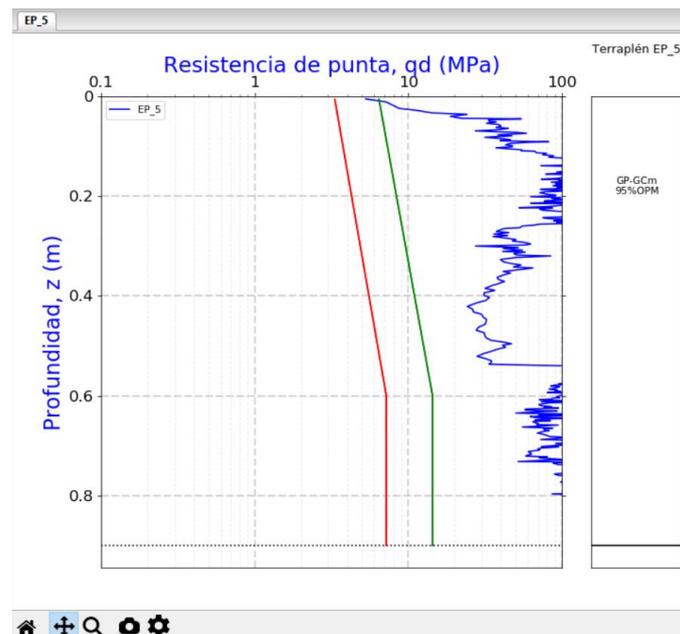
### 1.1.5. Ensayo EP\_5

El ensayo in-situ se realizó hasta una profundidad alcanzada de 0.815 m, con un estado hídrico (Medio), y grado de compactación al 95%OPM; el penetrograma obtenido  $\log qd(z)$  nos indica que la señal penetrometrica aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor constante a una determinada profundidad critica  $Z_c=0.122$  m, asimismo la resistencia de punta estabilizada( $qd1$ ), determinada como el valor promedio ponderado de la resistencia de punta  $qd$  entre la profundidad final y la profundidad critica, es de  $qd1=85.06$  MPa. La posición relativa del penetrograma,  $qd(z)$ , ubicado a la derecha con respecto a las curvas  $qdR$  y  $qdL$  indica que no se han detectado anomalías.

Del penetrograma de control respecto a las curvas  $qdR$  y  $qdL$  y la relación experimental entre la densidad, el contenido de humedad (Medio), grado de compactación al 95%OPM; nos indica que la auscultación (EP\_5) realizado se encuentra dentro de rango de aceptabilidad y de esta manera se logra el objetivo de compactación deseado.

### Figura 99

*Penetrograma del ensayo EP\_5*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

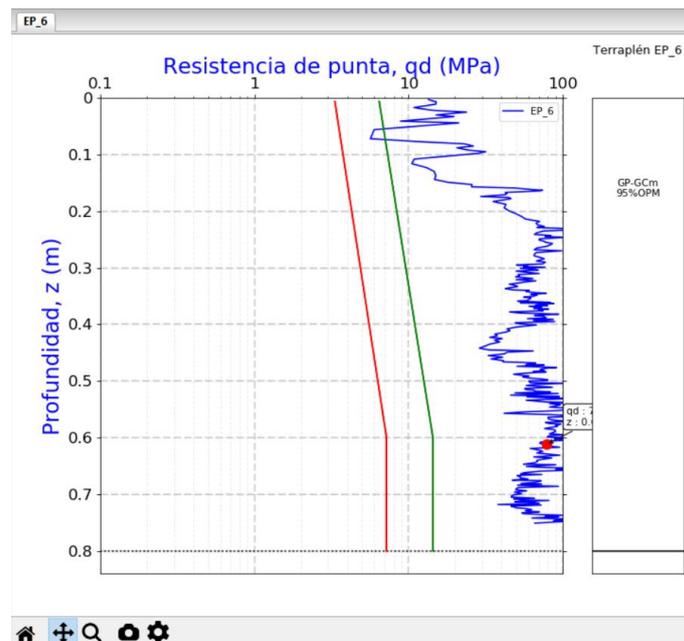
### 1.1.6. Ensayo EP\_6

El ensayo in-situ se realizó hasta una profundidad alcanzada de 0.751 m, con un estado hídrico (Medio), y grado de compactación al 95%OPM; el penetrograma obtenido  $\log qd(z)$  nos indica que la señal penetrometrica aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor constante a una determinada profundidad critica  $Z_c=0.227$  m, asimismo la resistencia de punta estabilizada( $qd1$ ), determinada como el valor promedio ponderado de la resistencia de punta  $qd$  entre la profundidad final y la profundidad critica, es de  $qd1=69.01$  MPa. La posición relativa del penetrograma,  $qd(z)$ , ubicado a la derecha con respecto a las curvas  $qdR$  y  $qdL$  indica que no se han detectado anomalías.

Del penetrograma de control respecto a las curvas  $qdR$  y  $qdL$  y la relación experimental entre la densidad, el contenido de humedad (Medio), grado de compactación al 95%OPM; nos indica que la auscultación (EP\_6) realizado se encuentra dentro de rango de aceptabilidad y de esta manera se logra el objetivo de compactación deseado.

### Figura 100

*Penetrograma del ensayo EP\_6*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Tabla 17**

*Resumen de resultado de las auscultaciones con Penetrómetro*

Auscultaciones	Grado de compactación mínimo aceptable (%)	Estado hídrico	Prof. Alcanzada (m)	Prof. Crítica (m)	Qd1 (MPa)	Anomalías (Tipo)	Aceptable
EP_1	95%	Medio	0.559	0.084	62.66	Anomalía 3	No
EP_2	95%	Medio	2.746	0.582	55.08	Anomalía 2	Sí
EP_3	95%	Medio	0.584	0.236	59.17	Anomalía 2	Sí
EP_4	95%	Medio	0.822	0.094	94.51	Sin anomalías	Sí
EP_5	95%	Medio	0.815	0.122	85.06	Sin anomalías	Sí
EP_6	95%	Medio	0.751	0.227	69.01	Sin anomalías	Sí

