

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia

**RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO MEDIANTE
SONDAJES MECÁNICOS EXPLORATORIOS Y EL
SISTEMA DE PREDICCIÓN SÍSMICA PARA
TÚNELES (TSP) EN EL TÚNEL RESTITUCIÓN
DEL PROYECTO CHAVIMOCHIC III
ETAPA – LA LIBERTAD**

TESIS

Presentada por:

Bach. Gladys Angélica Escobar Quispe

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO - GEOTÉCNICO

TACNA – PERÚ

2025



ACTA TITULO N° 091

Acta de sustentación de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo - Geotécnico de la bachiller GLADYS ANGÉLICA ESCOBAR QUISPE con código N° 2007-31060.

En Tacna, del día 04 de diciembre del dos mil veinticuatro, siendo las 12:00 horas, reunidos en el Salón de Grados -ESGE de la FIAG, los miembros del jurado:

Dr. Ing. Mario David Huamán Rodrigo	Presidente
Ing. Jorge Pantaleón Barriga Gamarra	Miembro - Secretario
M.Sc Ing. Gina Macklina Chambi Tapahuasco	Miembro

Inicia el acto, el secretario del jurado dando lectura de la Resolución de Facultad N° 919-2024-FIAG/UNJBG, de fecha 29 de noviembre del 2024, en el cual la bach. Gladys Angélica Escobar Quispe, con los requisitos exigidos para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo - Geotécnico.

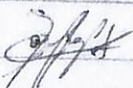
El presidente del jurado invita a la bachiller para que exponga la tesis: "RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO MEDIANTE SONDAJES MECÁNICOS EXPLORATORIOS Y EL SISTEMA DE PREDICCIÓN SÍSMICA PARA TÚNELES (TSP) EN EL TÚNEL RESTITUCIÓN DEL PROYECTO CHAVIMOCHIC III ETAPA - LA LIBERTAD".

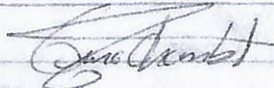
Asesorado por el Ing. Hismael Tiburcio Rodríguez Illachura

Concluida la exposición, el jurado realiza las observaciones y preguntas del caso, las mismas que son absueltas por el ponente.

CALIFICACIÓN:

El jurado califica en forma individual y en forma secreta el trabajo expuesto, por lo que procede a sacar el promedio total de dieciseis por lo que se da por aprobado por unanimidad, el secretario procede a leer la presente acta de sustentación y el jurado lo firma a continuación, por lo que se da por concluida el acto de sustentación siendo las 13:00 horas del mismo día.


Dr. Mario D. Huamán Rodrigo
Presidente


M.Sc. Gina M. Chambi Tapahuasco
Secretaria


Ing. Jorge P. Barriga Gamarra
Miembro

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, HISMAEL TIBURCIO RODRIGUEZ ILLACHURA en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N°584-2018-FIAG/UNJBG (y ampliación de plazo Resolución de Facultad N°075-2020-FIAG/UNJBG) del Trabajo de la Tesis, titulado: RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO MEDIANTE SONDAJES MECÁNICOS EXPLORATORIOS Y EL SISTEMA DE PREDICCIÓN SÍSMICA PARA TÚNELES (TSP) EN EL TÚNEL RESTITUCIÓN DEL PROYECTO CHAVIMOCHIC III ETAPA – LA LIBERTAD, Presentado por la Bachiller GLADYS ANGÉLICA ESCOBAR QUISPE para optar el título profesional en Ingeniería Geológica – Geotecnia.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual de la UNJBG, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del **software de similitud textual** TURNITIN, cuenta con el **nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 9%** Por lo que, **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciando líneas arriba, la cual esta expedita para continuar con los trámites para obtener el título profesional Ingeniero Geólogo – Geotécnico, según corresponda para su publicación en el repositorio institucional.

Tacna, 25 de noviembre del 2024



Docente Asesor de Tesis
Ing. HISMAEL TIBURCIO RODRIGUEZ ILLACHURA
DNI N°80027763



Firma del Autor
Bachiller GLADYS ANGÉLICA ESCOBAR QUISPE
DNI N°45763391

DEDICATORIA

Expreso mi más profunda gratitud a Dios, quien me ha proporcionado la perseverancia necesaria para alcanzar esta meta tan anhelada y me ha permitido vivir este momento significativo en mi trayectoria vital.

Extiendo mi especial agradecimiento a mis padres, quienes han sido el cimiento esencial de mi existencia. Ellos han cultivado en mí principios invaluable y, mediante su dedicación, esfuerzo y cariño incondicional a lo largo de los años, han sido fundamentales para que yo pudiera alcanzar mis metas y desarrollarme como persona.

A mi amado hijo Santiago, que ha sido el impulso en cada una de mis acciones y me alienta a superarme constantemente, tanto en el ámbito profesional como personal. Mi amor por ti es infinito, querido hijo.

Finalmente, agradezco a todos los que me acompañaron durante este período, contribuyendo tanto a mi desarrollo profesional como a mi crecimiento personal.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Dios, quien es el principal autor de todo lo que podido realizar, por darme la vida y por hacer realidad este sueño tan anhelado.

A mis padres y hermanos quienes a lo largo de esta trayectoria de mi vida académica me han apoyado y motivado en todo momento y no dudaron de mis habilidades.

De manera muy especial agradecer a la empresa **DNA – BLAST GROUP**, por su confianza y profesionalismo, por brindarme todos los recursos y herramientas para llevar a cabo este trabajo, agradecerles por sus consejos y el apoyo que me han brindado.

Así mismo, a la escuela de Ingeniería Geológica – Geotecnia de la universidad Jorge Basadre Grohmann, a mis profesores, quienes me han motivado durante mi formación académica profesional.

RESUMEN

El presente trabajo trata del reconocimiento geológico mediante sondajes mecánicos exploratorios y el sistema de predicción sísmica para túneles (TSP), en el túnel restitución del proyecto Chavimochic III etapa, ubicado en el departamento de La Libertad.

Una comprensión sólida de las condiciones geológicas y geotécnicas del macizo rocoso y sus propiedades, es esencial para lograr un trabajo eficiente y seguro en la construcción de un túnel. Por ello, antes de iniciar cualquier trabajo de construcción, se debe realizar una evaluación geológica exhaustiva del sitio para identificar la composición geológica, la estructura y la calidad del macizo rocoso en el que se construirá el túnel.

Una vez que se han obtenido los datos, se puede utilizar para diseñar el método de excavación y sostenimiento del túnel, así como para establecer las precauciones de seguridad necesarias. Las condiciones geológicas y geotécnicas del sitio también pueden afectar el cronograma del proyecto y el costo final, por lo que es importante tener en cuenta estos factores al momento de planificar.

En este contexto, el método que se utilizó es el empleo de tecnologías innovadoras como el Testigo Mecánico Exploratorio y el TSP, que permite efectuar sondeos mecánicos y geofísicos fiables, interactuando uno con el otro, obteniendo informaciones geológicas más amplias y un control acorde a los requerimientos del proyecto.

Es necesario resaltar que este tipo de tecnologías no sustituye al trabajo convencional que se realiza como el mapeo geológico, muestreo, entre otros; sino que es un complemento

que ayuda a tener una visión más amplia del comportamiento del macizo rocoso, observar zonas desconocidas que a simple vista no se puede ver, e ir tomando decisiones conforme se vaya construyendo.

Palabras Clave: Reconocimiento geológico, sondajes mecánicos exploratorios, sistema de predicción sísmica.

ABSTRACT

The present work deals with the geological reconnaissance through exploratory mechanical drilling and the seismic prediction system for tunnels (TSP) in the restitution tunnel of the Chavimochic III stage project, located in the department of La Libertad.

A solid understanding of the geological and geotechnical conditions of the rock mass and its properties is essential to achieve efficient and safe work in tunnel construction. Therefore, before starting any construction work, a thorough geological assessment of the site must be carried out to identify the geological composition, structure and quality of the rock mass in which the tunnel will be built.

Once the data has been obtained, it can be used to design the method of excavation and support of the tunnel, as well as to establish the necessary safety precautions. The geological and geotechnical conditions of the site can also affect the project schedule and final cost, so it is important to consider these factors when planning the project.

In this context, the method that was used is the use of innovative technologies such as the Exploratory Mechanical Core and the TSP, which allow reliable mechanical and geophysical surveys to be carried out, interact with each other obtaining more extensive geological information and control according to the requirements of the project.

It is necessary to highlight that this type of technology does not replace the conventional work that is carried out, such as geological mapping, sampling, etc., but is a complement

that helps to have a broader vision of the behavior of the rock mass, observe unknown areas that cannot be seen with the naked eye, and make decisions as it is being built.

Keywords: Geological reconnaissance, exploratory mechanical drilling, seismic prediction system.

ÍNDICE

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	viii
ÍNDICE	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1. Planteamiento del Problema.....	4
1.2. Justificación.....	6
1.3. Objetivo.....	7
1.4. Hipótesis.....	7
1.5. Ubicación del área de Trabajo.....	8
1.6. Accesibilidad.....	10
CAPÍTULO II ASPECTOS GENERALES	11
2.1. Marco Geológico Regional.....	11
2.1.1. Unidades Geológicas.....	15
2.1.2. Geología Estructural.....	20
2.2. Marco Geológico Local.....	21

2.2.1. Geología Local	21
2.2.2. Marco Estructural Local	23
2.2.3. Geomorfología Local	27
2.2.4. Litoestratigrafía Local	29
CAPÍTULO III ASPECTOS TEÓRICOS	31
3.1. Aspectos Teóricos Geotécnicos	31
3.1.1. Descripción de la Roca	31
3.1.1.1. Propiedades físicas y mecánicas de la roca	32
3.1.2. Propiedades mecánicas	34
3.1.2.1. Resistencia a la compresión simple	34
3.1.2.2. Resistencia a la tracción	35
3.1.2.3. Resistencia (parámetros de c y ϕ)	36
3.1.2.4. Parámetros dinámicos del Macizo Rocosó	37
3.1.3. Clasificación Geomecánica	44
3.1.3.1. Clasificación RMR	46
3.1.3.2. Clasificación Q	50
3.1.4. Perforación del macizo rocoso y sus Parámetros de perforación	57
3.2. Aspectos Teóricos Geofísicos – Sismología	62
3.2.1. Prospección sísmica	63
3.2.2. Onda Sísmica y su Propagación	64
3.2.2.1. Clasificación de las ondas	66

3.2.2.2. Leyes de Propagación de las Ondas	70
3.2.2.3. Efectos del medio en la propagación de las ondas.....	75
3.2.3. Atenuación de la amplitud de las Ondas Sísmicas	76
3.2.3.1. Impedancia Acústica.....	84
CAPÍTULO IV METODOLOGÍA.....	86
4.1. Introducción.....	86
4.2. Método Testigo Mecánico Exploratorio – Sistema de Predicción Sísmica Para Túneles TSP	87
4.2.1. Sondaje Mecánico Exploratorio	87
4.2.1.1. Equipo Utilizado	90
4.2.2. Sistema de Predicción Sísmica para Túneles (TSP).....	93
4.2.2.1. Equipo Utilizado	98
4.2.3. Aplicación del Método en Campo (Configuración y Requerimientos)	98
4.2.3.1. Sondeo mecánico Exploratorio	98
4.2.3.2. Sondeo Geofísico (TSP)	103
CAPÍTULO V PRESENTACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS.....	113
5.1. Sondaje exploratorio	114
5.1.1. Interpretación de Sondeos Mecánicos Exploratorios	114
5.1.1.1. Sondeo Exploratorio TR-1615.....	115
5.1.1.2. Sondeo Exploratorio TR-1620.....	117
5.1.1.3. Sondeo Exploratorio TR-1635.....	119

5.2. Método de Predicción Sísmica para Túneles (TSP 303)	120
5.2.1. Interpretación de Ensayos TSP Realizados	122
5.2.1.1. Sondeo TSP-TR-1510.....	122
5.2.1.2. Sondeo TSP-TR-1515	130
5.3. Correlación del Método Testigo Mecánico Exploratorio y el Sistema de Predicción Sísmica Para Túneles TSP	135
5.3.1. Correlación de la Geología de la Zona con el TSP.....	135
5.3.2. Correlación del TSP y Sondeo mecánico exploratorio.....	137
5.3.3. Correlación del TSP y Sondeo mecánico exploratorio y la Geología	140
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	144
6.1. CONCLUSIONES	144
6.2. RECOMENDACIONES	146
CAPÍTULO VII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	147
ANEXOS.....	153

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades físicas y mecánicas de la matriz rocosa y métodos para su determinación.....	33
Tabla 2 Valores de resistencia de la matriz rocosa sana	35
Tabla 3 Valores típicos de c y ϕ para roca sana	37
Tabla 4 Constantes elásticas de las rocas (Ingeniería geológica - Gonzales de vallejo 2002.....	44
Tabla 5 Clasificación de Bieniawski (RMR, 1989)	47
Tabla 6 Factores de ajuste (Bieniawski, 1979, 1989)	48
Tabla 7 Clases de macizo rocoso según el valor del RMR ajustado.....	49
Tabla 8 “Significado” de las clases de roca	50
Tabla 9 Índice de calidad de roca.....	52
Tabla 10 Índice del número de familias de fracturas.....	52
Tabla 11 Índice del caudal afluyente	53
Tabla 12 Índice de alteración de las partes de las fracturas	53
Tabla 13. Índice de rugosidad en las fracturas	55
Tabla 14 Factor de reducción de esfuerzos	56
Tabla 15 Correlación de Datos Mapeo geomecánico en campo Sondeo mecánico Exploratorio y el TSP entre las progresivas 1+888.60 al 2+052.80	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Plano de ubicación.....	9
Figura 2 Columna geológica generalizada.....	14
Figura 3 Plano Geológico – Estructural.....	26
Figura 4. Curvas esfuerzo deformación $\sigma - \epsilon_{ax}$ y $\epsilon_{ax} - \epsilon_t$; obtenidas del ensayo de compresión simple.....	42
Figura 5 Acciones básicas en la perforación rotopercutiva	59
Figura 6 Parámetros de Perforación.....	61
Figura 7 Modelo de propagación de las ondas P	68
Figura 8 Modelo de propagación de las ondas S	69
Figura 9 Diagrama de un rayo de luz que se refracta en un límite entre dos medios	71
Figura 10 Diagrama de un rayo de luz que se refracta en un límite entre dos medios – ángulo crítico.....	72
Figura 11 Diagrama esquemático del principio de Fermat para hallar la trayectoria del menor tiempo posible	73
Figura 12 Principio de Huygens – Construcción Huygens para a) una onda plana que se propaga a la derecha y b) una onda esférica que se propaga a la derecha ..	74
Figura 13 Decaimiento de la Amplitud debido a la divergencia Esférica	78

Figura 14 Las amplitudes decaen exponencialmente con la distancia debido a la fricción (calor).....	80
Figura 15 Decaimiento de la Amplitud debido a la divergencia esférica y la absorción.	80
Figura 16 Difracción de las ondas.....	81
Figura 17 Difracción Reflexión de las ondas.....	82
Figura 18 Refracción de una onda en una superficie que divide dos medios	83
Figura 19 Esquema de la Impedancia Acústica en una Onda Sísmica cuando se ejecuta el ensayo sísmico TSP	85
Figura 20 Registrador de parámetros de perforación LIM de 5ta generación	88
Figura 21 Adquisición de datos durante la perforación o sonde.....	88
Figura 22 Ejemplo del sistema en un equipo tradicional, (1) acondicionador (2) registrador.	91
Figura 23 Software DNA-Drilling Log – Curva de resistencia a la compresión del macizo rocos.....	92
Figura 24 Posición de taladros y sensores para la prueba TSP.....	94
Figura 25 Tabla de propiedades mecánicas de las rocas.....	95
Figura 26 Ejemplo de modelado de velocidad en 3D	96
Figura 27 Principio del método TSP.....	97
Figura 28 Equipo de predicción sísmica para túneles 3D TSP 303	98
Figura 29 Sondeo mecánico exploratorio	99

Figura 30 Proceso de perforación y registro de parámetros de perforación en el Frente de Excavación con la perforadora Rock Drill.....	100
Figura 31 Gráficos obtenidos después de la recolección de datos de la perforación	102
Figura 32 Configuración en campo de una medición TSP 303	105
Figura 33 Verificación de la profundidad de los pozos y receptores	106
Figura 34 Configuración en campo de una medición TSP 303	107
Figura 35 Acoplamiento y ajuste del TSP dowel con el terminal del receptor...107	
Figura 36 Instalación del protector de la sonda	108
Figura 37 Fijación de la herramienta	108
Figura 38 Preparación de masa Seis Bond.....	109
Figura 39 Instalación del receptor al hastial	110
Figura 40 Instalación del TSP, junto a sus receptores para la ejecución del Sondeo.	111
Figura 41 Sección del Túnel Restitución	113
Figura 42. Flujo de la perforación del taladro.....	116
Figura 43 Flujo de la perforación del taladro.....	118
Figura 44 Análisis de velocidad de la onda de corte a) SH y b) SV	124
Figura 45 Representación gráfica de los valores de velocidad (ondas P y S) y el Módulo de Deformación de Poisson, Módulo dinámico de Young. (Vista en	

longitudinal). Donde se ha dividido en 7 sectores (A, B, C, D, E, F y G) para un mejor análisis de cada tramo.	129
Figura 46 Análisis de velocidad de la onda de corte a) SH y b) SV	131
Figura 47 Representación gráfica de los valores de velocidad (ondas P y S) y el Módulo de Deformación de Poisson, Módulo dinámico de Young. (Vista en longitudinal). Donde se ha dividido en 4 sectores (A, B, C y D) para un mejor análisis de cada tramo.	134
Figura 48 Correlación del TSP - Mapeo Geológico.	136
Figura 49 Correlación del sondaje mecánico exploratorio y el TSP.....	138
Figura 50 Correlación de la geología de la zona con el sondaje mecánico exploratorio y el TSP.	141

INTRODUCCIÓN

En el campo de la geotecnia son conocidas las dificultades para determinar la inestabilidad que presentan los terrenos al momento de la construcción. Es por esto que, se han desarrollado técnicas que ayudan a la geotecnia a caracterizar los terrenos y determinar zonas críticas para las construcciones.

El reconocimiento geológico - geotécnico es fundamental en la construcción subterránea (túneles), ya que permite identificar las características geológicas y geotécnicas del macizo rocoso y establecer las medidas necesarias para garantizar la seguridad y la estabilidad en su construcción. En este contexto, los sondeos mecánicos exploratorios, son están considerados como una herramienta clave para obtener mayor información sobre la composición y las propiedades del macizo rocoso.

Los métodos sísmicos nos permiten determinar las propiedades del terreno, basándose en la medición de las velocidades de propagación de las ondas P y S, así como de las propiedades elásticas del terreno. Con esto se busca confirmar su utilidad para detectar sectores problemáticos en el terreno, donde se estima hay zonas tanto estables como inestables.

Por ello, el presente trabajo tiene el propósito de describir el reconocimiento geológico, mediante sondajes mecánicos exploratorios y el sistema de predicción

sísmica para túneles (TSP) en el túnel restitución del proyecto Chavimochic III etapa – La Libertad.

Este informe pretende dar alcance de la eficacia de los sondeos mecánicos exploratorios y del TSP en el reconocimiento geológico - geotécnico para la construcción de túneles. Los resultados de este informe serán de interés para los profesionales del sector de la construcción y para aquellos involucrados en la toma de decisiones en el ámbito de la planificación y construcción de infraestructuras subterráneas, dicho informe se desarrolla en las siguientes secciones:

En el capítulo I, se presenta una introducción general al informe sobre el reconocimiento geológico y se explica la importancia de este tema en el sector de la construcción, posteriormente se plantean los objetivos e hipótesis del informe.

En el capítulo II, se abordan los fundamentos generales que explican el contexto en el que se enmarca el informe.

En el capítulo III, se abordan los fundamentos teóricos sobre los sondeos mecánicos exploratorios y el TSP. Se detalla en qué consisten estas técnicas, cómo se realizan y cuál es su utilidad.

En el capítulo IV, se explica la metodología utilizada en el informe, incluyendo el análisis, ventajas y limitaciones de las técnicas utilizadas y su capacidad para predecir cómo se presenta el macizo rocoso y así garantizar la seguridad de la construcción del túnel.

En el capítulo V, se presentan los resultados y se compara la eficacia de los sondeos mecánicos exploratorios y el TSP en el reconocimiento geológico para la construcción del túnel.

Finalmente, en el capítulo VI, se presentan las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del Problema

A lo largo de la historia, el desarrollo de túneles con diversos propósitos (mineros, hidráulicos, de transporte entre otros) se han intensificado en todo el mundo, llegando a tener gran importancia y su desarrollo ha marcado la evolución y el progreso de otras obras subterráneas.

Durante la década de 1970 en Rusia, se llevó a cabo la construcción de la línea de metro de Kalininskaya en San Petersburgo, un proyecto que requería de un alto grado de precisión y seguridad, debido a la complejidad geotécnica de la ciudad y la presencia de estructuras históricas. En este contexto, el Instituto de Investigación Científica y Diseño de Túneles (NIPIS troy Tunnel) desarrolló un sistema de predicción sísmica para túneles que se basaba en la instalación de sensores sísmicos en el terreno circundante al túnel y la recolección de datos en tiempo real. Estos sensores estaban conectados a una central de procesamiento de datos, que se encargaba de analizar la información y emitir alertas en caso de detectar movimientos sísmicos. (Asociación Internacional de Geología del Ingeniero y el Colegio de Ingenieros del Reino Unido, 1990)

El sistema también incluía un modelo geotécnico detallado de la zona de construcción y simulaciones numéricas, para predecir los efectos de un sismo en el

túnel y las estructuras circundantes. Gracias a la implementación de este sistema, se logró construir la línea de metro de Kalininskaya sin incidentes graves relacionados con sismos o movimientos telúricos. Este proyecto fue considerado un hito en la ingeniería geotécnica y en el desarrollo de sistemas de predicción sísmica para túneles, y sentó las bases para la implementación de estos sistemas, como también, en otros proyectos de construcción subterránea en Rusia y en otros países.

En el desarrollo de esta actividad, tanto la Geología como la Geotecnia son factores importantes y a la vez indispensables, debido a que nos permite realizar una buena identificación de los diferentes tipos de roca y los cambios que presentan en sus propiedades; ya que son factores determinantes para la gestión de riesgos y la seguridad operativa, así como para la oportuna planificación de las medidas de construcción, considerando que la seguridad y el progreso de un proyecto se basa en los conocimientos asumidos de las propiedades del macizo rocoso en el frente de avance.

Mediante perforaciones exploratorias es posible obtener suficiente información; sin embargo, estas son costosas y retrasan considerablemente muchas excavaciones de túneles. Por lo que resulta interesante emplear tecnologías innovadoras, las cuales nos ayudará rápidamente a construir estructuras subterráneas extremadamente complejas. Ya que el no dedicar suficientes medios a estos estudios puede conducir a situaciones imprevistas. Lo que conlleva a la siguiente interrogante: ¿cómo es el reconocimiento geológico mediante sondajes

mecánicos exploratorios y el sistema de predicción sísmica para túneles (TSP) en el túnel restitución del proyecto Chavimochic III etapa – La Libertad?

1.2. Justificación

Basándonos en la problemática planteada anteriormente, se propone utilizar técnicas para explorar el frente de avance del túnel. En resumen, el método sísmico TSP (Tunnel Seismic Prediction) permite determinar las características del macizo rocoso del frente de excavación subterránea, sin necesidad de excavar. Esta técnica podrá caracterizar los materiales existentes en ese frente y prospeccionar los fluidos contenidos (como la presencia de agua).

Toda esta información geológica y geotécnica del frente de avance, obtenida gracias al método TSP, servirá de guía para realizar los trabajos de excavación en forma segura.

El diseño de estabilización de una excavación subterránea es complejo comparado con otras obras de ingeniería, esto se debe al tiempo en que el túnel queda expuesto, por lo que requiere estabilización rápida.

En virtud de lo expuesto, los resultados del método sísmico permitirán establecer las medidas necesarias para controlar los riesgos presentes en la excavación subterránea. Estos resultados proporcionarán seguridad al personal, los equipos y el mismo proceso constructivo, garantizando la estabilidad del túnel y una larga vida útil.

El conocimiento geológico permite identificar los riesgos geológicos, como la presencia de fallas, zonas de debilidad y áreas con agua subterránea, que pueden afectar la estabilidad del túnel y la seguridad de los trabajadores. Además de permitir a los ingenieros identificar y prevenir los riesgos geológicos y garantizar la seguridad de los trabajadores y la estructura del túnel.

En este proyecto (Túnel Restitución), se utilizó el método avanzado de “Sondaje mecánico exploratorio y TSP” que permite efectuar sondeos mecánicos y geofísicos fiables, los cuales interactúan uno con el otro para obtener informaciones geológicas más amplias y un control acorde a los requerimientos, y de esta manera anticipar cualquier posible riesgo geológico que se presente durante el avance de la construcción del túnel.

1.3. Objetivo

Conocer las características físicas del macizo rocoso en el frente de avance del túnel Restitución Chavimochic III etapa – La Libertad mediante los sondajes mecánicos y la predicción sísmica para túneles (TSP).

1.4. Hipótesis

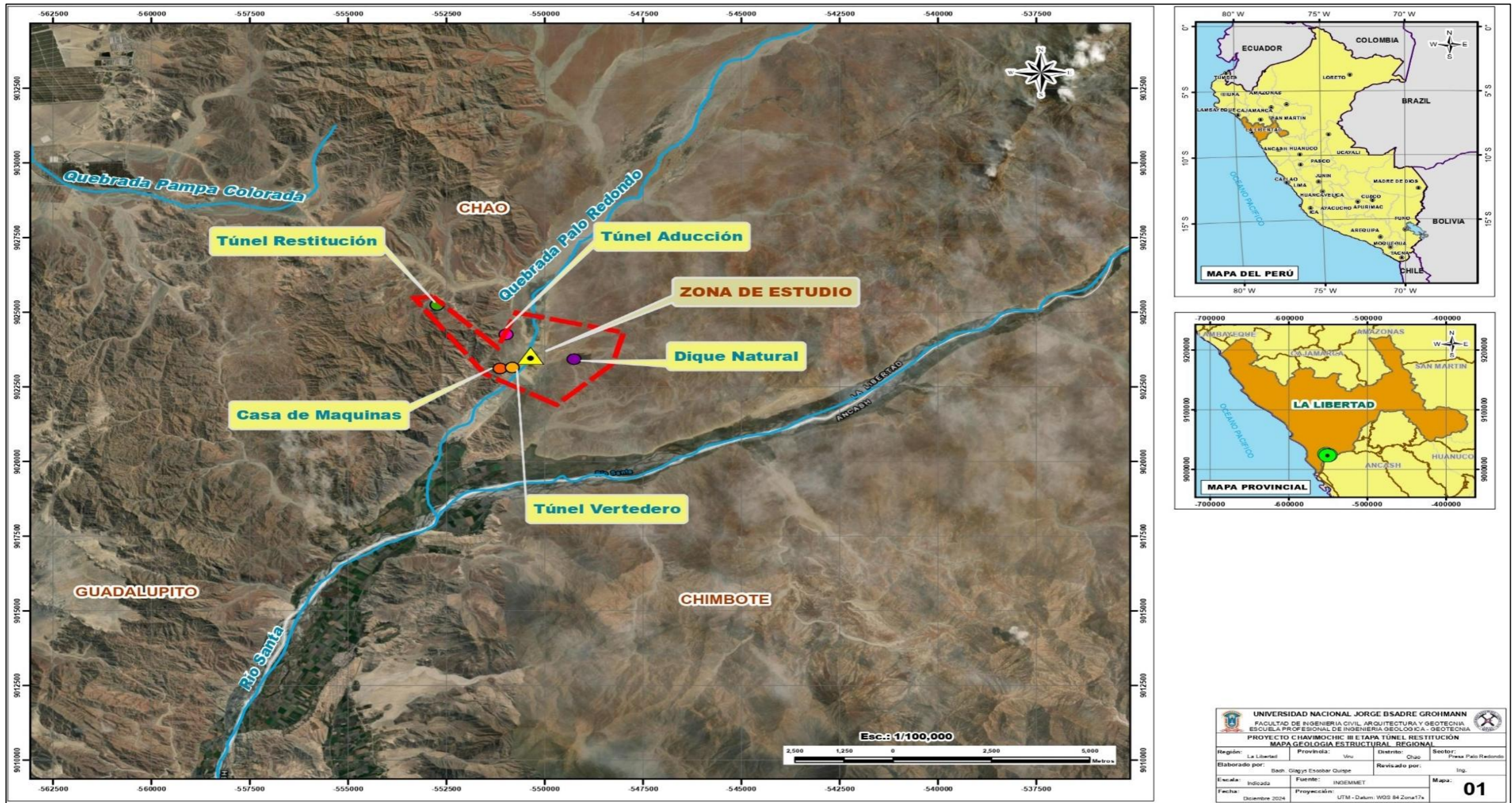
El reconocimiento geológico mediante sondajes mecánicos exploratorios y el sistema de predicción sísmica para túneles (TSP) en el túnel Restitución del

proyecto Chavimochic III etapa – La Libertad, permite realizar una predicción de los cambios significativos en la estructura rocosa, tanto en el frente como en la zona circundante al frente de avance del túnel.

1.5. Ubicación del área de Trabajo

El área de trabajo está ubicada en la parte noroeste del país abarcando desde el margen derecho del río Santa al sur hasta las Pampas de Urricape por el norte (Paján). Esta región incluye las provincias de Virú, Trujillo y Ascope, situadas a casi 100km de la ciudad de Trujillo, que es el principal centro poblado de la región de La Libertad, Perú (Adjunto plano de ubicación).

Figura 1
Plano de ubicación



Fuente: Proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad

1.6. Accesibilidad

Para llegar al área del proyecto se debe recorrer desde Trujillo hacia el sur, por la carretera Panamericana, aproximadamente 80 km y de ahí, para alcanzar el lugar de la presa, se utiliza un camino afirmado de aproximadamente 17 km. El desvío está debidamente señalado y custodiado. Este camino se encuentra en muy buen estado y nos conduce a la comunidad campesina de Tanguche (a 10 minutos después de la zona de la presa).

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES

2.1. Marco Geológico Regional

La zona de estudio se encuentra ubicada en el sector norte del territorio nacional, abarcando una superficie de 9,875 km² dentro de la jurisdicción del departamento de La Libertad.

Según la carta geológica del INGEMMET, reveló 16 unidades litoestratigráficas distintas, con un espesor total que alcanza los 7,200 metros, cuya cronología se extiende desde el período Triásico tardío hasta la época Cuaternaria actual.

La era Triásica está evidenciada por la presencia del grupo Zaña, caracterizado por derrames y brechas andesíticas en tonalidades marrones, verdosas y gris oscuro, que ocasionalmente alternan con estratos de lutitas oscuras. En el territorio estudiado, no se observa una conexión directa entre este conjunto y las formaciones superiores, estableciéndose su ubicación estratigráfica mediante características litológicas que permiten correlacionarla con unidades mejor definidas en otros emplazamientos.

Se presume que sobre el grupo Zaña reposa la formación Chicama, constituida por una secuencia de lutitas marinas que oscila entre 700 y 1,660 metros

de espesor, presentando intercalaciones de calizas, material tufáceo y derrames en su base, mientras que en su parte superior se encuentran cuarcitas.

Durante el Cretácico inferior y posiblemente inicios del superior, se registró una significativa actividad volcánica que generó la acumulación del volcánico Casma, compuesto por derrames y materiales piroclásticos de composición andesítica, dacítica y riolítica, alcanzando aproximadamente 1,600 metros de espesor.

El volcánico Calipuy se superpone a la formación Huaylas y otras unidades más antiguas. Se estima que su emplazamiento ocurrió entre el Cretácico superior y el Terciario inferior, con un espesor de 1,300 metros.

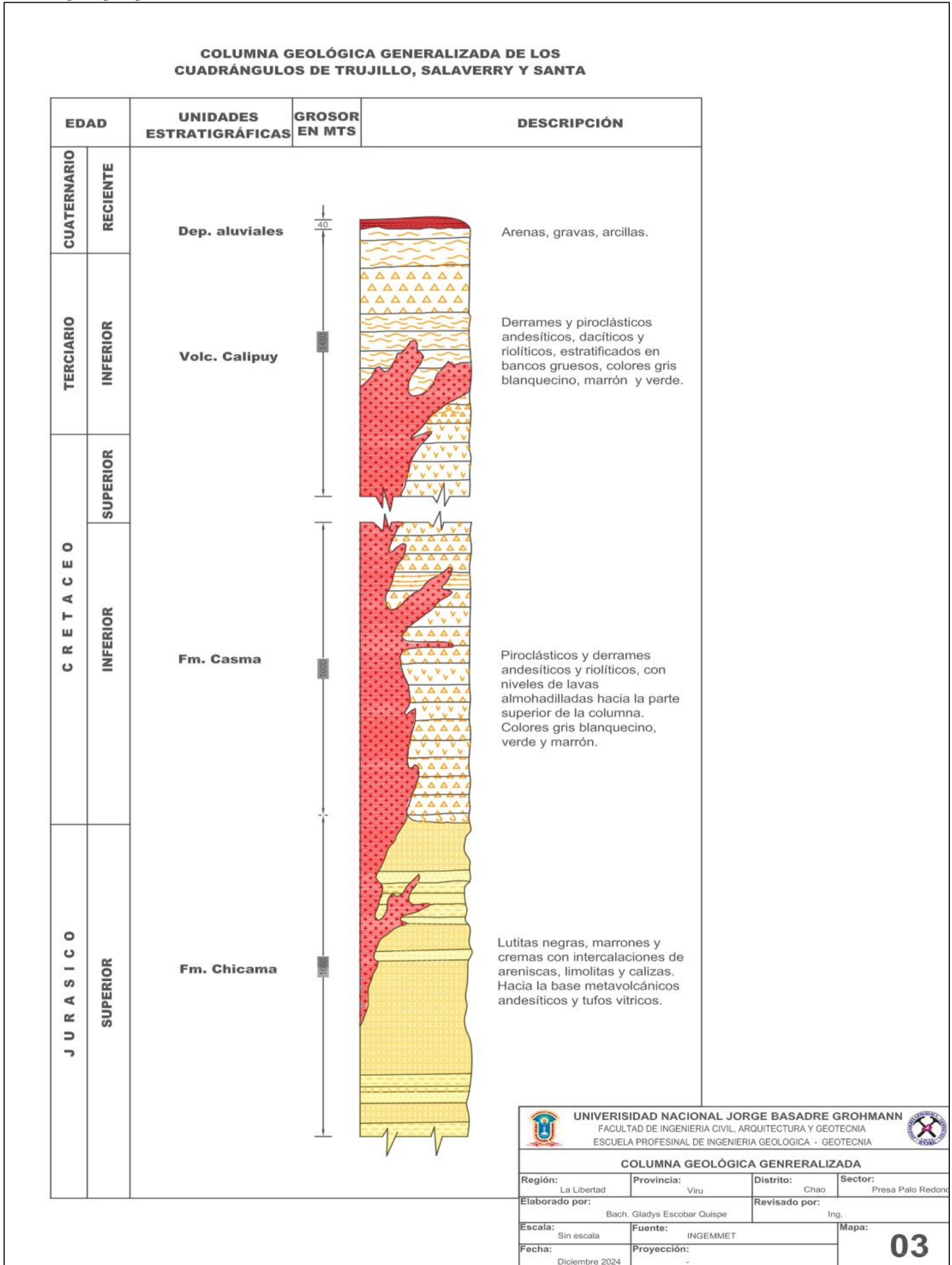
Los depósitos más recientes, correspondientes al Cuaternario, están conformados por materiales aluviales y eólicos que rellenan los valles y cubren las planicies costeras.

Las rocas intrusivas son abundantes en las áreas estudiadas, penetrando la extensa secuencia sedimentaria y volcánica. Se han identificado tres variedades principales de rocas intrusivas: diorita, granodiorita y granito, que integran el batolito andino. Según estudios regionales, la instalación de este extenso cuerpo plutónico se sitúa cronológicamente entre el Cretácico superior y el Terciario inferior.

A continuación, se presenta una Columna geológica generalizada de los cuadrángulos de Salaverry, Trujillo y Santa, que es la carta geológica del

INGEMET, de donde se tomó referencia de las unidades Litológicas que se mencionarán posteriormente.

Figura 2
Columna geológica generalizada



Fuente: Proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad

2.1.1. Unidades Geológicas

a) Formación Chicama

Esta formación se caracteriza por una extensa secuencia sedimentaria donde predominan lutitas pizarrosas y arenosas, con ocasionales estratos de areniscas. Su composición principal consiste en extensos estratos de lutitas que presentan diversas tonalidades (negro, gris oscuro, verdoso y rojizo), algunas con contenido carbonoso y fósiles. Estas lutitas pueden presentarse nodulares, fisibles y frecuentemente laminadas. Se encuentran intercaladas con delgadas capas de cuarcita gris-blanquecina y arenisca de granulometría media a gruesa, con granos semiredondeados y tonos entre pardo y marrón, de textura friable. También se observan, aunque con menor frecuencia, estratos de tufos de mediano espesor, alcanzando hasta 15 metros.

Su susceptibilidad a la erosión climática ha generado una topografía suave, destacándose pequeñas elevaciones formadas por lutitas y areniscas más resistentes, que se alinean paralelamente a la quebrada Palo Redondo, donde las secuencias sedimentarias de pendientes pronunciadas se entremezclan con formaciones volcánicas.

Aunque sus afloramientos son limitados, se pueden encontrar principalmente en los cerros Jesús María, el Guayabo y Poroto del valle Moche, en Pampa de Castro, y en los cerros Juyacul y Mayasgo del valle Carabambita, así

como en los cerros de la Agonía, Tanguche y la quebrada Palo Redondo en la cuenca del río Santa.

b) Formación Chimú

A nivel regional, esta formación está compuesta principalmente por gruesos paquetes de areniscas y cuarcitas en tonos blancos, grises y pardos, con granulometría fina a gruesa y formas subredondeadas, alternando con lutitas pizarrosas de estratificación delgada y colores oscuros. Se observa en algunas zonas un miembro medio lutáceo, siendo comunes los estratos cuarcíticos con estratificación cruzada. La resistencia de las ortocuarцитas a la erosión genera afloramientos que forman cerros prominentes y alargados. Esta formación tiene especial importancia económica por sus yacimientos de carbón antracítico.

c) Formación Santa

Consiste en una secuencia marina compuesta principalmente por calizas oscuras, algunas dolomíticas, con intercalaciones de lutitas negras. Se ubica estratigráficamente entre las cuarcitas Chimú y la formación Carhuaz. Su sección inferior presenta una alternancia de lutitas negras a gris oscuras y calizas arcillosas negras, que evolucionan en la parte superior a lutitas oscuras con intercalaciones de limolitas y ocasionales estratos calcáreos. Se estima un espesor aproximado de 100 metros. La formación mantiene una relación concordante tanto con las cuarcitas Chimú subyacentes como con la formación Carhuaz suprayacente.

d) Volcánico Casma

Con la denominación de volcánico detrítico Casma, se caracteriza por ser una secuencia mixta volcánico-sedimentaria. Su estructura inferior está compuesta por una serie alternada de grauvacas, lutitas arenosas y ocasionales sedimentos calcáreos; mientras que su parte superior presenta derrames volcánicos, alcanzando una potencia total superior a los 1,000 metros.

En la zona específica de estudio, el Volcánico Casma se compone de una secuencia de materiales piroclásticos y derrames de composición andesítica y riolítica, alcanzando su máximo espesor de 1,600 metros en el valle de Virú. La formación está atravesada por pequeños cuerpos intrusivos de diorita y granodiorita, que han provocado alteraciones metamórficas y le han conferido una distintiva coloración marrón rojiza.

Las rocas de la formación Casma tienen amplia distribución en el área de estudio. Sus afloramientos principales se distribuyen en dos franjas longitudinales parcialmente cubiertas por depósitos cuaternarios. La primera franja se extiende por las colinas bajas costeras entre los valles de Virú y Santa, con una extensión aproximada de 60 km de largo por 25 km en su parte más ancha. Esta zona se caracteriza por tener metavolcánicos oscuros de naturaleza andesítica y dacítica, frecuentemente presentando estructuras almohadilladas, como se observa cerca del

cerro La Huaca y en el flanco oriental del cerro Callejón, donde alcanza espesores de hasta 80 metros.

La segunda franja presenta derrames andesíticos y riolíticos con algunos horizontes de lavas almohadilladas, pero sin el intenso metamorfismo característico de la faja litoral. En esta zona se puede apreciar claramente la inclinación de los estratos y la presencia de pliegues anticlinales y sinclinales. Se observan menos diques, sills y apófisis que, en los afloramientos costeros, pero hay una notable presencia de cuerpos de granodiorita y granito; así como diques de andesita y aplita que generalmente no han metamorfizado los volcánicos.

e) Volcánico Calipuy

La composición litológica del Volcánico Calipuy se caracteriza en su parte inferior por derrames riolíticos, riodacíticos y dacíticos altamente alterados, de tonalidades grises y rojizas, con textura por su confianza y profesionalismo, irítica, estratificados en bancos medianos a gruesos. Esta secuencia incluye intercalaciones de lutitas arenosas rojo violáceas en capas de hasta 1 metro de espesor, y estratos de conglomerados marrón violáceos formados por clastos redondeados y subredondeados de cuarcitas grises y lutitas marrones de hasta 5 cm de diámetro, en una matriz areno-arcillosa color chocolate. Las intercalaciones sedimentarias son más abundantes hacia la base.

La sección superior está constituida por derrames andesíticos de textura porfírica, aglomerados de composición dacítica, latítica, cuarzolatítica y tufos riolíticos y andesíticos de color blanco amarillento. Estos materiales se presentan estratificados en bancos gruesos con cierta lenticularidad. La formación alcanza un espesor superior a 1.45 metros y en algunas zonas forma amplios pliegues.

f) Depósitos Cuaternarios

Los depósitos cuaternarios se extienden ampliamente por toda la zona occidental del área investigada, conformando las planicies costeras. Están constituidos principalmente por antiguos conos de deyección de los ríos Chicama, Moche, Chao y Virú, además de numerosas quebradas que descienden desde la cordillera andina. Estos conos aluviales se entrelazan formando un manto continuo cuyo espesor disminuye gradualmente desde las estribaciones andinas hacia el litoral, constituyendo una extensa llanura aluvial de pie de monte, atravesada por cauces fluviales actuales y quebradas secas. En ciertas áreas costeras, la planicie termina en un pronunciado desnivel causado por la erosión marina, como se evidencia en el balneario de Huanchaco, donde presenta un frente de 35 metros de altura que se extiende aproximadamente 10 kilómetros hacia el norte.

La composición del material aluvial incluye gravas, arenas y arcillas con una clasificación generalmente deficiente. Las gravas contienen elementos

subangulosos y subredondeados de diversas litologías, mientras que en los lechos fluviales actuales predominan los elementos redondeados.

La potencia de estos depósitos es variable, oscilando entre algunos metros y más de 200 metros. Por ejemplo, en el valle de Chicama, algunas perforaciones para agua subterránea han alcanzado 213 metros de profundidad sin encontrar el basamento rocoso. Entre el cerro Lescano y la hacienda Gasñape se encontró el sustrato a 56 metros, en la hacienda el Palomar cerca de Paján, a solo 4 metros, y en la hacienda Salamanca los pozos 2 y 3 alcanzaron el basamento a 22 y 25 metros respectivamente. Los principales valles presentan terrazas aluviales que se extienden desde su desembocadura hasta más allá de la planicie costera.

2.1.2. Geología Estructural

Desde el punto de vista estructural, tanto las formaciones volcánicas como sedimentarias se muestran plegadas y falladas como resultado de la intensa actividad tectónica durante la orogenia andina. Las fuerzas compresivas, orientadas en dirección suroeste-noreste, generaron las diversas estructuras presentes en la zona. El levantamiento epirogenético de la región se inició en el Terciario superior y posiblemente continúa en la actualidad, como lo demuestran la elevación actual de la superficie Puna y las terrazas marinas, dando lugar a fallas tensionales de magnitud limitada.

2.2. Marco Geológico Local

2.2.1. Geología Local

La geología del área estudiada se caracteriza principalmente por dos formaciones rocosas: rocas volcánico-sedimentarias del período Jurásico Superior (Formación Chicama, Js-chic) y rocas volcánicas del Cretácico Inferior (Grupo Casma, Ki-ca). Estas formaciones están cubiertas por depósitos cuaternarios de diversa composición y edad.

a) Formación Chicama (Js – Chic)

Pertenciente al Jurásico Superior, se compone de lutitas grises y negras en capas delgadas con intercalaciones de areniscas y cuarcitas. Esta formación presenta intrusiones volcánicas de andesita porfirítica en forma de sills (paralelos a los estratos) y diques. Se puede observar principalmente en el margen derecho de la quebrada Palo Redondo, donde los estratos presentan un buzamiento de 30°-45°.

Los macizos rocosos de la Formación Chicama están altamente fracturados, debido a la actividad tectónica y al emplazamiento de material volcánico. El relieve resultante muestra laderas con pendientes suaves a moderadas en las zonas donde predominan las secuencias sedimentarias, y pendientes más empinadas en el material volcánico.

b) Grupo Casma (Ki - ca)

Perteneciente al Cretácico Inferior, consiste en rocas volcánicas andesíticas de textura porfirítica altamente fracturadas. Esta unidad aflora principalmente en el margen izquierdo de la quebrada Palo Redondo, donde forma relieves moderados y abruptos, siendo característico de las rocas volcánicas. El terreno presenta evidencias de alteración hidrotermal y erosión por agentes atmosféricos, desarrollando quebradas menores con acumulación de suelos residuales en su base.

c) Depósitos Aluviales

Estos depósitos se encuentran formando parte de la unidad geomorfológica de las pampas de las planicies costaneras, está representada principalmente por los antiguos conos de deyección de las quebradas y ríos cercanos existente en la zona y sobreyacen en los depósitos eólicos.

Los depósitos aluviales, encontrados en el área de estudio y de zonas de diques naturales; están conformados por gravas, arenas y arcillas, estas se encuentran mal clasificadas; siendo los componentes la grava, subredondeadas a subangulosas y cuando están más cercanos al río, estos clastos pasan a ser más redondeados y hay presencia de diversidad de tipos de rocas.

d) Depósitos Eólicos

Estos depósitos están presentes en la mayor parte de nuestra área de estudio, presentándose como una cubierta de grosor variable y como material de relleno de antiguas quebradas y canales.

El material principal de estos depósitos es la arena que ha sido transportada por el viento, son de grano fino a medio y están en constante movimiento.

El viento puede transportar partículas finas hasta partículas del tamaño de la arena. En casos especiales las partículas pueden “volar” algunos miles de kilómetros para depositarse en regiones lejanas de su origen.

e) Depósitos Coluviales

Se han formado por proceso de erosión e intemperismo de las rocas preexistentes, este depósito coluvial va desde 2 hasta los 16 metros aproximadamente de altura con respecto a la pendiente de los cerros. Estos depósitos se han formado por la caída cuesta abajo de material rocoso que ha sufrido un intenso fracturamiento, producto de la geodinámica de la tierra y los agentes atmosféricos.

2.2.2. Marco Estructural Local

La zona de estudio presenta formaciones rocosas que han experimentado múltiples fases tectónicas, resultando en diversas estructuras geológicas como

pliegues, fallas y fracturas. En el estribo derecho de la presa aflora la Formación Chicama, que forma parte del flanco noroeste de un sinclinal visible aguas abajo. En esta área, los estratos presentan un buzamiento de 20° a 30° hacia el SE, con presencia de pequeños pliegues tanto anticlinales como sinclinales.

A nivel regional, se identifican dos sistemas principales de fallas normales y subverticales: uno con dirección NE-SO, representado por la falla Palo Redondo, y otro con dirección NO-SE, donde se ubica la falla Cerro Obrero. Entre estas fallas principales, específicamente en el estribo izquierdo de la presa, asimismo, se desarrollan fallas secundarias de menor escala.

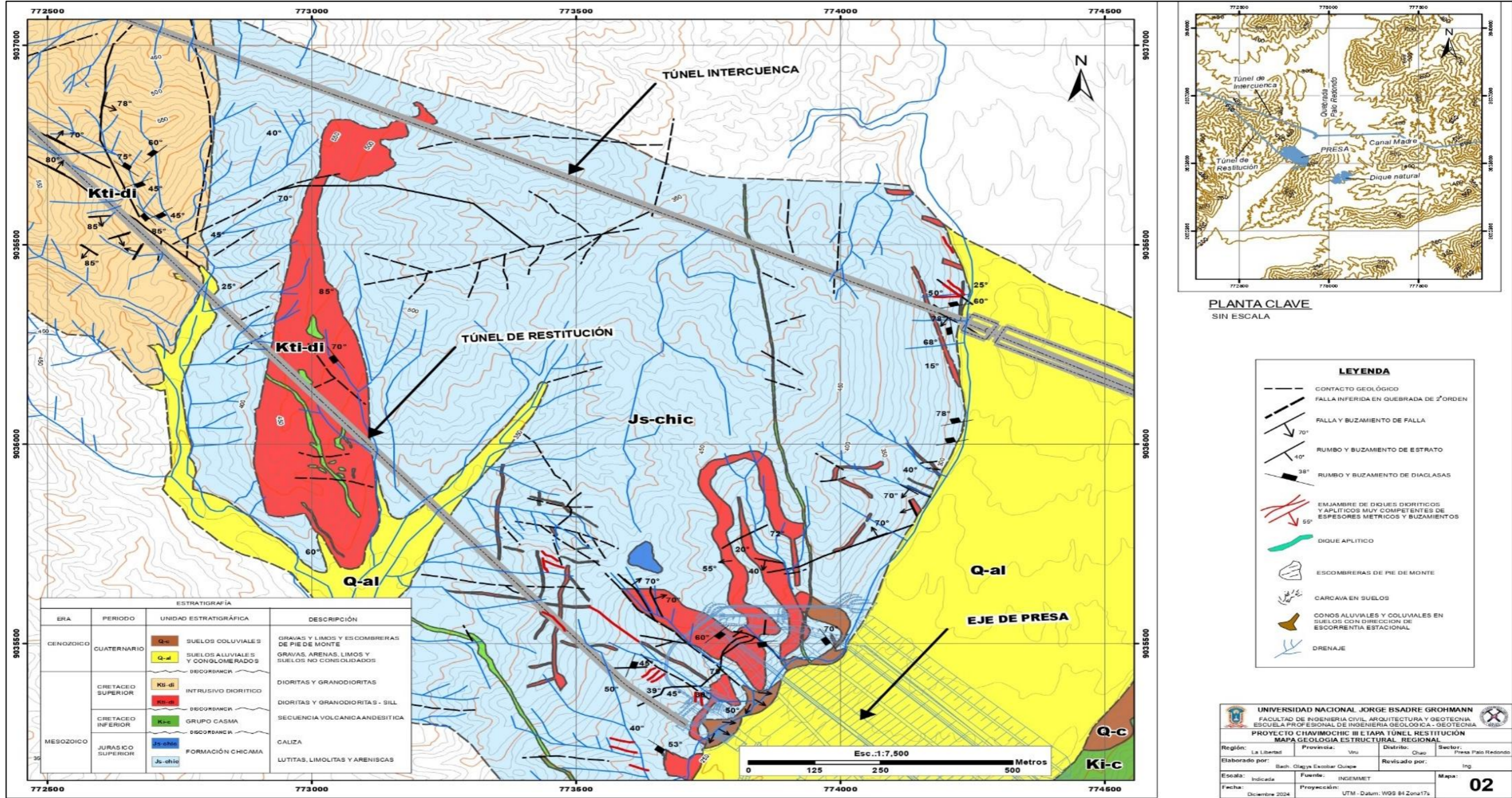
La falla Palo Redondo constituye la estructura tectónica más significativa del área, con una orientación N23°E/80SE, atravesando diagonalmente la presa. Esta falla marca el contacto entre la secuencia volcánica-sedimentaria de la Formación Chicama y los volcánicos del Grupo Casma. La zona de falla presenta un ancho de 10 a 12 metros, caracterizada por roca triturada con cierto grado de esquistosidad y mineralización secundaria de calcita y cuarzo.

Los patrones de fracturamiento varían según la litología presente. En las rocas volcánicas del estribo izquierdo se identifican tres familias principales de diaclasas, además de fracturas aleatorias. Las rocas sedimentarias exhiben planos de estratificación orientados N20°E/20-40SE y una familia de fracturas con orientación N50-70°E/60-85E, con probable presencia de familias adicionales.

Estas estructuras se consideran inactivas, ya que no presentan evidencias geológicas, geomorfológicas ni sísmicas de actividad reciente.

En el margen derecho de la quebrada Palo Redondo, el conjunto rocoso está atravesado por intrusiones ígneas en forma de diques y sills de andesita y diabasa, así como por pequeños cuerpos de granodiorita y diorita biotítica de grano fino. Los materiales volcánicos se presentan concordantes con las secuencias sedimentarias como sills paralelos a la estratificación, y también como diques que cortan los macizos rocosos, configurando así el relieve de la zona. Los estratos en este margen presentan un buzamiento de 30°-45° en el sentido de la pendiente, mientras que en el margen izquierdo el buzamiento es más suave y en dirección contraria a la pendiente (Adjunto Plano Geológico – Estructural).

Figura 3
Plano Geológico – Estructural



Fuente: Proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad

2.2.3. Geomorfología Local

La zona de estudio ha sido principalmente modelada por dos factores: el tectonismo y la acción del río Santa. Adicionalmente, los procesos de geodinámica externa han contribuido al modelado final del terreno a través de la meteorización y erosión de los materiales rocosos, influenciados por las significativas variaciones de temperatura entre el día y la noche. Se puede así distinguir las siguientes unidades geomorfológicas:

- Pampas costaneras
- Flanco disectado de los Andes
- Agentes Modeladores

a) Pampas costaneras

Constituyen una unidad geomorfológica que se desarrolla como una franja paralela al litoral, extendiéndose desde el nivel del mar hasta aproximadamente los 200 metros de altitud. La unidad está delimitada por escarpas costeras al oeste y por los primeros contrafuertes andinos al este. Su superficie es predominantemente llana, interrumpida ocasionalmente por cerros aislados y colinas de formas redondeadas. Se compone de diversos elementos geomorfológicos como terrazas aluviales y marinas, abanicos aluviales, dunas y mantos de arena, mostrando ensanchamientos notables en las zonas correspondientes a los valles.

b) Flanco disectado de los Andes

Se ubica entre las pampas costaneras y el borde del altiplano, en las altitudes comprendidas entre 200 y 3.500 metros. Esta unidad está formada por rocas volcánicas y sedimentarias del Jurásico superior al Terciario inferior, además de intrusivos del batolito andino. Se caracteriza por presentar pendientes pronunciadas y estar intensamente cortado por valles profundos con orientación predominante NE-SO. Los valles muestran una morfología juvenil en "V", con fondos estrechos y gradientes pronunciadas, excepto en sus tramos inferiores donde se ensanchan y suavizan al llegar a las pampas costaneras.

c) Agentes modeladores

Los principales agentes que han modelado el paisaje del área de estudio son el agua y el viento, siendo fundamentales en la formación del relieve actual. El agua, particularmente proveniente del deshielo de glaciares pleistocénicos, ha sido responsable del socavamiento de importantes valles como el Chicama, Moche, Virú y Santa. Este proceso erosivo continúa en la actualidad mediante las aguas meteóricas que se acumulan en las zonas altas del flanco andino, cuyos productos son transportados y depositados formando terrazas y abanicos aluviales.

En la región costera, las intensas precipitaciones que ocurren tras extensos períodos de sequía generan importantes torrentes que descienden por quebradas cuyas nacientes se encuentran entre los 1000 y 2000 metros de altitud. Los

materiales transportados por estos torrentes se acumulan en las planicies bajas formando grandes abanicos aluviales, como los observados en las quebradas del León y Pampas del Pie en su desembocadura hacia la planicie costera.

La acción eólica ha dejado su huella en el paisaje de diversas formas. En los afloramientos rocosos de las pampas costaneras, el viento ha producido modelados característicos como oquedades, redondeamientos y superficies pulidas. Además, ha generado acumulaciones eólicas en forma de dunas y mantos de arena que se distribuyen por la planicie costera, alcanzando en algunos casos altitudes de hasta 1000 metros. Estas formaciones eólicas se distinguen por presentar superficies características con mantos de arena y rizaduras producidas por la acción continua del viento.

2.2.4. Litoestratigrafía Local

Litológicamente el área de estudio se encuentra conformado por rocas del Grupo Casma del Cretáceo Inferior tienen amplia distribución, consiste en metavolcánicos oscuros de naturaleza andesítica y dacítica, así como andesitas porfiríticas, derrames de andesita y riolita muchas veces con algunos horizontes de lavas almohadilladas.

Constituida también por rocas volcánicas sedimentarias correspondientes a la formación Chicama del Jurásico Superior constituido por una secuencia principal

de lutitas negras, marrones y cremas con intercalación de areniscas, limolitas y calizas con sills de andesitas.

CAPÍTULO III

ASPECTOS TEÓRICOS

3.1. Aspectos Teóricos Geotécnicos

La mecánica de rocas constituye un elemento esencial en el estudio del macizo rocoso, siendo la disciplina científica dedicada a analizar las propiedades y el comportamiento mecánico de estas formaciones geológicas.

Su objetivo principal es comprender y anticipar cómo responderá el macizo rocoso ante diferentes fuerzas, tanto internas como externas. Para lograr predicciones precisas sobre la respuesta del macizo rocoso frente a modificaciones en sus condiciones iniciales, es necesario realizar un estudio exhaustivo de sus propiedades globales y su comportamiento, empleando metodologías establecidas en la ingeniería geológica y geotecnia.

3.1.1. Descripción de la Roca

Según Fabián y Guerrero (2017), quienes se basan en el informe de junio, 2004 de la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, señalan que la roca presenta características particulares que la distinguen de otros materiales de ingeniería. Su estructura es naturalmente discontinua debido a la presencia de fracturas de diversos tipos, y sus propiedades son heterogéneas como resultado de los procesos geológicos que ha experimentado desde su formación hasta la actualidad. Estas características requieren una

evaluación continua durante cualquier proceso de trabajo. Es fundamental establecer la diferencia entre dos conceptos claves: la "roca intacta" (o "material rocoso") y el "macizo rocoso" (o "masa rocosa").

La roca intacta se define como el bloque de material que se encuentra entre las discontinuidades. Este concepto puede representarse mediante una muestra de mano o un segmento de testigo utilizado en ensayos de laboratorio. Por otro lado, el macizo rocoso o masa rocosa se caracteriza por su comportamiento frente a operaciones de minado, el cual está determinado por la disposición y características de las discontinuidades o rasgos estructurales presentes en su interior. (Fabián & Guerrero, 2017).

3.1.1.1. Propiedades físicas y mecánicas de la roca

Según Gonzales de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002), las propiedades físicas de las rocas son resultado de tres factores fundamentales: su composición mineralógica, su estructura interna o fábrica, y su historia geológica. Esta última incluye los procesos de deformación que ha experimentado la roca, así como los cambios ambientales, de alteraciones y meteorización que ha sufrido a lo largo del tiempo. La diversidad de estas propiedades físicas se manifiesta en las diferentes formas en que las rocas responden a las fuerzas aplicadas sobre ellas, lo cual se puede medir a través de dos parámetros principales: su resistencia y su modelo de deformación.

Es precisamente este conjunto de propiedades físicas el que determina cómo se comportará mecánicamente la roca. Para obtener valores precisos de estas propiedades,

se emplean metodologías específicamente diseñadas y se realizan diversos ensayos en laboratorio, permitiendo así una caracterización cuantitativa del material rocoso.

Tabla 1

Propiedades físicas y mecánicas de la matriz rocosa y métodos para su determinación

	Propiedades	Métodos de determinación
Propiedades de identificación y clasificación	Composición mineralógica. Fíbrica y textura. Tamaño de grano Color.	Descripción visual. Microscopía óptica y electrónica. Difracción de rayos X.
	Porosidad (n).	Técnicas de laboratorio.
	Peso específico (γ).	
	Contenido en humedad.	
	Permeabilidad (coeficiente de permeabilidad, k).	Ensayo de permeabilidad.
	Durabilidad. Alterabilidad (índice de alterabilidad).	Ensayos de alterabilidad.
Propiedades mecánicas	Resistencia a la compresión simple (σ_c).	Ensayo de compresión uniaxial. Ensayo de carga puntual. Martillo Schmidt.
	Resistencia a la tracción (σ_T),	Ensayo de tracción directa. Ensayo de tracción indirecta.
	Velocidad de ondas sínicas (V_p, V_c)	Medida de velocidad de ondas elásticas en laboratorio.
	Resistencia (parámetros c y φ).	Ensayo de compresión triaxial.
	Deformabilidad (módulos de deformación elástica estáticos o dinámicos: E, ν).	Ensayo de compresión uniaxial. Ensayo de velocidad sínica.

Fuente: Gonzales de Vallejo et al. (2002).

3.1.2. Propiedades mecánicas

3.1.2.1. Resistencia a la compresión simple

Según Gonzales y colaboradores (2002), la resistencia a compresión simple representa el esfuerzo máximo que una roca puede soportar cuando se le aplica una carga uniaxial. Este parámetro se evalúa mediante pruebas de laboratorio utilizando una probeta cilíndrica sin restricciones en el laboratorio y se calcula mediante una fórmula específica.

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} = \frac{\text{Fuerza compresiva aplicada}}{\text{Area de aplicacion}}$$

La importancia de determinar la resistencia a compresión radica en que proporciona información crucial sobre las características ingenieriles de diferentes tipos de rocas. Existen diversos métodos sencillos para su medición en campo, como el ensayo de carga puntual (PLT) y el uso del martillo Schmidt. Estos métodos permiten clasificar las rocas según su nivel de resistencia, proporcionando datos relevantes para aplicaciones geotécnicas y de ingeniería.

Los valores de resistencia a compresión simple varían significativamente dependiendo del tipo de roca, lo que se puede evidenciar en tablas comparativas que muestran las diferencias entre distintas formaciones geológicas.

Tabla 2*Valores de resistencia de la matriz rocosa sana*

Roca	Peso específico (g/cm³)	Porosidad (%)
Andesita	2,2-2,35	10-15
Anfibolita	2,9-3,0	-
Arenisca	2,3-2,6	5,25 (16,0)
Basalto	2,7-2,9	0,1-2
Caliza	2,3-2,6	5-20 (11,0)
Carbón	1,0-2,0	10
Cuarcita	2,6-2,7	0,1-0,5
Creta	1,7-2,3	30
Diabasa	2,9	0,1
Diorita	2,7-2,85	-
Dolomía	2,5-2,6	0,5-10
Esquisto	2,5-2,8	3
Grabo	3,0-3,1	0,1-0,2
Gneiss	2,7-3,0	0,5-1,5
Granito	2,6-2,7	0,5-1,5 (0,9)
Grauvaca	2,8	3
Mármol	2,6-2,8	0,3-2 (0,6)
Lutita	2,2-2,6	2-15
Pizarra	2,5-2,7	0,1-1
Riolita	2,4-2,6	4-6
Sal	2,1-2,2	5
Toba	1,9-2,3	14-40
Yeso	2,3	5

Entre paréntesis, algunos valores medios de porosidad eficaz. Datos seleccionados a partir de Goodman (1989), Rahn (1986), Walthan (1999), Farmer (1968),

Fuente: Gonzales de Vallejo et al. (2002).

3.1.2.2. Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción es la máxima tensión que un material puede soportar antes de romperse bajo fuerzas de tracción. Este valor se determina en el laboratorio aplicando fuerzas traccionales a una probeta cilíndrica de roca.

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A} = \frac{\text{Fuerza de traccion aplicada}}{\text{Area - seccion de la probeta}}$$

Según Duncan como se citó en (Gonzales de Vallejo, 2002), señala que el valor de σ_t de la matriz rocosa oscila del 5 y el 10 % de su resistencia a compresión simple, sin embargo, para algunas rocas sedimentarias, este valor oscilaría entre el 14 al 16 %.

3.1.2.3. Resistencia (parámetros de c y ϕ)

La determinación de los parámetros de resistencia (cohesión y ángulo de fricción) se realiza principalmente mediante el ensayo de compresión triaxial. Este ensayo es particularmente valioso porque simula las condiciones reales de la roca in situ, donde está sometida a esfuerzos confinantes, mediante la aplicación de una presión hidráulica uniforme alrededor de la muestra. A través de este ensayo, se puede obtener la envolvente o línea de resistencia del material rocoso, que permite calcular los valores específicos de cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ). Es importante notar que la fuerza friccional está directamente relacionada con el ángulo de fricción y el esfuerzo normal que actúa sobre el plano analizado.

Es fundamental comprender que la resistencia de la roca no es un valor constante o único. Además de los parámetros de cohesión y fricción, esta propiedad está influenciada por diversos factores como:

- La magnitud de los esfuerzos financieros
- La presencia de agua en los poros

- La velocidad con que se aplica la carga de rotura
- El grado de cementación
- Las variaciones en la composición mineralógica.

Incluso en rocas que parecen ser homogéneas e isotrópicas, los valores de cohesión y fricción pueden variar debido a estos factores. Estos parámetros se determinan específicamente mediante ensayos de compresión triaxial en laboratorio, que permiten establecer valores característicos para la matriz rocosa.

Tabla 3

Valores típicos de c y ϕ para roca sana

Roca sana	Velocidad de propagación de las ondas V_p (m/s)
Arenisca	1.400-4.200
Basalto	4.500-6.500
Caliza	2.500-6.000
Conglomerado	2.500-5.000
Cuarcita	5.000-6.500
Diabasa	5.500-7.000
Dolerita	4.500-6.500
Dolomía	5.000-6.000
Gabro	4.500-6.500
Gneiss	3.100-5.500
Granito sano	4.500-6.000
Lutita	1.400-3.000
Marga	1.800-3.200
Mármol	3.500-6.000
Pizarra	3.500-5.000
Sal	4.500-6.000
Yeso	3.000-4.000

Fuente: Gonzales de Vallejo et al. (2002).

3.1.2.4. Parámetros dinámicos del Macizo Rocoso

Cuando se aplica una fuerza sobre el macizo rocoso, se genera una deformación cuya magnitud depende de las propiedades de dicha roca. Una fuerza

de gran intensidad provoca una deformación considerable en un material dado. La deformación es proporcional a la fuerza aplicada y puede ser elástica o plástica.

Se dice que la deformación es elástica si inicialmente se producen cambios en las propiedades del macizo rocoso, pero al dejar de aplicar la fuerza, el material recupera sus propiedades originales. En cambio, es plástica si con el tiempo la deformación del material es irreversible y tiende a la ruptura.

Para entender el proceso de deformación elástica, hay que comprender las magnitudes elásticas establecidas por las leyes de la física:

- a. **Módulo de Young:** relaciona esfuerzo y deformación en la dirección de la fuerza aplicada. Fue desarrollado por el británico Thomas Young en 1810, basándose en la ley de Hooke. Young, indicó que el esfuerzo es proporcional a la deformación, buscando relacionar numéricamente dicho esfuerzo y deformación en los materiales. Esto lo llevó a elaborar la siguiente fórmula:

$$E = \frac{F/A}{\Delta L/\Delta L_0}$$

Donde:

E = Módulo de Young o constante de proporcionalidad

F = Fuerza aplicada sobre la muestra

A = Área donde se aplica la Fuerza

ΔL = Variación de la longitud

L_0 = Longitud inicial

Valores altos de E implican que el material es muy resistente, ya que ante un determinado esfuerzo sufre poca deformación. Por el contrario, valores bajos de E señalan que el material es débil y se deforma considerablemente ante un esfuerzo dado.

b. Módulo de Poisson: relaciona la deformación transversal con la deformación longitudinal. Fue desarrollado por el francés Siméon Poisson en 1831, considerando los principios de Young, pero basándose solo en la deformación mas no en el esfuerzo. A la deformación longitudinal establecida por Young le añadió la deformación transversal del material, mediante la fórmula:

$$v = \frac{\Delta W / W_0}{\Delta L / L_0}$$

Donde:

v = Módulo o ratio de Poisson

ΔW = Variación de la deformación transversal

W = Deformación transversal inicial

ΔL = Variación de la longitud

L_0 = Longitud inicial

Si ν es cercano a 1, la deformación transversal será casi igual a la longitudinal en el material. Si $\nu = 0.5$, la deformación transversal fue la mitad que la longitudinal.

- c. Módulo de Lamé:** describe la elasticidad de un material isotrópico. Fue desarrollado por el francés Gabriel Lamé en 1850. También se le conoce como módulo de corte, cizalla o rigidez. Lamé consideró un esfuerzo aplicado en un vértice del objeto, observando que la deformación ocurría solo en el lado de ese vértice, mientras que en el lado opuesto no deformado no había deformación. Esto genera una deformación por corte, con un desplazamiento angular. El esfuerzo aplicado es de corte.

$$\mu = \frac{F/A}{\tan\theta}$$

Donde:

μ = Módulo de Lamé

F = Fuerza

A = Área

θ = Ángulo de desplazamiento

Si μ es alto, el material es resistente porque ante un esfuerzo dado sufre poca deformación. Si μ es bajo, el material se deforma mucho ante un esfuerzo, siendo débil o poco resistente.

d. Módulo Volumétrico o de Incompresibilidad: mide la resistencia a los cambios de volumen de un material. También llamado Módulo Volumétrico. Considera que en un cuerpo pueden actuar esfuerzos en 3 ejes (x, y, z), existiendo deformaciones en cada eje. Se tienen en cuenta esfuerzos y deformaciones en los 3 ejes, de allí lo de volumétrico.

$$K = \frac{P}{\Delta V / V_0}$$

Donde:

K = Módulo de Incompresibilidad o Volumétrico

P = Presión

ΔV = Variación de Volumen

V_0 = Volumen Inicial

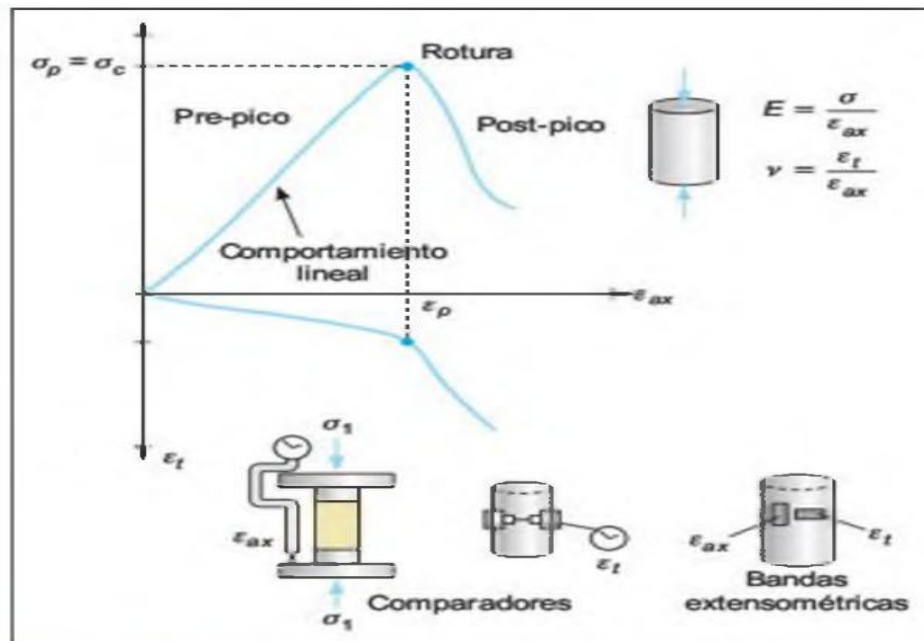
Si K es alto, ante una presión dada la deformación es leve, indicando que el objeto es resistente. Si K es bajo, la presión origina gran deformación, por tanto, el objeto es débil o poco resistente.

De acuerdo con Gonzales de Vallejo et al. (2002), la deformabilidad sería la capacidad y propiedad que tiene la roca para cambiar su forma en respuesta a fuerzas aplicadas. Esta propiedad se expresa mediante las constantes elásticas E (módulo de elasticidad) y ν (coeficiente de Poisson), y se determina a través del ensayo de compresión simple.

$$E = \sigma / \varepsilon_{ax} \text{ (Unidades de esfuerzo)}; \nu = \varepsilon_t / \varepsilon_{ax} \text{ (Adimensional)}$$

Figura 4.

Curvas esfuerzo deformación $\sigma - \varepsilon_{ax}$ y $\varepsilon_{ax} - \varepsilon_t$; obtenidas del ensayo de compresión simple



Fuente: Gonzales de Vallejo et al. (2002).

- **El Módulo de Young (E):** Representa un parámetro fundamental que establece la relación lineal elástica entre el esfuerzo aplicado y la deformación generada en la dirección de aplicación del esfuerzo.
- **Coefficiente de Poisson (ν):** Describe la proporción entre la deformación transversal y axial de un material rocoso.

Estas constantes, obtenidas mediante ensayos de compresión simple, permiten caracterizar el comportamiento elástico "estático" de las rocas. Se observa una clara diferencia entre rocas duras y frágiles, que presentan un módulo de Young más elevado y un coeficiente de Poisson más reducido, en comparación con rocas blandas y dúctiles.

En la práctica, las rocas no exhiben un comportamiento elástico completamente lineal, lo que provoca variaciones significativas en los valores de estos parámetros. En un material elástico, isótropo y homogéneo sometido a carga axial, el volumen permanecería constante a pesar de las deformaciones experimentadas.

Adicionalmente, estos parámetros pueden determinarse mediante el análisis de velocidades de ondas elásticas V_p y V_s , siendo el módulo de Young dinámico generalmente superior al estático. La variabilidad de estos valores es considerable, influenciada por factores como la porosidad, la estructura mineral, el grado de cementación y las características anisotrópicas de las rocas.

Para la mayoría de las formaciones rocosas, el coeficiente de Poisson oscila típicamente entre 0.25 y 0.33, aunque pueden presentarse variaciones significativas dependiendo de las características específicas de cada tipo de roca.

Tabla 4*Constantes elásticas de las rocas (Ingeniería geológica - Gonzales de vallejo 2002*

Roca	Cohesión c (kp/cm²)	Ángulo de fricción básico φ_b (grados)
Andesita	280	45
Arenisca	80-350	30-50
Basalto	200-600	48-55
Caliza	50-400	35-50
Caliza margosa	10-60	30
Cuarcita	250-700	40-55
Diabasa	900-1.200	40-50
Diorita	150	50-55
Dolomía	220-600	25-35
Esquisto	250	25-30*
	20-150*	20-30*
Gabro	300	35
Gneiss	150-400	30-40
Granito	150-500	45-58
Grauvaca	60-100	45-50
Mármol	150-350	35-45
Lutita	30-350	40-60
		15-25*
Pizarra	100-500	40-55
	<100*	15-30*
Toba	7	-
Yeso	-	30

(*) En superficies de laminación o esquistosidad. Datos seleccionados a partir de Walthan (1999), Rahn (1986), Goodman (1989), Farmer (1968), Jiménez Salas y Justo Alpañés (1975).

Fuente: Gonzales de Vallejo et al. (2002).

3.1.3. Clasificación Geomecánica

La clasificación geomecánica constituye un método fundamental para evaluar las características de los medios rocosos con propósitos ingenieriles. Su objetivo principal radica en obtener parámetros que permitan comprender el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos, los cuales son sistemas complejos y discontinuos.

Estas clasificaciones surgen como una herramienta de análisis que, mediante observación directa y sencillos ensayos, permite categorizar las rocas según su aptitud para diferentes aplicaciones. Proporcionan índices de calidad que se relacionan directamente con las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, resultando especialmente útiles para aspectos como diseño de sostenimientos de túneles, estabilidad de taludes y evaluación de excavabilidad. (Díaz y otros, 2019)

Los elementos considerados en la clasificación geomecánica abarcan un amplio espectro de características físicas y estructurales, incluyendo:

- La resistencia intrínseca del material rocoso
- El índice de RQD (Rock Quality Designation)
- La distribución espacial de las discontinuidades
- La orientación de dichas discontinuidades
- Las condiciones de las superficies de discontinuidad
- La estructura geológica y presencia de fallas
- Las condiciones hidrogeológicas
- El estado tensional del macizo rocoso

Entre las clasificaciones geomecánicas más reconocidas y utilizadas en la actualidad se encuentran la clasificación RMR y la clasificación Q. Cada una tiene aplicaciones específicas: la RMR se emplea tanto para caracterizar macizos rocosos como para proyectos de túneles, mientras que la clasificación Q se utiliza casi exclusivamente en el diseño y análisis de túneles. (Díaz y otros, 2019)

3.1.3.1. Clasificación RMR

Bieniawski (1973) introdujo un sistema de clasificación de macizos rocosos denominado índice RMR (“Rock Mass Rating”). En 1989, Bieniawski revisó y estableció la forma actual del sistema. El índice numérico RMR básico del macizo rocoso es independiente de la estructura a construir y se calcula sumando cinco parámetros:

Tabla 5*Clasificación de Bieniawski (RMR, 1989)*

PARÁMETROS	INTERVALO DE VALORES						
Resistencia a la compresión simple de la roca	> 250 MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	25 – 50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 Mpa
Valoración	15	12	7	4	2	1	0
RQD	90 – 100 %	75 – 90 %	50 – 75 %	25 – 50 %	< 25 %		
Valoración	20	17	13	8	3		
Separación entre las juntas	> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
Valoración	20	15	10	8	5		
Condición de las juntas	Muy rugosas, no continuas, cerradas, bordes sanos y duros.	Algo rugosas, separación < 1 mm bordes algo meteorizados (duros).	Algo rugosas, separación < 1 mm bordes muy meteoriza dos (blandos)	Espejos de falla o relleno < 5 mm o separación 1-5 mm. Continuas.	Relleno blando > 5 mm o separación > 5 mm. Continuas.		
Valoración	30	25	20	10	0		
Flujo de agua en las juntas	Secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Fluyendo		
Filtración en							
Razón de presiones intersticiales	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	0.5		
Valoración	15	10	7	4	0		

Fuente: Bieniawski (1989)

El proceso de evaluación del RMR (Rock Mass Rating) requiere un ajuste adicional que considera la orientación de las discontinuidades en relación con la dirección de la excavación proyectada. Este factor de corrección se determina cualitativamente y varía según el tipo de obra de ingeniería, específicamente para túneles, cimentaciones o taludes. A continuación, se muestran los factores de ajuste para el caso de túneles:

Tabla 6

Factores de ajuste (Bieniawski, 1979, 1989)

Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento de 0° a 20° en cualquier dirección
Avance con buzamiento		Avance contra buzamiento				
Buzamiento de 45° a 90°	Buzamiento de 20° a 45°	Buzamiento de 45° a 90°	Buzamiento de 20° a 45°	Buzamiento de 45° a 90°	Buzamiento de 20° a 45°	
Muy Favorable	Favorable	Acceptable	Desfavorable	Muy Desfavorable	Acceptable	Desfavorable
0	-2	-5	-10	-12	-5	-10

Fuente: Bieniawski (1989)

El índice final de RMR se obtiene restando este factor de ajuste al valor inicial, resultando en una puntuación que puede oscilar entre 0 y 100. Mediante esta valoración, los macizos rocosos se clasifican en cinco categorías distintas, cada una con características específicas.

Tabla 7

Clases de macizo rocoso según el valor del RMR ajustado

RMR	100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	20 – 0
Clase	I	II	III	IV	V
Descripción	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala

Fuente: Bieniawski (1989)

La clasificación original de Bieniawski proporciona para cada clase parámetros cuantitativos fundamentales:

1. Parámetros de estabilidad túnel:

- Tiempo de estabilidad
- Longitud libre de soporte
- Estos conceptos se basan en los principios del Nuevo Método Austriaco de Tunelería.

2. Parámetros geomecánicos:

- Intervalo de valores de cohesión de la masa rocosa
- Intervalo de valores del ángulo de fricción interno de la masa rocosa

Tabla 8*“Significado” de las clases de roca*

CLASE	I	II	III	IV	V
Tiempo de sostenimiento según la luz libre	20 años para 15 m	1 año para 10 m.	1 semana para 5 m.	10 horas para 2,5 m.	30 minutos para 1 m.
*Cohesión de la masa rocosa (kPa)	> 400	400-300	300-200	200-100	< 100
Rozamiento de la masa	> 45	45-35	35-25	25-15	< 15

* Estos valores solo son aplicables a deslizamientos en macizos saturados.

Fuente: Bieniawski (1989)

3.1.3.2. Clasificación Q

El Sistema Q representa un método empírico desarrollado originalmente por Barton, Lien y Lunde (1974) para el Instituto Geotécnico de Noruega (IGN). Posteriormente fue perfeccionado por Grimstad, Barton y Loset en 1993, fundamentándose en un extenso análisis de una base de datos que comprende más de 1000 ejemplos de túneles y cavernas.

Esta metodología posee una versatilidad significativa, siendo aplicable tanto durante la etapa de construcción como herramienta predictiva. Su objetivo principal radica en evaluar la calidad del macizo rocoso mediante un mapeo geotécnico de testigos, considerando múltiples factores interrelacionados.

El Sistema Q se estructura mediante una ecuación que integra seis parámetros fundamentales:

$$RQD = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Donde:

RQD: índice de calidad de la roca.

J_n: índice del número de familias de fracturas.

J_r: índice de rugosidades en las fracturas.

J_a: índice de alteración de las paredes de las fracturas.

J_w: índice del caudal afluyente.

SRF: factor de reducción por esfuerzos.

Cada uno de estos factores contribuye a una evaluación integral y compleja de las características geomecánicas del macizo rocoso, permitiendo una clasificación detallada y fundamentada en parámetros empíricos y observacionales.

El método destaca por su capacidad para proporcionar una estimación cuantitativa de la calidad rocosa, considerando aspectos estructurales, hidrogeológicos y mecánicos que influyen en el comportamiento geotécnico del medio.

A continuación, se definen los factores que intervienen en la clasificación:

Tabla 9*Índice de calidad de roca.*

Índice de calidad de roca	RQD	Observaciones
A.- Muy mala	0 – 25	1.- Cuando RQD 10, incluyendo cero; se puede utilizar el valor 10 para el RQD. 2.- Intervalos de 5 para RQD, o sea 100, 95, 90 son precisos.
B.- Mala	25 – 50	
C.- Regular	50 – 75	
D.- Buena	75 – 90	
E.- Excelente	90 – 100	

*Fuente: Barton, N., Lien, R., and Lunde, J. (1974)***Tabla 10***Índice del número de familias de fracturas.*

Número de Familias	<u>Jn</u>	Observaciones
A.- Masivo, sin o con pocas juntas	0.5 – 1	1.- Para cruces en túneles utilizar (3 x <u>Jn</u>) 2.- Para Portales utilizar (2 x <u>Jn</u>)
B.- Una familia de juntas	2	
C.- Una familia y algunas juntas ocasionales	3	
D.- Dos familias de juntas	4	
E.- Dos familias y algunas juntas	6	
F.- Tres familias de juntas	9	
G.- Tres familias y algunas juntas	12	
H.- Cuatro familias o más, roca muy fracturada, Terrones de azúcar	15	
I.- Roca triturada terrosa	20	

Fuente: Barton, N., Lien, R., and Lunde, J. (1974)

Tabla 11*Índice del caudal afluyente*

Factor de reducción por presencia de agua en las juntas	Jw	Presión agua Kg/cm²	Observaciones
A.- Excavaciones secas o de fluencia poco importante, menos de 5l/min. Localmente.	1	< 1	1.- Los factores de C a E, son estimaciones aproximadas aumenta Jw si se instalan drenes. 2.- Los problemas especiales causados por la presencia de hielo no se toman en consideración.
B.- Fluencia o presión media, ocasional lavado de los rellenos de las juntas.	0.66	1 – 2.5	
C.- Fluencia grande o presión alta, considerable lavado de los rellenos de las juntas.	0.33	2.5 – 10	
D.- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas con las voladuras disminuyendo con el tiempo.	0.1 – 0.2	> 10	
E.- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas y continuas, sin disminución.	0.05 – 0.1	> 10	

Tabla 12*Índice de alteración de las partes de las fracturas*

Número de alteración de las juntas	Ja	φ_r (aprox.)	Observación
- Contacto entre las dos caras de la junta.			1.- Los valores de φ_r el ángulo de fricción residual, se indican como guía aproximada de las propiedades mineralógicas de los productos de la alteración si es
A.- Junta sellada, dura, sin reblandamiento relleno impermeable, ej. Cuarzo	0.75		
B.- Caras de la junta únicamente manchadas.	1	25° - 35°	
C.- Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no reblandecibles, partículas de	2	25° - 30°	

arena, roca desintegrada libre de arcilla.			que están presentes.
D.- Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fracción arcillosa no reblandecible.	3	20° - 25°	
E.- Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja fricción, ej. Caolinita, mica, clorita, talco, y pequeñas cantidades y de arcillas expansivas, los recubrimientos son discontinuos con espesores de 1 ó 2 mm.	4	8° - 16°	
- Contacto entre las dos caras de la junta con menos de 10 cm de desplazamiento lateral.			
F.- Partículas de arena, roca desintegrada, libre de arcilla.	4	25° - 30°	
G.- Fuertemente sobreconsolidados, rellenos de minerales arcillosos no reblandecidos. Los recubrimientos son continuos menores de 5 mm de espesor.	6	16° - 24°	
H.- Sobreconsolidación media a baja, reblandecimiento, relleno de mineral arcilloso. Los recubrimientos son continuos menores de 5 mm de espesor.	8	8° - 16°	
I.- Relleno de arcillas expansivas ej. Montmorillonita, de espesor continuo de 5 mm. El Valor Ja depende del porcentaje de partículas del tamaño de la arcilla expansiva.	8 - 12	6° - 12°	

- No existe contacto entre las dos caras de la junta cuando esta es cizallada.			
J.- Zonas o bandas de roca desintegrada o machacada y arcilla.	6 – 8 ó 8 – 12	6° - 24°	
K.- Zonas blandas de arcilla limosa o arenosa con pequeña fracción de arcilla sin reblandamiento.	5	6° - 24°	
L.- Zonas o capas gruesas de arcilla	10 – 13 13 – 20	6° - 24°	

Fuente: Barton, N., Lien, R., and Lunde, J. (1974)

Tabla 13.