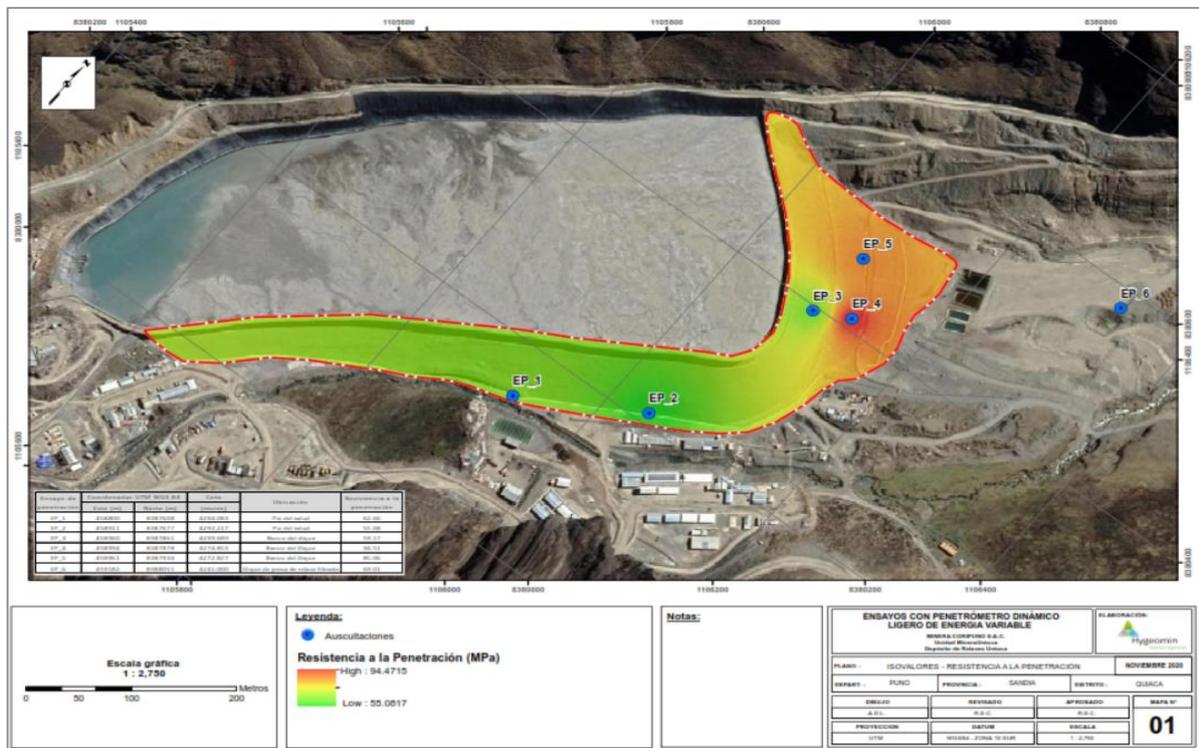
Nota. Fuente: Norma NFP-94-105

**1.2. Mapa de isovalores en planta e isovalores en secciones.**

Se muestran los resultados obtenidos del desarrollo de los planos de isovalores en planta e isovalores en secciones explicados anteriormente.

**Figura 101**

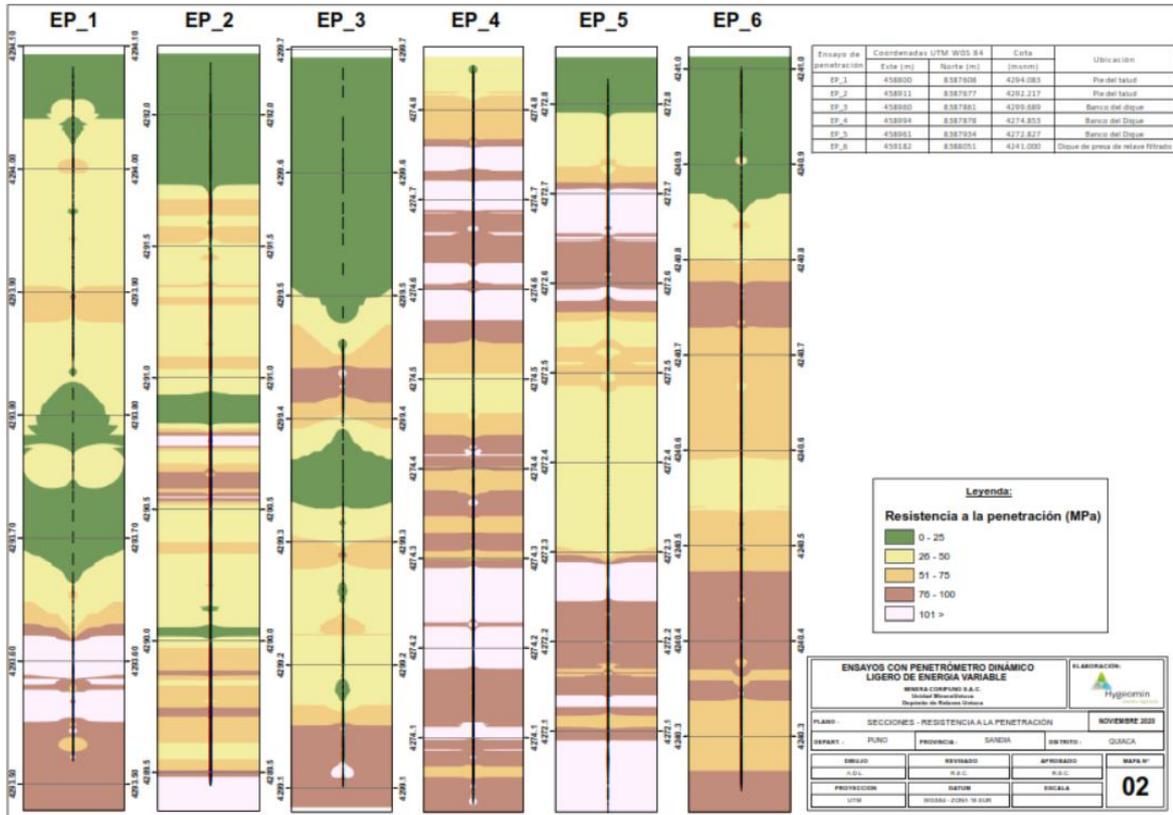
*Plano de isovalores en planta*



Nota. Fuente: Elaboración propia

**Figura 102**

Plano de isovalores en sección



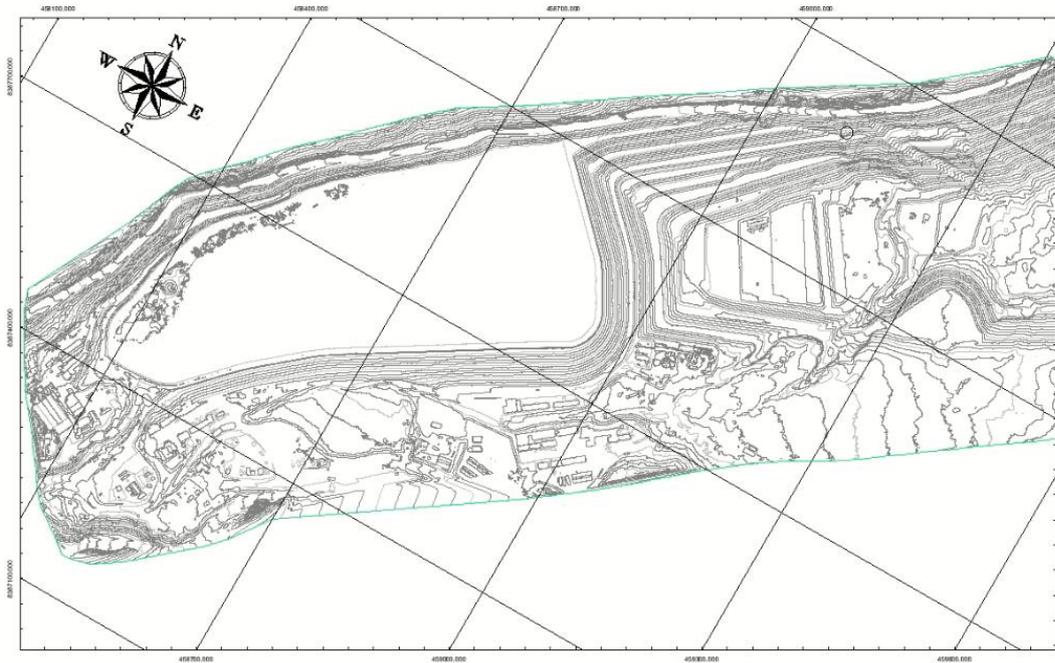
Nota. Fuente: Elaboración propia

## 2. Resultados de la fotogrametría con DRONE

Se muestran los resultados obtenidos luego de georreferenciar todas las fotografías tomadas por el DRONE con los puntos de control (dianas de campo). Se creó la nube de puntos para generar la superficie topográfica actualizada y la ortofoto georreferenciada del área de estudio. Como se pudo observar en las imágenes anteriores se usó esta ortofoto y las curvas de nivel para desarrollar diversos planos que se requerían en los estudios e informes.