Índice de rugosidad en las fracturas

Número de rugosidad de las juntas	Jr	Observaciones
- Contacto entre las dos caras de la junta - Contacto entre las dos caras de la junta mediante un desplazamiento lateral 10 cm		1.- Se añade 1.0 si el esparcimiento medio juntas es mayor de 3 m. 2.- Jr=0.5 se puede usar para juntas de fricción plana y que tengan alineaciones orientadas para resistencia mínima.
A.- Juntas discontinuas	4	
B.- Junta rugosa o irregular ondulada	3	
C.- Suave ondulada	2	
D.- Espejo de falla, ondulada	1.5	
E.- Rugosa o irregulares plana	1.5	
F.- Suave plana	1.0	
G.- Espejo de falla o superficie de fricción plana	0.5	
- Sin contacto entre las dos caras de la Junta desplazados lateralmente		
H.- Zona que contiene minerales arcillosos de espesor suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las dos caras.	1	
I.- Zona arenosa de grava o roca triturada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las dos caras de la junta.	1	

Fuente: Barton, N., Lien, R., and Lunde, J (1974)

Tabla 14*Factor de reducción de esfuerzos*

Factor de Reducción de esfuerzos	dc/d1	dt/d1	SRF	Observaciones
- Roca Competente, problemas de esfuerzos				1.- Hay pocos casos reportados donde el techo debajo de la superficie sea menor que el ancho del claro. Se sugiere que el SRF sea aumentado de 2.5 a 5 para estos casos, ver H.
A.- Esfuerzo bajo, cerca de la superficie.	> 200	> 13	2.5	
B.- Esfuerzo medio.	200 – 10	13 – 0.66	1.0	
C.- Esfuerzo grande, estructura muy cerrada (generalmente favorable para la estabilidad). Puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales.	10 – 5	0.66 – 0.33	0.5 – 2	
D.- Desprendimiento moderado de la roca masiva.	5 – 2.5	0.33 – 0.16	0.5 – 10	
E.- Desprendimiento intenso de la roca masiva.	< 2.5	< 0.16	10 – 20	
- Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostáticas.				
F.- Presión de flujo moderado.			5 – 10	
G.- Presión de Flujo intenso.			10 – 20	
- Roca expansiva, actividad, química expansiva dependiendo de la presencia de agua.				
H.- Presión de expansión Moderado.			5 – 10	
I.- Presión de expansión Intensa.			10 – 15	

Fuente: Barton, N., Lien, R., and Lunde, J. (1974)

3.1.4. Perforación del macizo rocoso y sus Parámetros de perforación

3.1.4.1. Perforación

La perforación de rocas constituye la operación inicial en el desarrollo de labores mineras, fundamentándose en un principio físico de concentración energética sobre una superficie reducida para superar la resistencia del macizo rocoso.

El proceso se sustenta en principios mecánicos de percusión y rotación, donde los efectos combinados de golpeo y fricción provocan el astillamiento y trituración de la roca. Esta acción se produce en un área equivalente al diámetro del barreno y alcanza una profundidad determinada por la longitud de la herramienta de perforación.

Entre los métodos de perforación más utilizados se encuentran los sistemas rotativos y rotopercutivos, siendo este último el método más tradicional (Franca, 2012). La perforación a rotopercutiva integra cuatro acciones fundamentales: percusión, rotación, empuje y barrido (Wang et al., 2010).

La selección del método de perforación depende directamente de la resistencia de la roca. Las características de dureza condicionan parámetros como: Velocidad de perforación, Fuerza aplicada y Torque requerido y el medio de perforación a emplear: rotación simple o rotopercusión

Generalmente, las rocas más blandas permiten mayores velocidades de perforación, mientras que las más resistentes a la compresión demandan mayor fuerza y torque para ser perforadas.

En el caso específico del presente trabajo, se empleó el método de perforación por rotopercusión.

3.1.4.1.1. Perforación a Rotopercusión. La perforación rotopercutiva emerge como un sistema clásico de perforación de barrenos, cuyo desarrollo se vincula con el avance industrial del siglo XIX. Este método de perforación resulta versátil, siendo aplicable en diversos contextos como: Obras subterráneas, Explotaciones mineras, Proyectos a cielo abierto, Construcción de túneles, Apertura de carreteras, Excavación de cavernas, entre otros.

El principio de perforación de estos equipos se basa en el impacto de una pieza de acero llamada pistón, sobre una varilla, que transfiere dicha energía al fondo del barreno a través de un elemento terminal denominado boca o bit. Este sistema resulta especialmente efectivo en terrenos caracterizados por su dureza o dureza intermedia.

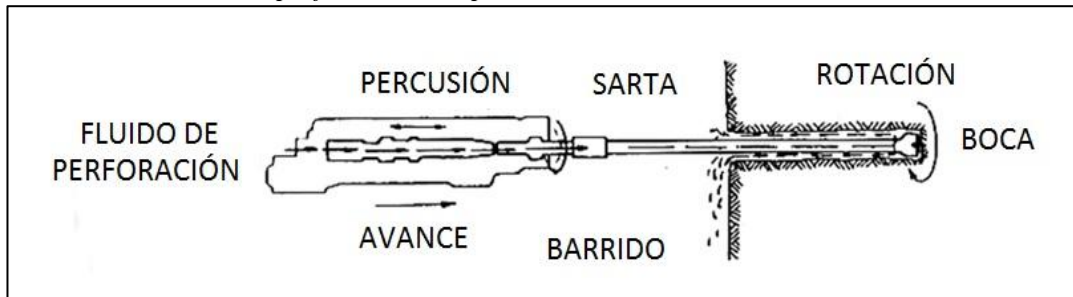
El proceso de perforación integra cuatro acciones fundamentales:

- 1. La percusión:** Generación de ondas de choque mediante los impactos del pistón, transmitidas a través del varillaje hasta la boca de perforación.

2. **La rotación:** Movimiento giratorio de la boca que permite modificar consecutivamente la zona de impacto.
3. **El empuje:** Presión constante que mantiene el contacto entre la roca y la boca de perforación
4. **El barrido:** Utilización de un fluido para extraer los detritus generados en el fondo del barreno.

Figura 5

Acciones básicas en la perforación rotopercutiva



Fuente: victoryepes.blogs.upv.es/2013/12/29/la-perforacion-a-rotopercusion

Entre las principales ventajas de la perforación rotopercutiva se destacan:

- Adaptabilidad a diferentes tipos de rocas, tanto blandas como duras.
- Flexibilidad en la selección de diámetros de perforación.
- Gran versatilidad de los equipos.
- Versatilidad de los sistemas de perforación.

3.1.4.2. Parámetros de Perforación

El registro de parámetros de perforación tiene una trayectoria histórica que se remonta a la industria petrolera en los años 60, con los primeros estudios de Somerton en 1959. Sin embargo, su aplicación en geotecnia no se desarrolló hasta

principios de los 70, con la introducción del sistema ENPASOL. Este dispositivo pionero permitía registrar parámetros como par de rotación, presión sobre la corona y velocidad de penetración, siendo utilizado principalmente en sondeos de rotación destructiva y, ocasionalmente, en sondeos de testigo continuo. (Galera & Olivenza, 2015).

Los parámetros que intervienen en el proceso de perforación pueden clasificarse en tres categorías fundamentales:

1. Parámetros del Equipo: Características de la máquina, configuración de la sarta de perforación y propiedades de la corona
2. Parámetros del Proceso de Perforación: como la presión sobre la corona, Velocidad de rotación, propiedades del fluido de perforación y velocidad de circulación del fluido. Estos parámetros son susceptibles de manipulación por parte del operario dentro de los límites del equipo.
3. Parámetros de Respuesta del Macizo Rocoso: Velocidad de penetración, Par de rotación, Presión del fluido. Estos dependen exclusivamente de las características intrínsecas del macizo rocoso para condiciones de perforaciones específicas.

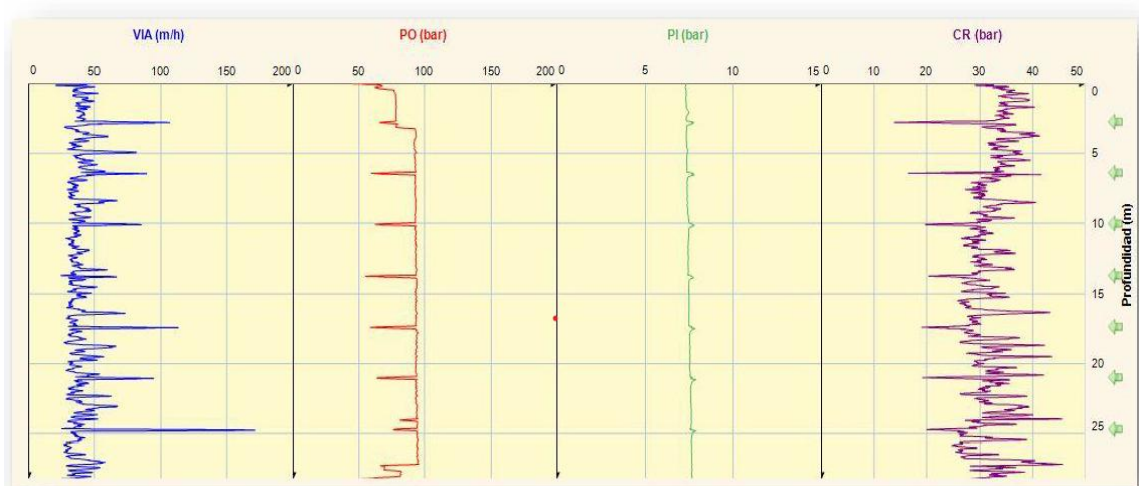
Las formas de registro de parámetros pueden ser analógicos o digitales. Los sistemas analógicos tienen capacidad limitada, permitiendo registrar únicamente cuatro parámetros con una salida gráfica impresa. En contraste, los dispositivos digitales representan una tecnología más avanzada, ofreciendo múltiples ventajas

como el registro de mayor número de parámetros, mayor precisión en las mediciones y la posibilidad de procesar los datos digitalmente para análisis matemáticos o estadísticos posteriores.

Entre los parámetros más relevantes para registrar durante un proceso de perforación se encuentran:

Específicamente, se consideran importantes cinco parámetros: presión sobre la corona, par de rotación, velocidad de rotación, velocidad de penetración y presión de fluido. Estos parámetros pueden combinarse mediante ecuaciones para correlaciones que permitan caracterizar las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, cuyo objetivo principal es obtener evaluar las características físicas, mecánicas e hidrogeológicas del medio geológico. (Figura 6).

Figura 6
Parámetros de Perforación



Fuente: Software DNA-Drill LOG

Para profundizar en el análisis de los datos obtenidos, es posible combinar los valores mediante ecuaciones más sofisticadas y complejas, las cuales permiten obtener parámetros adicionales o derivados. En este informe se procedió a trabajar con una metodología específica de cálculo que permitiría un análisis más detallado de los resultados.

- **Resistencia a la perforación (Somerton, 1959)**

El índice de Somerton fue presentado en 1959 por Wilbur H. Somerton a raíz de un estudio sobre la rotura de rocas durante la perforación rotatoria. Este índice se propuso como un "parámetro de resistencia" que podría proporcionar una buena correlación entre la velocidad de avance, la velocidad de rotación y el peso efectivo sobre la broca.

$$Sd = Wx \sqrt{\frac{N}{V}}$$

W = peso sobre la corona (presión sobre la corona – fuerza de retención + peso de la sarta de perforación y de la corona) (kN)

N = velocidad de rotación (rps)

V = velocidad de penetración instantánea (m/s).

3.2. Aspectos Teóricos Geofísicos – Sismología

La sismología es la ciencia que estudia el comportamiento de las ondas sísmicas en un medio geológico. Según la definición de la Universidad Nacional

Autónoma de México, la sismología "se ocupa del estudio de las ondas sísmicas, las características de los sismos y su distribución en el espacio y tiempo, las causas y consecuencias de los sismos". (UNAM, 2020)

La sismología, según la Universidad de los Andes de Colombia, es una disciplina geofísica especializada que estudia los sismos, la propagación de ondas sísmicas a través de la tierra y las características del subsuelo. Este campo científico comprende diversas subdisciplinas como sísmica activa, pasiva, ingeniería sísmica, sismología volcánica y sismometría, con aplicaciones que abarcan desde la exploración de recursos hasta el análisis de fenómenos geológicos complejos. (Baptiste Tary & Molina, 2022)

En resumen, la sismología se encarga de estudiar y analizar los sismos, las ondas sísmicas, las causas y consecuencias, así como la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación generada sobre el terreno durante un sismo.

3.2.1. Prospección sísmica

En la prospección sísmica, se generan perturbaciones dinámicas artificiales, habitualmente mediante explosivos, que producen ondas elásticas longitudinales y transversales. Estas ondas se registran en detectores llamados geófonos, midiendo los intervalos de tiempo entre la generación del impulso y su recepción en sensores ubicados a diferentes distancias. Este proceso permite construir una gráfica

denominada tomocrónica, que ayuda a determinar la velocidad de propagación de las ondas en el macizo rocoso.

La técnica se basa en el contraste de las propiedades elásticas de las rocas, lo que permite identificar cambios litológicos y es especialmente utilizada en geotecnia para evaluar la calidad del macizo rocoso. Mediante la generación artificial de un pequeño terremoto y el registro de los tiempos de llegada de las ondas reflejadas o refractadas en las formaciones geológicas, se obtiene una imagen aproximada de las discontinuidades sísmicas, que generalmente coinciden con las discontinuidades estratigráficas.

3.2.2. Onda Sísmica y su Propagación

Las ondas sísmicas son un tipo especial de onda mecánica que se propaga a través de medios con propiedades elásticas, específicamente la Tierra. Según López (2016), representan la propagación de perturbaciones temporales del campo de esfuerzos, generando pequeños movimientos en un medio determinado.

Estas ondas se originan por fuentes vibratorias dentro del planeta y se dispersan en múltiples direcciones, presentando características únicas que resultan fundamentales para los estudios sismológicos. Su propagación se distingue principalmente por dos aspectos cruciales: la velocidad y la naturaleza del movimiento.

En términos de **velocidad**, las ondas sísmicas se desplazan de manera diferenciada a través de la Tierra, dependiendo tanto del tipo de onda como del material que atraviesan. Las más rápidas son las ondas P (primarias) y pueden movilizarse a través de sólidos, líquidos y gases, mientras que las más lentas son las ondas S (secundarias) que únicamente se mueven en medios sólidos.

Respecto a su **naturaleza** de propagación, las ondas P son longitudinales, comprimiendo y expandiendo el material en la dirección de su movimiento. Las ondas S son transversales, sacudiendo el suelo lateralmente y en dirección perpendicular a su propagación. Las ondas de superficie presentan un movimiento combinado, pudiendo ser tanto longitudinal como transversal.

Las ondas sísmicas presentan una **capacidad** diferenciada para atravesar materiales según su tipología. Las ondas P pueden desplazarse a través de sólidos, líquidos y gases, mientras que las ondas S únicamente se mueven en medios sólidos. Esta particularidad se debe a las características específicas de propagación y a la rigidez de los diferentes materiales.

La energía de las ondas sísmicas se manifiesta a través de su amplitud y frecuencia, aspectos que determinan su potencial de impacto sobre estructuras y terreno. Las ondas más energéticas tienen la capacidad de provocar daños significativos, lo que las convierte en un fenómeno de especial interés para la investigación sísmica.

Cuando las ondas sísmicas encuentran fronteras entre materiales con propiedades diferentes, como distintas densidades o rigideces, experimentan fenómenos de reflexión y refracción. Además, estas ondas pueden interferir entre sí, y su amplitud disminuye gradualmente durante su propagación, un proceso conocido como atenuación.

Los eventos sísmicos como terremotos, erupciones volcánicas y explosiones son las principales fuentes generadoras de ondas sísmicas. Su detección y registro mediante sismógrafos permiten a los científicos estudiar y comprender estos eventos, así como desentrañar aspectos de la estructura interna terrestre.

La teoría de propagación de ondas sísmicas se fundamenta en ecuaciones de elasticidad, proporcionando un marco conceptual para entender las trayectorias y velocidades en el interior del planeta.

3.2.2.1. Clasificación de las ondas

A efectos prospectivos, las ondas se clasifican en dos grupos, ondas internas (Longitudinales y Transversales) y las ondas superficiales (Rayleigh, Love, Stanley); para fines de este trabajo nos vamos a enfocar en las ondas internas, ya que, con ellas, se ha trabajado, las mismas que son descritas a continuación:

3.2.2.1.1. Ondas internas. Las ondas internas, también denominadas ondas centrales o de cuerpo, se caracterizan por propagarse al interior de medios elásticos mediante ondas de compresión o cizalla. Las ondas de compresión se

desplazan más rápidamente, siendo las primeras en registrarse durante un sismo en los sismógrafos.

Las ondas internas viajan a través del interior de la tierra, siguen caminos curvos debido a la variada densidad y composición del interior de la tierra. Este efecto es similar al de refracción de ondas de luz. Las ondas de cuerpo transmiten los movimientos preliminares de un terremoto, el cual puede poseer poca fuerza destructiva. Las ondas de cuerpo son divididas en dos grupos: ondas longitudinales (P) y transversales (S).

Estas ondas viajan a través del interior terrestre siguiendo trayectorias curvas, influenciadas por la variada densidad y composición del planeta, lo que genera un efecto similar a la refracción de ondas luminosas. Las ondas de cuerpo transmiten los movimientos preliminares de un terremoto, generalmente con escasa fuerza destructiva, y se dividen en dos grupos: ondas longitudinales (P) y transversales (S).

a) Ondas Longitudinales (P)

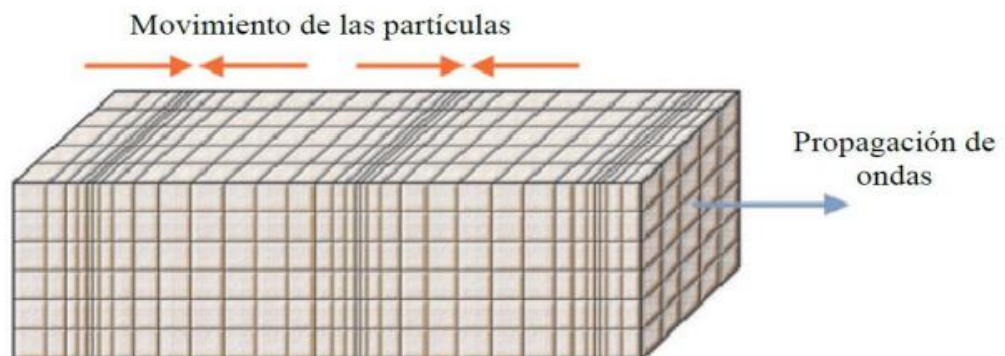
Se caracterizan por comprimir y dilatar el suelo alternadamente en su dirección de propagación. Son las ondas sísmicas más veloces, alcanzando más de 5 km/s en rocas graníticas superficiales y sobre 11 km/s en el interior terrestre. (Lopez, 2016) viajan aproximadamente 1.73 veces más rápido que las ondas S y

pueden atravesar cualquier tipo de material, con velocidades típicas de 330 m/s en el aire, 1450 m/s en agua y cerca de 5000 m/s en granito.

Por ser las primeras en llegar, en sentirse y registrarse en sismogramas, se denominan ondas Primarias o "P", término que en inglés también se asocia con "push" (empujar), describiendo su movimiento característico. (Figura 7).

Figura 7

Modelo de propagación de las ondas P



Fuente: Anderson (2003). RDT 03-006 – University of Missouri – Rolla

b) Ondas Transversales (S)

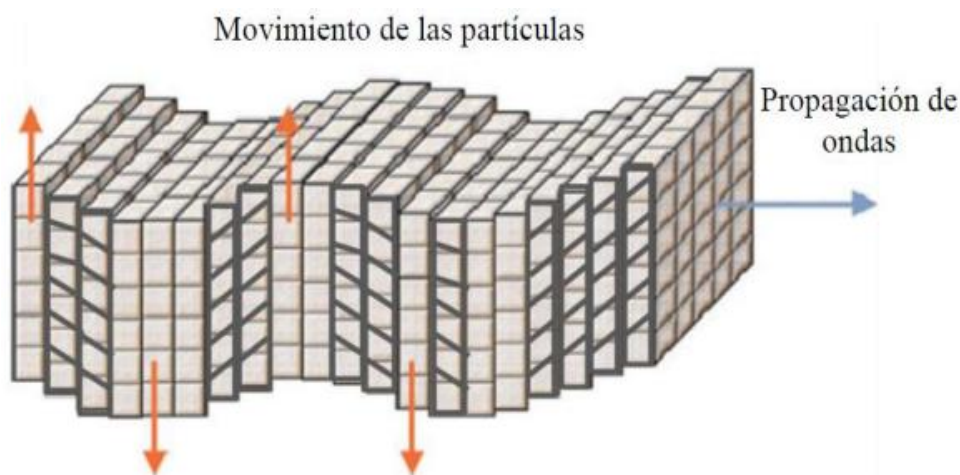
Según Nava (1998), las ondas transversales o de corte, conocidas como ondas S, se caracterizan por el desplazamiento perpendicular de las partículas del medio con respecto a su dirección de propagación. Están asociadas con deformaciones de cizalla en el terreno y son más lentas que las ondas P, con una velocidad que generalmente corresponde a la velocidad de la onda P dividida por $\sqrt{3}$, según la condición de Poisson. Estas ondas, denominadas Secundarias por ser las segundas en llegar.

Pueden desplazarse en cualquier dirección perpendicular a su propagación. En ocasiones, las ondas presentan polarización, distinguiéndose su componente vertical (SV) y horizontal (SH). Típicamente, las ondas S tienen mayor amplitud que las ondas P y se perciben más intensamente. (Figura 8).

A diferencia de las ondas P, las ondas S únicamente pueden viajar a través de medios sólidos, ya que los líquidos no soportan esfuerzos de corte. Su velocidad es aproximadamente el 58 % de la velocidad de una onda P en cualquier material sólido. Esta característica es particularmente relevante en el núcleo externo terrestre, un medio líquido que impide el paso de las ondas S.

Figura 8

Modelo de propagación de las ondas S



Fuente: Anderson et al. (2003)

3.2.2.2. Leyes de Propagación de las Ondas

Durante la propagación de las ondas sísmicas, se cumplen tres leyes fundamentales: la Ley de Snell, el Principio de Fermat y el Principio de Huygens. De estas, la Ley de Snell se enfoca específicamente en el estudio de la refracción de las ondas.

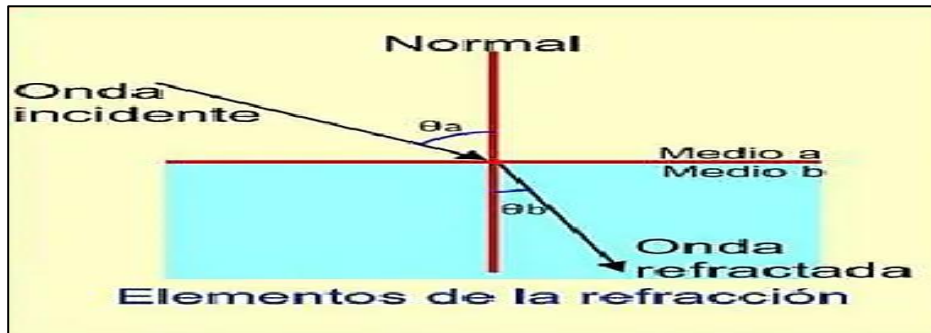
a) **Ley de Snell.** - Describe el comportamiento de una onda cuando incide en la superficie de separación entre dos medios (Figura 9). En este proceso, parte de la energía de la onda se refleja; mientras que otra parte penetra en el segundo medio. El rayo transmitido, denominado "rayo refractado", cambia de dirección formando un ángulo con la normal a la superficie, cuya relación se expresa mediante la ecuación

$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2$$

Donde n_1 y n_2 representan los índices de refracción de los medios a y b. Según esta ley, cuando el rayo pasa a un medio con menor índice de refracción, se aleja de la normal, lo que significa que el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia

Figura 9

Diagrama de un rayo de luz que se refracta en un límite entre dos medios



Fuente: Scribd-Ley de Snell

El valor que puede tomar el seno es como máximo 1, lo que implica que existe un ángulo de incidencia límite tal que para ángulos mayores la refracción no se origina:

$$n_2 \cdot \text{sen} \theta_c = n_1 \cdot \text{sen}(\pi/2)$$

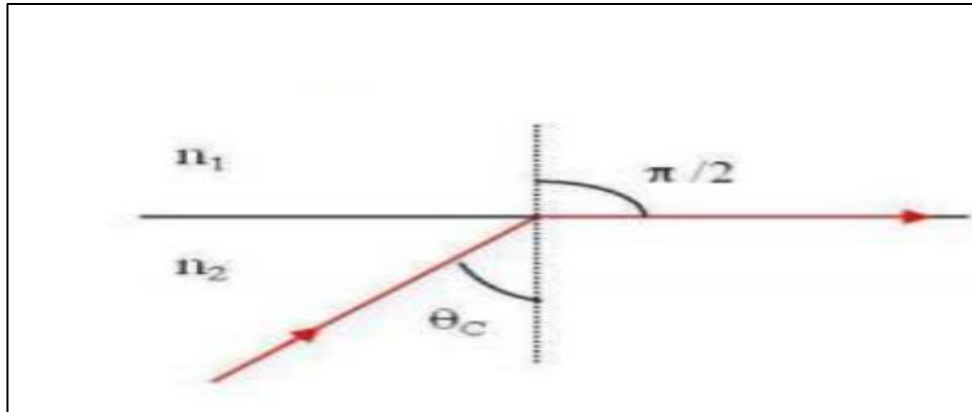
Ese ángulo de incidencia límite se denomina ángulo crítico θ_c :

$$\text{sen} \theta_c = n_2 / n_1$$

Para ángulos mayores que este ángulo crítico no existe rayo refractado, toda la energía de la onda se refleja. Este fenómeno se denomina reflexión total interna (Figura 10).

Figura 10

Diagrama de un rayo de luz que se refracta en un límite entre dos medios – ángulo crítico

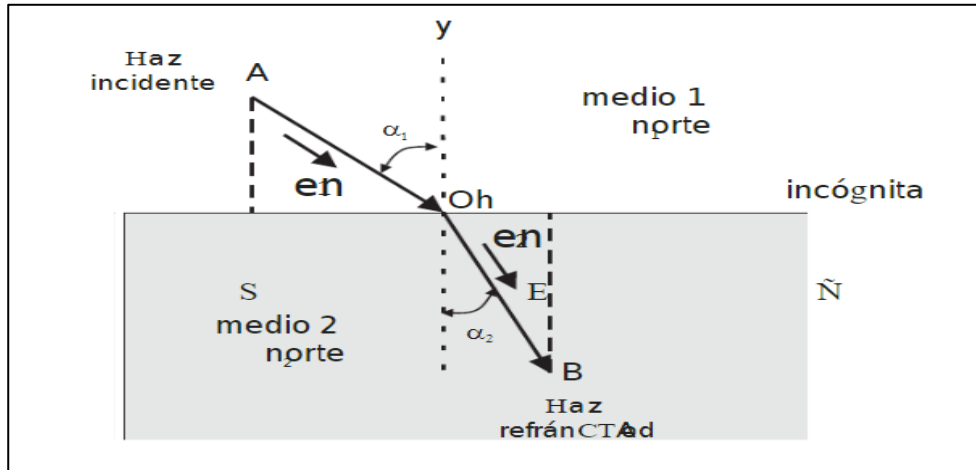


Fuente: Scribd-Ley de Snell

b) **Principio de Fermat.** – Establece que la trayectoria de los rayos de luz es aquella que requiere el menor tiempo posible para ir de un punto a otro. Esta ley puede derivarse a partir de la Ley de Snell, proporcionando una perspectiva fundamental sobre el comportamiento de las ondas luminosas, cuyo principio establece que la trayectoria de la luz es aquella en la que los rayos de luz emplean el menor tiempo posible para viajar de uno a otro punto (Figura 11).

Figura 11

Diagrama esquemático del principio de Fermat para hallar la trayectoria del menor tiempo posible



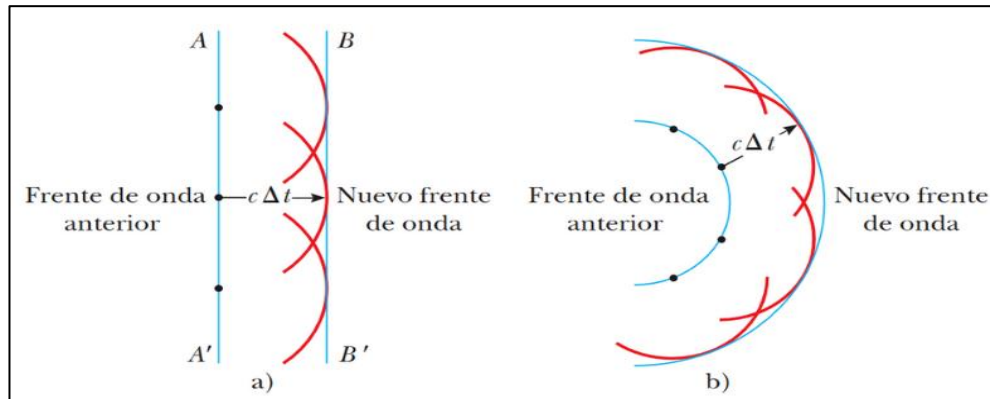
Fuente: Artículo - Argáez-Mendoza, S.; Oliva, AI

c) **Principio de Huygens.** – Ofrece una explicación detallada sobre la propagación de ondas. Cuando las partículas de un medio material son alcanzadas por una onda, cada punto se comporta como un foco emisor de ondas secundarias. El resultado global de estas emisiones simultáneas genera un nuevo frente de onda similar al anterior, permitiendo la propagación sucesiva de la onda. (Figura 12).

Este principio permite comprender fenómenos como la reflexión y la refracción.

Figura 12

Principio de Huygens – Construcción Huygens para a) una onda plana que se propaga a la derecha y b) una onda esférica que se propaga a la derecha



Fuente: Artículo - Luz.izt.uam.mx

El Principio de Huygens ilustra la propagación de un frente de onda original AA' alejándose de una fuente, representada por pequeños puntos. Para determinar la forma del frente de onda después de un tiempo t, se considera la velocidad de propagación v. En el tiempo t, la onda recorre una distancia vt, construyendo círculos de ondas secundarias esféricas con radio $r=vt$, centrados en puntos a lo largo de AA'.

La envolvente de estas ondas secundarias forma la curva BB', asumiendo que la velocidad v es constante en todos los puntos y direcciones. Esta descripción geométrica explica cómo las ondas se propagan a través del espacio.

Dos aspectos fundamentales caracterizan este principio:

- Primero, cada punto del frente de ondas se comporta como un foco de ondas secundarias que se propagan en la misma dirección de la perturbación original, manteniendo idéntica velocidad y frecuencia.
- Segundo, la superficie tangente a todas las ondas secundarias en un instante determinado constituye el siguiente frente de ondas.

3.2.2.3. Efectos del medio en la propagación de las ondas

Los movimientos ondulatorios se fundamentan en dos principios científicos esenciales: el principio de Huygens y el principio de Fermat. Según el principio de Huygens, cada punto de un frente de onda actúa como un nuevo centro generador de ondas, mientras que el principio de Fermat establece que la trayectoria de un movimiento ondulatorio entre dos puntos será aquella que requiera el menor tiempo de recorrido. Estos principios se apoyan en los conceptos de frente de onda, definido como un lugar geométrico que une puntos con idéntico estado de vibración en un momento dado, y de trayectoria, que indica la dirección de propagación del frente de ondas de manera perpendicular.

La velocidad de propagación de las ondas está directamente condicionada por las características elásticas del medio de transmisión, las cuales dependen estrechamente de su composición. En el caso específico de las rocas, factores como la variedad de minerales, su ductilidad, grado de fractura, densidad, nivel de compactación y porosidad influyen significativamente en cómo se propagan las

ondas a través de ellas. Estos parámetros determinan la velocidad y características de la propagación ondulatoria, evidenciando la estrecha relación entre las propiedades físicas del medio y el comportamiento de las ondas.

Entre los principales factores que afectan la propagación de las ondas tenemos:

- **Absorción o Atenuación Inelástica:** se produce debido a la fricción entre dos superficies cuando una onda pasa de una superficie a otra, causando la pérdida de energía de la onda.
- **Divergencia Esférica de la Onda:** La pérdida de energía ocasiona que la onda se propague en un área más reducida.
- **Dispersión:** La velocidad de la onda sísmica disminuye, afectando su capacidad de propagarse. Esta reducción en la velocidad ocurre debido a la disminución de la frecuencia de la onda.
- **División de la Onda:** La onda se divide cuando es refractada según la ley de Snell, lo cual es otro factor que impacta su trayecto.

3.2.3. Atenuación de la amplitud de las Ondas Sísmicas

La atenuación de la amplitud de las ondas sísmicas es otro efecto importante del medio en la propagación de ondas. Las ondas sísmicas son ondas mecánicas que se propagan a través del medio geológico, y su amplitud disminuye a medida que viajan a través de la Tierra. (Badi, 2011)

La atenuación de la amplitud se debe a varios factores, como la absorción de energía por el macizo rocoso y la dispersión de la energía, debido a la heterogeneidad del medio. Además, la atenuación puede variar con la frecuencia de la onda, la distancia recorrida y la profundidad del evento sísmico. La amplitud de las ondas sísmicas es principalmente atenuada por:

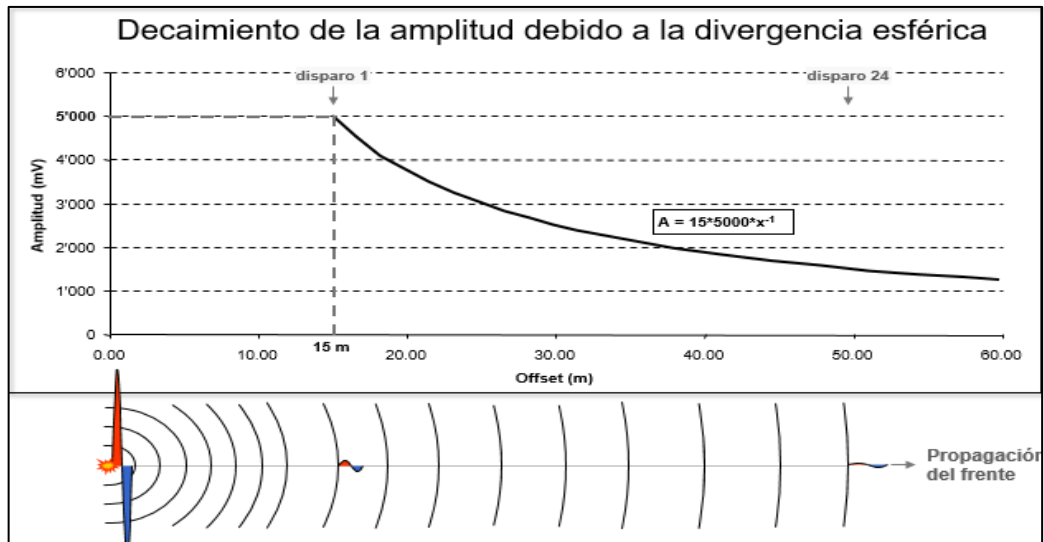
a) Divergencia esférica (expansión geométrica).

La propagación de ondas implica una disminución gradual de su intensidad energética a medida que el frente se distancia de su origen. La esencia de cualquier onda radica en la energía generada por el movimiento del medio durante su desplazamiento. Este fenómeno involucra una interacción dinámica entre energía cinética y potencial, donde las tensiones elásticas provocan oscilaciones que transforman la energía de un estado a otro, manteniendo constante su valor total.

La expansión geométrica de las ondas esféricas produce un decrecimiento energético, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde la fuente, un proceso denominado divergencia esférica. Este mecanismo explica cómo la intensidad y densidad de la onda se reducen sistemáticamente conforme se expande en el espacio, siguiendo una relación matemática precisa que describe su dispersión geométrica.

Figura 13

Decaimiento de la Amplitud debido a la divergencia Esférica



Fuente: Amberg TSP PLUS.

b) Absorción Intrínseca.

La transformación de energía elástica en calor ocurre durante el desplazamiento de la onda sísmica a través de un medio, lo que provoca una reducción en la amplitud de la onda. En el fenómeno físico real, el movimiento ondulatorio absorbe gradualmente su propia energía elástica, que reaparece como calor, a este proceso se le denomina absorción, siendo el responsable de la eventual desaparición completa del movimiento ondulatorio. La magnitud de la absorción presenta variaciones según la frecuencia de la onda. El decrecimiento de la amplitud por absorción sigue una progresión exponencial con respecto a la distancia para ondas elásticas en rocas, pudiendo expresarse matemáticamente como un decremento de amplitud relacionado con la distancia recorrida.

La absorción intrínseca representa un proceso de transformación energética donde la onda sísmica convierte gradualmente su energía elástica en calor durante su propagación por el medio. Este fenómeno provoca una disminución sistemática de la amplitud de la onda, conduciendo eventualmente a la desaparición completa del movimiento ondulatorio. La absorción es un proceso dinámico que varía según la frecuencia, presentando un decaimiento exponencial de la amplitud proporcional a la distancia recorrida.

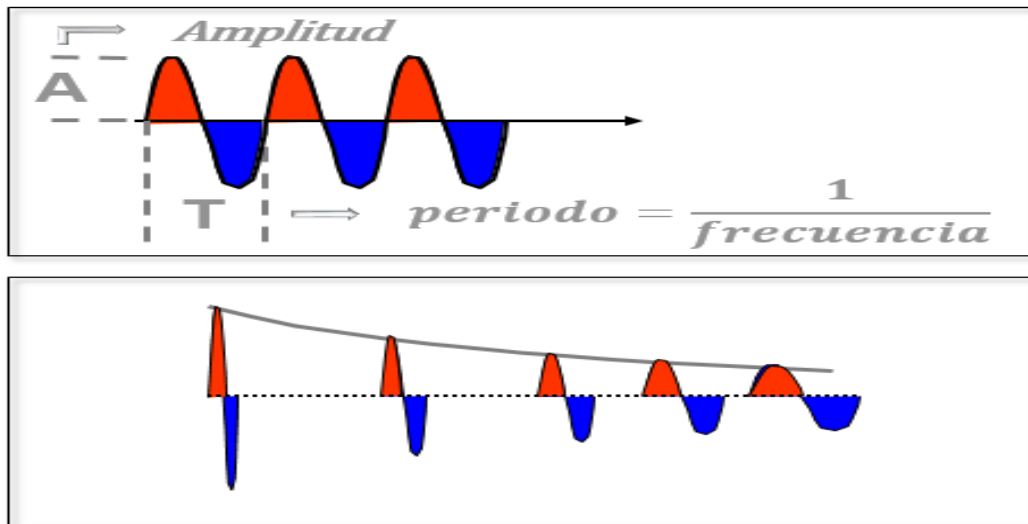
$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}, \text{ donde } \alpha = \text{coeficiente de absorción}$$

Donde A y A_0 son valores de las amplitudes del plano de frente de onda entre 2 puntos a una distancia x , y α es el coeficiente de absorción.

El comportamiento energético de las ondas muestra particularidades significativas según su frecuencia y distancia de propagación. En frecuencias bajas y trayectos cortos, predominan las pérdidas por esparcimiento, mientras que, al incrementarse la frecuencia y la distancia, la absorción se convierte en el mecanismo de atenuación energética más relevante. Las ondas a altas frecuencias experimentan transformaciones en su forma, provocando un decrecimiento energético más pronunciado que el esperado por la absorción convencional, lo que genera una atenuación dependiente de la frecuencia más compleja. (Figura 14).

Figura 14

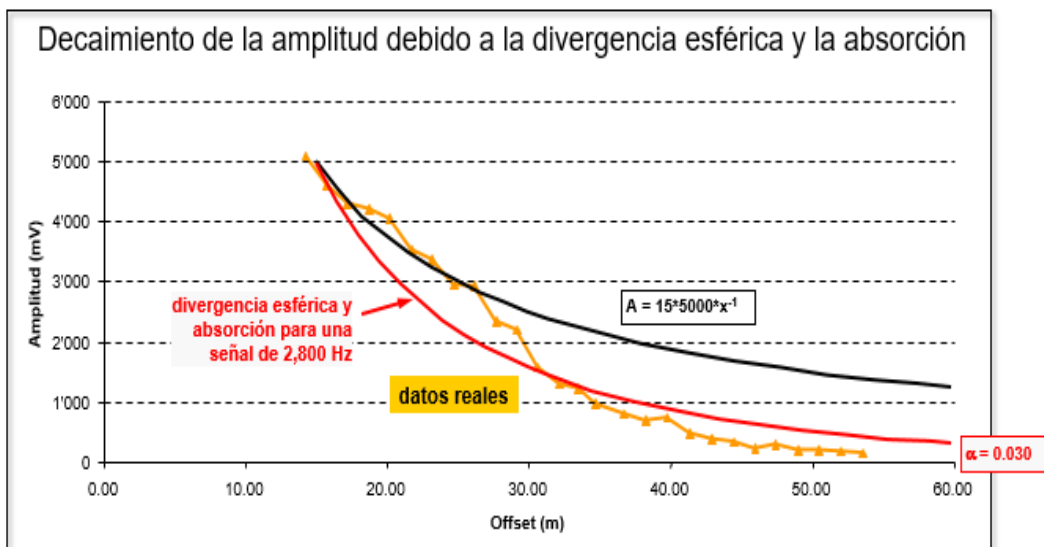
Las amplitudes decaen exponencialmente con la distancia debido a la fricción (calor)



Fuente: Amberg TSP PLUS

Figura 15

Decaimiento de la Amplitud debido a la divergencia esférica y la absorción.



Fuente: Software "Amberg TSP PLUS"

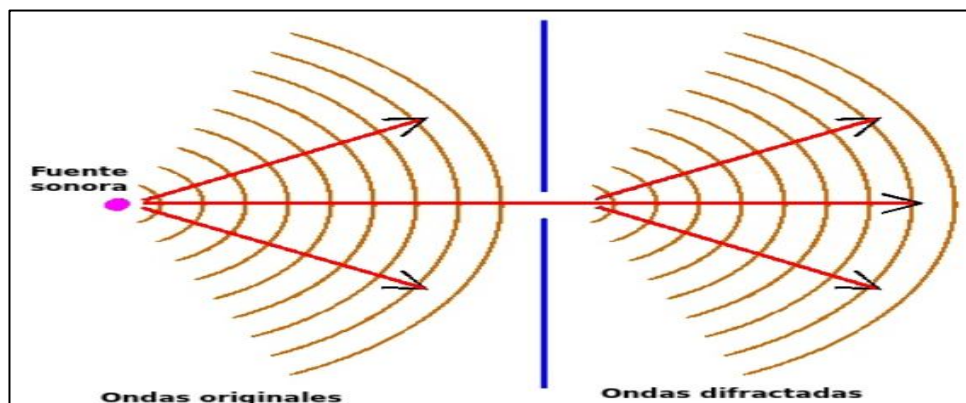
c) **Difracción en una interface debido a reflexión, refracción, conversión (Scattering).**

Cuando las ondas sísmicas se propagan en un medio no homogéneo, se observan fenómenos como la difracción, la dispersión y el scattering.

- **Difracción.** Es la propagación de un frente de onda que se produce cuando una onda encuentra un obstáculo o una abertura en su camino. El efecto se produce en los bordes del objeto o la abertura que encuentra la onda (Figura 16). La difracción puede variar mucho en función del tamaño del obstáculo. La difracción óptima ocurre cuando la anchura de la rendija es equivalente a la longitud de onda. En el caso de dos o más rendijas, además de la difracción individual, se genera un fenómeno de interferencia por la superposición de las ondas difractadas.

Figura 16

Difracción de las ondas

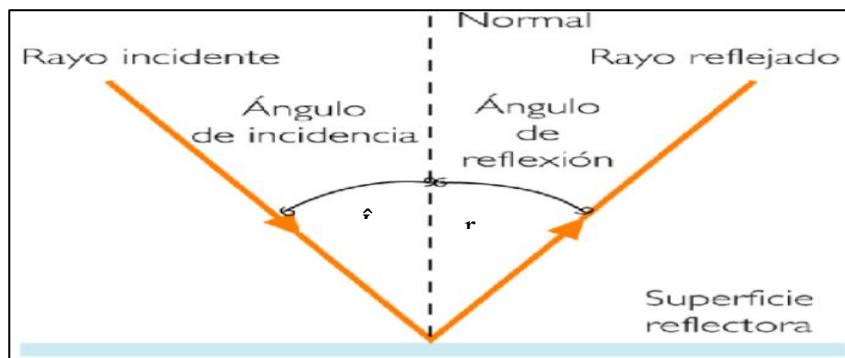


Fuente: Artículo Propiedades de las ondas- María del Pilar Cárdenas Gutiérrez

- **Reflexión.** Esto sucede cuando ocurre el cambio de dirección de la onda cuando se encuentra con un nuevo medio causando que esta sea reflejada volviendo a su medio por donde venía (Figura 17). En la reflexión, la longitud de onda y la frecuencia de las ondas reflejadas son iguales a las de las ondas incidentes.

Figura 17

Difracción Reflexión de las ondas



Fuente: Artículo Propiedades de las ondas- María del Pilar Cárdenas Gutiérrez

Las leyes de la reflexión establecen principios fundamentales sobre el comportamiento de los rayos luminosos u ondulatorios al encontrar una superficie. Según estas leyes, el rayo incidente, el rayo reflejado, la línea normal y los ángulos de incidencia y reflexión coexisten en un mismo plano, cumpliendo además la condición de que los ángulos de incidencia y reflexión son idénticos ($\hat{i} = r$).

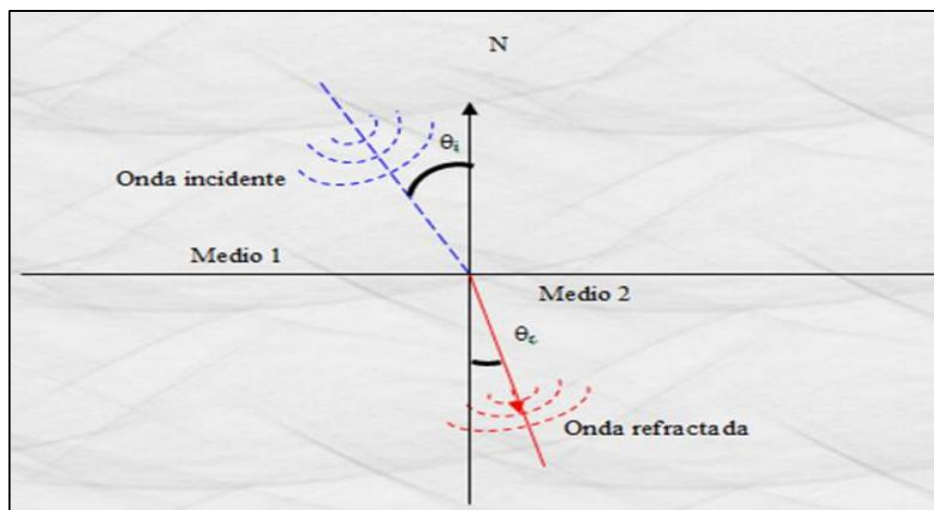
- **Refracción.** Fenómeno ondulatorio que ocurre cuando una onda cambia su dirección y velocidad al pasar de un medio a otro, caracterizándose cada medio por su propio índice de refracción. (Figura 18).

Este proceso involucra tres elementos principales: el rayo incidente, la línea normal a la superficie y el rayo refractado.

La trayectoria del rayo refractado depende de las velocidades de propagación de los medios: si la onda se desplaza más rápido en el nuevo medio, el rayo se aproxima a la normal, mientras que, si viaja más lentamente, el rayo se aleja de ella.

Figura 18

Refracción de una onda en una superficie que divide dos medios



Fuente: Artículo académico. cecyt7

La refracción se fundamenta en dos principios esenciales que describen el comportamiento de las ondas al atravesar diferentes medios.

- Primero, el rayo incidente y el rayo refractado se sitúan en un plano perpendicular a la superficie de separación en el punto de incidencia.

- Segundo, la relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción se determina mediante la ley de Snell, que establece una conexión matemática entre los ángulos formados por los rayos y las características de los medios involucrados. Cada rayo de la onda incidente y el rayo correspondiente de la onda refractada forman un plano que es perpendicular a la superficie de separación entre los medios en el punto de incidencia.

- **Scattering:** Es un fenómeno ondulatorio caracterizado por la generación de pequeñas ondas que dispersan la energía en múltiples direcciones. Ocurre cuando un frente de ondas colisiona con partículas libres u objetos diminutos en comparación con su longitud de onda. Este proceso es menos significativo en medios con frecuencias altas y puede contribuir a la generación de "ruido" en registros, produciendo una distribución energética aleatoria sobre una superficie.

La disminución de la energía sísmica, es el resultado de diversos fenómenos como scattering, reflexión y refracción, va acompañada de pérdidas por absorción que generan amortiguamiento. Durante la propagación del impulso sísmico a través de diferentes capas, las frecuencias altas se absorben más rápidamente que las bajas.

3.2.3.1. Impedancia Acústica

La impedancia acústica (Z) es una propiedad física que describe la capacidad de transmisión de ondas sonoras en un material, calculándose mediante la

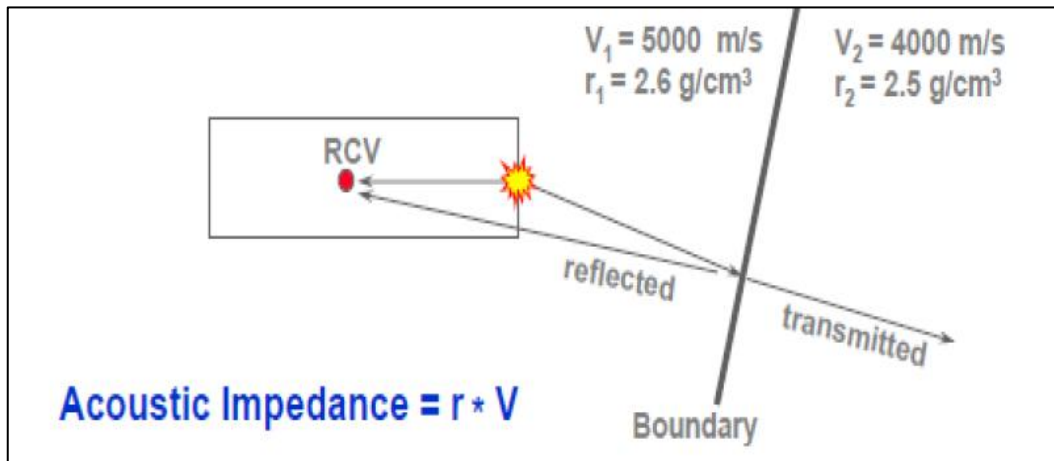
multiplicación de la velocidad de la onda sísmica por la densidad de la roca ($Z=V*\rho$).

Cuando las ondas sísmicas encuentran una interfaz con diferente impedancia acústica, parte de su energía se refracta y otra parte se refleja. Las ondas reflejadas, cuyo tiempo de tránsito se mide desde la fuente hasta los receptores, permiten reconstruir la trayectoria de las ondas mediante procesamiento sísmico.

La impedancia acústica es una propiedad importante, y puede utilizarse para distinguir entre diferentes tipos de roca e identificar la presencia de estructuras geológicas (Figura 19).

Figura 19

Esquema de la Impedancia Acústica en una Onda Sísmica cuando se ejecuta el ensayo sísmico TSP



Fuente: Software "Amberg TSP PLUS"

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1. Introducción

La metodología detallada a continuación denominada “SONDAJES MECÁNICOS EXPLORATORIOS Y EL SISTEMA DE PREDICCIÓN SÍSMICA PARA TÚNELES (TSP)” permitirá a lo largo del Túnel Restitución en el proyecto CHAVIMOCHIC III ETAPA, realizar sondeos mecánicos y geofísicos fiables, dando la seguridad debida para el reconocimiento y mitigación de un evento de riesgo geológico que pueda presentarse en la construcción del túnel.

En este proyecto se tiene como parte del programa de investigaciones geotécnicas del Túnel Restitución durante su fase ejecutiva (excavación y sostenimiento), la realización de ensayos directos e indirectos que suministren información geológica – geotécnica del macizo rocoso al atravesarlo, así como sus áreas de contorno. La información extraída de los procesos de investigación realizados, servirán como referencias principales para determinar la reacción y comportamiento del macizo rocoso ante los trabajos de excavación y posteriormente como indicador de algunos datos utilizables para establecer características geotécnicas del mismo.

4.2. Método Testigo Mecánico Exploratorio – Sistema de Predicción Sísmica Para Túneles TSP

Este tipo de método avanzado “Sondaje Mecánico Exploratorio y el Sistema de Predicción Sísmica Para Túneles TSP” permite interactuar los sondeos tanto mecánico como geofísico obteniendo informaciones geológicas más amplias y un control acorde a los requerimientos, pudiendo reaccionar de forma anticipada ante cualquier posible riesgo geológico que pueda presentarse al momento de la construcción del Túnel.

4.2.1. Sondaje Mecánico Exploratorio

Este sondaje se realiza con el apoyo del equipo “LIM 5G” y un equipo equivalente, donde nos permita medir parámetros de perforación y geomecánicos a partir de los parámetros de perforación registrados, combinando los valores obtenidos, en ecuaciones más complejas; mostrando cortes geológicos relacionados directamente a la resistencia de la roca en compresión (índice de Somerton, 1959) mientras se efectúa la perforación en tiempo real. (Fernández-Gutiérrez, 2017)

Los datos son registrados directamente en el sistema de recolección, como se muestra en la figura 20 y 21. Los cuales muestran las diferentes variaciones posibles de la perforación, de esta manera se obtiene una interpretación geomecánica de la roca perforada, relacionada directamente, como ya se ha mencionado, con la resistencia de la roca.

Figura 20

Registrador de parámetros de perforación LIM de 5ta generación



Fuente: Lim SAS_Equipo

Figura 21

Adquisición de datos durante la perforación o sonde



Fuente: Lim SAS_Equipo

Como se ha indicado anteriormente, el sistema empleado se efectúa en tiempo real, tanto en la adquisición y registro de los parámetros, por lo que nos centraremos en lo siguiente:

- a) Velocidad Instantánea de Avance (VIA)
- b) Presión sobre herramienta (PO)
- c) Presión de inyección del fluido de perforación (PI)
- d) Torque (CR)

La velocidad instantánea de avance (VIA) representa la velocidad de penetración de la barra de perforación, proporcionando información sobre la resistencia a la compresión de la formación geológica. Aunque no determina directamente la dureza del terreno, muestra una correlación significativa con el índice RMR (Rock Mass Rating), permitiendo una evaluación geomecánica preliminar (Fernández-Gutiérrez, 2017).

La presión de inyección de fluidos (PI) y la presión de rotación ofrecen información complementaria sobre las características geológicas. Mientras la PI indica las variaciones de plasticidad en las formaciones perforadas, la presión de rotación revela el esfuerzo necesario para que la broca gire en el taladro, revelando la heterogeneidad del terreno. La combinación de estos parámetros, junto con la velocidad instantánea de avance, facilita la obtención de cortes litológicos y geomecánicos, contribuyendo a la identificación de estructuras geológicas como

fallas mediante el análisis de la resistencia a la compresión (Fernández-Gutiérrez, 2017).

El tiempo de perforación es el inverso de la velocidad instantánea de avance (VIA), es aplicada en los casos de perforación lenta causada por la existencia de formaciones duras.

4.2.1.1. Equipo Utilizado

Nuestro equipo utilizado está constituido por la perforadora Rock Drill, en el cual se acopla el equipo tipo “LIM 5g” (Figura 22).

Este sistema de medida está constituido por:

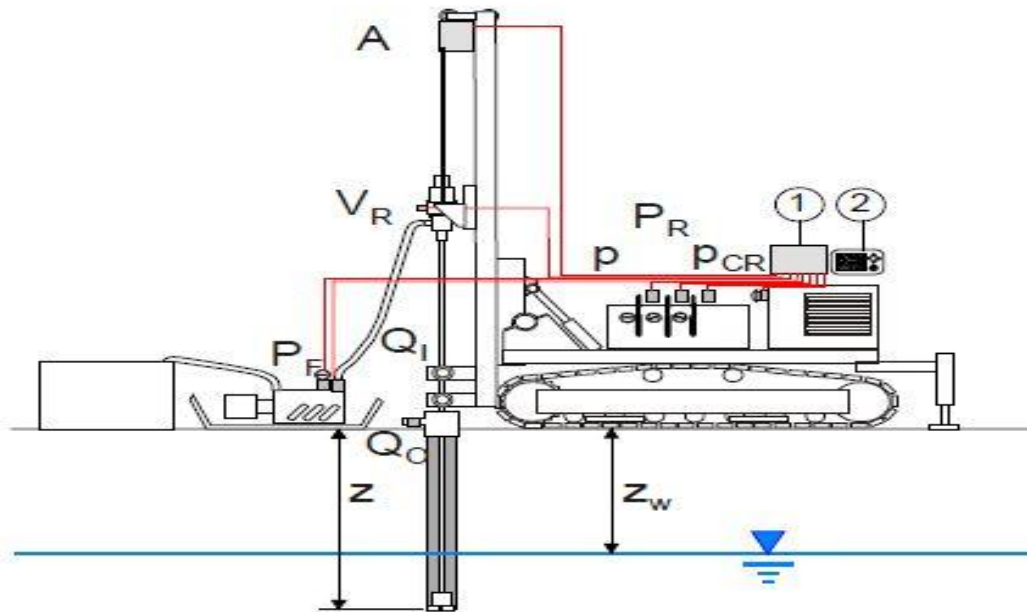
- Un registrador de parámetros (Figura 22 (1)) que contiene una interface usuaria y un dispositivo de transferencia de datos.
- Un acondicionador (Figura 22 (2)) alimentando los sensores, multiplexando las vías de medida y acondicionando las señales.
- Un conjunto de sensores dispuestos sobre el Rock Drill.

El sistema de medida posee un interruptor llamado “botón de sondeo”, que permite al operador de interrumpir el registro durante maniobras como el acoplamiento de barras.

Para tener el mejor registro de parámetros, la frecuencia del sistema de adquisición de medida debe ser superior a 10Hz y el registro es realizado de preferencia en función del avance y del tiempo de perforación.

Figura 22

Ejemplo del sistema en un equipo tradicional, (1) acondicionador (2) registrador.



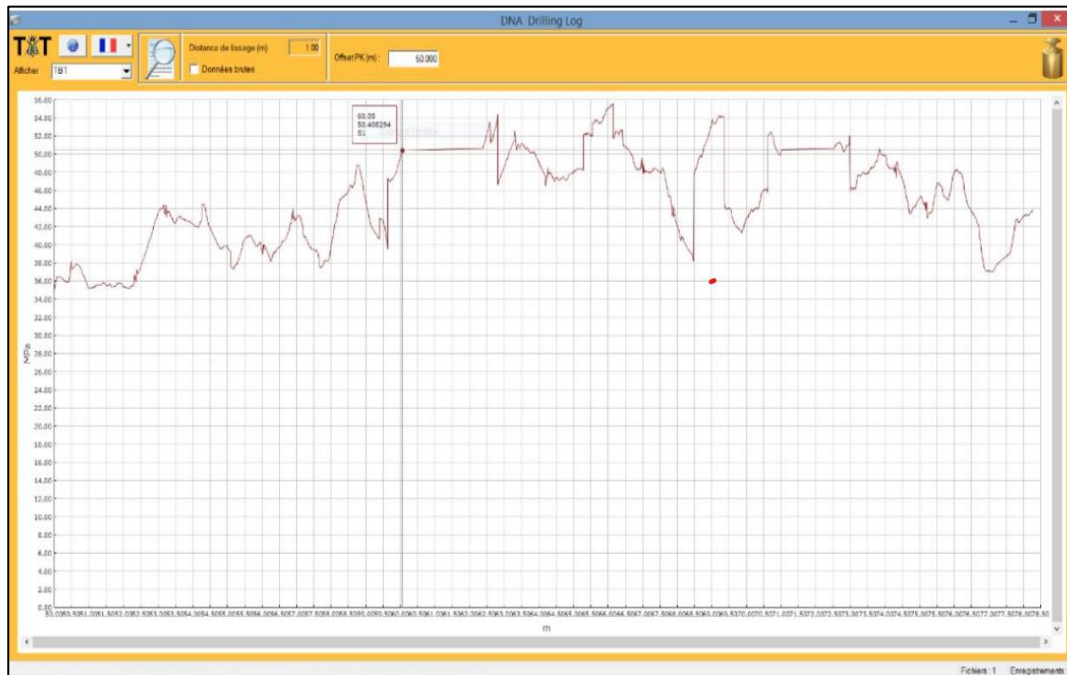
Fuente: DNA-BLAST GROUP

El “LIM 5g” nos podrá proporcionar parámetros geológicos - geomecánicos, mediante sondeo mecánico destructivo, acompañado del software “DNA DRILL LOG” (Figura 23) y del Martillo de Schmidt – Esclerómetro (DIGITAL).

- **Software DNA DRILL LOG.** – El software se basa en la utilización del índice de TBT (Dr. Thierry Bernard); el cual se deriva del índice Somerton y utiliza el torque del taladro en lugar de la velocidad de rotación y solo la presión del empuje.

Figura 23

Software DNA-Drilling Log – Curva de resistencia a la compresión del macizo rocos



Fuente: DNA-BLAST GROUP

Martillo de Schmidt – Esclerómetro (DIGITAL). – Conocido como martillo suizo o martillo de rebote, es un dispositivo para medir las propiedades elásticas de la roca INSITU, principalmente la dureza de la superficie y la resistencia a la penetración. El martillo de prueba golpeará la roca con una energía definida. Su rebote depende de la dureza de la roca el valor de rebote se puede utilizar para determinar la resistencia a la compresión del macizo rocoso. Este equipo nos ayudará para la calibración de nuestro índice TBT en el software DNA DRILL LOG.

4.2.2. Sistema de Predicción Sísmica para Túneles (TSP)

Constituye una herramienta geofísica no destructiva diseñada para analizar estructuras geológicas y parámetros geomecánicos desde el frente de excavación. Su capacidad de investigación abarca la detección de zonas de falla, cavidades peligrosas, formaciones con presencia de agua y cambios mecánicos en las rocas, permitiendo identificar riesgos potenciales y facilitar la toma de decisiones correctivas.

Es un método geofísico no destructivo que permite:

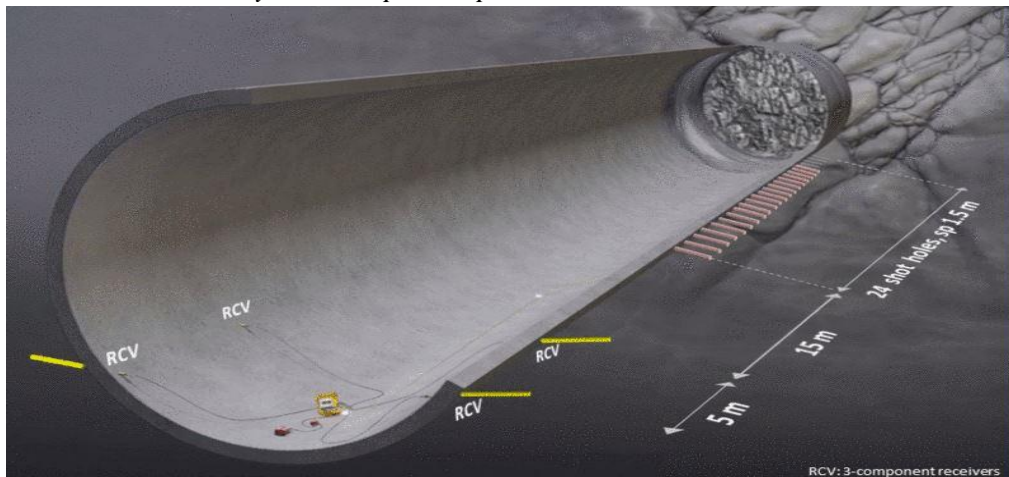
- Investigar el área por delante del frente de avance.
- Detecta zonas de falla y cavidades peligrosas.
- Explora formaciones portadoras de agua.
- Identifica zonas con cambios en los parámetros mecánicos de las rocas.
- Identifica los riesgos en su proyecto.
- Ayuda a controlar riesgos y tomar decisiones correctas.

El sistema de predicción sísmica para túneles en 3D (TSP) busca obtener una evaluación geológica y geotécnica, precisa y ágil, explorando un volumen tridimensional delante y alrededor del túnel. Su propósito fundamental es perfeccionar el modelo geológico-geotécnico e incrementar la fiabilidad en la identificación de zonas de fallas y fracturas, mediante un método diseñado para detectar modificaciones en la masa rocosa.

El método opera de manera predictiva durante la excavación del túnel, utilizando sísmica de reflexión con una técnica que involucra la detonación secuencial de hasta 24 cargas pequeñas. Estas generan señales acústicas (ondas sísmicas) captadas por sensores triaxiales anclados en la pared lateral del túnel, permitiendo revelar cambios en formaciones geológicas como cavernas, fallas, zonas fracturadas y discontinuidades en el frente de avance. (Figura 24)

Figura 24

Posición de taladros y sensores para la prueba TSP



Fuente: Software "Amberg TSP PLUS"

Los sensores sísmicos capturan las señales reflejadas por discontinuidades en el macizo rocoso, procesadas mediante software de manera semi o totalmente automática. La capacidad del sistema para registrar el tren de ondas de manera completa, junto con un software de análisis inteligente, lo que permite determinar las propiedades mecánicas de las rocas en un área predictiva de 100-200 metros.

Un sistema de software 3D presenta todas las discontinuidades, fallas y zonas de fractura detectadas con su orientación sobre el eje del túnel. A pesar de su eficiencia en la toma de datos (1-2 horas sin acceder al frente), el método requiere un proceso de perforación para cargas y geófonos, además de un tiempo de procesamiento y análisis que dilata la entrega de resultados.

El software Amberg TSP PLUS se utiliza para evaluar e interpretar las señales sísmicas, procesando la información para determinar las características geomecánicas del macizo rocoso como el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y las velocidades de ondas P y S. (Figura 25)

Figura 25

Tabla de propiedades mecánicas de las rocas

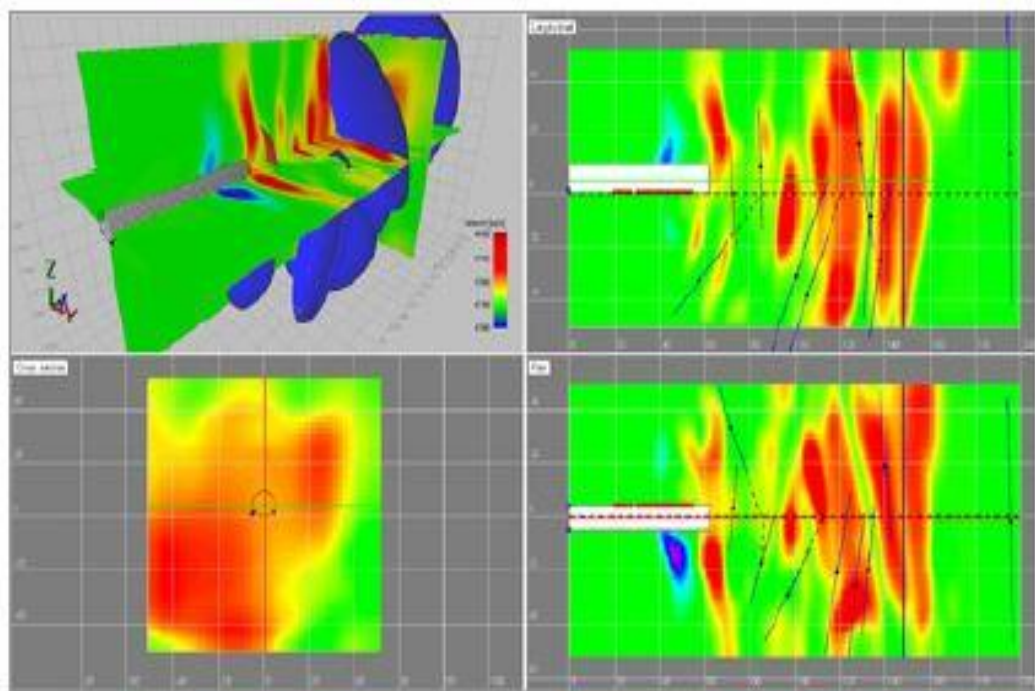


Fuente: Software "Amberg TSP PLUS"

El sistema TSP 303 incorpora un software de vanguardia que utiliza tecnología de punta VMR para la adquisición y procesamiento de datos sísmicos tridimensionales. Esta sofisticada tecnología permite realizar un modelado de migración 3D basado en velocidad, con capacidad de extracción automática de reflectores. Como resultado, el sistema genera representaciones tanto en formato bidimensional como tridimensional, ofreciendo una visualización detallada y precisa de las estructuras geológicas analizadas. (Figura 26)

Figura 26

Ejemplo de modelado de velocidad en 3D



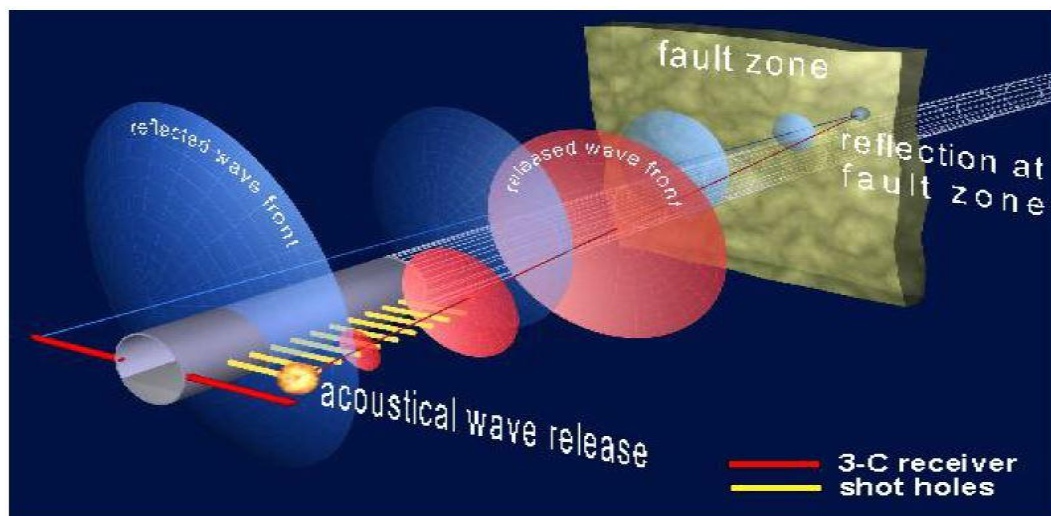
Fuente: Software "Amberg TSP PLUS"

Este sondaje tiene un alcance por encima de los 150 metros y es aplicable en rocas con contrastes significativos en sus propiedades físicas, excluyendo suelos blandos donde el método resulta ineficaz. Se fundamenta en el análisis de la impedancia acústica, que representa la resistencia de un medio a las ondas que lo atraviesan, siendo una función variable según la frecuencia.

La impedancia acústica permite determinar la presión generada por ondas acústicas en frecuencias específicas y calcular el coeficiente de reflexión para detectar discontinuidades en el macizo rocoso. Un contraste de impedancia acústica mínimo del 20 % resulta suficiente para identificar variaciones geológicas estructurales, constituyendo una herramienta precisa para la caracterización del terreno.

Figura 27

Principio del método TSP



Fuente: Software "Amberg TSP PLUS"

4.2.2.1. Equipo Utilizado

El empleo del equipo TSP 303 (Figura 28), con su respectivo software con la Techonologies Amberg, mediante sondajes geofísicos no destructivos, que nos proporcionará una predicción geológica de vanguardia.

Figura 28

Equipo de predicción sísmica para túneles 3D TSP 303



Fuente: Software "Amberg TSP PLUS"

4.2.3. Aplicación del Método en Campo (Configuración y Requerimientos)

4.2.3.1. Sondeo mecánico Exploratorio

El sondeo mecánico se efectúa de manera destructiva, mediante sensores adaptados e interconectados a un terminal con pantalla de registro en la cabina de la máquina, el cual posee el registrador de parámetros LIM de 5ta generación-

PocketLim 5G, que va anexado al equipo de perforación en este caso en un Rock Drill (Sandvik DT 820).

Se realiza una perforación de 8 barras, cada barra con 3,66 metros de longitud y diámetro de perforación 64 milímetros, llegando a una perforación efectiva de 28 a 30 m. Donde podemos apreciar en la figura 29, como inicia el proceso de perforación.

Figura 29

Sondeo mecánico exploratorio



Fuente: Proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad

La observación de la variación de los parámetros de la perforación permitirá tener una idea relativamente precisa de la posición de transición entre las diferentes litologías geológicas.

4.2.3.1.2. Interpretación de Parámetros

Cada parámetro registrado puede entonces ser atribuido a un tipo de litología o en términos del funcionamiento de perforación. Durante la perforación, cada cambio de litología se traduce por la variación de uno o varios parámetros (Figura 31). A la mayoría de las formaciones le corresponde un parámetro preponderante, claro este parámetro puede ser el mismo para dos formaciones diferentes. Por lo que la utilización de la variación de ciertos parámetros de perforación, para establecer cortes geológicos como complemento a un número determinado de sondeos o en la búsqueda de vacíos y fallas es de suma importancia.

4.2.3.2. Sondeo Geofísico (TSP)

El sondeo geofísico es independiente del método de excavación y del diámetro del perfil del túnel (> 2m). El tendido sísmico tiene una configuración de cerca de 50 m de largo y está alineado a lo largo de la pared del túnel, por detrás del frente de avance.

4.2.3.2.1. Equipamiento y trabajo preparativo antes del sondeo

Señalización del perfil para la medición TSP

- A. Se procede al marcado e inspección geométrica de las posiciones para las perforaciones de los 24 taladros de disparo y receptores en la pared del túnel.
- B. Perforación de los Taladros de Disparo y de los Receptores
- C. Se efectuarán salvo indicación contraria de la siguiente manera:

	PERFORACIÓN TALADROS DISPARO	PERFORACIÓN DE RECEPTORES
CANTIDAD	24	4
PROFUNDIDAD	Mín. 1.5 m dentro de roca sólida	2 m
DIÁMETRO	32 – 45 mm	50 mm
ESPACIAMIENTO	1.5 m	5 m
INCLINACIÓN	20° hacia abajo desde la horizontal	5° hacia arriba desde la horizontal
POSICIÓN	Comenzando por detrás del frente, pared izquierda o derecha del túnel, dependiendo de la geología.	Frontal: 15 m detrás de la línea de disparo. Posterior: 20 m detrás de la línea de disparo; pared izquierda y derecha opuestos uno al otro

a) Protección de Taladros Perforados

De ser necesario se procederá a introducir tubos de plástico delgado (PVC, u otro) inmediatamente después de perforar para evitar el colapso de los hoyos.

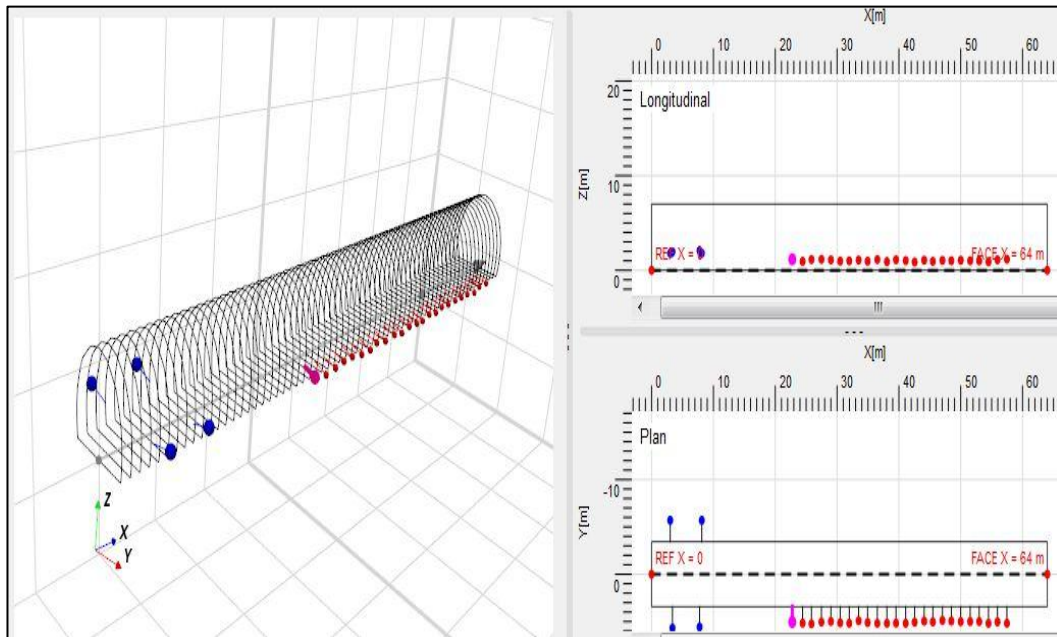
b) Equipamiento Necesario

- Vehículo para trasladar el equipo y personal técnico al sitio de medición dentro del túnel.
- Alumbrado normal, si es posible una luminaria adicional
- Fuente de abastecimiento de agua y manguera para el apisonado de la carga en los taladros de disparo.
- Consola de voladura eléctrica con una tensión de salida de 1000 – 1500 V, Capacidad 40 μ F - 80 μ F.
- Explosivos: 30 piezas de cordón detonante (PETN) o explosivo gelatinoso con velocidad de detonación $\geq 6,000$ m/s, cantidad 50-150 g/ pieza.
- Detonador eléctrico: 30 piezas, insensibilidad alta, retraso: 0 (instantáneo)

4.2.3.2.2. Configuración en Campo – Preparación y Medición

Amberg, es la empresa que patenta la ejecución del método utilizado en estos sondajes, definiendo así el diseño de la prueba, como se muestra en la figura 32.

Figura 32
Configuración en campo de una medición TSP 303



Fuente: Software "Amberg TSP PLUS"

Se definió la ubicación de 24 pozos y 4 receptores en las paredes laterales del túnel para su perforación (Figura 33), verificando las profundidades de los pozos y de los receptores. Asimismo, la profundidad de los pozos receptores es reducido por el relleno de Seis Bond (aditivo fragüable para el sellado de los receptores en los taladros) en cada uno de ellos.

Figura 33

Verificación de la profundidad de los pozos y receptores



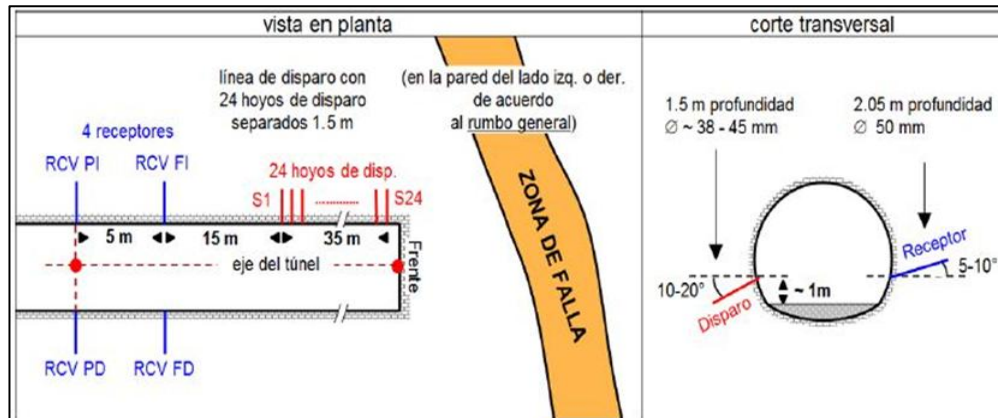
Fuente: Proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad

En el caso de las sondas receptoras, se cuenta con cuatro de ellas las cuales tienen integradas sensores triaxiales de alta sensibilidad que son colocadas dentro de tubos protectores. Los extremos de estos son fijados firmemente por medio de un mortero especial en perforaciones de aproximadamente 2 m de profundidad y 50 mm de diámetro en ambas paredes del túnel.

Aproximadamente alrededor de 15m desde la posición de los receptores frontales en dirección del frente, se perforan 24 taladros para nuestros puntos de disparo a lo largo de una de las paredes del túnel a intervalos de 1.5 m (Figura 34).

Figura 34

Configuración en campo de una medición TSP 303



Fuente: Software "Amberg TSP PLUS"

4.2.3.2.2.1. Preparación – Instalación de los Receptores

- Atornillar el TSP dowel en el terminal del receptor correspondiente al sensor, atornillarlo apropiadamente hasta alcanzar el acople perfecto con el terminal del sensor (Figura 35).

Figura 35

Acoplamiento y ajuste del TSP dowel con el terminal del receptor



Fuente: Proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad

- Insertar el terminal opuesto a través del tubo protector. Los tubos protectores y de instalación deben ser previamente ensamblados e introducir TSP dowel en el terminal hembra del tubo protector (Figura 36).

Figura 36

Instalación del protector de la sonda



Fuente: Proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad

- Fijar la herramienta de instalación a través del terminal del receptor a la base del tubo de instalación (Figura 37).

Figura 37

Fijación de la herramienta



Fuente: Proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad

- Preparar la masa Seis Bond y amasar el cartucho por aprox. 30 seg. hasta que el cemento absorba el agua, el tiempo de instalación del receptor es de solo 5 minutos porque después fragua y no cumplirá su función (Figura 38).

Figura 38

Preparación de masa Seis Bond



Fuente: Proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad

- Insertar cuidadosamente el cartucho en la perforación destinada al receptor e inmediatamente inserte al receptor ya ensamblado, gírelo hacia la derecha y finalmente atornille el receptor en el cemento usando la herramienta de instalación hasta que el TSP dowel quede ajustado en el cemento (Figura 39).

Figura 39

Instalación del receptor al hastial



Fuente: Proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad

4.2.3.2.2. Medición:

Para la realización del ensayo necesitamos nuestra fuente sísmica, la cual consiste en cargas explosivas pequeñas de entre 20 -100 gr colocadas en cada taladro junto con un alambre de rotura anudado a la punta del fulminante, que se instala dentro de la carga explosiva, con la finalidad de que al momento de la detonación se rompa el alambre de rotura y poder registrar la señal de la onda (Figura 40).

Se realiza la detonación de los 24 pozos de disparo para obtener las señales sísmicas, las cuales se almacenan en el dispositivo de registro. La detonación y

grabación sísmica de los 24 disparos tiene una duración aproximadamente entre 45 a 90 minutos, pudiendo variar de acuerdo en base a las condiciones del frente.

Con la finalidad de evitar falsas medidas por la influencia de ruido sísmico en las grabaciones, se debe evitar cualquier trabajo dentro del túnel en un radio de 100 m alrededor del área del tendido TSP.

Figura 40

Instalación del TSP, junto a sus receptores para la ejecución del Sondeo.



Fuente: Proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad

4.2.3.2.3. Intervalo de mediciones

Como ya se ha mencionado el rango de predicción del TSP 303 varía de acuerdo con la calidad del macizo rocoso circundante. Si las condiciones del macizo son buenas (roca dura, pocas fracturas) se pueden esperar un rango de predicción mínimo de 150 a 200 m.

Hay que tener en cuenta que este rango de medida puede disminuir en el caso de un macizo con calidad pobre (roca blanda o fuertemente fracturada) debido a una elevada atenuación de la señal sísmica. Por ello, es recomendable realizar mediciones en intervalos de un promedio de 120 m en roca normal y 80 – 100 m en zonas de fracturamiento.

4.2.3.2.4. Evaluación y procesamiento de los datos obtenidos en el sondeo

La evaluación y el procesamiento están directamente controlados por un computador portátil. Todos los parámetros del procesamiento para la obtención de los módulos dinámicos son establecidos de manera semi- automática. A medida que se avanza con el análisis del procesamiento el programa va a ir estableciendo los parámetros adecuados. A partir de los registros sísmicos obtenidos en la adquisición de datos, utilizando algoritmos en el programa AMBERG, podremos analizar los procesos de análisis de velocidad y la migración por profundidad. Con esta información podremos determinar la ubicación correcta de la energía reflejada de las discontinuidades geológicas.

CAPÍTULO V

PRESENTACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS

La zona de trabajo fue en el Túnel Restitución el cual tiene una longitud de 2,58 km aproximadamente, que fue excavado con el método de perforación y voladura; realizando los sondajes directos e indirectos correspondientes. El túnel Restitución, tiene la siguiente sección, tal como se aprecia en la figura 41:

Figura 41

Sección del Túnel Restitución



Fuente: Plano del proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad

En el transcurso de la construcción del túnel se realizaron un total de 72 sondajes mecánicos exploratorios y 17 sondajes geofísicos (TSP). De los cuales, para hacer un análisis de los datos obtenidos, se hará la evaluación de 03 sondajes mecánicos exploratorios y 02 sondajes geofísicos (TSP).

5.1. Sondaje exploratorio

El resultado de estos trabajos de prospección e investigación directa llevadas a cabo durante las excavaciones subterráneas en el túnel nos proporcionará la información que corresponde a una interpretación y predicción del frente de excavación, la cual está basada en las curvas de resistencia de Somerton (1959), que son resultantes de las correlaciones entre la velocidad de penetración de la barra, presiones y torque aplicados al macizo rocoso.

Estas curvas, datos y resultados de campo se evalúan, analizan e interpretan de tal forma que la inferencia geológica – geomecánica dada a conocer horas después de emitido el reporte preliminar, son de utilidad desde un primer momento a las personas involucradas en la excavación y sostenimiento geotécnico del túnel.

5.1.1. Interpretación de Sondeos Mecánicos Exploratorios

Los sondajes a interpretar son los siguientes con sus respectivas codificaciones y progresivas de avance:

- TR-1615: 1+024.00 – 1+052.00
- TR-1620: 1+158.90 – 1+187.00
- TR 1635: 1+340.00 – 1+368.00

5.1.1.1. Sondeo Exploratorio TR-1615

La perforación fue realizada dentro del tramo 1+024.00 a 1+051.00 donde se puede verificar correlacionando la geología de base en el frente de excavación y con la visualización de la coloración del flujo de la perforación (Figura 42), se trataría de una caliza gris oscura intercalada en menor proporción con roca volcánica, pudiendo tratarse contactos de diques o rocas intrusivas.

Se observa a la vez pérdida de resistencia en la perforación en casi todo el tramo, teniendo valores de resistencia a la compresión de 20 a 40 MPa (Gráfico 1), evidenciando de esta manera que el macizo rocoso en el tramo está alterado y con gran presencia de estructuras geológicas (zonas de cizalla, fallas de menor expresión, contactos geológicos discordantes, entre otros).

Recomendando hacer una evaluación más minuciosa en este tramo. Basado en la resistencia del macizo rocoso a la barra de perforación, velocidades y recuperación de detritos, se infieren macizos de calidad regular a deficiente (pudiendo clasificarla de Roca Tipo III a IV).

Figura 42.