**Figura 103**

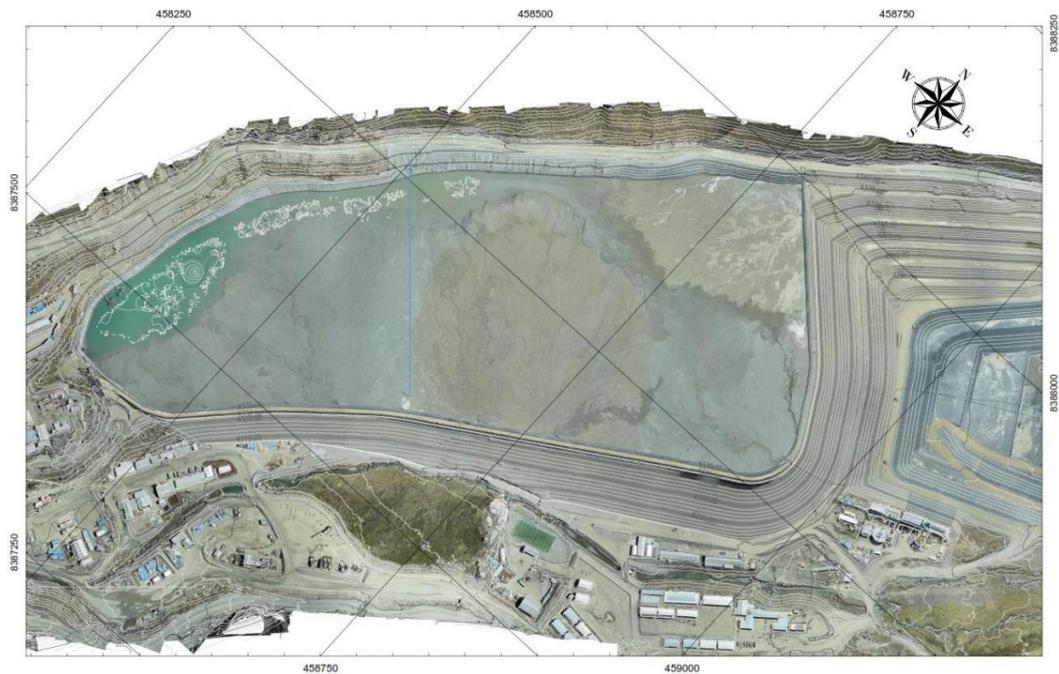
*Superficie topográfica actualizada*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Figura 104**

*Ortofoto georreferenciada actual*



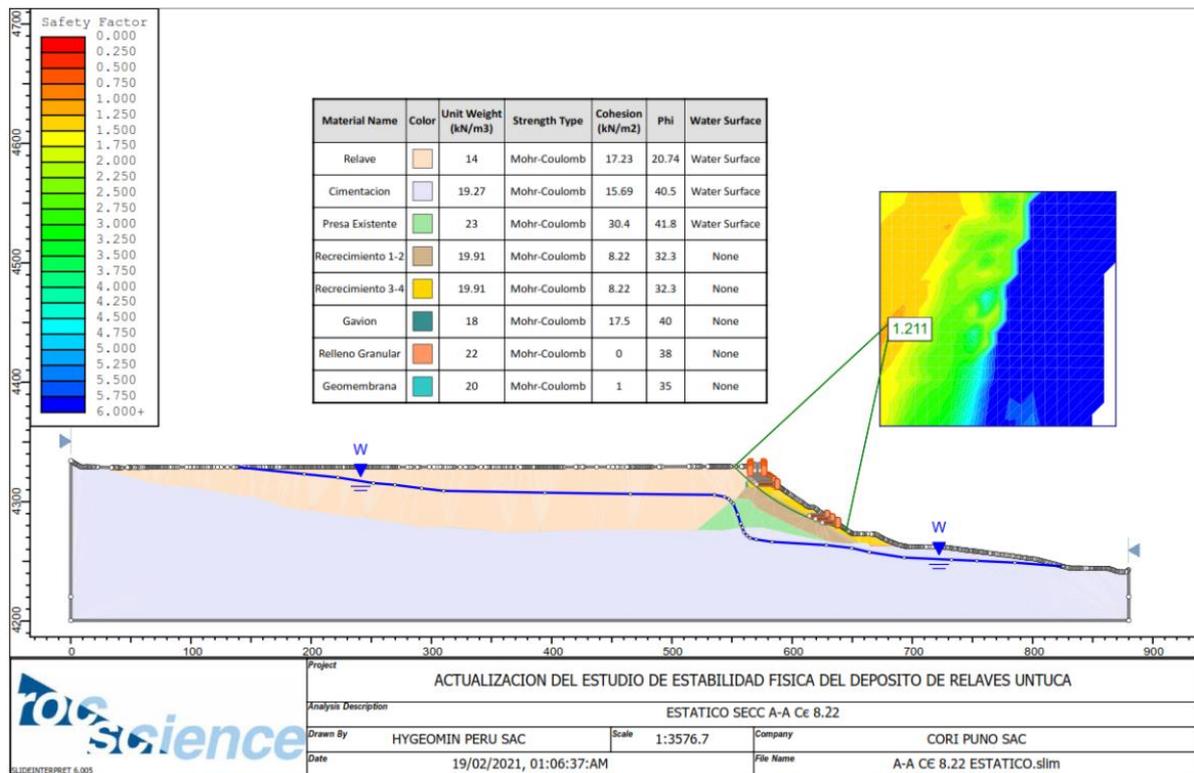
*Nota.* Fuente: Elaboración propia

### 3. Resultados del Análisis de Estabilidad del Depósito de Relaves Minero

Finalmente se obtuvieron los resultados del Análisis de Estabilidad del Depósito de Relaves Minero mediante las corridas de RocScience (RS2) las cuales se presentarán algunas de ellas a continuación:

**Figura 105**

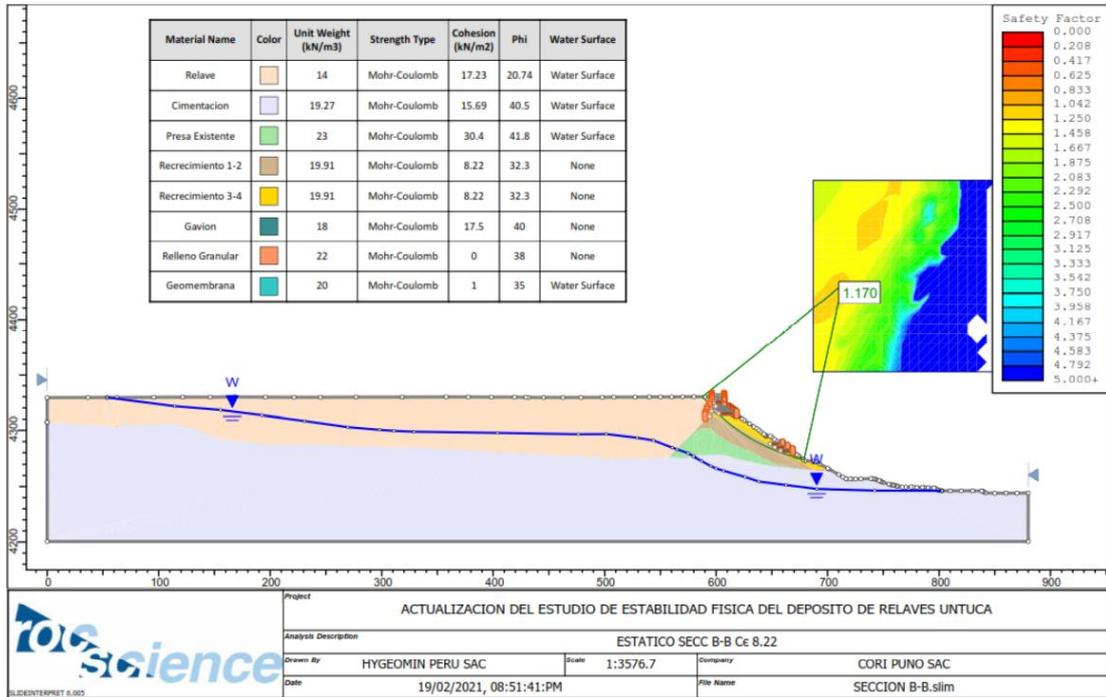
*Análisis de Estabilidad Sección A-A' – Condición Estática*