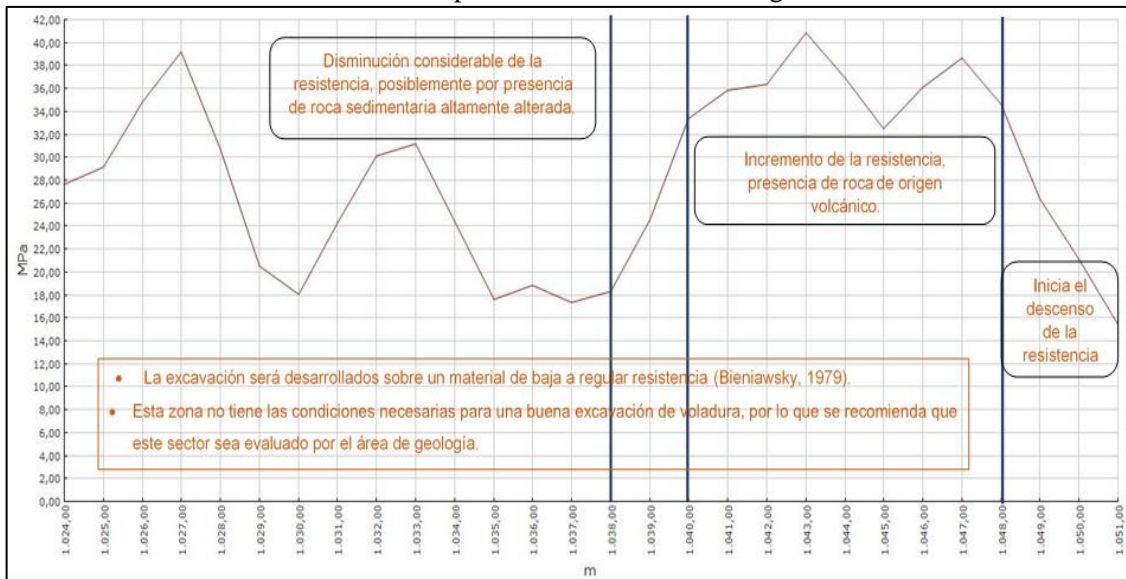
Flujo de la perforación del taladro



Fuente: Proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad

Gráfico 1.

Relación de la Resistencia a la compresión en función a la Progresiva



Fuente: TBT - DNA DRILL LOG (Thierry Bernard, Francia, 2015)

5.1.1.2. Sondeo Exploratorio TR-1620

Se llevó a cabo la perforación dentro del tramo 1+158.90 - 1+187.00. Identificando ciertas variaciones continuas en los valores proporcionales de la resistencia a la compresión, los cuales varían entre los 40 a 70 MPa (Gráfico 2), durante el sondeo se pudo observar un tipo de roca homogénea, por lo que las variaciones de la resistencia a la compresión en la roca se tratarían de pequeños tramos donde el macizo se podría encontrar fracturado, esto debido a diferentes procesos geológicos que ha podido pasar la roca

Asimismo, en el proceso de perforación se pudo observar en el lavado del detrito al inicio de un gris oscuro a negro, tratándose de intercalaciones de roca sedimentaria; cambiando después de un blanco a un gris claro (Figura 43) desde la progresiva 1+163.00 hasta terminar el sondeo:

Entre los tramos 1+158.90 - 1+161.0: El macizo rocoso responde a resistencias bajas a regulares, indicando materiales alterados o presencia de estructuras geológicas. Se recomienda tener un acompañamiento geológico más minucioso.

Entre los tramos 1+161.0 - 1+171.0: Sub tramo de roca resistente con pequeñas caídas de la resistencia, pero sin mayor presencia de estructuras geológicas de gran expresión que dificulten el proceso constructivo.

Entre los tramos 1+171.0 - 1+173.0: Probable estructura o contacto geológicos. Macizo de regular resistencia y algo alterado.

Entre los tramos 1+173.0 - 1+187.0: Sub tramo de roca resistente a muy resistente y observando la variación de la coloración de los detritos de color gris claro, tratándose de roca volcánica de buen comportamiento geomecánico, ya que vemos una tendencia favorable en su resistencia. No se distinguen picos o decaimientos bruscos que promuevan estructuras geológicas. Macizo de regular a buena calidad geomecánica. (Roca Tipo III).

Figura 43

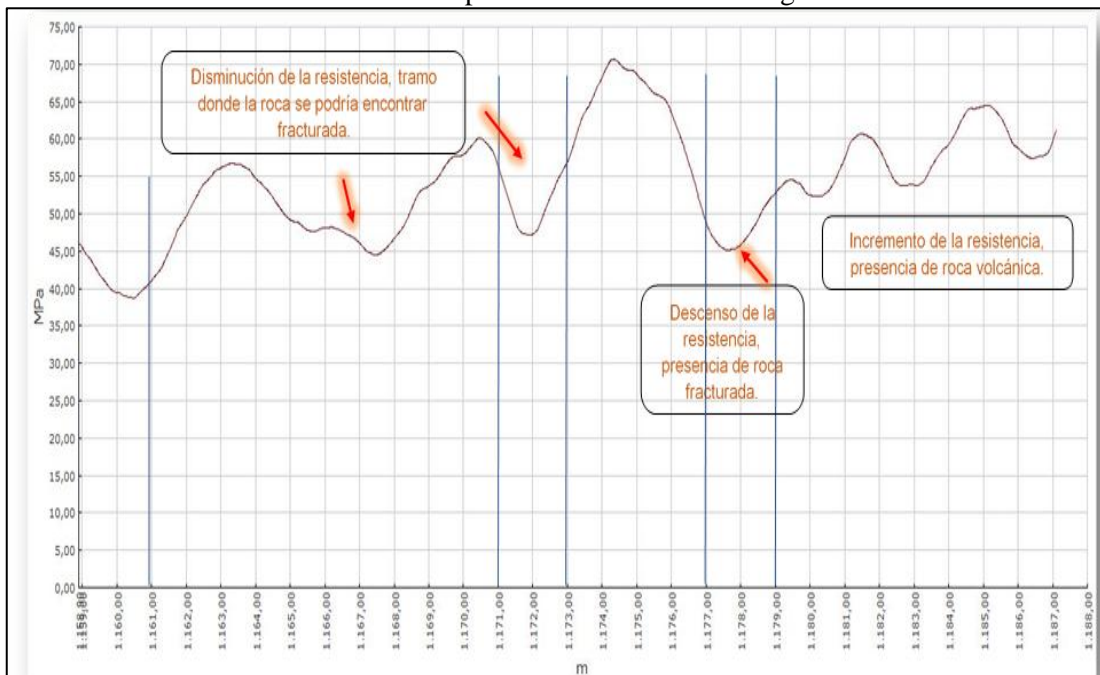
Flujo de la perforación del taladro



Fuente: *Proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad*

Gráfico 2.

Relación de la Resistencia a la compresión en función a la Progresiva



Fuente: TBT - DNA DRILL LOG (Thierry Bernard, Francia, 2015)

5.1.1.3. Sondeo Exploratorio TR-1635

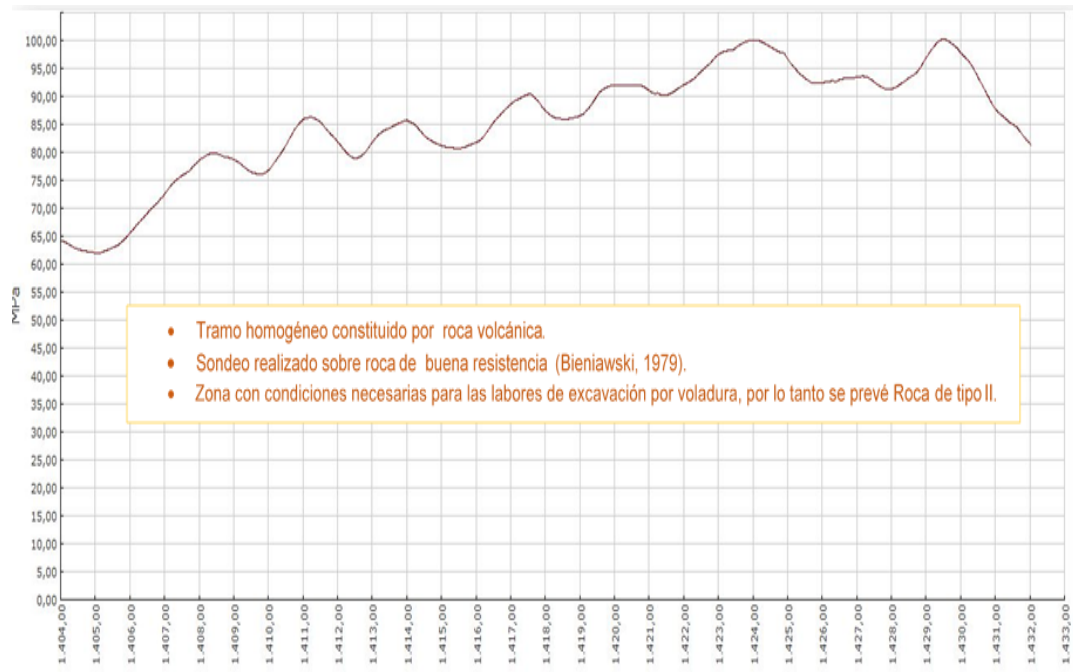
La perforación fue realizada dentro del tramo 1+404.00 a 1+432.00. En función de los parámetros de la perforación como la velocidad, torque y presión aplicada a la barra son constantes en todo el tramo evaluado, se trata de un macizo rocoso de buena resistencia.

En todo el tramo del sondeo está constituido por roca volcánica, ya que en todo el tramo evaluado la coloración del flujo del detrito, es de gris claro; obteniendo valores proporcionales a la resistencia a la compresión que se encuentran en un rango entre los 65 y 100 MPa. Tratándose de un macizo rocoso

muy resistente, sano o levemente alterado y poco fracturado, proyectando avances normales sobre macizos de buena calidad geomecánica (Clasificándola como roca Tipo II). No se aprecian picos o decaimientos marcados que indiquen estructuras geológicas de interés.

Gráfico 3

Relación de la Resistencia a la compresión en función a la Progresiva



Fuente: TBT - DNA DRILL LOG (Thierry Bernard, Francia, 2015)

5.2. Método de Predicción Sísmica para Túneles (TSP 303)

Geológicamente, el túnel se encuentra ubicado dentro de una zona compuesta por rocas volcánicas de tipo andesita con intercalaciones de rocas sedimentarias, con características variables. Con la finalidad de identificar

contrastes y anomalías litológicas y geológicas estructurales que pongan de manifiesto alguna dificultad constructiva durante los avances; se trabajó con el método de Predicción Sísmica para Túneles (TSP).

Para los análisis e interpretación se toman en cuenta los diferentes parámetros dinámicos resultantes del ensayo, las trazas que distinguen aspectos geológico-estructurales y básicamente los contrastes y anomalías observadas a lo largo del espectro ensayado y visualizado a través de las cartas de propiedades y representación gráfica de las mismas.

La carta de propiedades que se obtiene luego del procesamiento de la señal sísmica con la representación gráfica de los valores de velocidad (ondas P y S), Coeficiente de Poisson, y Módulo dinámico de Young. Estos valores son directamente correlacionables con el macizo rocoso.

La representación gráfica expresada a través de una vista transversal y longitudinal, incluyendo la extracción de los reflectores, los cuales son interpretados como discontinuidades geológicas con sus respectivos ángulos de rumbo y buzamiento, es decir la confiabilidad de medidas estructurales es una gran ventaja en el ensayo.

Además de los datos e información se utilizó el software como el TSP PLUS de la firma AMBERG y reportes técnicos de campo como mapeos superficiales,

valoraciones y cartografiados hechos directamente a los frentes de excavación anteriores a la zona de ensayo, para su corroboración.

En este caso vamos a analizar 02 ensayos del TSP, los cuales están representados con su codificación correspondiente y sus progresivas respectivamente.

5.2.1. Interpretación de Ensayos TSP Realizados

5.2.1.1. Sondeo TSP-TR-1510

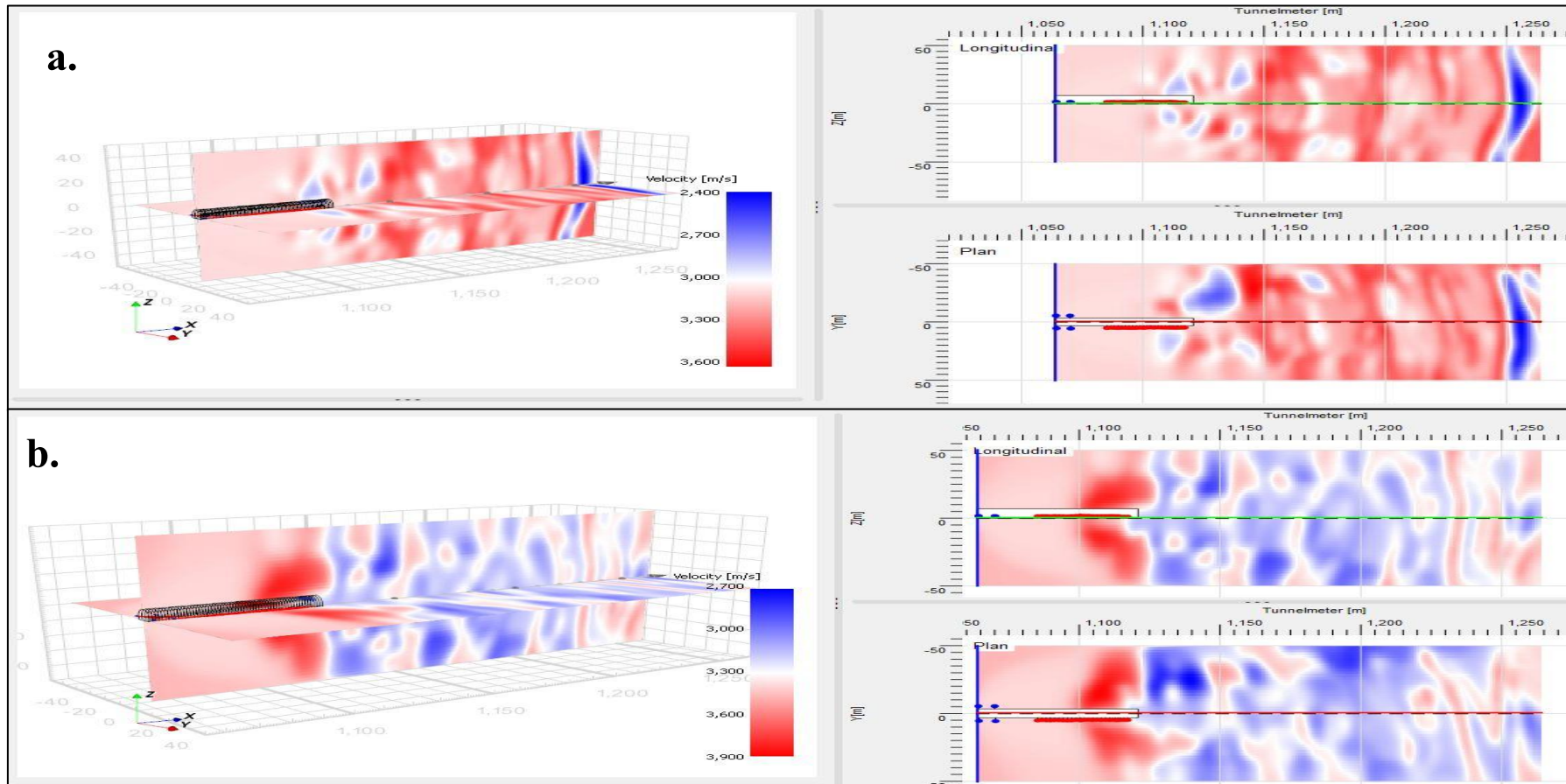
El ensayo se realizó desde la progresiva 1+120.00 hasta 1+220.00 abarcando un total de 100 m. desde el frente del túnel. Una vez obtenida toda la data de campo, pasamos a realizar el análisis con el Software TSP PLUS. Todos los parámetros del procesamiento para la obtención de los módulos dinámicos son establecidos de manera semi- automática. A medida que se avanza con el análisis del procesamiento el programa va ir estableciendo parámetros adecuados. A partir de los registros sísmicos obtenidos en la adquisición de datos, utilizando algoritmos en el programa podremos separar las ondas compresionales (V_p) de las ondas de corte (V_s).

De los resultados del procesamiento de datos se han definido zonas con mayor y menor reflectancia de las ondas sísmicas, que podría corresponder a un cambio en las condiciones del macizo rocoso o a cambios estructurales transversales de poca relevancia en el macizo rocoso.

El resultado de la prueba muestra anomalías indicadas en color azul (Figura 44). Los cuales son interpretados como zonas de roca menos competente, cambios litológicos o posible presencia de estructuras geológicas principales (Pliegues, estratificación vertical, zonas de cizalla, contactos, fallas, entre otras).

Figura 44

Análisis de velocidad de la onda de corte a) SH y b) SV



Fuente: Software "Amberg TSP PLUS"

Basados en la velocidad de propagación de las ondas de compresión (ondas p) y de cizalla (ondas S); y el cálculo de la densidad de la roca mediante fórmulas empíricas predeterminadas en el programa Amberg TSP Plus, nos permitió estimar los módulos de deformación del terreno, tales como la razón de Poisson, módulo de Corte, módulo de Young, entre otros; que ayudan a evaluar las características geotécnicas de cada unidad geológica.

A partir del análisis sísmico se ha definido 7 sectores (A, B, C, D, E, F y G) para consideraciones geomecánicas del tramo evaluado (Figura 45), observando diferencias en las velocidades de onda y módulos de deformación (Se podrá observar en los anexos a mejor detalle), los cuales serán detallados a continuación, según cada tramo y su respectiva progresiva:

- Sector A – Tramo 1+120.0 a 1+135.0

Velocidades de onda (V_p) 5350 m/s, (V_s) entre 3100 m/s y con módulos dinámicos de Young en el rango de 66 GPa, correspondiente a intercalaciones de rocas sedimentarias (calizas) resistentes; y rocas volcánicas (andesitas) resistentes. Zona con mayor fracturamiento. Se debe prestar atención en este sector y de ser necesario ejecutar algún ensayo exploratorio directo. Se podría calificar a este tramo como una roca de regular calidad geomecánica (Roca Tipo III).

- **Sector B – Tramo 1+135.0 a 1+150.0**

Representado por velocidades de ondas V_p 5950 m/s y V_s 3290 m/s y valores del módulo dinámico de Young correspondiente a 75 GPa, identificándose un incremento de este, por ende, se define como un material más homogéneo, pero con presencia de estructuras geológicas menores como diques, contactos y algunas zonas de cizalla (contacto entre paredes roca – roca). Se podría calificar a este tramo como roca de regular calidad geomecánica (Roca Tipo III).

- **Sector C – Tramo 1+150.0 a 1+160.0**

Velocidades de onda (V_p) de 5800 m/s a 5200 m/s, V_s de 3100 m/s a 3300 m/s y con módulo dinámico de Young de 73 GPa, que indica una zona con una mayor presencia de reflectores indicándonos presencia frecuente de estructuras geológicas como zona de falla, generalmente transversales al trazado. Se podría calificar a este tramo como un macizo rocoso de deficiente calidad geomecánica (Roca Tipo IV).

- **Sector D – Tramo 1+160.0 a 1+170.0**

Velocidades de onda (V_p) en el orden de 5350m/seg, V_s de 3500m/seg y con un módulo dinámico de Young de 74GPa, correspondiente a intercalaciones de rocas sedimentarias (calizas) resistentes; y rocas volcánicas (andesitas) resistentes,

observando reflectores ocasionales. Se podría calificar a este tramo como de regular calidad geomecánica (Roca Tipo III).

- Sector E – Tramo 1+170.0 a 1+180.0

Velocidades de onda (V_p) en el orden de 5200m/seg a 5600m/seg, (V_s) de 3350 y valores del módulo dinámico de Young correspondiente a 75 GPa, correspondiente a intercalaciones de rocas resistentes. Se verifican algunas estructuras geológicas como contactos o fallas de menor expresión atravesando transversalmente el frente de excavación. Puede calificarse al tramo como de regular calidad geomecánica (Roca Tipo III).

- Sector F – Tramo 1+180.0 a 1+200.0

Velocidades de onda (V_p) de 5550 m/s a 5700 m/seg, V_s de 3250 m/s con módulo dinámico 73 GPa a 75 GPa, aumento de la velocidad, pero con mayor presencia de reflectores indicándonos presencia de estructuras geológicas (estructuras generadas por contactos geológicos o fallas de menor a regular expresión) lo que reducen la calidad geomecánica del macizo. Calificando este tramo de regular calidad geomecánica (Roca Tipo III).

- **Sector G– Tramo 1+200.0 a 1+220.0**

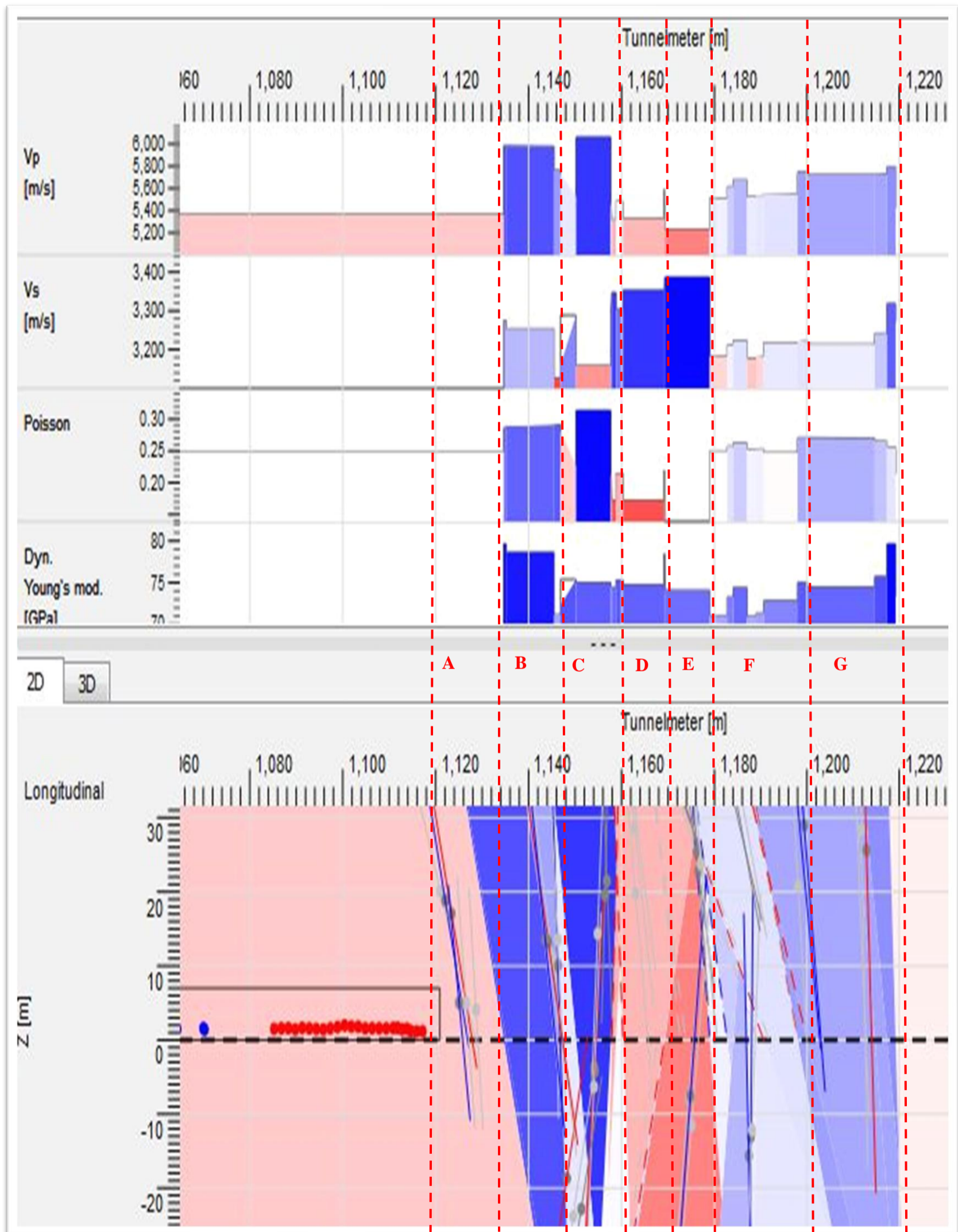
Velocidades de onda (V_p) 5850 m/s, (V_s) entre 3350 m/s y con módulos dinámicos de Young en el rango de 80 GPa, indican macizos rocosos de buena competencia. Solo se verifican ocasionales reflectores (estructuras geológicas, como fallas de menor expresión) cruzando transversalmente el trazado del túnel. Se infieren macizos de regular a buena calidad geomecánica (Roca Tipo II).

- **Progresiva 1+220.0**

Punto final de la prueba.

Figura 45

Representación gráfica de los valores de velocidad (ondas P y S) y el Módulo de Deformación de Poisson, Módulo dinámico de Young. (Vista en longitudinal). Donde se ha dividido en 7 sectores (A, B, C, D, E, F y G) para un mejor análisis de cada tramo.



Fuente: Software "Amberg TSP PLUS"

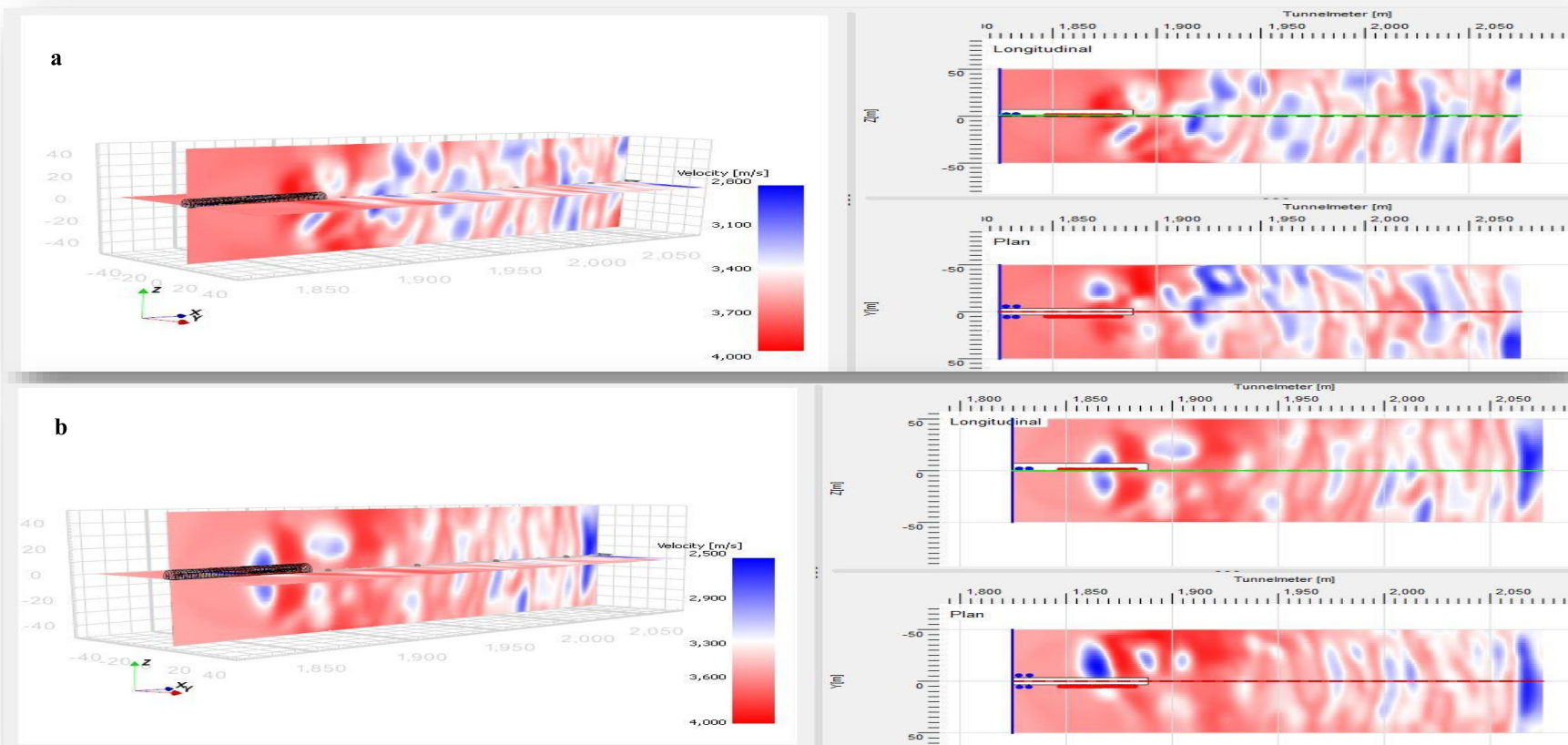
5.2.1.2. Sondeo TSP-TR-1515

El ensayo se realizó desde la progresiva 1+888.60 hasta 2+050.00 abarcando un rango total de 160 m. desde el frente del túnel.

El resultado de la prueba muestra anomalías indicadas en color azul. Los cuales son interpretados como zonas de roca menos competente, cambios litológicos o posible presencia de estructuras geológicas principales (Zonas de cizalla, diques, contactos, fallas menores, entre otros) (Figura 46).

Figura 46

Análisis de velocidad de la onda de corte a) SH y b) SV



Fuente: Software "Amberg TSP PLUS"

A partir del análisis sísmico se ha definido 4 sectores (A, B, C y D) para consideraciones geomecánicas del tramo evaluado (Figura 47), observando diferencias en las velocidades de onda y módulos de deformación (Se podrá observar en los anexos a mejor detalle), los mismos que son detallados a continuación:

- Sector A – Tramo 1+888.60 a 1+910.0

Velocidades de onda (V_p) 6100 m/s, (V_s) entre 3300 a 3600 m/s y con módulos dinámicos de Young en el rango de 88 a 98 GPa, identificándose a un macizo rocoso resistente, la presencia de reflectores reconoce la presencia de estructuras geológicas (zona de cizalla, fallas de menor expresión), que reflejan el ligero decaimiento de la calidad del macizo rocoso (Roca tipo III).

- Sector B– Tramo 1+910.0 a 1+922.0

Velocidades de onda (V_p) 5700 m/s, (V_s) de 34500 m/s con módulo dinámico de Young de 84 GPa, indican macizos de regular calidad, mayor presencia de reflectores indicando presencia de estructuras geológicas (zona de cizalla, diaclasamiento o fallas de menor expresión), ocasionando que se pueda encontrar al macizo moderadamente fracturado y alterado, por lo que se recomienda un acompañamiento geológico en este tramo (Roca tipo III).

- **Sector C– Tramo 1+922.0 a 1+962.0**

Velocidades de ondas V_p 5990 a 6260 m/s y V_s 3365 a 3370 m/s, cuya relación con el módulo dinámico es 86 a 92 GPa, correspondiente a un ambiente homogéneo que correspondería a un macizo rocoso de buena resistencia, ligeramente fracturado y de buena resistencia, no se verifican discontinuidades mayores para este tramo. Considerando un macizo rocoso de buena calidad (Roca tipo II).

- **Sector D– Tramo 1+962.0 a 2+050.0**

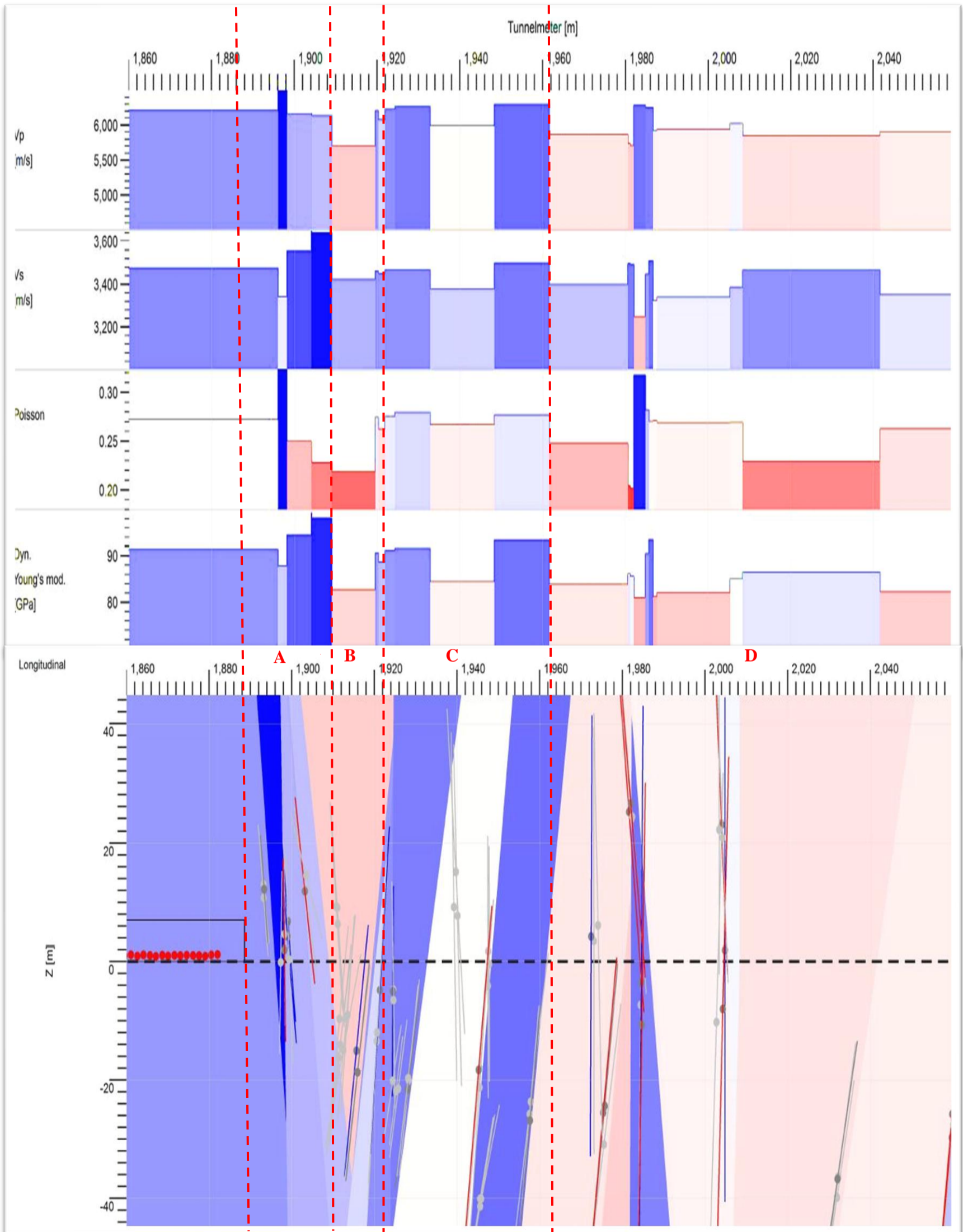
Velocidades de onda (V_p) entre los 5800 a 5900 m/s, V_s entre los 3250 y 3500 m/s y con módulo dinámico de Young entre los 82 a 88 GPa, se verifican reflectores en zonas puntuales. El macizo rocoso puede ser caracterizado como poco fracturado, en este sector se podría indicar que se tiene un macizo de regular a buena calidad geomecánica (Roca tipo III).

- **Progresiva 1+922.0**

Punto final de la prueba.

Figura 47

Representación gráfica de los valores de velocidad (ondas P y S) y el Módulo de Deformación de Poisson, Módulo dinámico de Young. (Vista en longitudinal). Donde se ha dividido en 4 sectores (A, B, C y D) para un mejor análisis de cada tramo.



Fuente: Software "Amberg TSP PLUS"

5.3. Correlación del Método Testigo Mecánico Exploratorio y el Sistema de Predicción Sísmica Para Túneles TSP

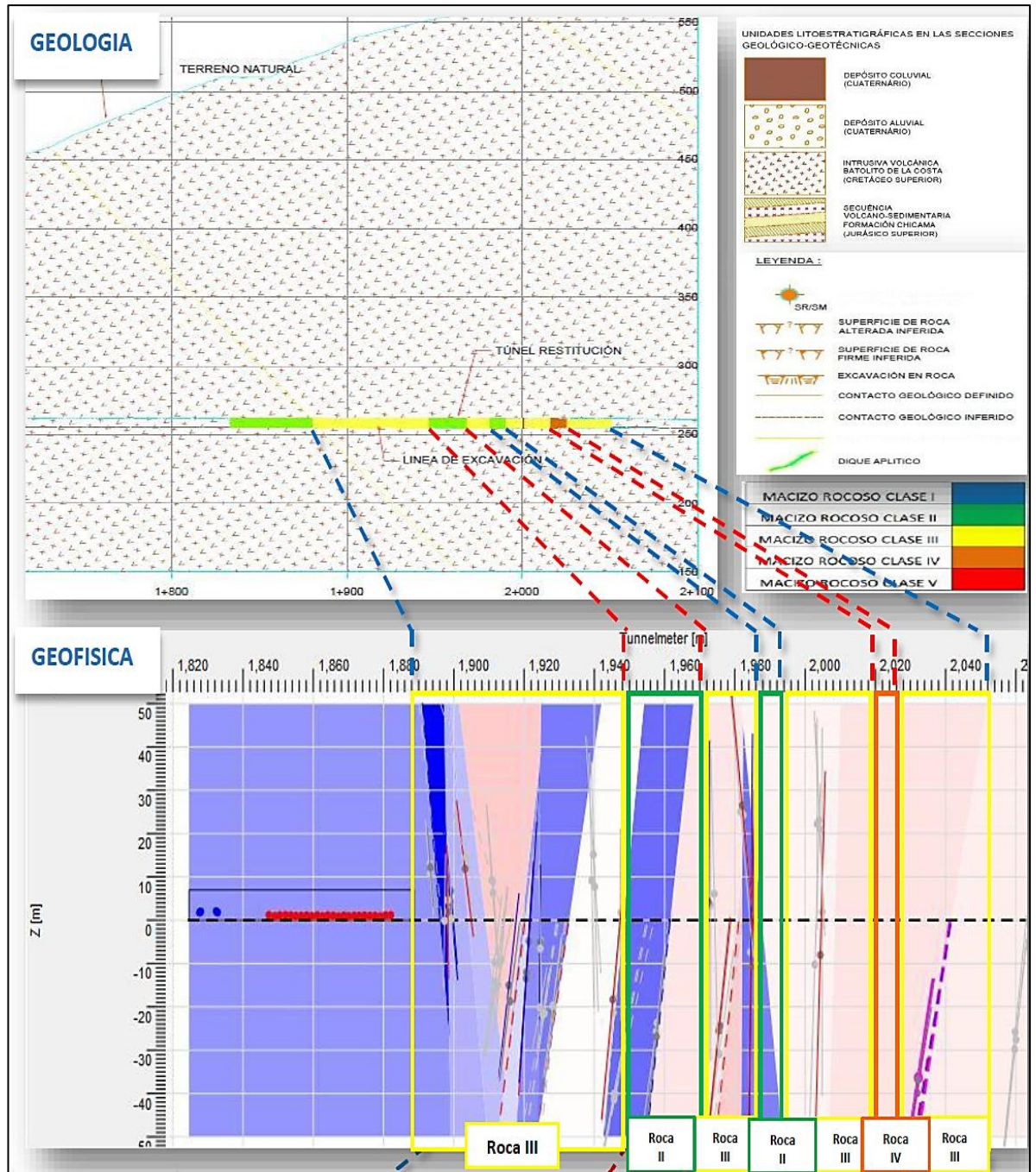
Realizaremos la correlación de las dos metodologías aplicadas en el presente trabajo, con el TSP-1515 y sondeo mecánico exploratorio entre las progresivas 1+888 al 2+050, para poder visualizar cuanta correlación hay entre ellas.

5.3.1. Correlación de la Geología de la Zona con el TSP

Se podrá observar en primer lugar la correlación de la geología de la zona trabajada con ensayo sísmico del TSP (Figura 48).

La comparación entre la litología pronosticada por el ensayo sísmico TSP y la litología excavada del Túnel Restitución se dieron acorde a lo que se predijo, así como los planos de fractura del macizo rocoso, corroborando conforme se realizaba la excavación del frente de trabajo.

Figura 48
Correlación del TSP - Mapeo Geológico.



Fuente: Software "Amberg TSP PLUS" – Mapeo Proyecto Chavimochic.

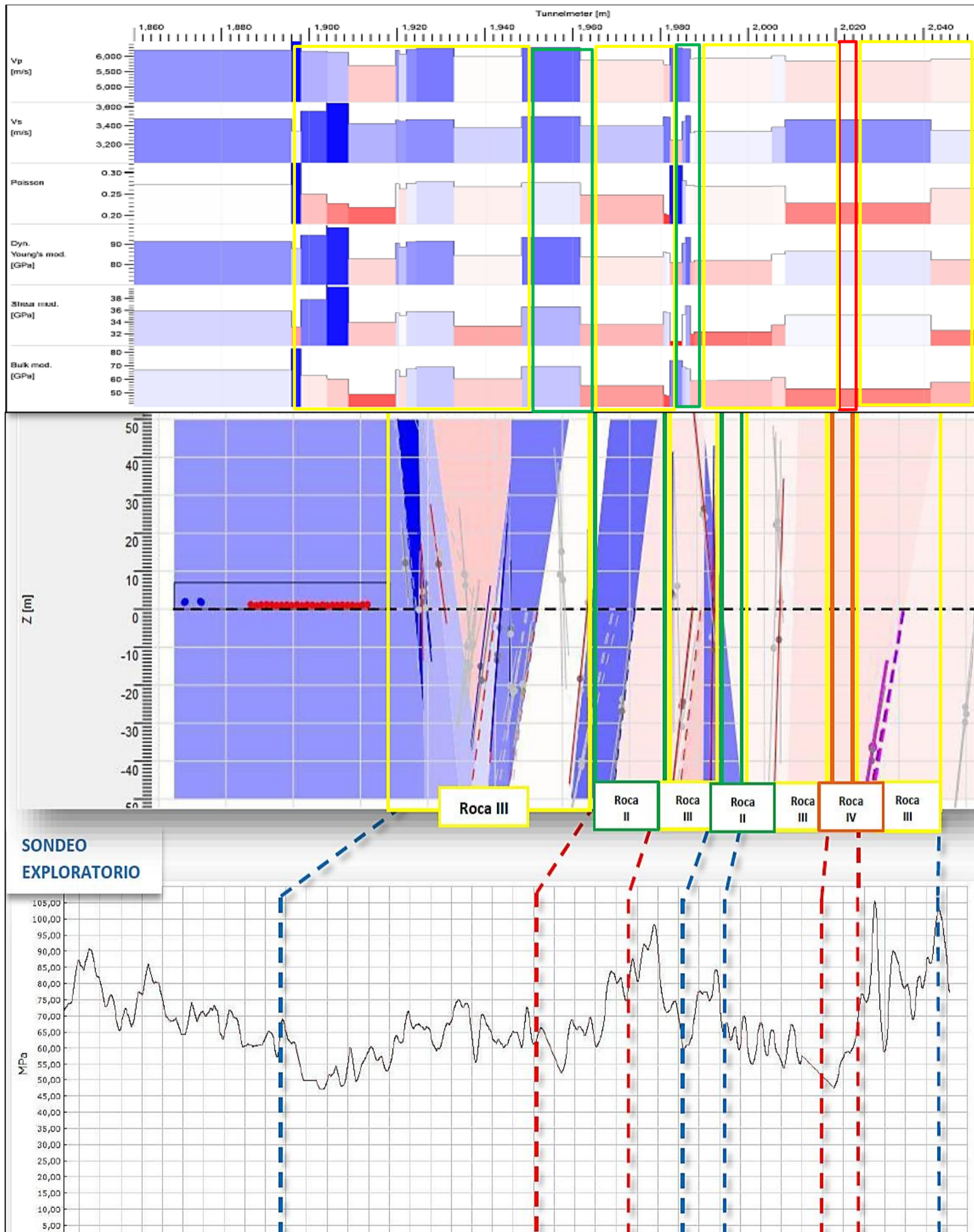
5.3.2. Correlación del TSP y Sondeo mecánico exploratorio

Se realizó la correlación entre el sondaje mecánico exploratorio con el TSP que se encuentran entre las progresivas 1+888.00 hasta la progresiva 2+050.00.

Pudiendo observar que en el tramo trabajado podemos identificar 7 zonas diferenciadas (Figura 49), las cuales compararemos entre ellas que son descritas a continuación:

Figura 49

Correlación del sondaje mecánico exploratorio y el TSP.