Nota. Fuente: Clean Technology

**Figura 106**

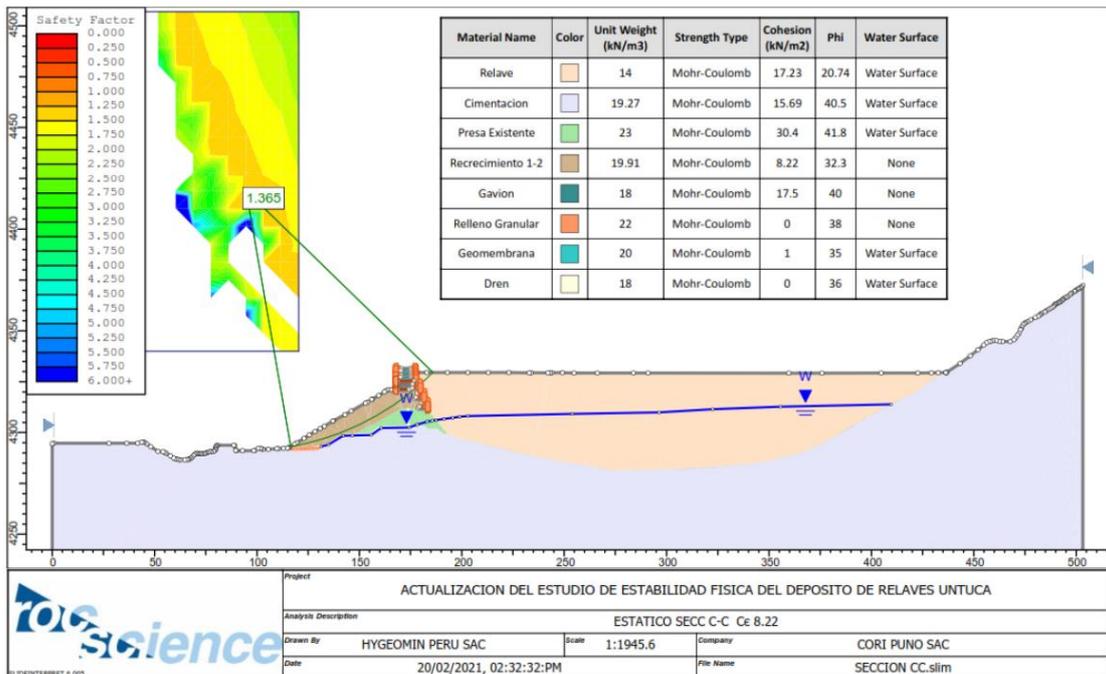
*Análisis de Estabilidad Sección B-B' – Condición Estática*



Nota. Fuente: Clean Technology

**Figura 107**

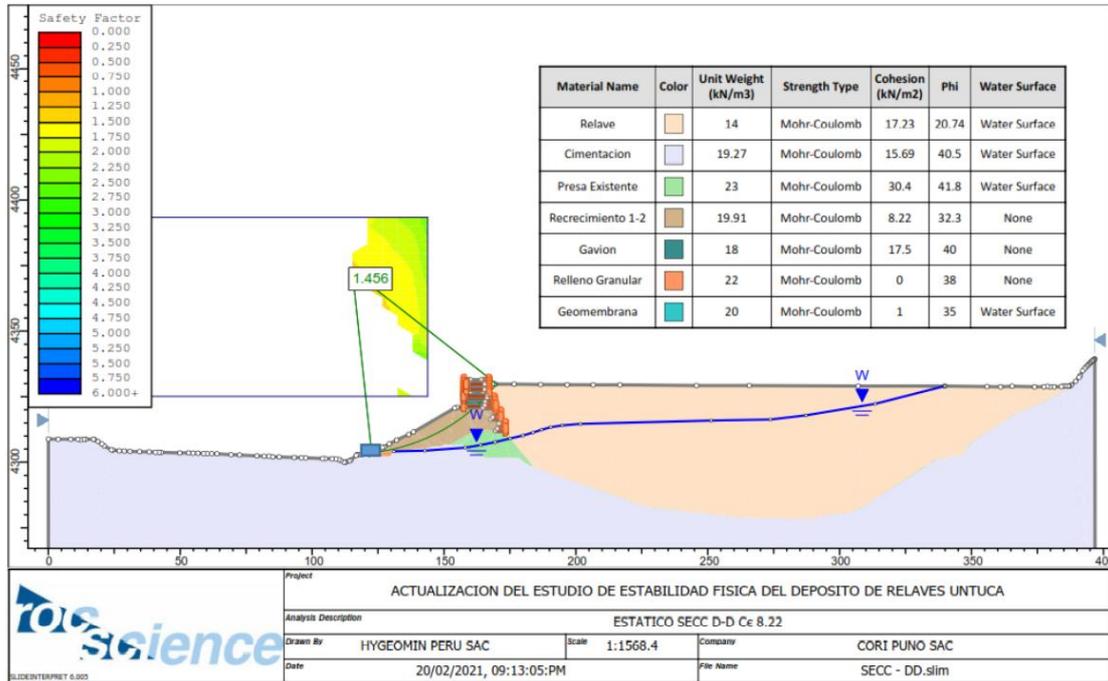
*Análisis de Estabilidad Sección C-C' – Condición Estática*



Nota. Fuente: Clean Technology

**Figura 108**

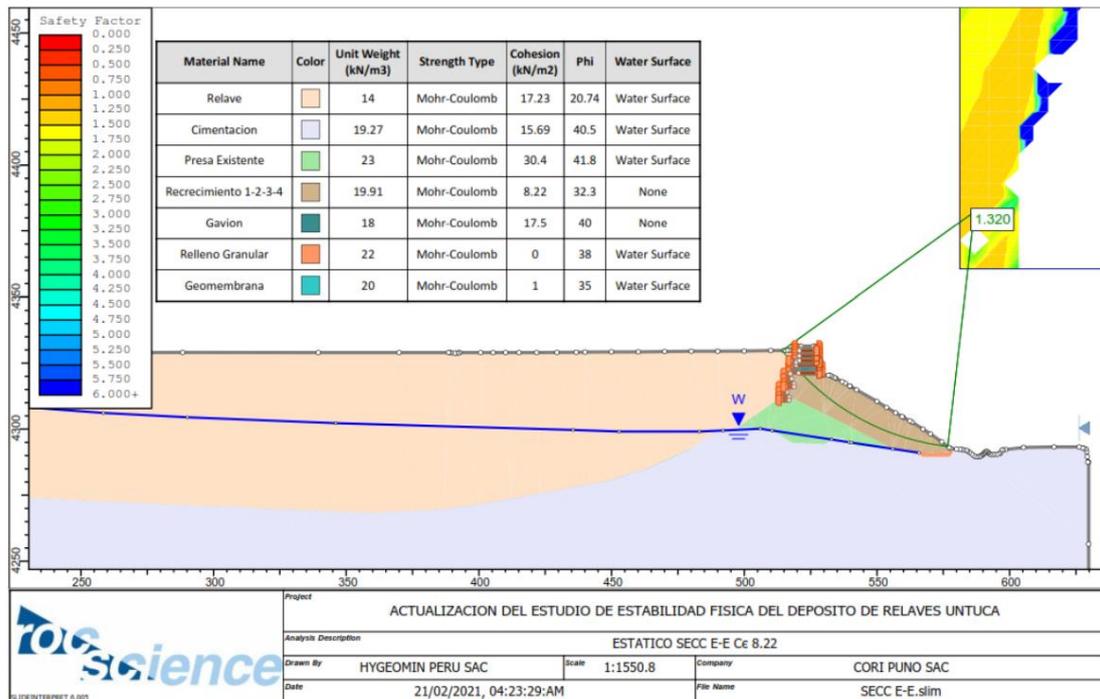
*Análisis de Estabilidad Sección D-D’ – Condición Estática*



Nota. Fuente: Clean Technology

**Figura 109**

*Análisis de Estabilidad Sección E-E’ – Condición Estática*



Nota. Fuente: Clean Technology

El análisis de la estabilidad física ha considerado parámetros geotécnicos históricos ejecutados a medida que se ha construido el depósito de relaves (parámetros conservadores sustentados en resultados de laboratorio); sin embargo, la variación significativa entre los valores de cohesión (30.40 kPa) de la presa de arranque (denominado presa existente), respecto a su recrecimiento (8.22 kPa), justifica realizar un análisis de sensibilidad específicamente respecto a este parámetro geotécnico. Asimismo, en estudios de estabilidad anteriores, este valor de cohesión del material “recrecimiento” ha tomado valores de hasta 25.00 KPa, a diferencia del análisis actual que conservadoramente ha tomado valores de laboratorio de 11.77 kPa. De esta manera, para el análisis de sensibilidad, se ha iterado valores de cohesión específicamente en el material “recrecimiento” con incrementos de 2 kPa para cada iteración, en el rango 10 kPa hasta 46 kPa.

El resumen de resultados del análisis de estabilidad en condición actual se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 18**

*Análisis de Sensibilidad, parámetro cohesión material “recrecimiento”*

Iteración	Peso Unitario	Cohesión C	Angulo Fricción $\phi$ (°)	FS Estático (Min 1.5)					FS Pseudo Estático (Min 1.0)				
				A-A'	B-B'	C-C'	D-D'	E-E'	A-A'	B-B'	C-C'	D-D'	E-E'
N°	kN/m <sup>3</sup>	kPa											
1	19.91	8.22	32.3	1.211	1.170	1.365	1.456	1.320	0.952	0.925	1.067	1.161	1.040
2	19.91	10	32.3	1.229	1.188	1.393	1.491	1.345	0.967	0.940	1.090	1.188	1.060
3	19.91	12	32.3	1.250	1.207	1.423	1.529	1.373	0.986	0.956	1.115	1.216	1.083
4	19.91	14	32.3	1.270	1.226	1.453	1.563	1.398	1.001	0.979	1.140	1.246	1.105
5	19.91	16	32.3	1.291	1.246	1.483	1.598	1.426	1.018	0.989	1.172	1.275	1.127
6	19.91	18	32.3	1.310	1.265	1.512	1.633	1.453	1.035	1.005	1.198	1.304	1.150
7	19.91	20	32.3	1.327	1.284	1.540	1.667	1.479	1.049	1.021	1.222	1.331	1.172
8	19.91	22	32.3	1.350	1.304	1.572	1.704	1.507	1.067	1.038	1.249	1.362	1.195
9	19.91	24	32.3	1.370	1.324	1.602	1.740	1.534	1.084	1.054	1.276	1.391	1.217
10	19.91	26	32.3	1.390	1.343	1.632	1.775	1.561	1.101	1.070	1.302	1.420	1.239
11	19.91	28	32.3	1.410	1.363	1.661	1.811	1.588	1.117	1.086	1.329	1.449	1.262
12	19.91	30	32.3	1.430	1.382	1.691	1.847	1.615	1.134	1.102	1.355	1.478	1.284
13	19.91	32	32.3	1.450	1.401	1.721	1.882	1.642	1.150	1.119	1.382	1.507	1.307
14	19.91	34	32.3	1.470	1.421	1.751	1.918	1.669	1.167	1.135	1.409	1.536	1.329

Iteración	Peso Unitario	Cohesión C	Angulo Fricción $\phi$ (°)	FS Estático(Mín 1.5)					FS Pseudo Estático (Mín 1.0)				
				A-A'	B-B'	C-C'	D-D'	E-E'	A-A'	B-B'	C-C'	D-D'	E-E'
15	19.91	36	32.3	1.490	1.440	1.781	1.953	1.696	1.184	1.151	1.435	1.565	1.351
16	19.91	38	32.3	1.510	1.460	1.810	1.989	1.723	1.200	1.167	1.462	1.594	1.374
17	19.91	40	32.3	1.530	1.479	1.840	2.025	1.750	1.217	1.183	1.488	1.623	1.396
18	19.91	42	32.3	1.550	1.498	1.870	2.060	1.777	1.233	1.200	1.515	1.652	1.419
19	19.91	44	32.3	1.570	1.518	1.900	2.096	1.804	1.250	1.216	1.542	1.681	1.441
20	19.91	46	32.3	1.590	1.537	1.930	2.131	1.831	1.267	1.232	1.568	1.710	1.463

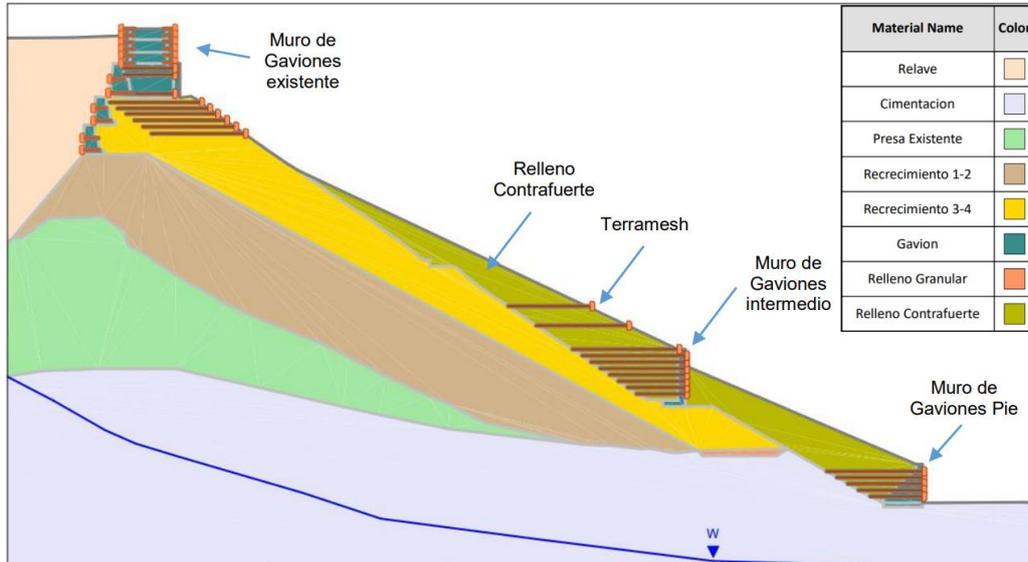
Nota. Fuente: Clean Technology

Como resultado final se recomendó el siguiente modelo que cumple con las condiciones de estabilidad en todas las secciones analizadas.

De acuerdo con las características geotécnicas de los materiales, el parámetro cohesión del material “recrecimiento” se presenta como crítico y en función al análisis de sensibilidad utilizando el método de equilibrio límite, se presenta el valor crítico 42.00 kPa; es decir, se garantiza la estabilidad física del depósito de relaves, en todas las secciones de análisis únicamente con valores de cohesión mayores a 42.00 kPa. Sin embargo, debido a que la cohesión actual conservadora del material recrecimiento es 11.77 kN/m<sup>2</sup> (Resultado conservador de análisis de laboratorio; CISMID, octubre de 2020), se ha planteado reforzar el talud del dique de contención, principalmente en la sección más crítica (Sección de Análisis B-B'); este reforzamiento finalmente consta de un Material Contrafuerte, construido encima del talud actual y soportados en un punto intermedio del talud y en el pie del talud, con muro de gaviones reforzado con terramesh. Este trabajo civil, logra obtener un Factor de Seguridad mayor a 1.5. en condición estática y mayor a 1.0 en condición pseudo estática, considerando una cohesión mínima de 15.73 kN/m<sup>2</sup> del material Contrafuerte; para ello, se recomienda compactar el material durante la construcción en capas de cada 1.0 metro.