Fuente: Software "Amberg TSP PLUS" – DNA DRILL LOG

- **Zona 1:** Con velocidades Vp de 6100 m/s y Vs de 3300 con módulos dinámicos de Young en el rango de 80 GPa; indicándonos un macizo rocoso resistente, con algunos reflectores que muestran presencias de estructuras, la resistencia calculada en este tramo calculada a partir del sondaje mecánico está entre 60 y 70 Mpa, con picos que suben y bajan lo que corrobora que se está atravesando estructuras geológicas que baja la calidad del macizo rocoso. Considerando una roca tipo III

- **Zona 2:** Con velocidades mayores Vp de 6100 m/s y Vs de 3400 con módulos dinámicos de Young en el rango de 97 GPa; indicándonos un macizo rocoso bastante resistente, sin presencia de estructuras geológicas, con picos que tiende a una subida y luego una bajada (60 y 70 Mpa) justo en el cambio de roca de una roca tipo II para esta zona a una zona roca tipo III.

- **Zona 3, 4 y 5:** Con velocidades que varían entre VP 5600 a 5800, Vs 3250 y 3500, con módulos de Young que varían entre 82 y 88 GPa, encontrando poca presencia de reflectores que muestra que nuestro macizo rocoso es de buena a regular resistencia, con picos que tiende a una subida y luego una bajada 70 a 55 Mpa. Corroborando ambos sondajes que guardan relación en cierta manera.

- **Zona 6:** Tenemos una pequeña zona con un Vp 5200 y un Vs de 3200, con bastante reflectores y con la correlación del sondaje tenemos un pico de bajada bastante abrupto que hace el cambio de roca a Tipo IV.

- **Zona 7:** Se verifican reflectores puntuales notándose ligeramente alterado tratándose de un macizo rocoso regular, roca tipo III.

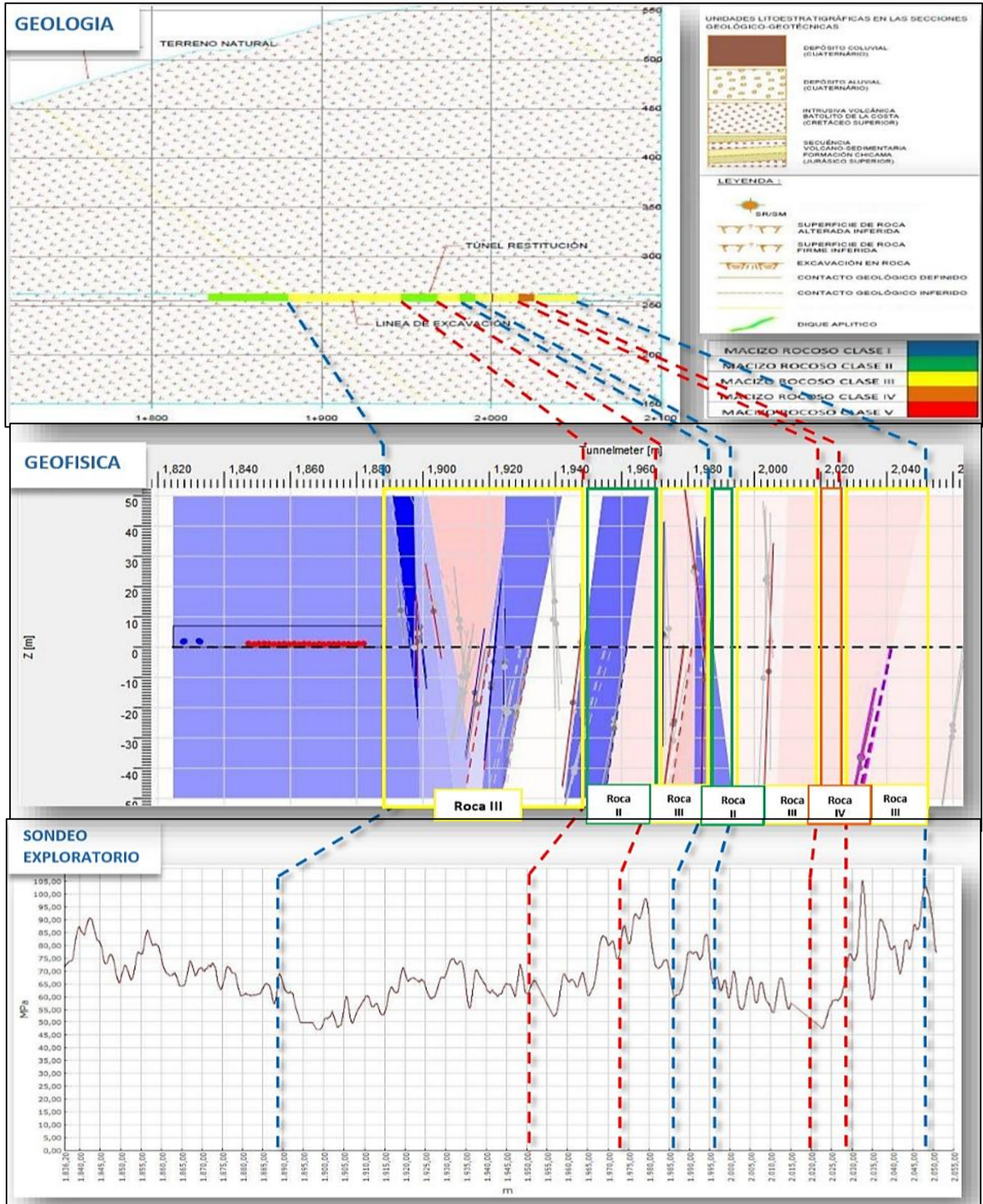
5.3.3. Correlación del TSP y Sondeo mecánico exploratorio y la Geología

Según el mapeo geológico diario que se realizó, junto con los resultados del sondaje mecánico exploratorio y el TSP, nos damos cuenta que el cambio de roca que se va dando en la geología de la zona coincide con los métodos realizados en este tramo, ya que la información de los distintos parámetros geológicos – geotécnicos coinciden de manera acertada conforme se va avanzando en el frente de excavación.

Realizando una tabla donde describimos los valores obtenidos en este tramo evaluado (Tabla 15).

Figura 50

Correlación de la geología de la zona con el sondaje mecánico exploratorio y el TSP.



Fuente: Software "Amberg TSP PLUS" – DNA DRILL LOG-Mapeo Geológico

Tabla 15

Correlación de Datos Mapeo geomecánico en campo Sondeo mecánico Exploratorio y el TSP entre las progresivas 1+888.60 al 2+052.80

CORRELACIÓN DE DATOS DEL SONDEO MECÁNICO EXPLORATORIO – TSP									
Nº Voladura	Fecha	Pk Inicial (m)	Pk Final (m)	Tipo Roca (Campo)	Resistencia Sondeo (Mpa)	Vp (m/s) - TSP	Vs (m/s) - TSP	Módulo Dinámico de Young (Gpa) - TSP	Poisson ratio
Vol 485	24/09/2016	1+884.60	1+888.60	III	90.0	6207	3474	85	0.27
Vol 486	28/09/2016	1+888.60	1+893.00	III	95.0	5801	3301	79	0.26
Vol 487	29/09/2016	1+893.00	1+897.30	III	95.0	5832	3280	78	0.26
Vol 488	29/09/2016	1+897.30	1+901.60	III	90.0	6152	3554	94	0.25
Vol 489	3/10/2016	1+901.60	1+905.90	III	58.0	6129	3640	98	0.23
Vol 490	3/10/2016	1+905.90	1+909.90	III	65.0	5697	3420	83	0.22
Vol 491	4/10/2016	1+909.90	1+913.90	III	68.0	5697	3420	83	0.22
Vol 492	5/10/2016	1+913.90	1+918.00	III	65.0	6202	3460	91	0.27
Vol 493	6/10/2016	1+918.00	1+922.10	III	70.0	6074	3449	89	0.26
Vol 494	6/10/2016	1+922.10	1+926.00	III	65.0	6223	3466	91	0.28
Vol 495	7/10/2016	1+926.00	1+929.80	III	60.0	6260	3465	91	0.28
Vol 496	7/10/2016	1+919.80	1+933.30	III	70.0	5988	3377	84	0.27
Vol 497	8/10/2016	1+933.30	1+937.80	III	65.0	5988	3377	84	0.27
Vol 498	8/10/2016	1+937.80	1+942.30	III	60.0	5988	3377	84	0.27
Vol 499	9/10/2016	1+942.30	1+946.60	III	65.0	5988	3377	84	0.27
Vol 500	9/10/2016	1+946.60	1+951.10	III	65.0	5988	3377	84	0.27
Vol 501	10/10/2016	1+951.10	1+955.60	II	68.0	6289	3497	93	0.28
Vol 502	10/10/2016	1+955.60	1+959.90	II	70.0	6289	3497	93	0.28
Vol 503	11/10/2016	1+959.90	1+964.40	II	70.0	6289	3497	93	0.28
Vol 504	11/10/2016	1+964.40	1+968.90	II	65.0	6289	3497	93	0.28
Vol 505	12/10/2016	1+968.90	1+973.20	II	75.0	6289	3497	93	0.28

Vol 506	12/10/2016	1+973.20	1+977.70	III	80.0	5862	3396	84	0.25
Vol 507	13/10/2016	1+977.70	1+982.20	III	75.0	5731	3495	86	0.20
Vol 508	13/10/2016	1+982.20	1+986.70	III	70.0	5707	3491	86	0.20
Vol 509	15/10/2016	1+986.70	1+991.10	II	80.0	6249	3508	93	0.27
Vol 510	15/10/2016	1+991.10	1+995.60	II	75.0	6249	3508	93	0.27
Vol 511	16/10/2016	1+995.60	2+000.10	III	60.0	5931	3338	82	0.27
Vol 512	16/10/2016	2+000.10	2+004.40	III	65.0	5931	3338	82	0.27
Vol 513	17/10/2016	2+004.40	2+008.90	III	65.0	5931	3419	84	0.27
Vol 514	17/10/2016	2+008.90	2+013.40	III	60.0	5840	3464	86	0.26
Vol 515	18/10/2016	2+013.40	2+017.90	III	60.0	6229	3112	74	0.33
Vol 516	18/10/2016	2+017.90	2+022.40	III	55.0	5669	3174	72	0.27
Vol 517	19/10/2016	2+022.40	2+026.90	IV	50.0	5668	3170	72	0.27
Vol 518	20/10/2016	2+026.90	2+031.40	IV	50.0	5668	3170	72	0.27
Vol 519	21/10/2016	2+031.40	2+035.90	III	60.0	6134	3328	84	0.29
Vol 520	21/10/2016	2+035.90	2+040.30	III	75.0	6134	3328	84	0.29
Vol 521	22/10/2016	2+040.30	2+044.50	III	80.0	6134	3328	84	0.29
Vol 522	22/10/2016	2+044.50	2+048.50	III	85.0	6134	3328	84	0.29
Vol 523	23/10/2016	2+048.50	2+052.80	III	85.0	6187	3346	85	0.29

Fuente: Proyecto Túnel Restitución Chavimochic III Etapa – La Libertad

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

El trabajo realizado permitió conocer las características físicas del macizo rocoso en el frente de avance del túnel Restitución mediante los sondajes mecánicos exploratorios y la predicción sísmica para túneles (TSP), en caso de los sondeos mecánicos exploratorios se obtuvo parámetros geomecánicos relacionados directamente a la resistencia en compresión de la roca al momento de la perforación, y en caso del TSP información geológica y geotécnica precisa y ágil, incrementando la fiabilidad en la identificación de zonas de fallas y fracturas, obteniendo propiedades mecánicas del macizo rocoso.

La correlación de ambas técnicas coincide entre sí, se relacionan entre ellas complementándose una con la otra; pero siendo hasta el momento el TSP la metodología más completa y con mayor información, por lo que no solo abarca el frente de excavación sino también la zona circundante al frente de avance del túnel.

La aplicación de estas metodologías tendrá un efecto positivo en la producción y avance de construcción del túnel, al poder optimizar su proceso de excavación (voladura) en función de la geología y sus parámetros geomecánicos.

Las informaciones resultantes del ensayo, tanto en aspectos de resistencia del macizo, litológicos como estructurales, suministran buena información al momento del análisis e interpretación.

Los resultados de los parámetros y valores utilizados extrapolados a los frentes evaluados han coincidido con las predicciones inferidas.

6.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda invertir en tecnologías innovadoras como las que presentamos, ya que nos brinda un gran soporte en poder realizar los estudios o trabajos que se realicen en este mundo subterráneo; para así tener conocimiento de las características del macizo rocoso, peligros geológicos, que se presenten durante el trabajo.

Se recomienda mantenerse actualizado con los últimos avances tecnológicos en este campo profesional, para poder contar con las herramientas necesarias para realizar un buen trabajo y lo más importante proteger la integridad del equipo de trabajo de la empresa.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, N., Chen, G., Kociu, S., Luna, R., & Thitimakorn, T. (2003). *Vertical Shear-Wave Velocity Profiles Generated From Spectral Analysis Of Surface Waves: Field Examples*, Report RDT 03-006,. *Development and Technology*.
- Asociación Internacional de Geología del Ingeniero y el Colegio de Ingenieros del Reino Unido. (1990). *Engineering Geology and Geotechnics for Infrastructure Development in Europe*.
- Azañón Hernández, J. (2005). *Geología Estructural*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Backus, G. (1978). *Diffraction of Seismic Waves*.
- Badi, G. (2011). *Atenuación de Ondas Sísmicas: Modelos y Métodos de determinación*. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/2049/II_-_Atenuaci%C3%B3n_de_ondas_s%C3%ADsmicas__modelos_y_m%C3%A9todos_de_determinaci%C3%B3n.pdf?sequence=8&isAllowed=y
- Baptiste Tary, J., & Molina, I. (2022). Sismología. *Universidad de los Andes Colombia*. <https://geociencias.uniandes.edu.co/es/investigacion/sismologia>
- Barton, N., & Grimstad, E. (2014). *Forty Years with the Q-System in Norway and Abroad. Fjell Sprengningsteknikk Bergmekanikk/Geoteknikk 2014*.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. Springer Verlag, 6, 189-236.

- Bieniawski, Z. T. (1973). *Engineering classification of jointed rock masses*. *Transactions, South African Inst, of Civil Engineers*, 15 (12) 335-344.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. . New York: John Wiley & Sons.
- Cañizal, J., Fernández, G., & Miranda, M. (2016). *Geofísica, Geotécnica y Prospección* .
https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2131/course/section/1942/tema_9.pdf
- Cossio, A., & Jaen, H. (1967). *Boletín A 17: Geología de los cuadrángulos de Puémape, Chocope, Otuzco, Trujillo, Salaverry y Santa*. Boletín, Lima.
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/134#files>
- Diaz, J., Medina, C., & Sánchez, L. (2019). *Informe de Ingeniería de Rocas II*.
- Dickmann, T. (2002). *Nuevo sistema de predicción sísmica en túneles: localización y caracterización de fracturas o zonas de falla*. *Ingeo Túneles, Serie: Ingeniera de Túneles*, . Madrid.: Editor C. Lopez Jimeno.
- Dickmann, T. (2005). *Seismic Prediction While Tunnelling In Hard Rock*.
- Dickmann, T. (2008). *Tunnel Seismic Prediction– Tsp 203 Olmos Tunnel*.
- Dickmann, T. (2012). *Predicting Rock Conditions Ahead Of The Face*.
- Dickmann, T., & Awasthi, R. (s.f.). The Tunnel Seismic Prediction Method and its impact on logistic optimisation in Tunnelling. *Proceedings of ROCKSITE-99*. 1999, 6(9). 203-207.
- Dna-Blast Latinoamerica s.a.c. (s.f.). *DNA-TEC-N-002-B-Odebrecht-técnica para el Reconocimiento Geológico*.

- Encyclopedia Britannica. (2020). *Main types of seismic waves*.
<https://www.britannica.com/science/seismic-wave/images-videos>
- Estrada, L. (2008). *Prospección sísmica*.
<https://catedras.facet.unt.edu.ar/geofisica/wp-content/uploads/sites/4/2014/02/Prospeccion-Sismica-para-Ingenieros.pdf>
- Everett, M. (2013). *Near – Surface Applied Geophysics*. Cambridge University, United Kingdom.
- Fabián, E., & Guerrero, J. (2017). *Aplicación de la geomecánica en los frentes de avances de carbón para prevenir accidentes por desprendimientos de rocas en la CIA. Minera Reyna Cristina – Ancash (tesis de pregrado)*. Universidad Nacional de Huancavelica. , Huancavelica. .
- Fernández-Gutiérrez. (abril de 12 de 2017). *Correlación entre el índice RMR de Bieniawski y el índice Q de Barton en formaciones sedimentarias de grano fino*. Retrieved 03 de noviembre de 2018, from <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/5854/6840>
- Fowler, C. (2005). *The Solid Earth, an Introduction to Global Geophysics*. Cambridge University, United Kingdom.
- Gaya, M. (2004). *Métodos sísmicos*.
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3404/41205-7.pdf>
- Gonzales de Vallejo, L. F. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación. https://www.u-cursos.cl/usuario/c19094b1ea89f1f08e243796b671e2e5/mi_blog/r/Ingenieria_Geologica_-_Gonzalez_de_Vallejo.pdf

- Hecht-Méndez, J., & Dickmann, T. (2016). *3D-TSP – Predicción geológica avanzada durante proyectos de tunelación en los Andes (XV colombian geotechnical congress & II international specialized conference of soft rocks)*. Cartagena: Amberg Technologies AG, Regensdorf-Watt, Switzerland .
- Instituto Costarricense de electricidad. (s.f.). *Proyecto de ampliación de la planta hidroeléctrica cachi. (documento informativo – proyecto túnel)*. Costa Rica.
- Jemela, A. (2012). *Rock Mass Classification in Tunnelling based on Seismic Velocities and Tunnel-Driving Data using Support Vector Machines. Eingereicht im Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin*. Germany.
- Laurente, R. (2017). *Uso de shotcrete vía húmeda con fibra metálica y su influencia en la caída de rocas en sociedad minera Corona S.A – c (tesis de pregrado)*. Universidad Nacional del Centro del Perú. , yauricocha - Huancavelica.
- Li, S., Xue, Y., & Tian, H. (2016). *Identifying the Geological Interface of the Stratum of Tunnel Granite and Classifying rock mass according to Drilling energy Theory*. Saudi Society for Geoscience.
- Lopez, A. (2016). *Evaluación geofísica geotécnica del Proyecto Central Hidroeléctrica Chilia, Región Huánuco-Ancash (tesis de pregrado)*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. , Arequipa. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2535/GFloprar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- López, J., Mejía, J., & Danilo, N. (2008). *Aplicación del Método de Refracción Sísmica para la determinación de Velocidades de Ondas P*. Universidad de El Salvador.

- Nava, A. (1998). *Terremotos*. Biblioteca del Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa.
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/34/html/sec_8
- Pei, Q., Ding, X., Lu, B., Zhang, Y., Huang, S., & Dong, Z. (2016). *An Improved Method for Estimating In Situ in an Elastic Rock Mass and its Engineering Application*. Open Geosci.
- Rat., M. (1995). Characterization of variable weathered profiles by using DPR Bourget . Interprétation semi-automatique des enregistrements Des paramètres de forage (sondeuses hydrauliques en rotation),. *Revue Française de Géotechnique.*, 73. 3 - 14.
- Rivera, M., Piedra, R., & Paripanca, Y. (2021). *Ensayos Geofísicos de Refracción Sísmica y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones*.
- Schön, J. (2015). *"Physical Properties of Rocks", Fundamentals and principle Petrophysics* (Vol. Volume 65). (2. Edition., Ed.) Amsterdam: Elsevier.
- Serway, R., & Jewett Jr., J. W. (2008). *Física para ciencias e ingeniería con física moderna*.
<http://www2.fisica.unlp.edu.ar/materias/fisgenI/T/Libros/Serway-7Ed.pdf>
- Shearer, P. (1999). *Introduction to Seismology*. Londres: Cambridge University Press.
- Shustov, V. (2012). *Seismic fitness: on some features of earthquake engineering*.
- Sjogren, B. (1984). *Shallow Refraction Seismic*. New York: Chapman and Hall,.

- Somerton, W. (1959). A Laboratory Study of Rock Breakage by Rotary Drilling. *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 216, 92–97.
<http://www.vrhistory.com/Locations/Somerton.pdf>.
- UNAM, U. N. (2020). *La sismología es una disciplina*.
<http://www.sgc.gob.mx/introgeo/geo911/sismicidad/sismicidad.html>.
- Van Heerden, W. L. (1987). General relations between static and dynamic moduli of rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, 24(6), 381-385.
- Zhou, H. W. (2014). *Practical seismic data analysis*. Huston: Cambridge University Press.
https://www.researchgate.net/publication/280134697_Practical_Seismic_Data_Analysis

ANEXOS

SONDEOS MECANICOS EXPLORATORIOS

- SONDEO EXPLORATORIO TR-1615
- SONDEO EXPLORATORIO TR-1620
- SONDEO EXPLORATORIO TR-1635

SONDEO EXPLORATORIO TR-1615

CHAVIMOCHIC	PROYECTO ESPECIAL CHAVIMOCHIC - III ETAPA	FECHA y HORA:		
	REPORTE DE SONDAJE PREDICTIVO	TURNO:		
		CÓDIGO SONDAJE EXPLORATORIO:		

DATOS GENERALES

TÚNEL	Túnel Restitución	PROGRESIVA DE INICIO	1+024.10
EQUIPO DE SONDAJE UTILIZADO	Rockdrill 10001		
TIPO DE PERFORACIÓN	Rotoperforación		
TIPO DE BARRAS DE PERFORACIÓN	T-38	DIÁMETRO DE BARRA:	64 mm.
		LONGITUD DE BARRA:	3.66 m
OPERADOR			
RESPONSABLE DE SONDAJE	G. Silva		

EJECUCIÓN DEL SONDAJE

DATOS DE CAMPO	BARRA 01	BARRA 02	BARRA 03	BARRA 04	BARRA 05	BARRA 06	BARRA 07	BARRA 08
INICIO DE PERFORACIÓN	4:29	4:34	4:38	4:43	4:47	4:50	4:58	5:05
FINAL DE PERFORACIÓN	4:32	4:37	4:42	4:46	4:49	4:56	5:04	5:11
TIEMPO UTILIZADO (HH:MM:SS)	0:03:00	0:03:00	0:04:00	0:03:00	0:02:00	0:06:00	0:06:00	0:06:00
PROFUNDIDAD ALCANZADA	2.50	6.16	9.82	13.48	17.14	20.8	24.46	28.12

PRESIÓN INICIAL DE PERFORACIÓN	74	88	89	87	87	89	87	90
PRESIÓN INTERMEDIA DE PERFORACIÓN	72	87	88	87	87	88	88	89
PRESIÓN FINAL DE PERFORACIÓN	87	89	87	85	89	85	89	87

ASPECTOS GEOLÓGICO - GEOMECÁNICOS

TIPO DE ROCA DEL FRENTE DE PERFORACIÓN	SEDIMENTARIA	VOLCÁNICA	INTRUSIVA
CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE ROCA EN FRENTE DE PERFORACIÓN (Q-BARTON)	$\phi = 0.5$		

RECUPERACIÓN DE DETRITO

COLOR DE DETRITO LAVADO	Negro	Negro	Negro	Negro	G. oscuro a claro	G. claro a blanco	G. claro	G. claro a G. oscuro
-------------------------	-------	-------	-------	-------	-------------------	-------------------	----------	----------------------

RESISTENCIA DEL MATERIAL PERFORADO A LA BARRA DE PERFORACIÓN


ROCA MUY RESISTENTE								
ROCA RESISTENTE								
ROCA DE REGULAR RESISTENCIA			X			X	X	
ROCA POCO RESISTENTE	X	X		X	X			X
ROCA FRIABLE / SIN RESISTENCIA								

PRESENCIA DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

PERFORACIÓN CONTINUA / DISCONTINUA INDICA PRESENCIA DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS	Continua	Continua	Continua	Continua	Continua	Continua	Continua	Continua
PERFORACIÓN NORMAL / CON DIFICULTAD / TRUNCADA INDICA PRESENCIA DE ESTRUCTURAS	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
INCREMENTO / REDUCCIÓN DE PRESIÓN DEPERFORACIÓN POR CAUSA DE ESTRUCTURAS	-	-	-	-	-	-	-	-
COLOR DE DETRITO LAVADO	Negro	Negro	Negro	Negro	G. oscuro a claro	G. claro a blanco	G. claro	G. claro a G. oscuro
DIAGNOSTICO DE ESTRUCTURA GEOLÓGICA	-	-	-	-	-	-	-	-

PREDICCIÓN DE AVANCE EN PROFUNDIDAD EXPLORADA

De los parámetros obtenidos de la perforación, se observó presencia de material Sedimentario casi en su totalidad, excepto entre el PIS 1+040-1+048, presentándose material de origen Volcánico observándose que los valores de resistencia tienen un rango de 18 a 40 MPa, por lo que se recomienda que los tramos deben ser evaluados por el área de Geología.


 GEOFÍSICO DE CAMPO

 GEÓLOGO DE CAMPO

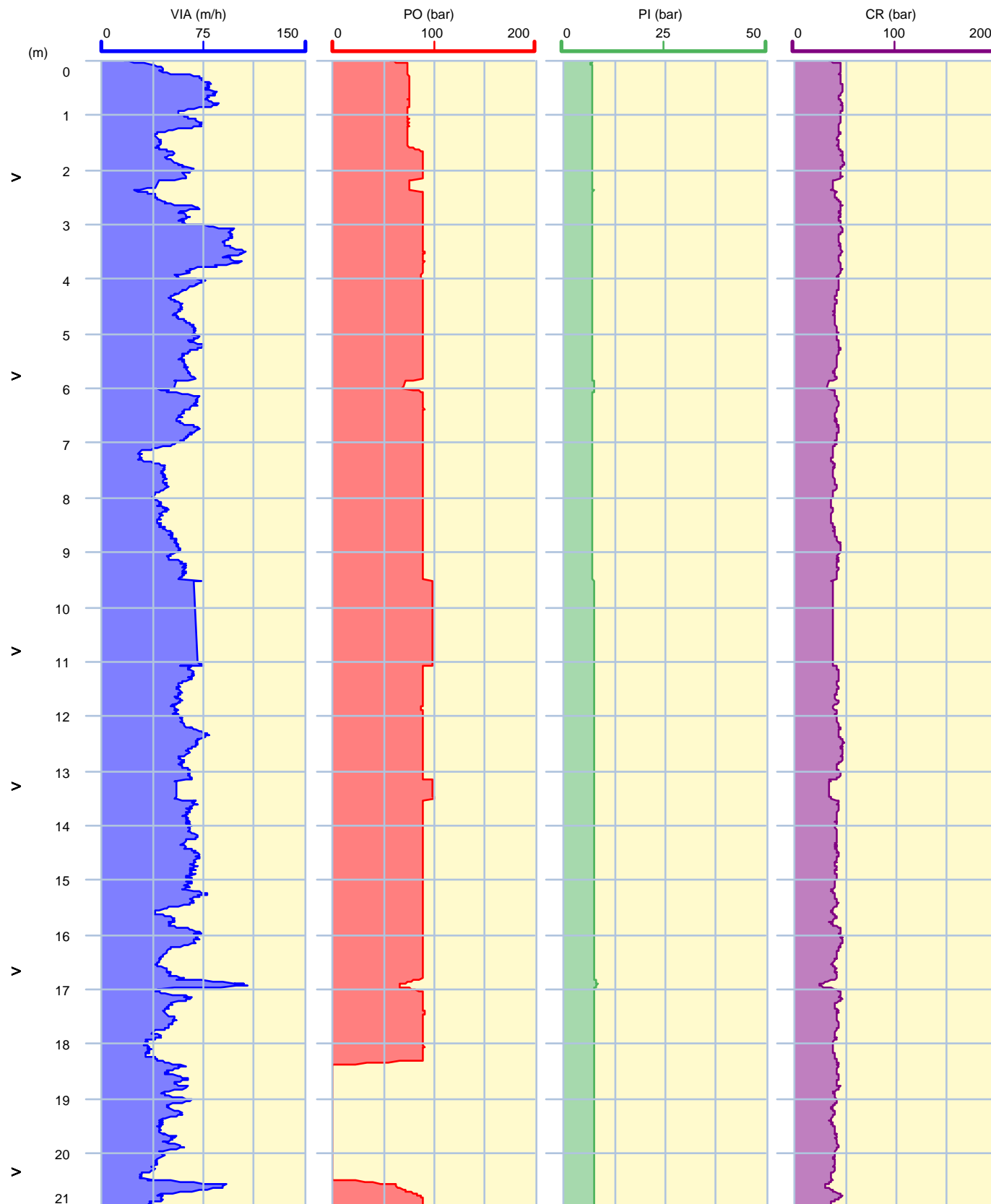
 SUPERVISOR

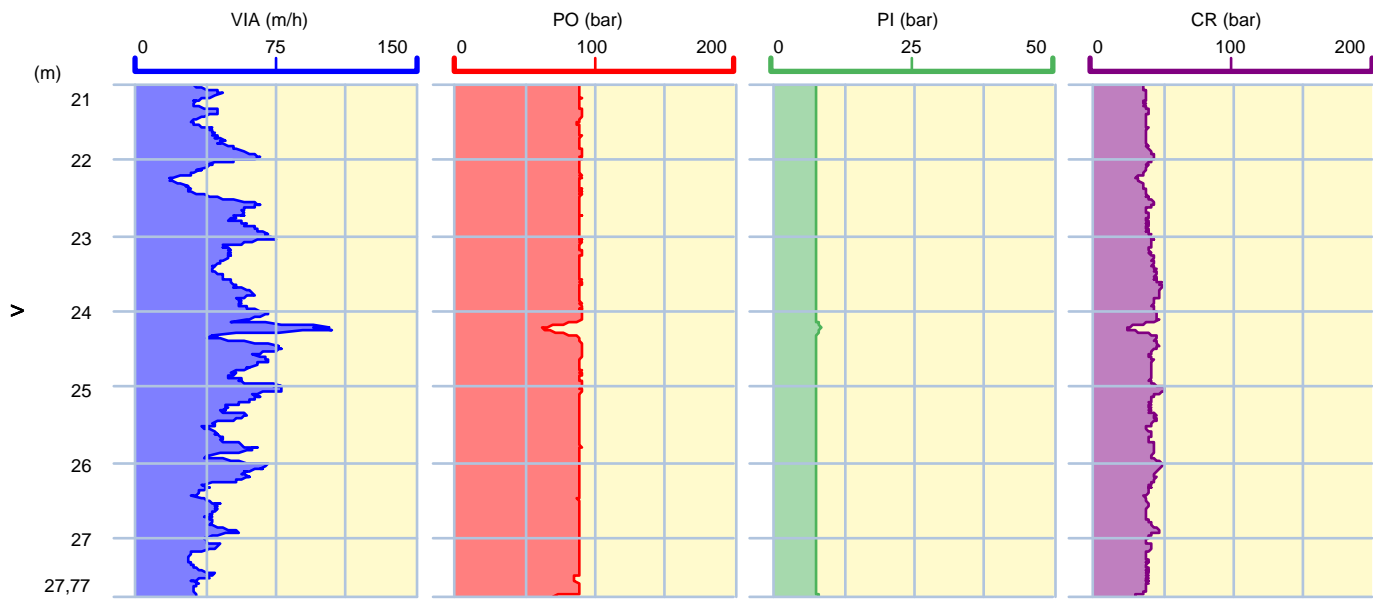
Informe de parámetros de perforación - FP0020

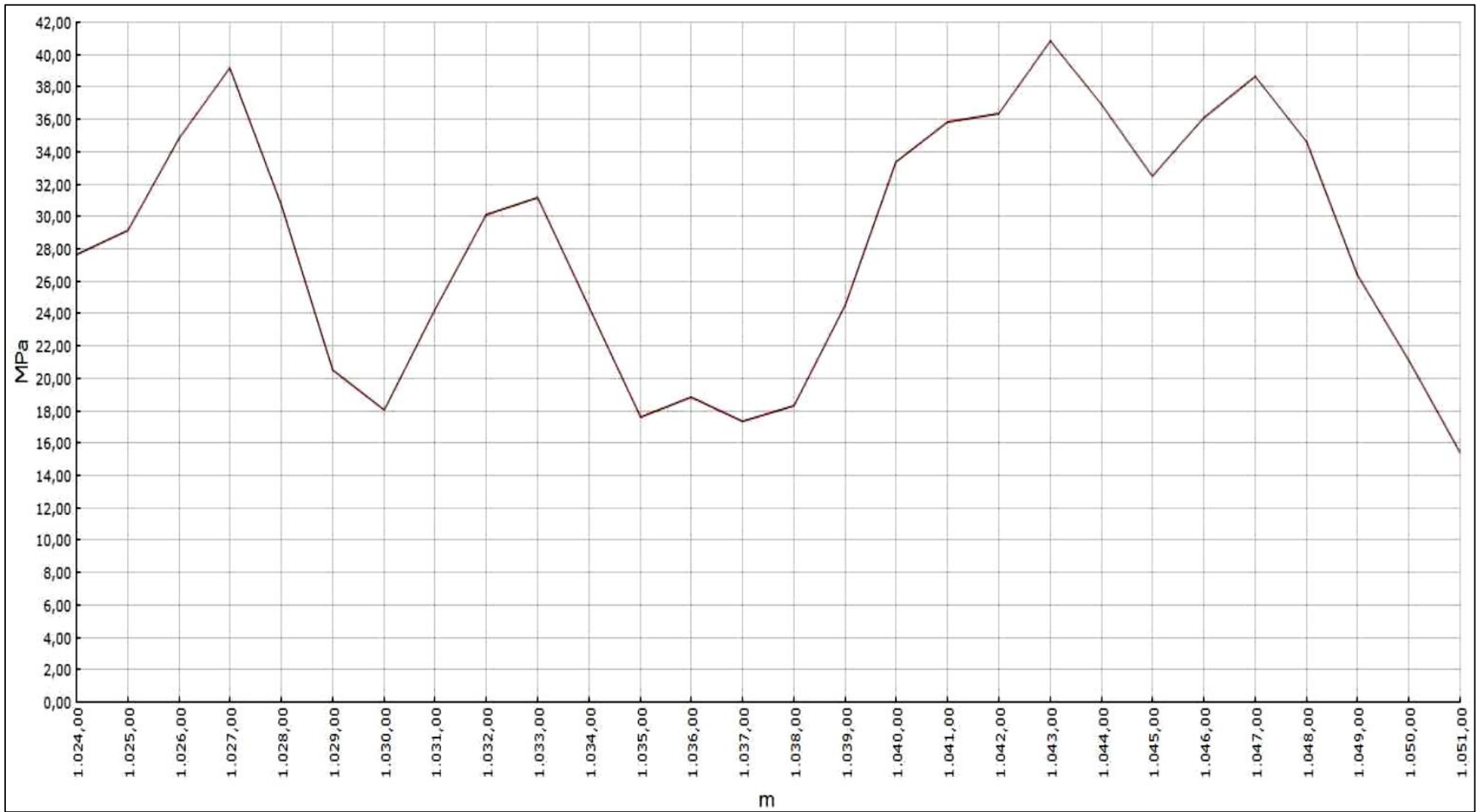
Site

Client

La perforación	FP0020	Fecha de Inicio	04/05/2016 16:15:59
Archivo	50253160504161559D	Fecha de finalización	04/05/2016 17:06:11
Alta	0,00 m	Max Depth	27,77 m
X Ángulo	0,00 °	Ángulo Y	0,00 °
Volumen Total	0,00 l	Escala	1/100
Máquina	DX680 - 05708010001	Duración	00:41:50







SONDEO EXPLORATORIO TR-1620

CHAVIMOCHIC	PROYECTO ESPECIAL CHAVIMOCHIC - III ETAPA	FECHA y HORA:	26-05-16	
	REPORTE DE SONDAJE PREDICTIVO	TURNO:	Día	
		CÓDIGO SONDAJE EXPLORATORIO:		

DATOS GENERALES TR-1620

TÚNEL	Restitución	PROGRESIVA DE INICIO	1+158.90
EQUIPO DE SONDAJE UTILIZADO	Rock drill 10003		
TIPO DE PERFORACIÓN	Rotoperforación		
TIPO DE BARRAS DE PERFORACIÓN	T-38	DIÁMETRO DE BARRA:	64 mm
OPERADOR			
RESPONSABLE DE SONDAJE	B. Fernández / G. Escobar.		

EJECUCIÓN DEL SONDAJE

DATOS DE CAMPO	BARRA 01	BARRA 02	BARRA 03	BARRA 04	BARRA 05	BARRA 06	BARRA 07	BARRA 08
INICIO DE PERFORACIÓN	14:49	14:54	15:00	15:04	15:09	15:15	15:20	15:25
FINAL DE PERFORACIÓN	14:52	14:59	15:03	15:08	15:14	15:19	15:25	15:31
TIEMPO UTILIZADO (HH:MM:SS)	00:02:18	00:05:25	00:03:49	00:04:31	00:05:29	00:04:20	00:05:08	00:06:00
PROFUNDIDAD ALCANZADA	2.81	6.39	10.00	13.66	17.36	21.05	24.68	28.20
PRESIÓN INICIAL DE PERFORACIÓN	70	78	74	80	74	80	74	81
PRESIÓN INTERMEDIA DE PERFORACIÓN	77	74	74	74	74	79	80	81
PRESIÓN FINAL DE PERFORACIÓN	78	78	79	80	80	79	81	81

ASPECTOS GEOLÓGICO - GEOMECÁNICOS

TIPO DE ROCA DEL FRENTE DE PERFORACIÓN	SEDIMENTARIA	VOLCÁNICA	INTRUSIVA
CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE ROCA EN FRENTE DE PERFORACIÓN (Q-BARTON)			

RECUPERACIÓN DE DETRITO

COLOR DE DETRITO LAVADO	Gris oscuro Negro	Blanco a G. claro	G. claro	G. claro	G. claro	G. claro a Blanco	Blanco a G. claro	G. claro
-------------------------	-------------------	-------------------	----------	----------	----------	-------------------	-------------------	----------

RESISTENCIA DEL MATERIAL PERFORADO A LA BARRA DE PERFORACIÓN

ROCA MUY RESISTENTE								
ROCA RESISTENTE								
ROCA DE REGULAR RESISTENCIA		X	X		X	X	X	X
ROCA POCO RESISTENTE	X			X				
ROCA FRIABLE / SIN RESISTENCIA								

PRESENCIA DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

PERFORACIÓN CONTINUA / DISCONTINUA INDICA PRESENCIA DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS	Continua	Continua	Continua	Continua	Continua	Continua	Continua	Continua
PERFORACIÓN NORMAL / CON DIFICULTAD / TRUNCADA INDICA PRESENCIA DE ESTRUCTURAS	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
INCREMENTO / REDUCCIÓN DE PRESIÓN DE PERFORACIÓN POR CAUSA DE ESTRUCTURAS	-	-	-	-	-	-	-	-
COLOR DE DETRITO LAVADO	G. oscuro Negro	Blanco a G. claro	G. claro	G. claro	G. claro	G. claro a Blanco	Blanco a G. claro	G. claro
DIAGNOSTICO DE ESTRUCTURA GEOLÓGICA	-	-	-	-	-	-	-	-

PREDICCIÓN DE AVANCE EN PROFUNDIDAD EXPLORADA

De acuerdo a los parámetros de perforación obtenidos en el sondeo mecánico se pudo observar que en la mayoría del tramo se encuentra la roca homogénea, teniendo un lavado del detrito de color gris claro a blanco, teniendo valores de resistencia entre un rango de 40 a 70 MPa, encontrando al macizo de baja a regular resistencia, esto debido al grado de fracturamiento que ha tenido la roca, por lo que se recomienda que los tramos deben ser evaluados por el área de Geología.