**Figura 110**

*Estabilización Física del Depósito de Relaves Minero en la Sección B-B', que considera el reforzamiento con un Contrafuerte*



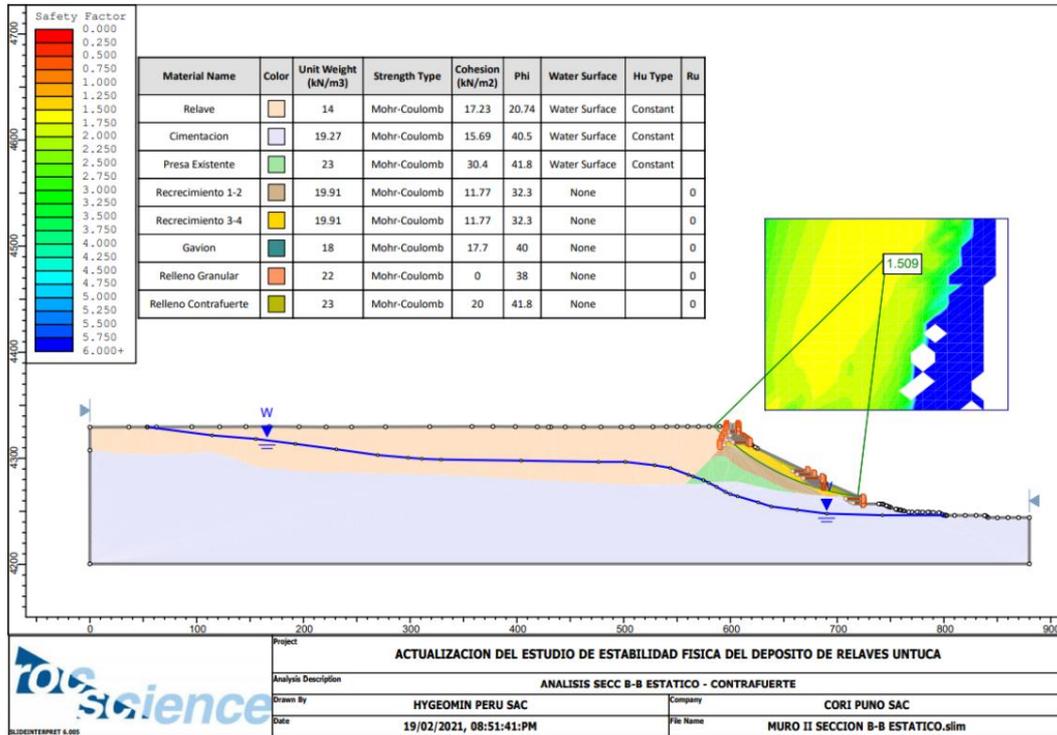
*Nota.* Fuente: Clean Technology

La condición de estabilización física del depósito de Depósito de Relaves Minero, fue evaluada en la sección de análisis B-B', a partir de una Cohesión 20.0 kN/m<sup>2</sup>, con resultados de Factor de Seguridad, mayor a 1.5 y 1.0 en la condición Estática y Pseudo Estática respectivamente en las siguientes figuras.

El Análisis de Sensibilidad para el Depósito de Relaves Minero en la Sección de Análisis B-B', considera necesariamente que para garantizar la estabilidad física del depósito de relaves en la Sección B-B' debe construirse el relleno contrafuerte, asegurando la compactación del material en capas cada 1.0 metros y así una cohesión de 15.73 kN/m<sup>2</sup>, del tal manera que logre superar o igualar un Factor de Seguridad en la condición estática y Pseudo Estática, tal como se muestra en las siguientes figuras (Análisis de Sensibilidad, del material Relleno Contrafuerte).

Figura 111

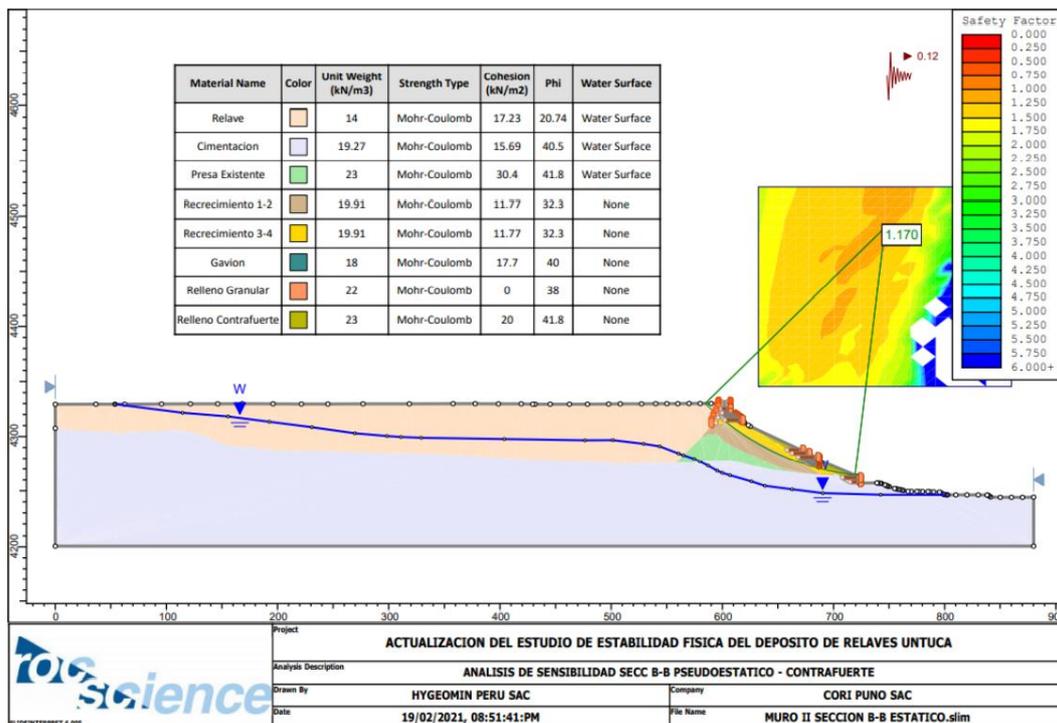
Análisis de Estabilidad Sección B-B' – Condición Estática



Nota. Fuente: Clean Technology

Figura 112

Análisis de Estabilidad Sección B-B' – Condición Pseudo Estática



Nota. Fuente: Clean Technology

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES

Del informe de Estabilidad Física del Depósito de Relaves minero en la provincia de Puno se concluye lo siguiente:

- La auscultación EP\_1 ejecutado con fines de verificación de las condiciones de compactación, han determinado la existencia de anomalías del tipo 3, el cual bajo los criterios de aceptación de la Norma NF P 94-105, la anomalía no es aceptable. Esta anomalía podría estar vinculado a que, en las coordenadas de esta auscultación (N 8°387,608.0; E 458,800.0), a 0.559 metros de profundidad, el material identificado, además de grava limosa (GM) contiene arena limosa (SM), a diferencia del resto de auscultaciones donde sus materiales están compuestos solo por grava limosa (GM).
- Las auscultaciones EP\_2 y EP\_3 ejecutados con fines de verificación de las condiciones de compactación, han determinado la existencia de anomalías del tipo 2, el cual bajo los criterios de aceptación de la Norma NF P 94-105, la anomalía es aceptable.
- Las auscultaciones EP\_4, EP\_5 y EP\_6 ejecutados con fines de verificación de las condiciones de compactación, han determinado que la compactación se encuentra dentro del rango esperado, es decir, sin anomalías.
- Las propiedades geotécnicas de los materiales del modelo geotécnico del depósito de relaves minero han sido obtenidas a partir de investigaciones geotécnicas históricas (durante la construcción) y condición actual; tales como: EyP en diciembre de 2013, Geoservice en enero de 2015, EyP en marzo de 2016, EyP en julio de 2018, NEIZUN en julio de 2020 y CISMID en octubre de 2020.
- De acuerdo a las características geotécnicas de los materiales, el parámetro cohesión del material “recrecimiento” se presenta como crítico, debido a que los rangos de valores analizados en los laboratorios EyP en marzo de 2016, NEIZUN en julio de 2020 y CISMID en octubre de 2020, registran valores muy sesgados (8.83 kPa, 8.22 kPa y