 GEOLOGO DE CAMPO

 GEOLOGO DE CAMPO

 SUPERVISOR

Imagen 1.- Ubicación del Sondeo Mecánico TR-1620 en el PK 1+158.90

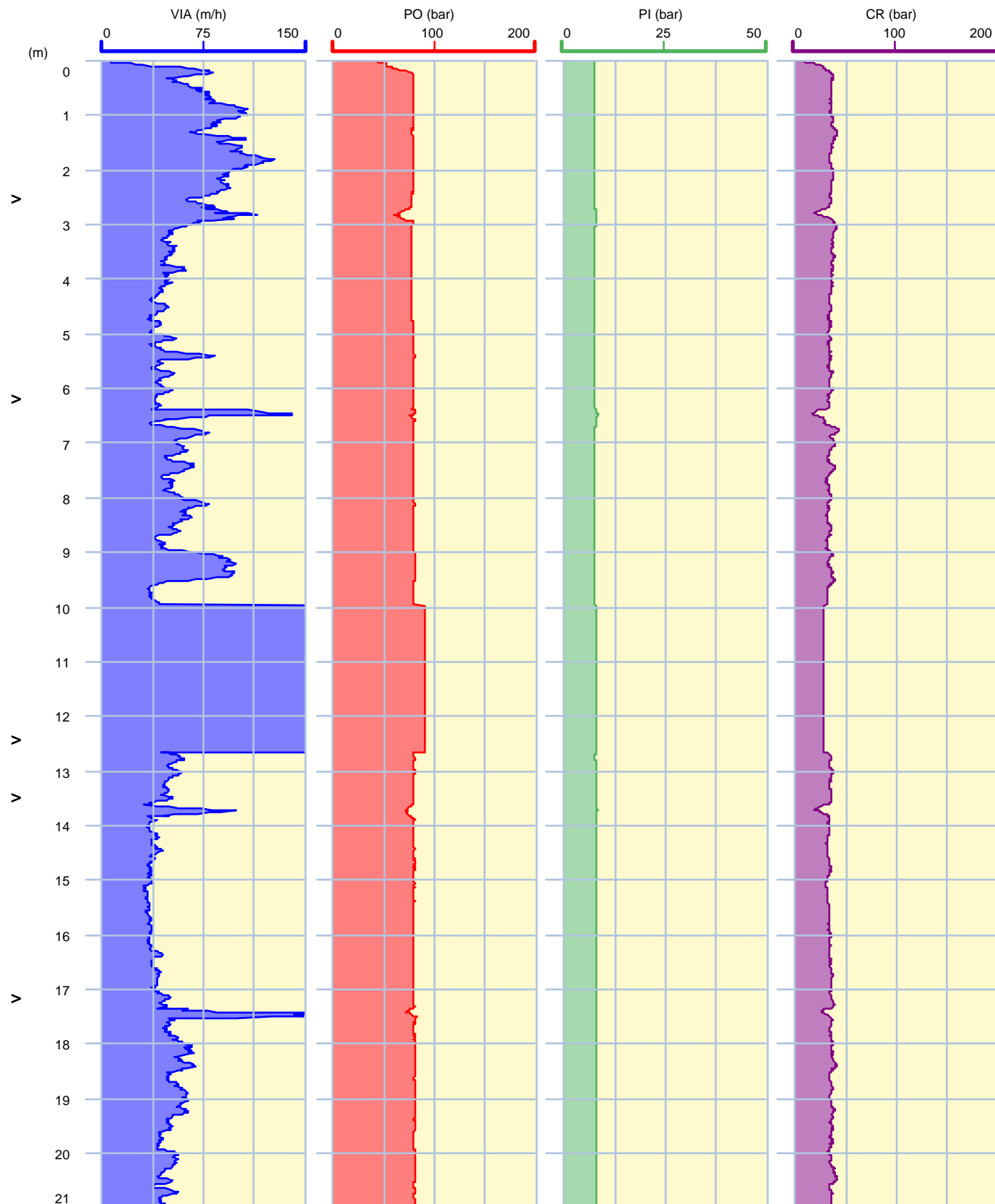


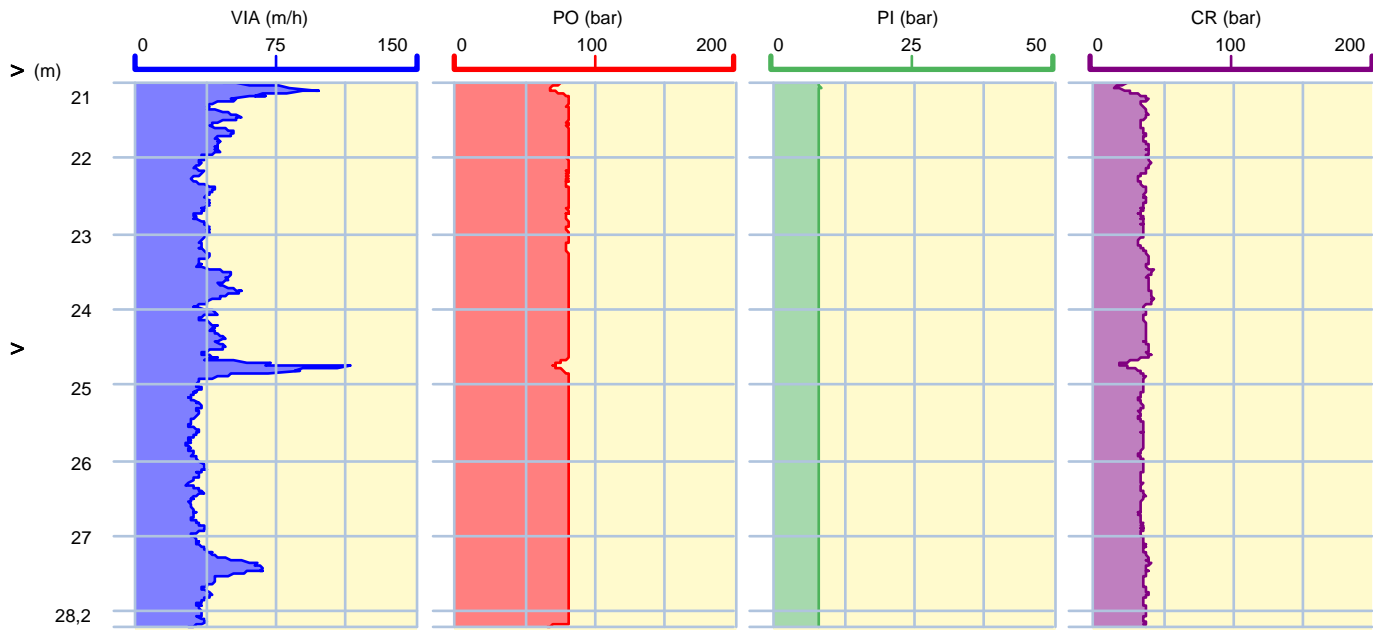
Informe de parámetros de perforación - FP0001

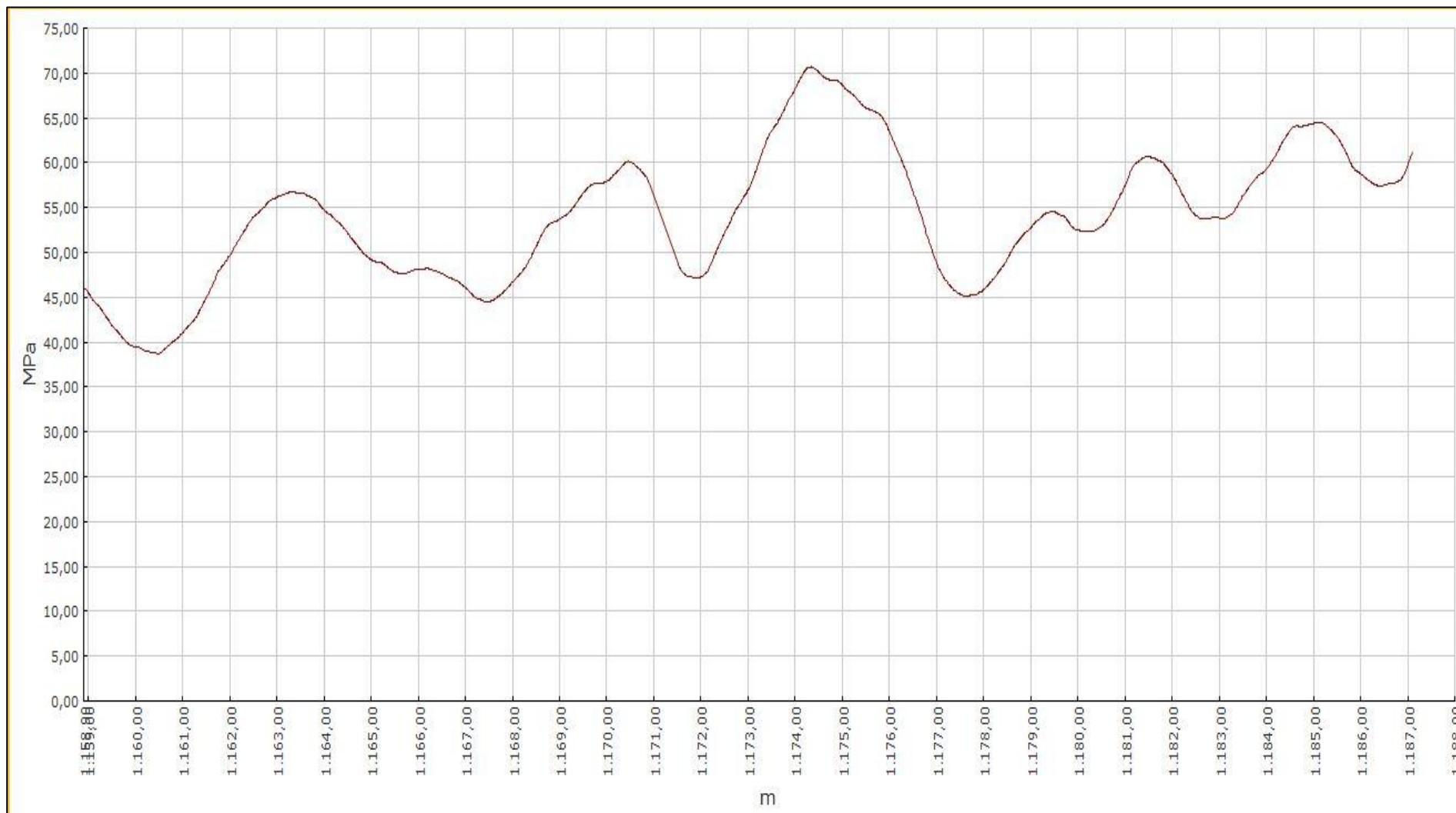
Site

Client

La perforación	FP0001	Fecha de Inicio	26/05/2016 14:48:48
Archivo	50254160526144848D	Fecha de finalización	26/05/2016 15:31:34
Alta	0,00 m	Max Depth	28,20 m
X Ángulo	0,00 °	Ángulo Y	0,00 °
Volumen Total	0,00 l	Escala	1/100
Máquina	DX 680 057 080 10003	Duración	00:42:43







SONDEO EXPLORATORIO TR-1635

CHAVIMOCHIC	PROYECTO ESPECIAL CHAVIMOCHIC - III ETAPA	FECHA y HORA:	05-07-16
	REPORTE DE SONDAJE PREDICTIVO	TURNO:	DIA
		CÓDIGO SONDAJE EXPLORATORIO:	

DATOS GENERALES

TÚNEL	Restitución	PROGRESIVA DE INICIO	1 + 404.00
EQUIPO DE SONDAJE UTILIZADO	Rock Drill 10003		
TIPO DE PERFORACIÓN	Reperforación		
TIPO DE BARRAS DE PERFORACIÓN	T-38	DIÁMETRO DE BARRA:	64 mm
		LONGITUD DE BARRA:	3.66 m.
OPERADOR	Juan Salvatierra		
RESPONSABLE DE SONDAJE	G. Escobar		

EJECUCIÓN DEL SONDAJE

DATOS DE CAMPO	BARRA 01	BARRA 02	BARRA 03	BARRA 04	BARRA 05	BARRA 06	BARRA 07	BARRA 08
INICIO DE PERFORACIÓN	12:43	12:48	12:54	13:01	13:08	13:14	13:23	13:31
FINAL DE PERFORACIÓN	12:48	12:54	13:01	13:06	13:14	13:22	13:30	13:37
TIEMPO UTILIZADO (HH:MM:SS)	00:05:43	00:06:01	00:06:05	00:05:54	00:06:31	00:07:31	00:07:23	00:06:47
PROFUNDIDAD ALCANZADA	2.65	6.33	9.99	13.65	17.31	20.96	24.60	28.04
PRESIÓN INICIAL DE PERFORACIÓN	62	79	88	87	88	87	89	91
PRESIÓN INTERMEDIA DE PERFORACIÓN	62	86	88	87	90	89	90	92
PRESIÓN FINAL DE PERFORACIÓN	62	87	87	87	87	89	91	91

ASPECTOS GEOLÓGICO - GEOMECÁNICOS

TIPO DE ROCA DEL FRENTE DE PERFORACIÓN	SEDIMENTARIA	VOLCÁNICA	INTRUSIVA
CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE ROCA EN FRENTE DE PERFORACIÓN (Q-BARTON)			

RECUPERACIÓN DE DETRITO

COLOR DE DETRITO LAVADO	G. Claro	G. Claro	G. Claro	G. Claro	G. Claro	G. Claro	G. Claro	G. Claro
-------------------------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

RESISTENCIA DEL MATERIAL PERFORADO A LA BARRA DE PERFORACIÓN

ROCA MUY RESISTENTE								
ROCA RESISTENTE		X	X	X	X	X	X	X
ROCA DE REGULAR RESISTENCIA	X							
ROCA POCO RESISTENTE								
ROCA FRIABLE / SIN RESISTENCIA								

PRESENCIA DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

PERFORACIÓN CONTINUA / DISCONTINUA INDICA PRESENCIA DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS	Continua	Continua	Continua	Continua	Continua	Continua	Continua	Continua
PERFORACIÓN NORMAL / CON DIFICULTAD / TRUNCADA INDICA PRESENCIA DE ESTRUCTURAS	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
INCREMENTO / REDUCCIÓN DE PRESIÓN DE PERFORACIÓN POR CAUSA DE ESTRUCTURAS	-	-	-	-	-	-	-	-
COLOR DE DETRITO LAVADO	G. Claro	G. Claro	G. Claro	G. Claro	G. Claro	G. Claro	G. Claro	G. Claro
DIAGNOSTICO DE ESTRUCTURA GEOLÓGICA	-	-	-	-	-	-	-	-

PREDICCIÓN DE AVANCE EN PROFUNDIDAD EXPLORADA

De acuerdo a los parámetros de perforación obtenidos en el sondeo mecánico, se pudo observar en todo el tramo al lavado del detrito un color gris claro; así mismo se obtuvieron valores de resistencia a la compresión que van de un rango de 65 a 100 MPa; tratándose de un mismo tipo de roca (volcánica), con las características ya mencionadas se prevé la persistencia de roca tipo II.

GEOFÍSICO DE CAMPO

GEÓLOGO DE CAMPO

SUPERVISOR

Figura N° 1: Ubicación del sondeo TR-1635_ Túnel Restitución

Pk 1+404.00

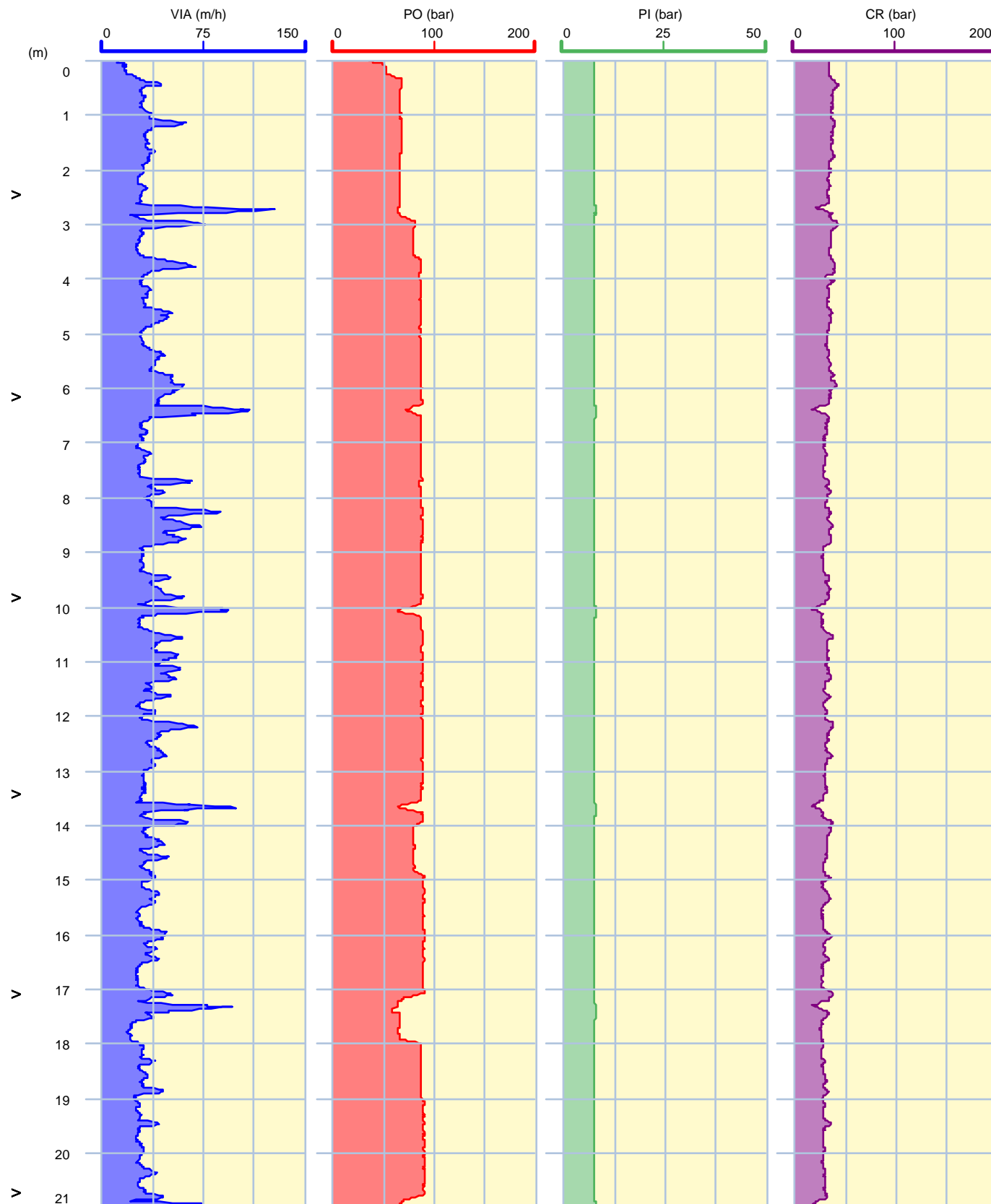


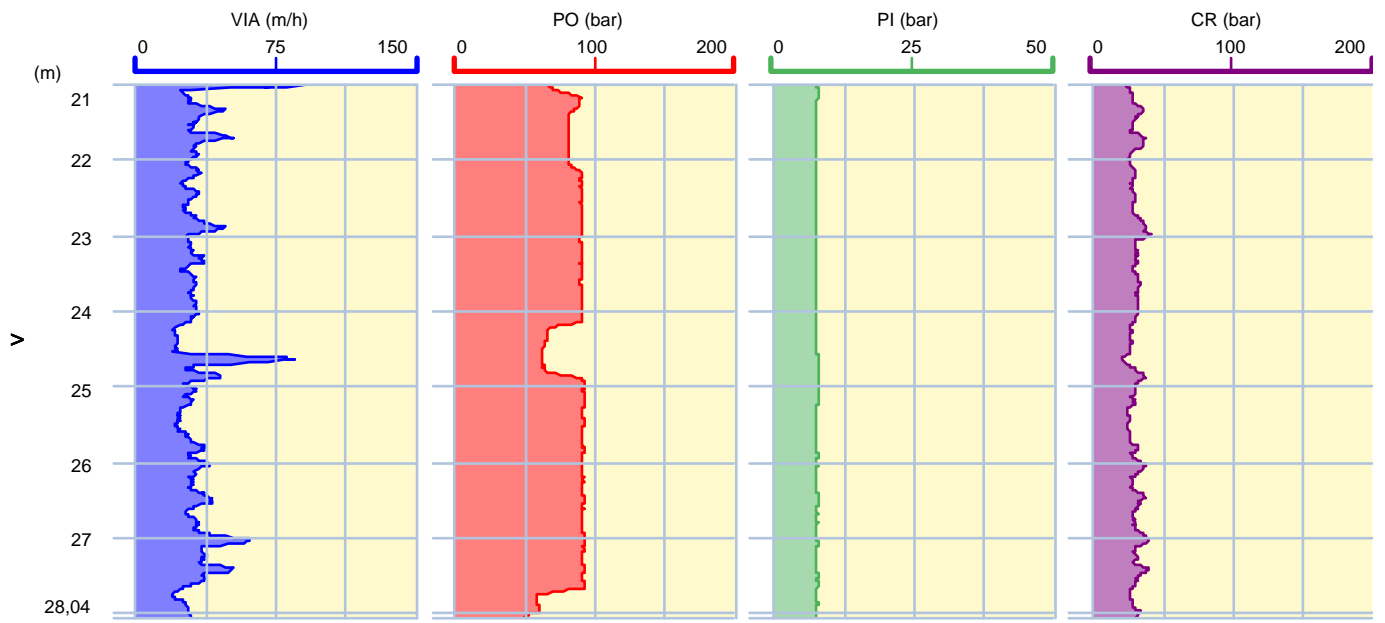
Informe de parámetros de perforación - FP0001

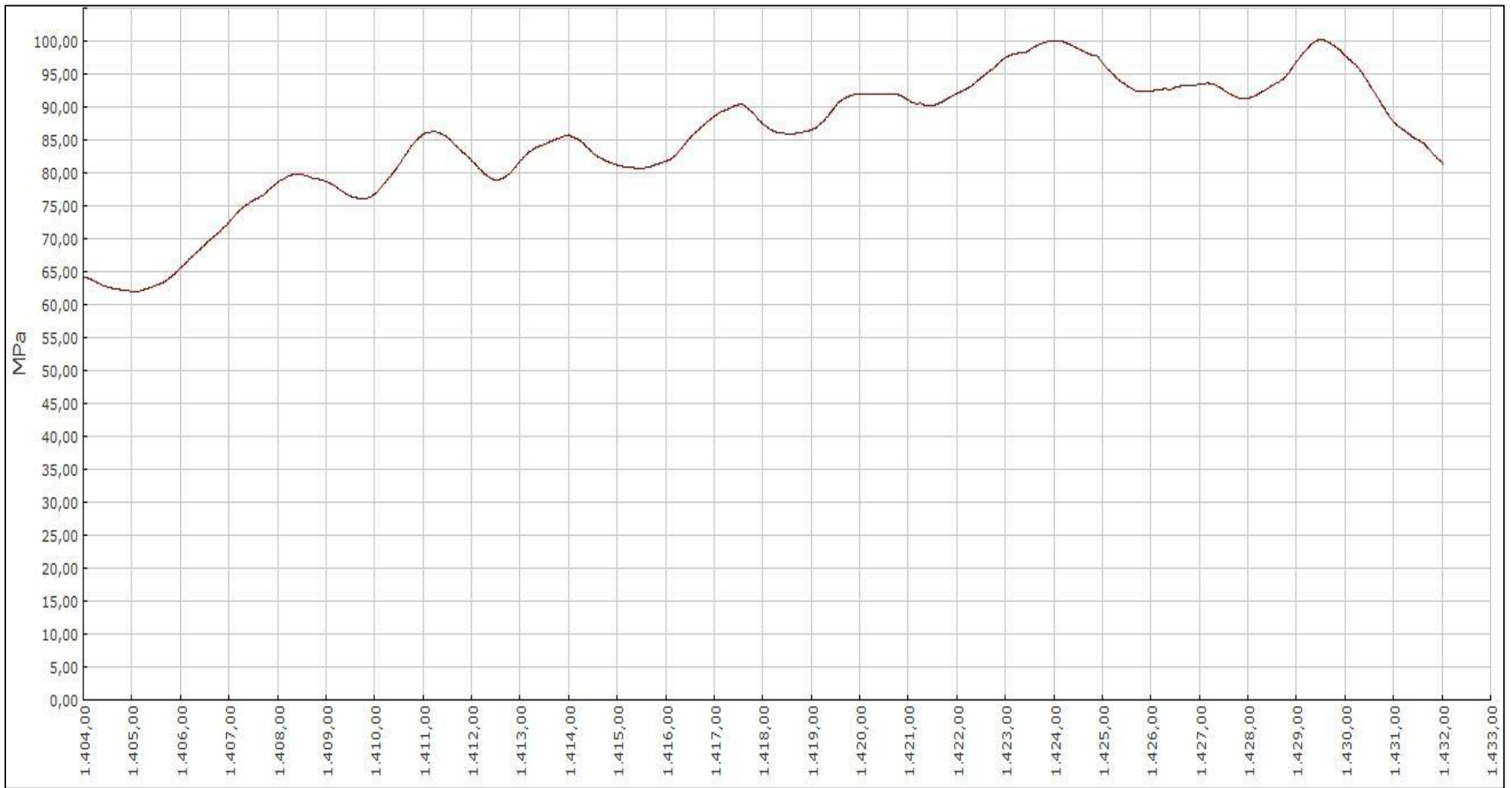
Site

Client

La perforación	FP0001	Fecha de Inicio	05/07/2016 11:39:30
Archivo	50254160705123930D	Fecha de finalización	05/07/2016 12:35:17
Alta	0,00 m	Max Depth	28,04 m
X Ángulo	0,00 °	Ángulo Y	0,00 °
Volumen Total	0,00 l	Escala	1/100
Máquina	DX 680 057 080 10003	Duración	00:55:43







PREDICCIÓN SÍSMICA PARA TÚNELES (TSP)

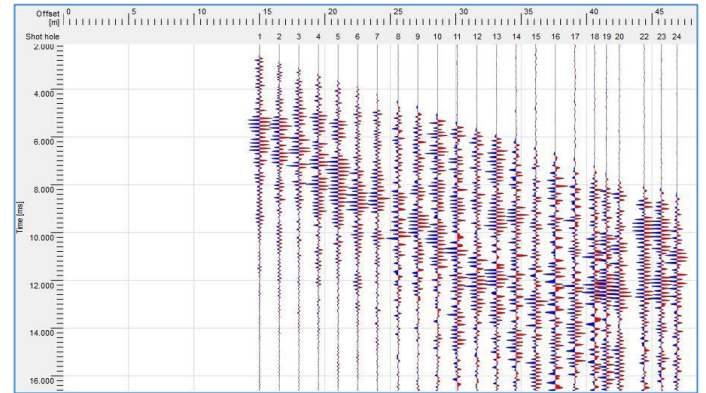
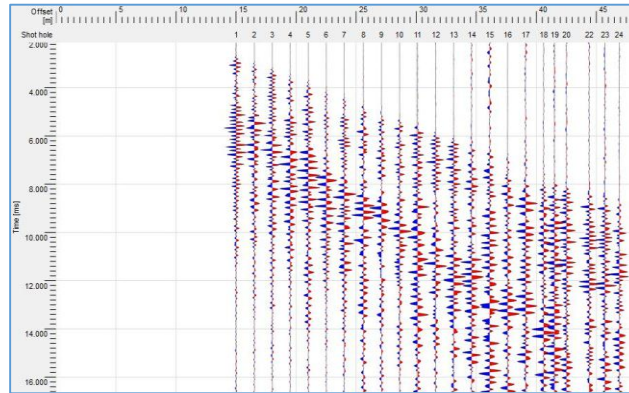
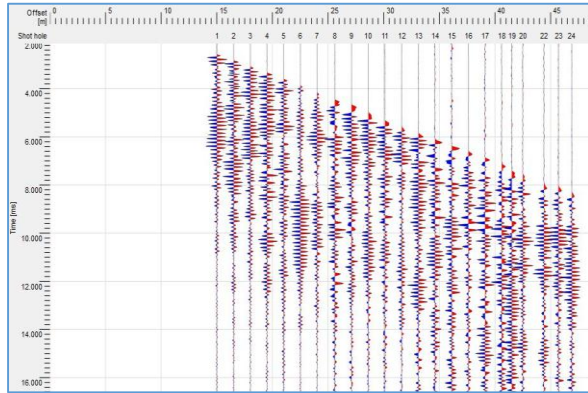
- TÚNEL DE RESTITUCIÓN TSP-TR-1510
- TÚNEL DE RESTITUCIÓN TSP-TR-1515

TÚNEL DE RESTITUCIÓN TSP-TR-1510

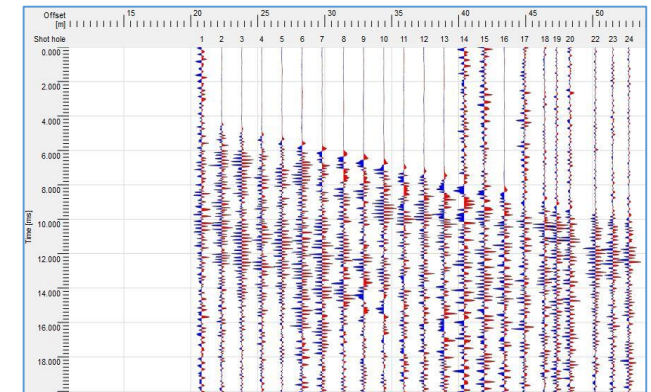
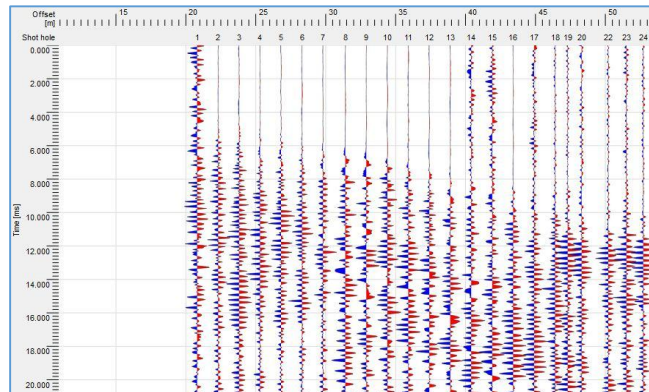
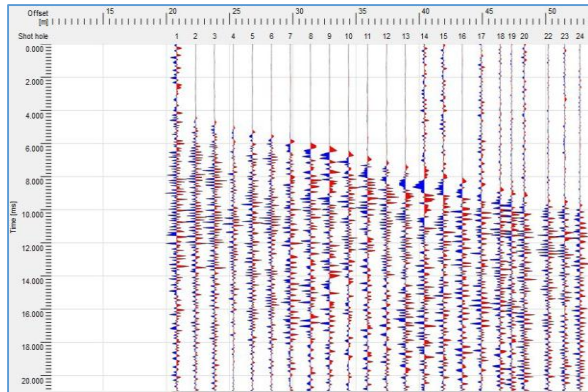
TSP 303-TR-1510

ANEXO 01
DATA SÍSMICA CRUDA

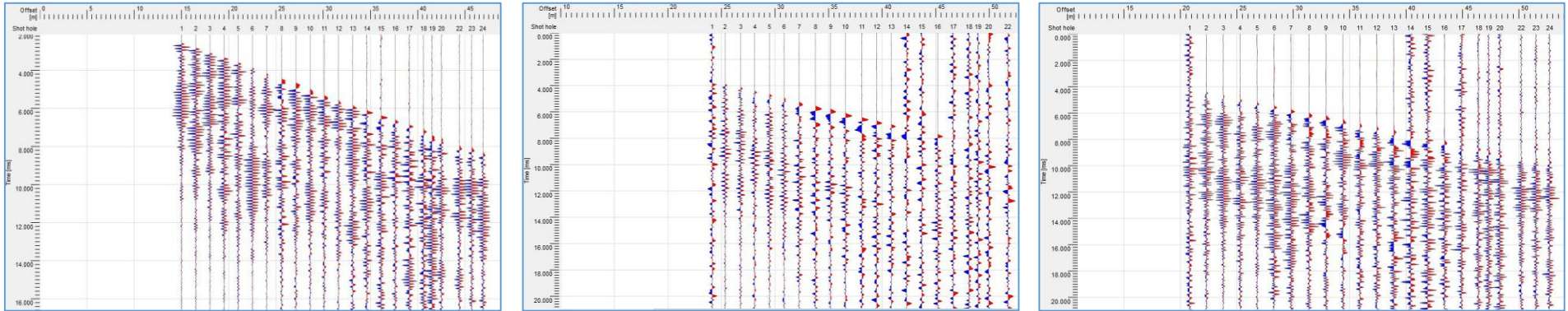
RCV 1 (Frontal Derecha), 24 puntos de disparo, trazas normalizadas X/Y/Z



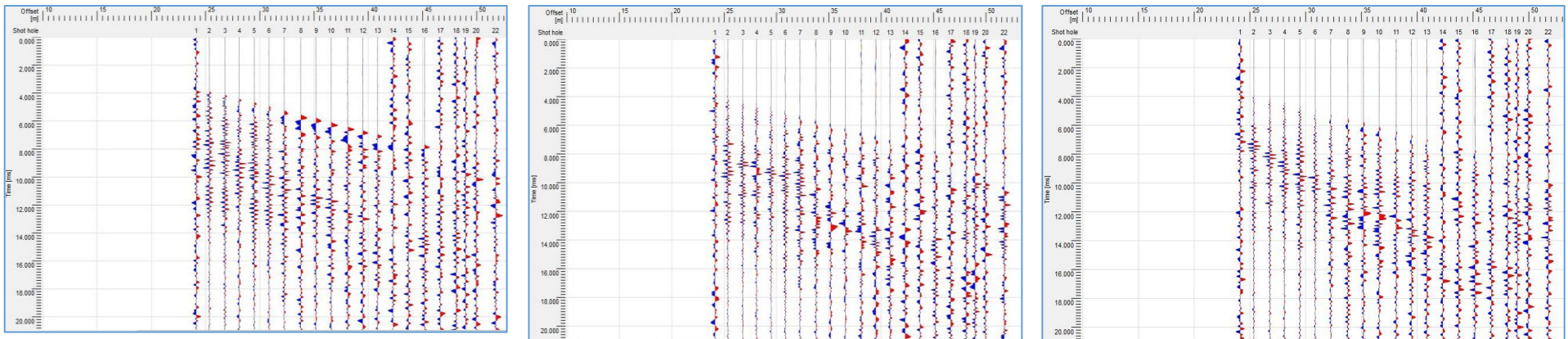
RCV 2 (Atrás Derecha), 24 puntos de disparo, trazas normalizadas X/Y/Z



RCV 3 (Frontal Izquierda), 24 puntos de disparo, trazas normalizadas X/Y/Z

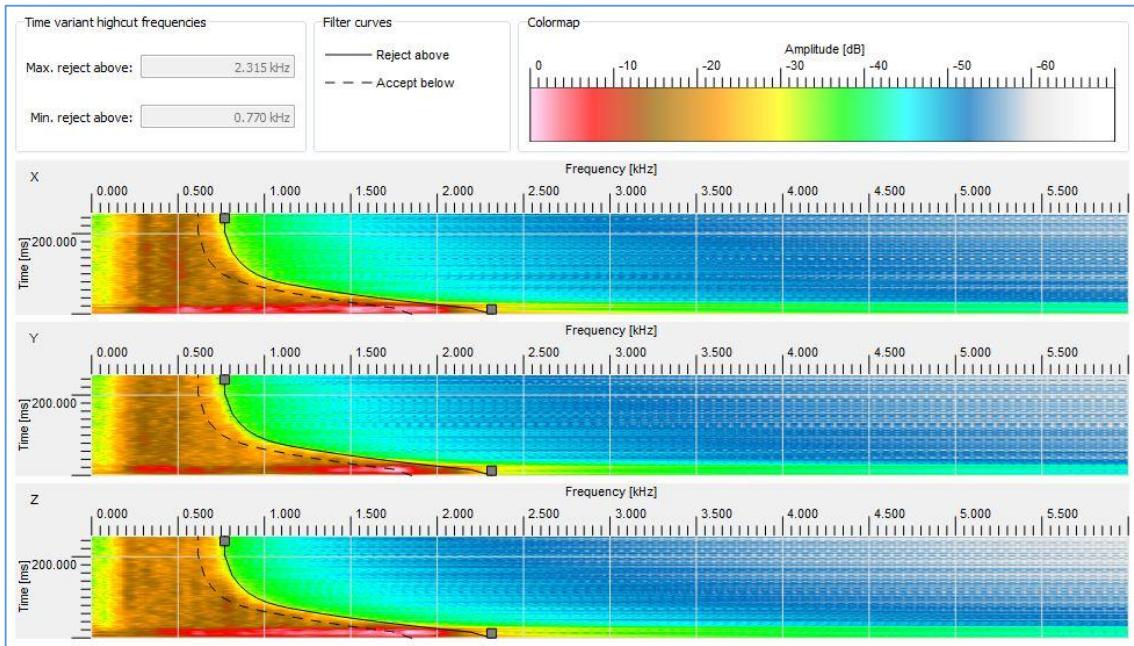


RCV 4 (Atrás Izquierda), 24 puntos de disparo, trazas normalizadas X/Y/Z

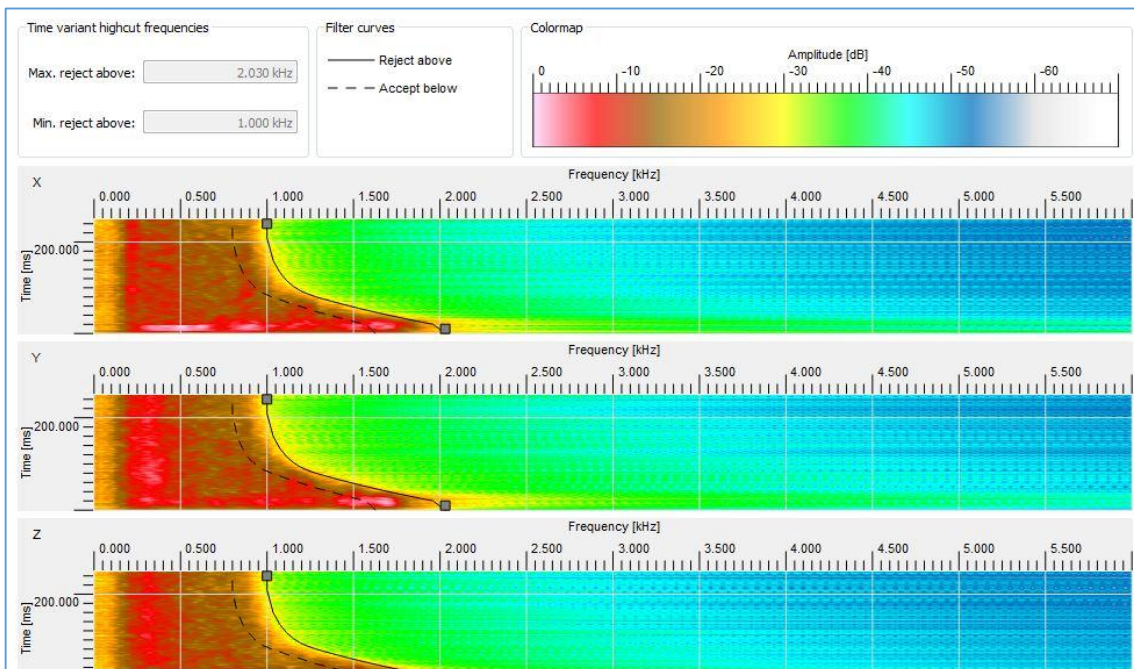


ANEXO 02
ESPECTRO DE AMPLITUD

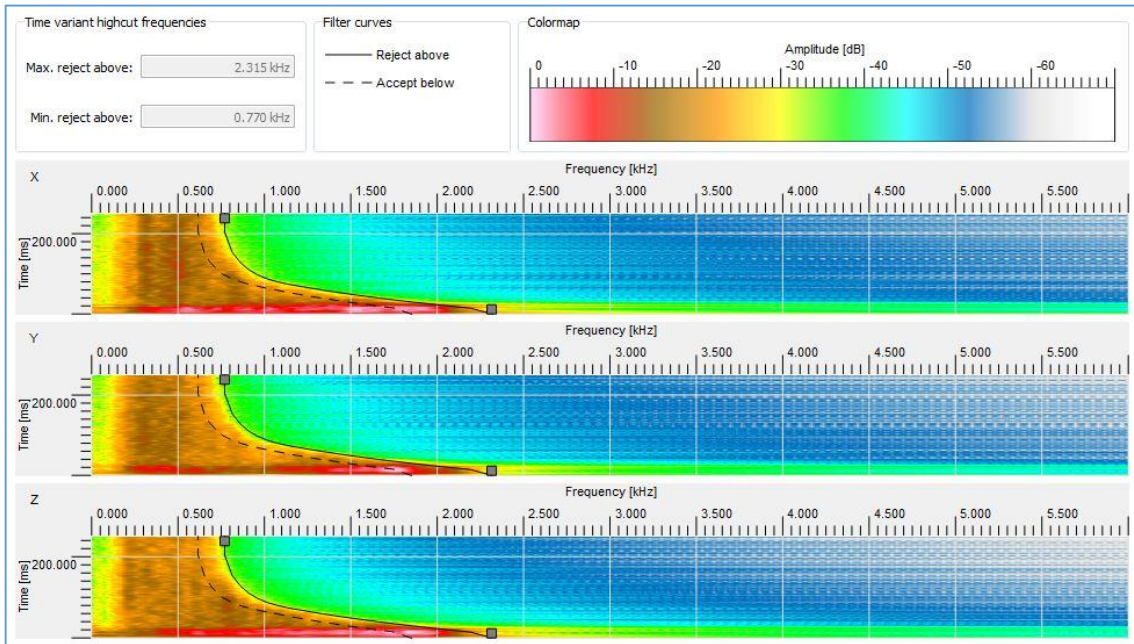
Espectro de Amplitud para el RCV1



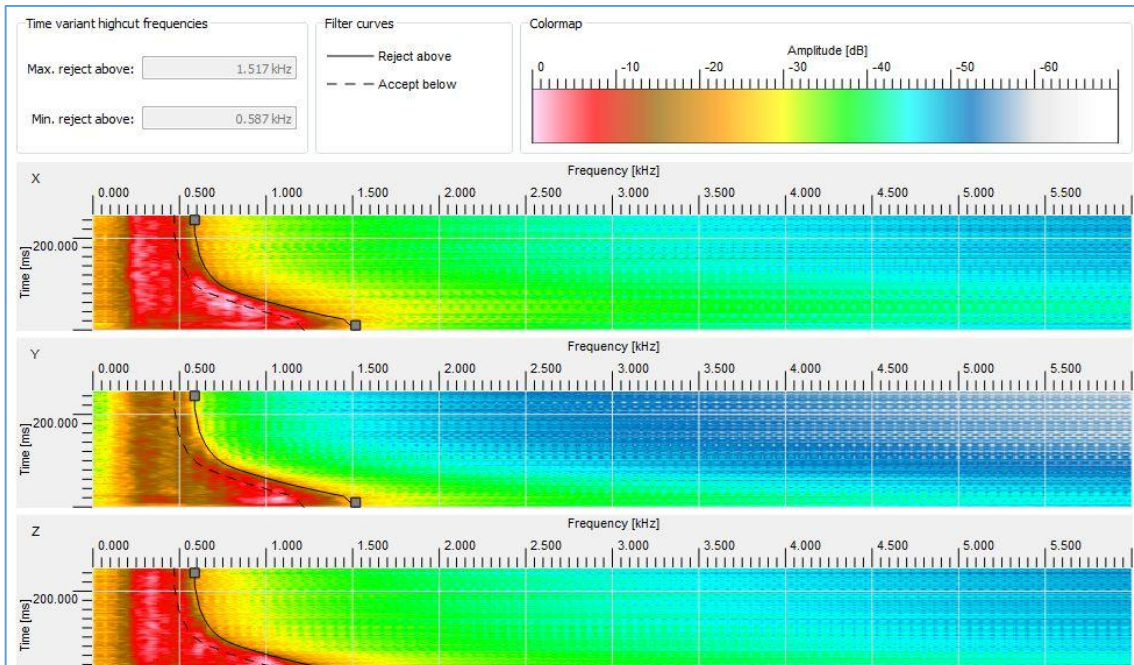
Espectro de Amplitud para el RCV2



Espectro de Amplitud para el RCV 3



Espectro de Amplitud para el RCV 4



ANEXO 03
**GRÁFICO Y TABLAS DE LAS PROPIEDADES DE LAS
ROCAS**

TSP - Tunnel Seismic Prediction: tsp1510-19-05-2016-1120.90

Acquisition date: 19.05.2016 Campaign name: tsp1510 Processing name: TSP-1510
 Face tunnelmeter: 1,120.90 m Direction: Increasing Report date: 25.05.2016
 Ref. tunnelmeter: 1,063.90 m Overburden: 150.00 m Operator: LSilva
 Scale: 1:1000

CHAVIMOCHIC

Rock properties table

Axis intersection [m]	Strike [DEG]	Dip [DEG]	Apparent dip [DEG]	Velocity P [m/s]	Velocity S [m/s]	Poisson ratio	Dyn. Young's mod. [GPa]	Shear mod. [GPa]	Bulk mod. [GPa]
initial				5,363	3,100	0.25	66	27	44
1,134.66	240	79	78	5,982	3,275	0.29	80	31	62
1,135.14	239	79	78	5,976	3,253	0.29	79	30	62
1,145.49	260	81	81	5,761	3,126	0.29	71	28	57
1,146.85	268	87	87	5,534	3,289	0.23	75	31	46
1,146.85	261	77	77	5,733	3,159	0.28	72	28	55
1,150.21	231	85	83	6,061	3,158	0.31	75	29	67
1,157.69	81	86	86	5,452	3,294	0.21	75	31	43
1,157.91	78	88	88	5,317	3,347	0.17	74	32	38
1,158.81	78	85	85	5,480	3,305	0.21	75	31	44
1,160.32	257	87	87	5,327	3,353	0.17	75	32	38
1,169.20	61	79	78	5,590	3,351	0.22	78	32	47
1,169.30	61	80	79	5,230	3,387	0.14	74	33	34
1,178.99	265	83	83	5,509	3,183	0.25	71	28	47
1,182.75	258	79	78	5,614	3,211	0.26	73	29	50
1,184.04	68	84	84	5,676	3,223	0.26	74	29	52
1,187.06	271	88	88	5,521	3,177	0.25	71	28	48
1,189.00	93	89	89	5,536	3,183	0.25	71	28	48
1,190.67	270	62	62	5,551	3,218	0.25	73	29	48
1,197.99	256	75	74	5,745	3,222	0.27	75	30	55
1,200.09	257	70	70	5,721	3,213	0.27	74	29	54
1,214.71	250	84	83	5,731	3,241	0.26	76	30	54
1,217.36	247	83	82	5,793	3,319	0.26	80	32	54

TSP - Tunnel Seismic Prediction: tsp1510-19-05-2016-1120.90

Acquisition date:	19.05.2016	Campaign name:	tsp1510	Processing name:	TSP-1510
Face tunnelmeter:	1,120.90 m	Direction:	Increasing	Report date:	25.05.2016
Ref. tunnelmeter:	1,063.90 m	Overburden:	150.00 m	Operator:	LSilva
Scale:	1:1000				