11.77 kPa respectivamente), respecto a la cohesión obtenida por el laboratorio EyP en julio de 2018 (39.23 kPa), por ello se ha realizado el análisis de sensibilidad para el material “recrecimiento”, considerado rangos desde 8.22 kPa hasta 46 kPa. De esta manera, en función al análisis de sensibilidad utilizando el método de equilibrio límite, se presenta el valor crítico de la cohesión del material “recrecimiento” en 42 kPa; es decir, se garantiza la estabilidad física del depósito de relaves, en todas las secciones de análisis únicamente con valores de cohesión mayores a este. Sin embargo, en la condición actual con datos del año 2020, el depósito de relaves no es estable.

Las lecciones aprendidas a lo largo de todo el desarrollo del proyecto en campo y gabinete fueron las siguientes:

- La planificación en gabinete se debe actualizar con lo observado en campo, debido a que, hay diversos factores que pueden generar retrasos para alcanzar las metas del proyecto, estos factores pueden ser la falta de personal de apoyo en campo, las condiciones climáticas de la zona del proyecto, la magnitud del componente de estudio, la topografía de la zona y la poca coordinación con la oficina de proyectos en campo.
- Se debe solicitar información histórica del proyecto para tener un mejor enfoque del componente que se va a analizar, puesto que, esta información nos va a permitir hacer un mejor análisis y proporcionar un diagnóstico acertado.
- Para aplicar los ensayos de compactación con el nuevo penetrómetro PANDA, se debe estar capacitado en el manejo, programación, ejecución y procesamiento del ensayo para obtener resultados verídicos, dado que, estos no deben ser alterados por factores externos para hacer un análisis global adecuado de la situación del componente minero.
- En trabajos de campo, el Equipo de Protección Personal es indispensable para evitar cualquier incidente o accidente, visto que, siempre estamos expuestos a cualquier condición subestándar (condición insegura). Por último, debemos de seguir al pie de la

letra todas las recomendaciones, advertencias y sugerencias que nos mencionan en las inducciones de seguridad cuando ingresamos al área del proyecto, con el fin de mantener nuestra salud e integridad para cumplir los objetivos de campo satisfactoriamente.

Mi participación en este proyecto, tanto en campo como en gabinete fue de lo más enriquecedora para mi formación profesional, por tal motivo, pude conocer otra de las ramas de la Ingeniería, el cual, es la Geotecnia.

Además, tuve que utilizar los conocimientos que aprendí tanto en mi formación académica en la Universidad Privada del Norte como en otras instituciones donde amplie mis conocimientos de herramientas profesionales como son el MS Project, S10 Costos y Presupuestos, Instrumentación topográfica, Manejo de estaciones diferenciales GPS RTK, AutoCAD Civil 3D, Geosprint, Agisoft y ArcGIS. Estas herramientas me permitieron lograr los objetivos que se me encomendaron en este proyecto de ingeniería.

En cuanto a las competencias profesionales que aplique para el desarrollo del proyecto fueron las siguientes:

- **Capacidad de toma de decisiones y dirigir:** En el proyecto me vi en la necesidad de contar con personal bajo mi mando, para ejecutar los ensayos de compactación, ensayos de mecánica de suelos y estudios de tomografía eléctrica. Fui el responsable de manejar nuestros tiempos por cada ensayo ejecutado, supervisar que cada ensayo se haga de manera adecuada, además de tomar las decisiones de detener los ensayos cuando identificaba algún riesgo, ya sea por una acción subestándar (acciones riesgosas) o por las condiciones climatológicas (tormentas y granizadas).
- **Capacidad para la comunicación:** Fui capaz de comunicarme siempre de manera eficaz al momento de capacitar al personal bajo mi mando y así logren comprender en que consiste cada actividad y la importancia de ejecutarlo de manera adecuada y segura.

Además, de mantener una comunicación fluida con los demás integrantes del equipo de trabajo para superar cualquier inconveniente presentado.

- **Capacidad para el trabajo en equipo:** Para desarrollar las actividades críticas en campo y gabinete participe y me integre de manera efectiva en cada cuadrilla de trabajo para apoyarnos entre nosotros con el fin de cumplir los objetivos planteados en campo y gabinete.
- **Capacidad para trabajar bajo presión:** En las etapas de desarrollo del proyecto tuve que lidiar con distintas actividades simultáneas para cumplir los objetivos, además, de revisar de manera sistemática la información proporcionada por la Unidad Minera para obtener detalles importantes que me solicitaba cada profesional para que siga avanzando en el desarrollo de sus actividades.
- **Capacidad analítica:** Para generar los informes de compactación tuve que entender, analizar y extraer la información más relevante para el desarrollo del estudio de estabilidad. En consecuencia, los datos en forma bruta no aportan de manera significativa a la comprensión del proyecto, por tal motivo, tuve que generar planos de isovalores, tablas específicas, resúmenes y conclusiones acertadas según los datos obtenidos.

## RECOMENDACIONES

Las recomendaciones de este proyecto se enfocan en garantizar la estabilidad física del Depósito de Relaves Minero, por lo observado en campo y gabinete esta actividad es vital para evitar cualquier tipo de riesgos, ya sea a nivel humano o a nivel ambiental, en consecuencia, todos los estudios y ensayos realizados deben ser ejecutados por personas capacitadas en la materia correspondiente y generar resultados verídicos y sin alteraciones.

- La obligación de asegurar la estabilidad física del Depósito de Relaves Minero debe contemplar activar en forma inmediata, las medidas de emergencia preventivas.
- Bajar el nivel piezométrico, del vaso del depósito de relaves, aumentando el porcentaje de sólidos en la pulpa de los relaves bombeados hacia el Depósito de Relaves Minero.
- Bajar el nivel piezométrico, del vaso del depósito de relaves, reduciendo el caudal diario de pulpa de relaves bombeados hacia el Depósito de Relaves Minero.
- Realizar más ensayos de compactación, cercanos a la auscultación EP\_1 para corroborar o descartar la anomalía puntual de tipo 3 a la profundidad 0.55 metros.
- Del análisis de estabilidad física simulado, incorporando un Relleno Contrafuerte sobre el talud actual, este además considera dos muros de gaviones con terramesh, ubicados a la mitad del talud y al pie del talud, se ha obtenido valores de Factor de Seguridad que aseguran la estabilidad física del depósito de relaves, asegurando una cohesión mínima del material Relleno Contrafuerte de 15.73 kN/m<sup>2</sup>; por lo tanto, se recomienda ejecutar las obras civiles que conlleven a la construcción del Contrafuerte, en función a un cronograma de ejecución de actividades, que considere desde la verificación de los valores de cohesión de los materiales, el diseño del contrafuerte y la contratación de una empresa especializada en obras civiles.

De las lecciones aprendidas a lo largo de todo el desarrollo del proyecto en campo y gabinete se recomienda lo siguiente:

- Se debe planificar las actividades de campo con la colaboración de profesionales que ya realizaron actividades similares en Unidades Mineras, además, de consultar cuales serian las actividades criticas que demandan mayor tiempo y recursos. Por último, planificar estas actividades en temporada seca de la zona del proyecto para evitar accidentes e incidentes en campo.
- Se debe hacer un listado de requerimiento de los estudios fundamentales para conocer la cronología de la historia del proyecto y así obtener los parámetros requeridos por los demás profesionales a cargo del proyecto.
- Para ejecutar los ensayos de compactación con el penetrómetro PANDA se debe de conocer bajo que reglamentos esta normado y así identificar las restricciones del equipo para obtener en campo datos verídicos.
- Se debe de hacer un listado de los Equipos de Protección Personal que necesita cada profesional en campo para que este protegido ante los incidentes que siempre ocurren, además, de complementarlo con un listado de equipos y sus complementos para ejecutar las actividades planeadas en campo y no se generen atrasos en las actividades críticas.

## REFERENCIAS

- Armas, R. y González, Y. (2-5 de diciembre del 2008). *Criterios sobre la compactación de suelos y el control de calidad de terraplenes*. 14 Conferencia de científica de ingeniería y arquitectura.
- Lopez, S., Benz, M. y Moustan, P. (17-20 de noviembre del 2019). *Comparación de los ensayos de penetración de cono dinámico (DCP) y penetrómetro de cono dinámico de energía variable PANDA®*. XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE)
- AFNOR (2000). *Suelos: Reconocimiento y pruebas Control de calidad de compactación*. (XP P 94-105). [https://www.orbisterrarum.es/wp-content/uploads/2018/01/XP\\_P94\\_105.pdf](https://www.orbisterrarum.es/wp-content/uploads/2018/01/XP_P94_105.pdf)
- Frazer, B. (1971) Formulas de hinca dinámica. *Revista Obras Públicas*. 977-990
- Instituto Nacional de Normalización INN Chile. (2012). *Depósito de relave – Control de compactación con penetrómetro dinámico ligero*. (NCh 3261-2012). <https://insitutek.com/wp-content/uploads/2015/02/norma-chilena-panda-NCh-3261-2012-depositos-de-relave-control-de-compactacion-con-penetrometro-dinamico-ligero.pdf>
- Del Río, O., Gómez, F., López, N., Saenz, J. y Espinoza, A. (2020). Análisis comparativo de levantamiento topográfico tradicional y tecnología de Drones. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 14(2), 1-13. <https://www.redalyc.org/journal/1939/193963490001/html/>
- Ruiz, R., Corominas, J. y Hürlimann, M. (2017). Experiencias con drones para el estudio de movimientos de ladera. En Alonso, E., Corominas, J. y Hürlimann, M (Eds.), *IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables* (pp. 581-592). Centre

Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).

<http://congress.cimne.com/simposiotaludes2017/frontal/doc/Ebook.pdf>

Thoeni, K., Giacomini, A., Murtagh, R. y Kniest, E. (2014). A comparison of multi-view 3D reconstruction of a rock wall using several cameras and a laser scanner. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 40(5), 573-580.

Flores, R., Alva, F. y Li, X. (2003). Efecto del flujo de agua en la estabilidad de taludes. *Revista de ingeniería hidráulica en México*, 18(2), 35-52.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4505384>

Rennat, A. y Miller, S. (agosto de 1997). *Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina*.

<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guiaestabilidad.pdf>

Sanhueza, C. y Rodríguez, L. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de la construcción*,

12(1), 17-29. [Análisis Comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales \(scielo.cl\)](#)

Suarez, J. (2012). *Deslizamientos, Análisis Geotécnico*. Universidad Industrial de Santander

UIS. [Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico - EROSION.COM.CO :: SITIO WEB DEL ING. JAIME SUÁREZ](#)

## ANEXOS

Anexo N°1 Certificado de Calibración Penetrometro Dinámico Ligerero a Energía Variable PANDA .....	138
Anexo N°2 Certificado de Operatividad Penetrometro Dinámico Ligerero a Energía Variable PANDA .....	139
Anexo N°3 Licencia del Programa GeoSprint V.1.1.6 .....	140

Anexo N°1

*Certificado de Calibración Penetrómetro Dinámico Ligero a Energía Variable PANDA*



**Fuji Electric France SAS**  
46, rue Georges Besse  
63039 CLERMONT-FERRAND CEDEX 02  
Tel : 04.73.98.26.98  
Fax : 04.73.98.26.99

**CERTIFICAT D'ÉTALONNAGE**  
2020-02-07-333A

**Délivré à :** **SOL Solution**  
ZA. Des Portes de Riom Nord  
23. Avenue Georges Gerswin  
BP 178  
63204 Riom Cedex - France

**N° commande :** BCA15876  
**Accusé de réception :** S6320010382

**Instrument à étalonner :**

**Désignation :** Pénétrömètre dynamique léger à énergie variable.  
**Constructeur :** Sol Solution  
**Type :** PANDA®

**N° de série :** 333  
**N° tête :** 333      **N° codeur :** 333      **N° TDD :** 333

**Date d'émission :** 07/02/2020

Marie-Christine Dumas  
Responsable QSE

La reproduction de ce certificat n'est autorisée que sous la forme d'un fac-similé photographique intégral

Ce certificat est conforme au fascicule de documentation FD X 07-012

Anexo N°2

Certificado de Operatividad Penetrómetro Dinámico Ligero a Energía Variable PANDA



CERTIFICADO DE OPERATIVIDAD N° LV-0034- 2021

1.- Solicitante SOS SUPERVISORES ASESORES Y CONSULTORES S.A.C.	4.- Fecha de Verificación: 04 de Agosto de 2021.
2.- Direccion Av. De Las Artes Sur 607 - San Borja, Lima	5.- Lugar de Verificación: LAB. ECOSISTEM S.A.C
3.- Instrumento Penetrómetro dinámico de energía variable	6.- Condiciones de Verificación
Marca/Fabricacion: Sol Solution	Temperatura Ambiental: 23 °C
Modelo: PANDA*	Humedad 78%
Serie: 333	Presión 1000.5 mb

7.- Metodología Aplicada

Según los estándares Internacionales establecidos certificamos que el equipo en mencion ha sido revisado y controlado según normas del fabricante.

10.- Apariencia Visible.

Color:	OK
Limpieza	OK
Sin Defectos	OK
Dimensiones según normativa	OK

Estos equipos antes de salir de almacen han sido revidados y se encuentran en perfecto estado. Es responsabilidad del cliente el adecuado uso y cuidado por lo que la empresa no se responsabiliza por lo daños causados por la mala manipulacion. Se expide el presente certificado a solicitud del interesado como muestra de conformidad y aceptacion de los equipos

Calibracion y Mantenimiento

Fecha	Reparación	Operatividad	Proxima Revisión	Observación
04/08/2021		x	12 meses	100% OPERATVO

Realizado por:

Revisado por:

ECOSISTEM S.A.C.  
  
Ian L. Salazar Tupia  
Técnico de Laboratorio

ECOSISTEM S.A.C.  
  
MARCELINO HUARCAYA TAIPE  
JEFE DE LABORATORIO

## Anexo N°3

### Licencia del Programa GeoSprint V.1.1.6

**SOL SOLUTION**  
*La innovación sur de todos los días*

DESCARGAR   GENERAR UNA LICENCIA   TUTORIALES   SERVICIO TÉCNICO   CONTACTO   **Hola**   ES

### Información de la licencia

Licencia asociada a su clave de producto (**d0330ebdfa**):

**[Redacted License Key]**

[Copiar en el portapapeles](#)

Fecha de expiración:  
**Sin (None días restantes)**

Tipo de licencia:  
**Permanente**

Se acaba de generar la licencia que le permite utilizar la aplicación GeoSprint®. Durante la primera utilización de GeoSprint®, será necesario rellenar esta llave de licencia. Esta licencia solo puede utilizarse en el equipo donde se instaló la aplicación.