CHAVIMOCHIC

Rock properties table

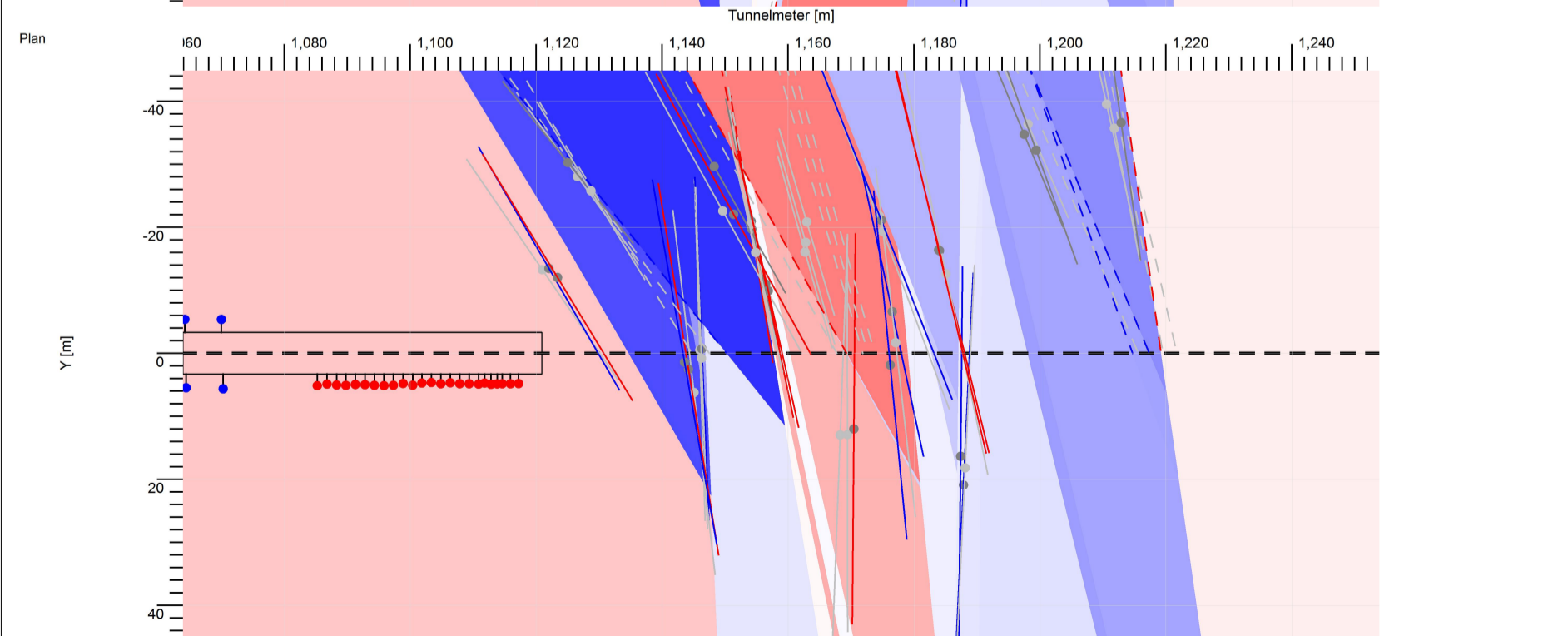
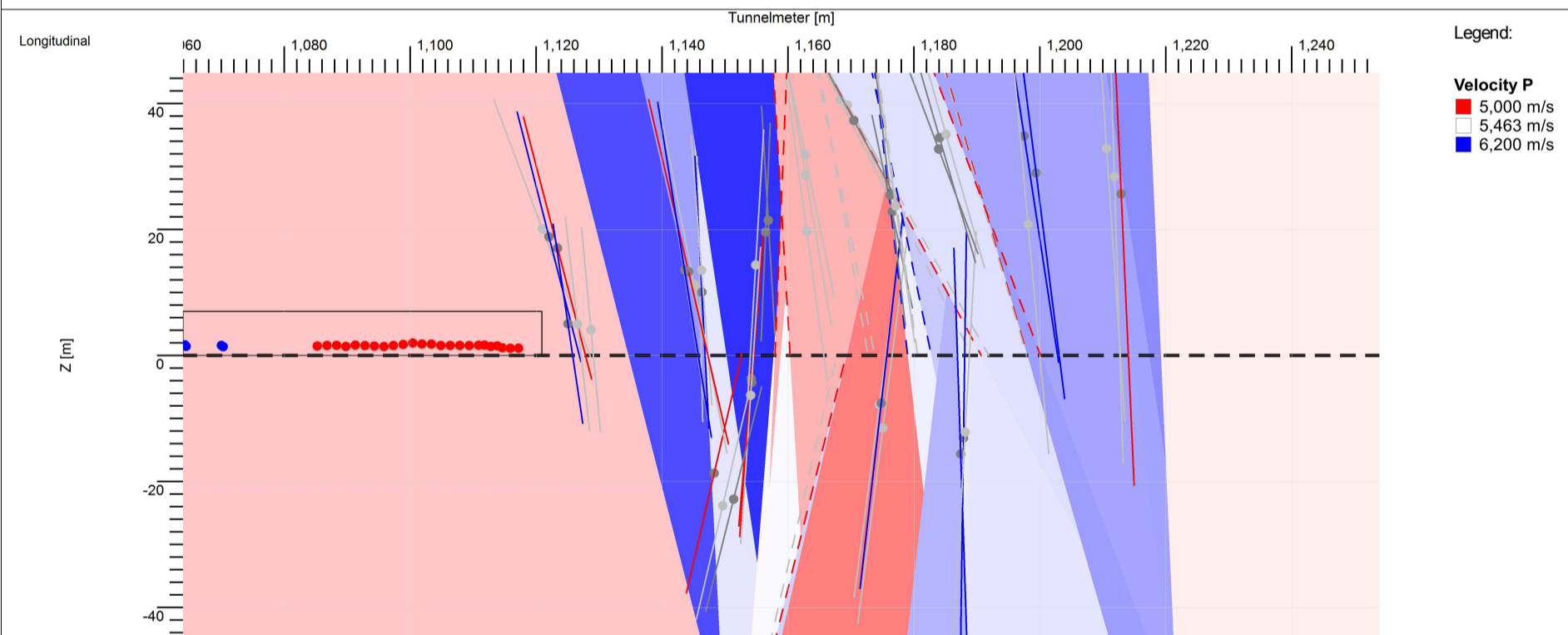
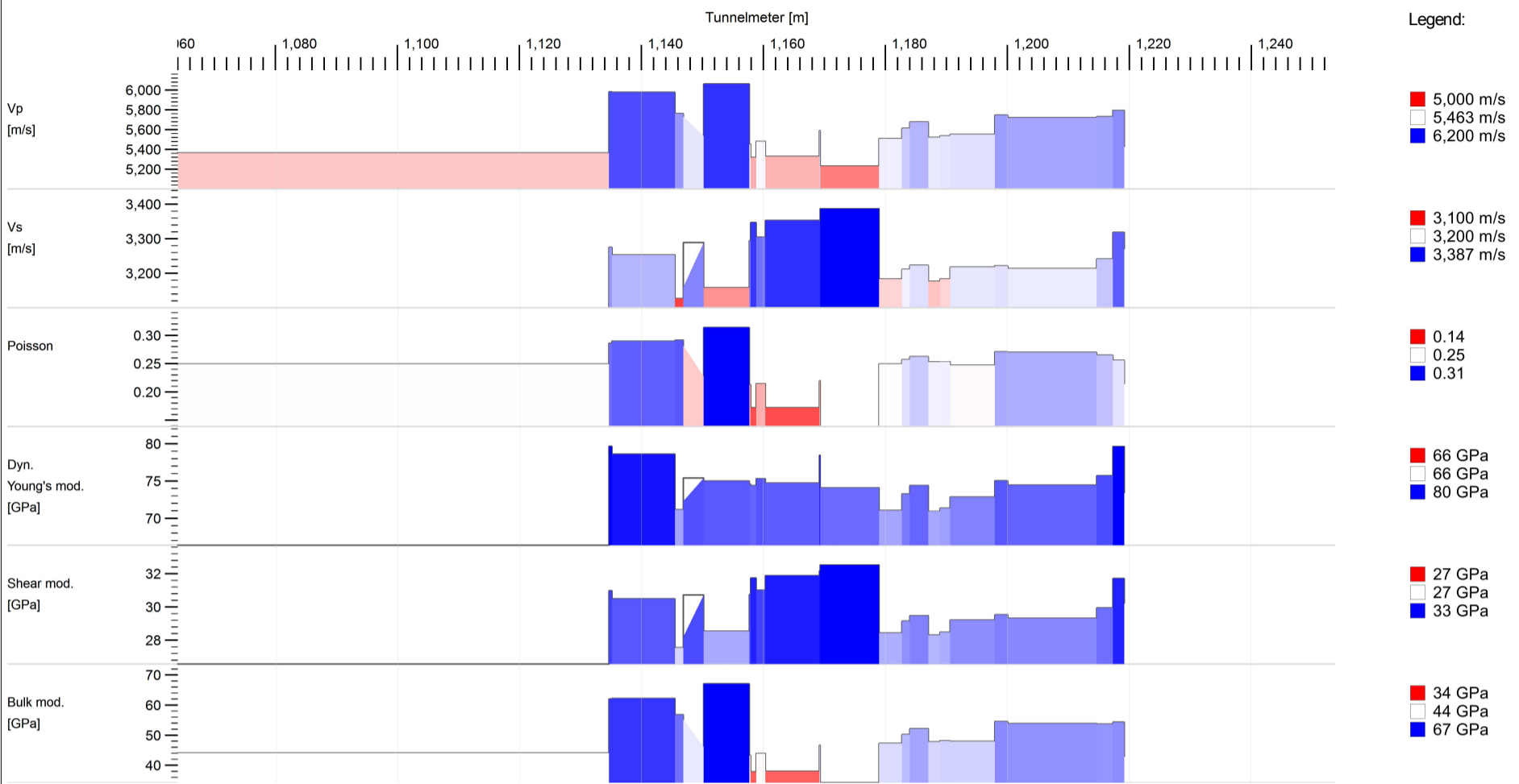
Axis intersection [m]	Strike [DEG]	Dip [DEG]	Apparent dip [DEG]	Velocity P [m/s]	Velocity S [m/s]	Poisson ratio	Dyn. Young's mod. [GPa]	Shear mod. [GPa]	Bulk mod. [GPa]
1,219.23	262	87	87	5,433	3,273	0.22	74	30	43

TSP - Tunnel Seismic Prediction: tsp1510-19-05-2016-1120.90

Acquisition date: 19.05.2016 Campaign name: tsp1510 Processing name: TSP-1510
 Face tunnelmeter: 1,120.90 m Direction: Increasing Report date: 25.05.2016
 Ref. tunnelmeter: 1,063.90 m Overburden: 150.00 m Operator: LSilva
 Scale: 1:1000



Rock properties charts / longitudinal and plan view

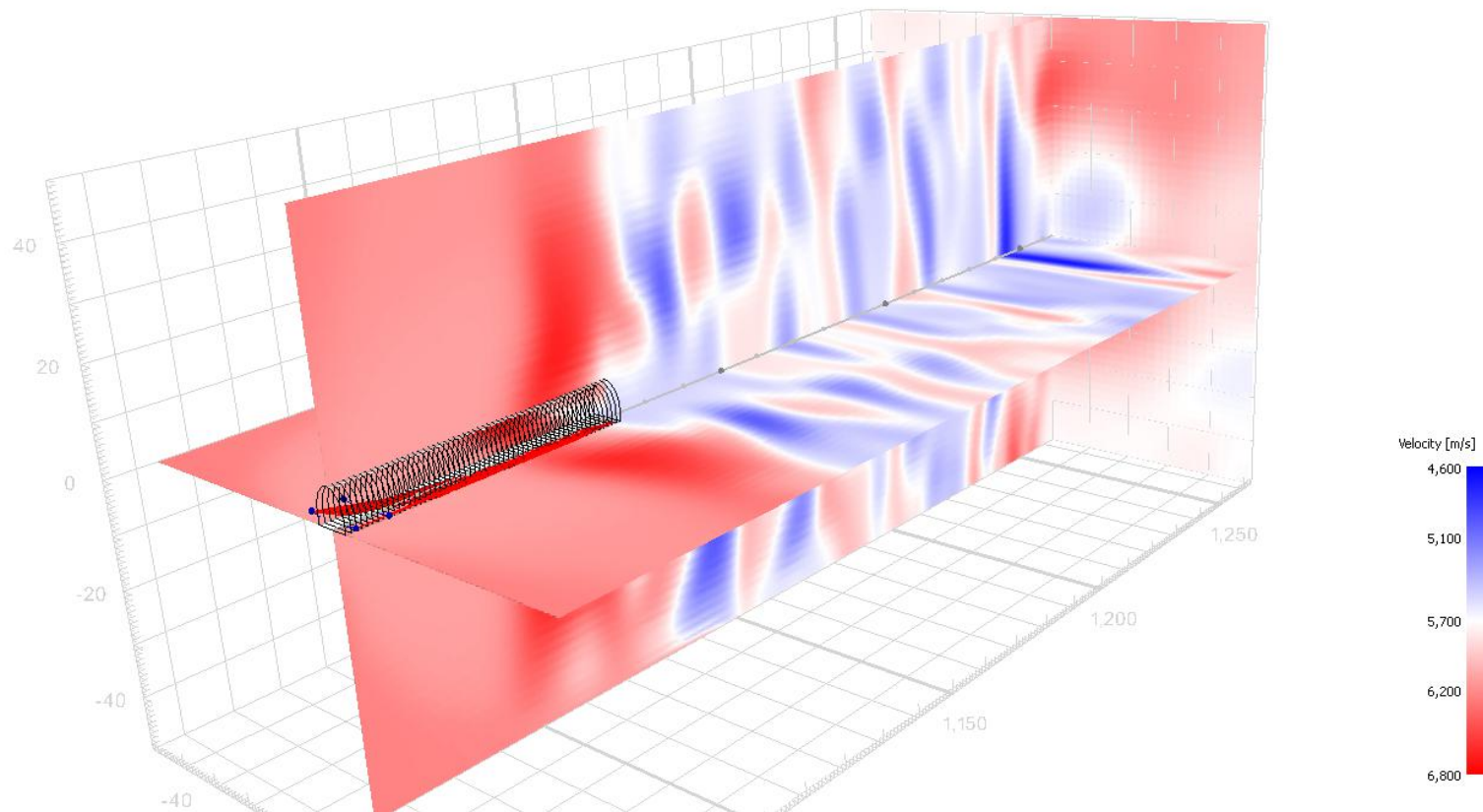


TSP - Tunnel Seismic Prediction: tsp1510-19-05-2016-1120.90

Acquisition date:	19.05.2016	Campaign name:	tsp1510	Processing name:	TSP-1510
Face tunnelmeter:	1,120.90 m	Direction:	Increasing	Report date:	25.05.2016
Ref. tunnelmeter:	1,063.90 m	Overburden:	150.00 m	Operator:	LSilva
Scale:	1:1000				

CHAVIMOCHIC

3D seismic model



ANEXO 04
PANEL FOTOGRAFICO

Panel Fotográfico



Foto 1: *Medición de la Profundidad de los pozos para los Receptores (RCV) en el Túnel Restitución*



Foto 2: *Distribución de los Puntos de disparo en el lateral derecho del túnel Restitución*



Foto 3: Ubicación del Receptor 1 (RCV1) en el lateral izquierdo del Túnel Restitución



Foto 4: Preparación de la carga explosiva para la prueba del Tunnel Seismic Prediction (TSP)



Foto 5: Apisonamiento del taladro de disparo con agua.



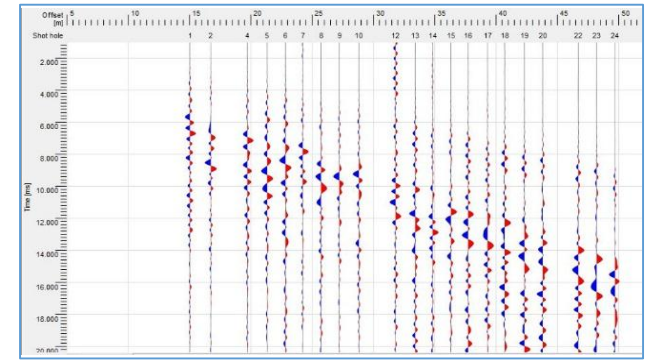
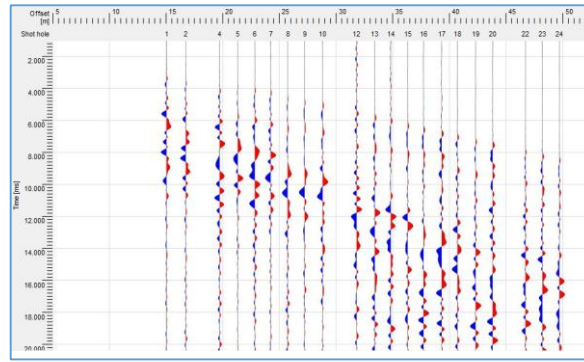
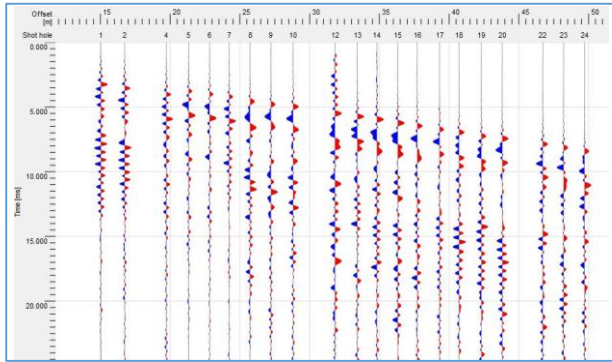
Foto 6: Equipo de Adquisición de datos sísmicos TSP 303 (Tunnel Seismic Prediction)

TÚNEL DE RESTITUCIÓN TSP-TR-1515

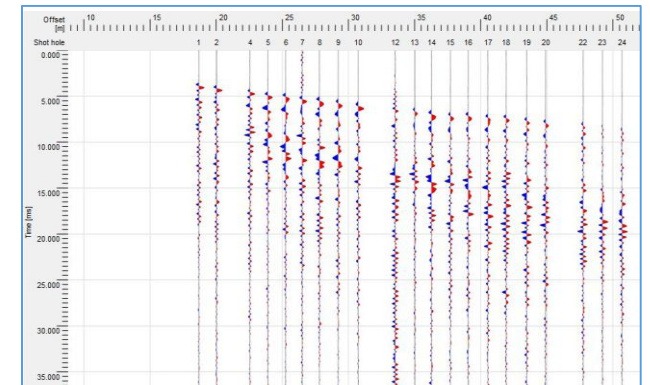
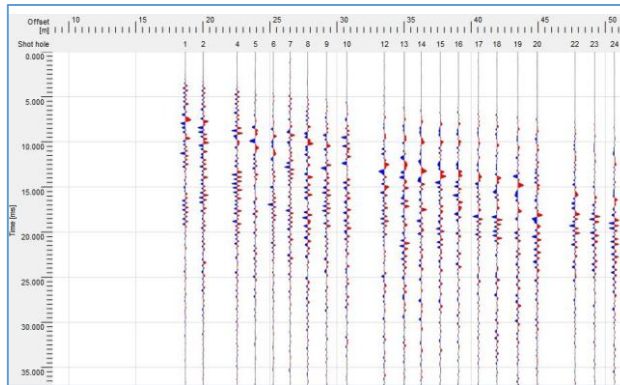
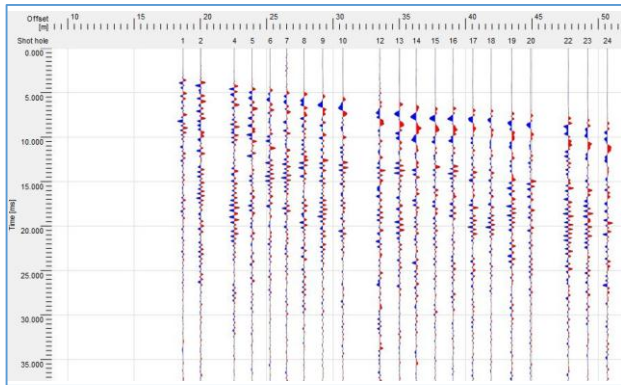
TSP 303-TR-1515

ANEXO 01
DATA SÍSMICA CRUDA

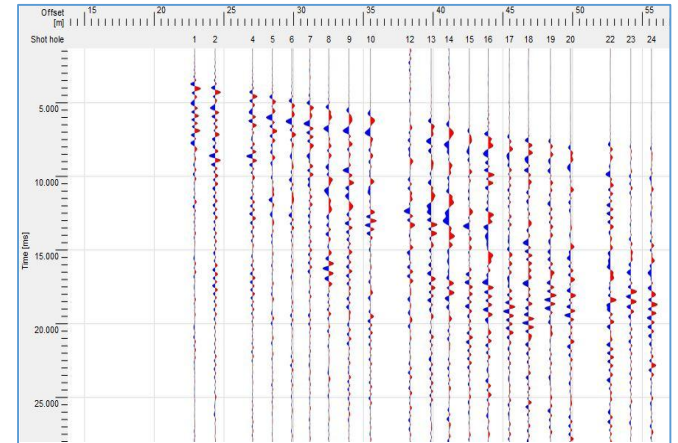
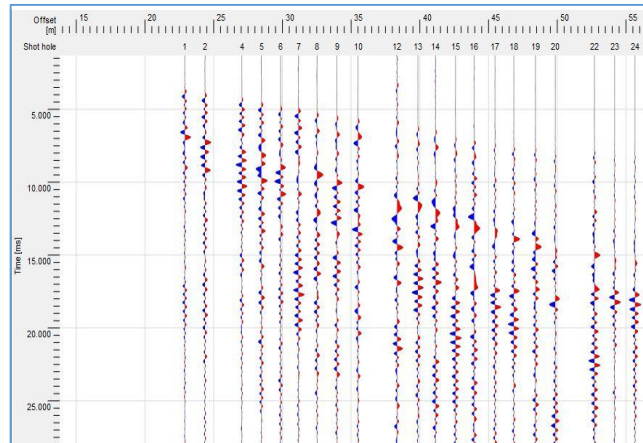
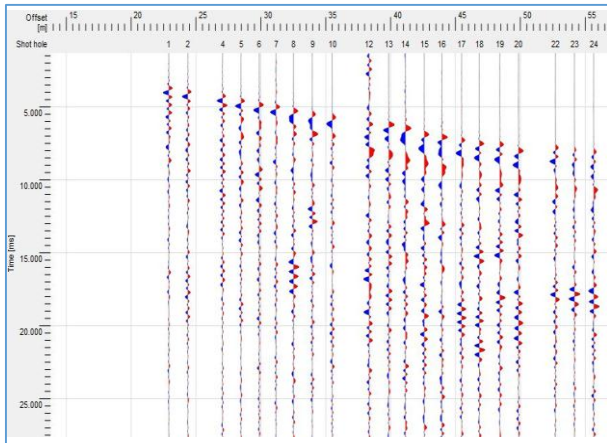
RCV 1 (Frontal Derecha), 24 puntos de disparo, trazas normalizadas X/Y/Z.



RCV 3 (Frontal Izquierda), 24 puntos de disparo, trazas normalizadas X/Y/Z.

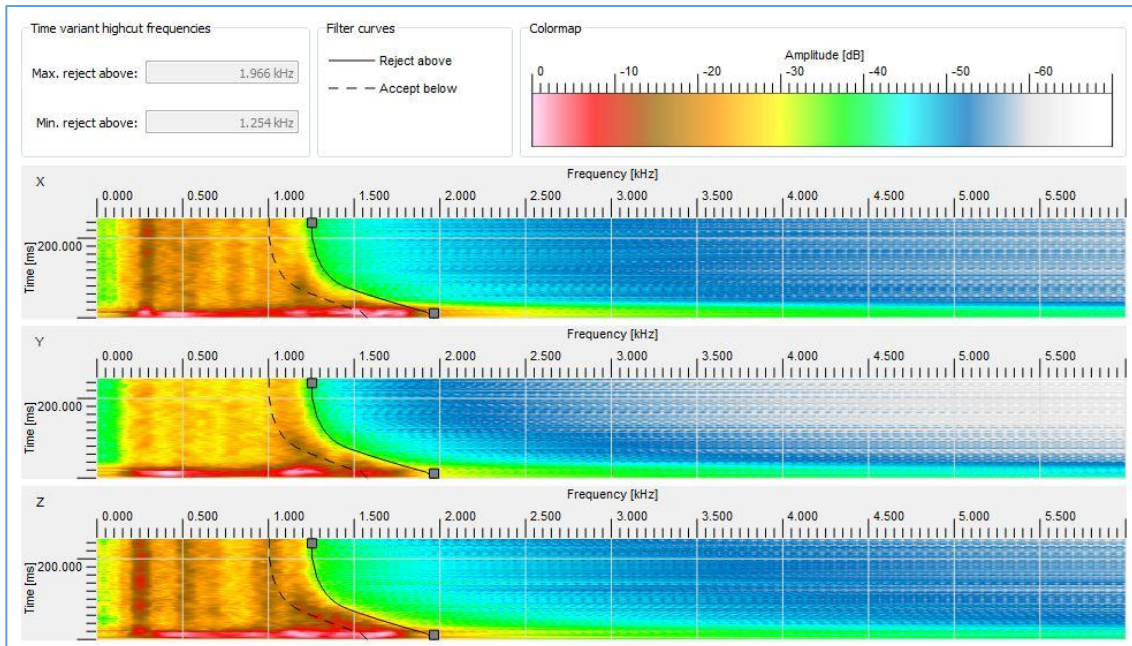


RCV 4 (Atrás Izquierda), 24 puntos de disparo, trazas normalizadas X/Y/Z

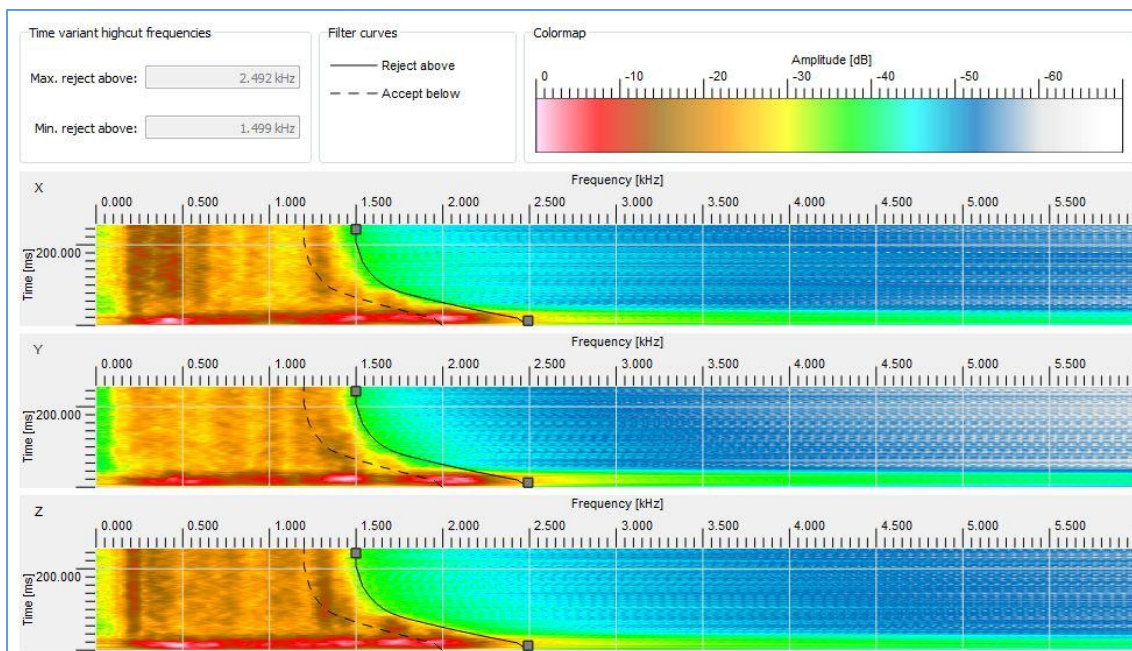


ANEXO 02
ESPECTRO DE AMPLITUD

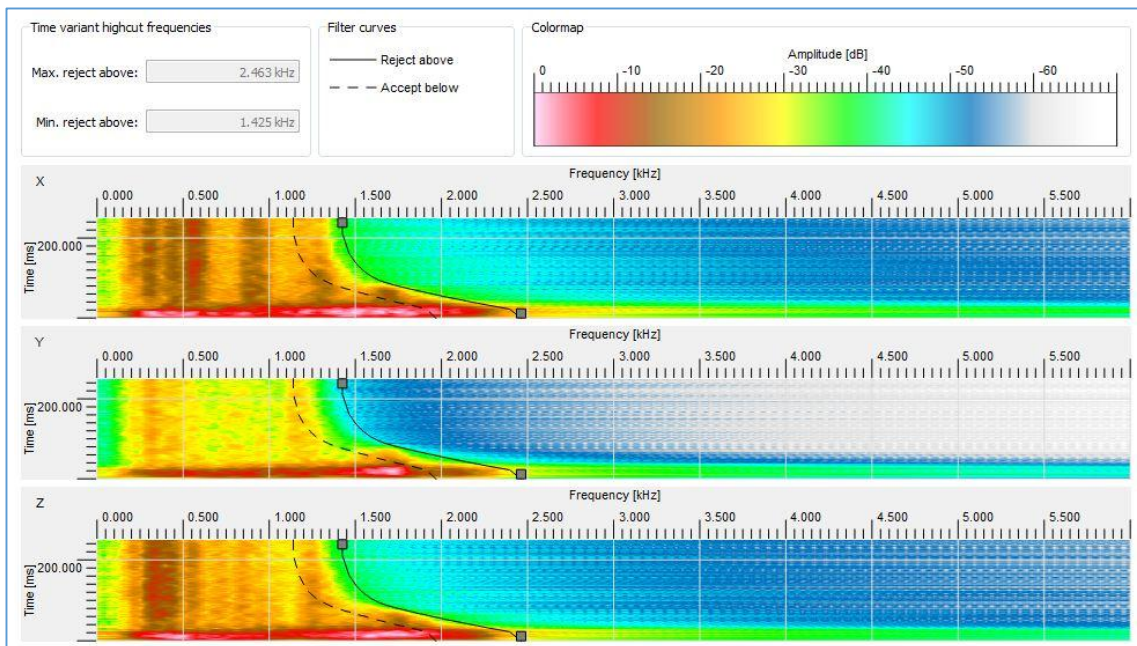
Espectro de Amplitud para el RCV1



Espectro de Amplitud para el RCV 3



Espectro de Amplitud para el RCV 4



ANEXO 03
**GRÁFICO Y TABLAS DE LAS PROPIEDADES DE LAS
ROCAS**

TSP - Tunnel Seismic Prediction: TSP-1515

Acquisition date: 28.09.2016 Campaign name: TSP-1515 Processing name: tsp-1515_pros 2
 Face tunnelmeter: 1,888.60 m Direction: Increasing Report date: 03.10.2016
 Ref. tunnelmeter: 1,824.60 m Overburden: 150.00 m Operator: G.ESCOBAR
 Scale: 1:1000

CHAVIMOCHIC

Rock properties table

Axis intersection [m]	Strike [DEG]	Dip [DEG]	Velocity P [m/s]	Velocity S [m/s]	Poisson ratio	Dyn. Young's mod. [GPa]	Shear mod. [GPa]	Bulk mod. [GPa]
initial			6,207	3,474	0.27	91	36	67
1,895.98	260	84	6,535	3,341	0.32	88	33	83
1,898.15	261	89	6,152	3,554	0.25	94	38	63
1,904.07	246	84	6,163	3,654	0.23	99	40	61
1,904.18	245	85	6,129	3,640	0.23	98	40	60
1,909.00	254	82	5,697	3,420	0.22	83	34	49
1,919.53	83	82	6,202	3,460	0.27	91	36	67
1,920.25	82	81	6,074	3,449	0.26	89	35	62
1,921.91	91	85	6,223	3,466	0.28	91	36	68
1,924.28	86	90	6,260	3,465	0.28	91	36	69
1,932.80	82	80	5,988	3,377	0.27	84	33	60
1,948.32	86	83	6,289	3,497	0.28	93	37	70
1,961.59	88	82	5,862	3,396	0.25	84	34	55
1,980.63	94	83	5,731	3,495	0.20	86	36	48
1,981.16	94	83	5,707	3,491	0.20	86	36	48
1,982.07	72	90	6,277	3,246	0.32	81	31	74
1,984.88	89	89	6,248	3,446	0.28	90	35	69
1,985.70	86	89	6,249	3,508	0.27	93	37	68
1,986.71	262	84	5,920	3,321	0.27	81	32	59
1,987.67	260	83	5,931	3,338	0.27	82	32	59
2,005.37	268	87	6,017	3,384	0.27	85	33	61
2,008.40	82	88	5,845	3,454	0.23	86	35	53
2,008.41	82	90	5,840	3,464	0.23	86	35	53

TSP - Tunnel Seismic Prediction: TSP-1515

Acquisition date: 28.09.2016 Campaign name: TSP-1515 Processing name: tsp-1515_pros 2
Face tunnelmeter: 1,888.60 m Direction: Increasing Report date: 03.10.2016
Ref. tunnelmeter: 1,824.60 m Overburden: 150.00 m Operator: G.ESCOBAR
Scale: 1:1000

CHAVIMOCHIC

Rock properties table

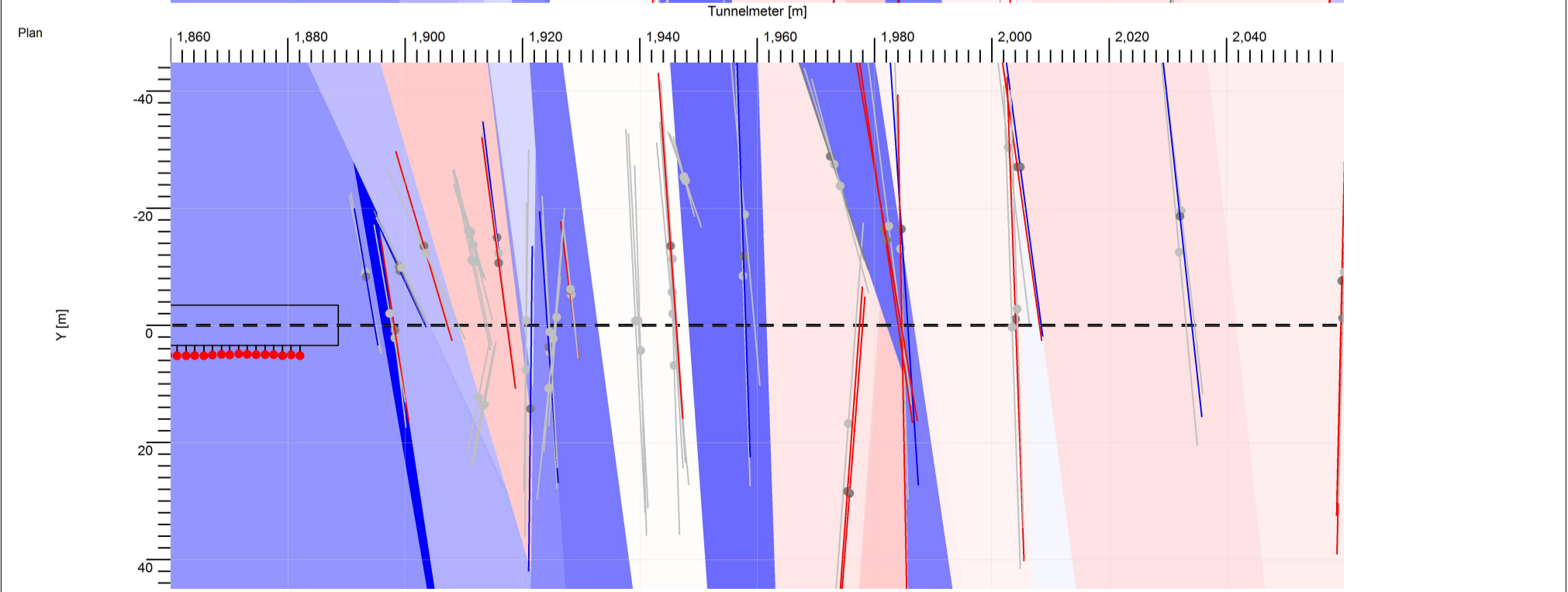
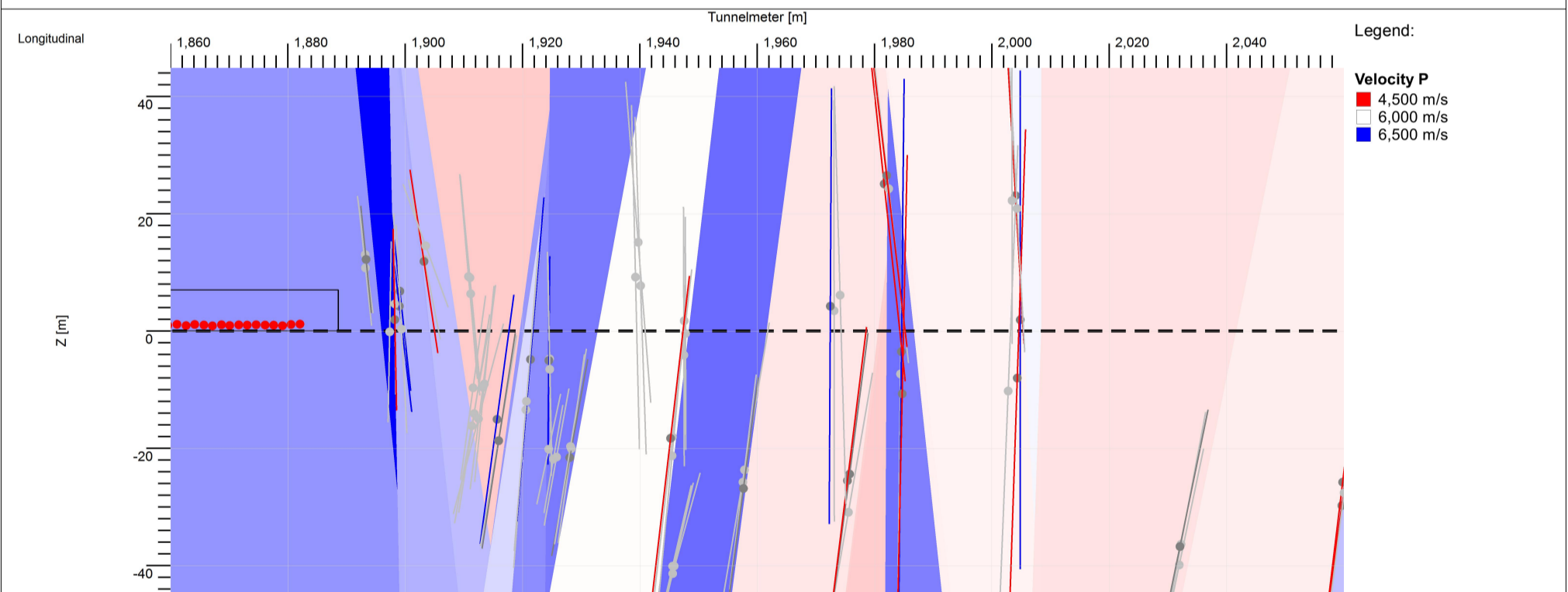
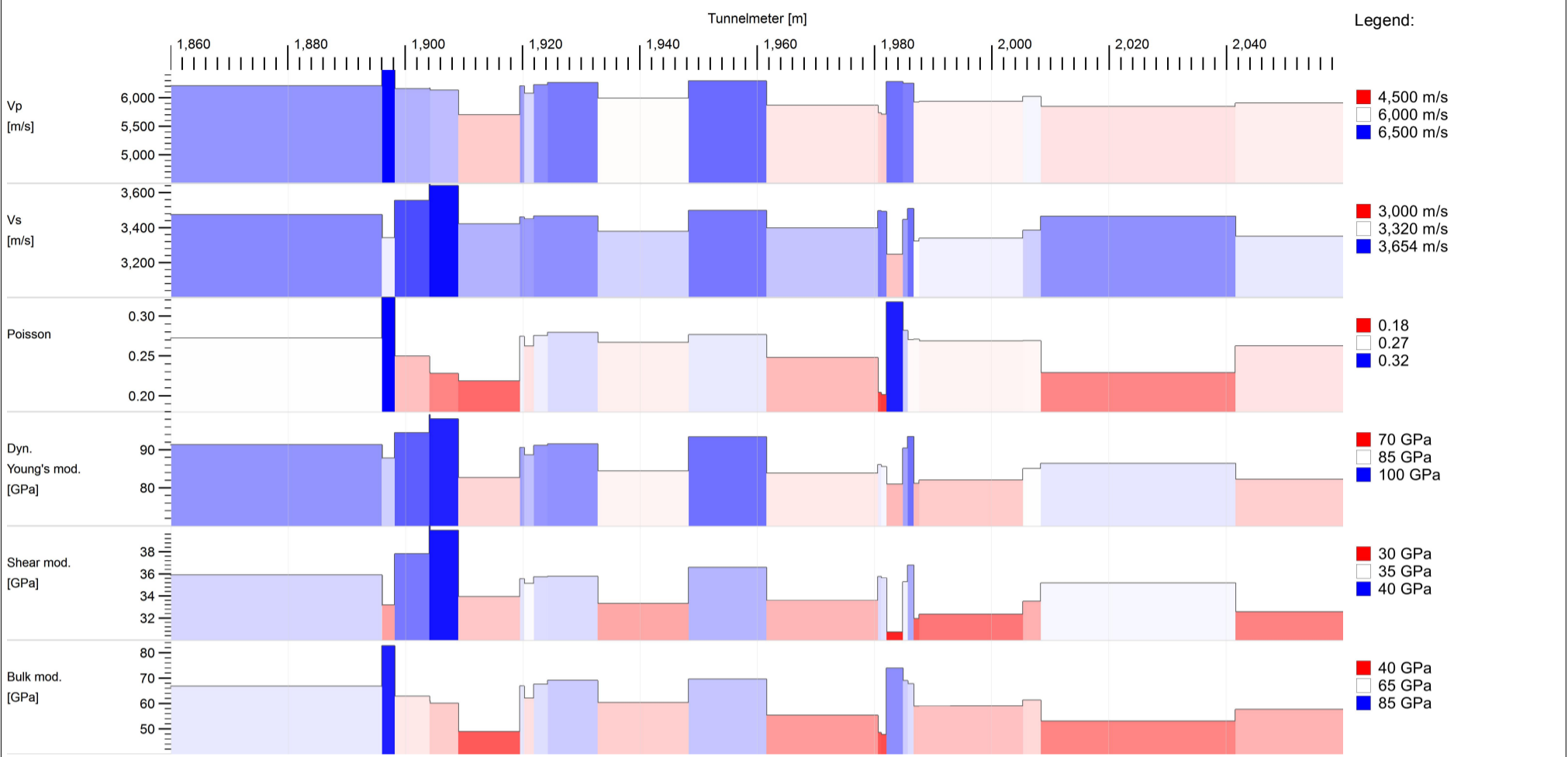
Axis intersection [m]	Strike [DEG]	Dip [DEG]	Velocity P [m/s]	Velocity S [m/s]	Poisson ratio	Dyn. Young's mod. [GPa]	Shear mod. [GPa]	Bulk mod. [GPa]
2,041.64	84	78	5,901	3,350	0.26	82	33	58
2,062.86	91	83	6,015	3,534	0.24	92	37	58
2,063.58	91	82	6,121	3,542	0.25	93	37	62

TSP - Tunnel Seismic Prediction: TSP-1515

Acquisition date:	28.09.2016	Campaign name:	TSP-1515	Processing name:	tsp-1515_pros 2
Face tunnelmeter:	1,888.60 m	Direction:	Increasing	Report date:	03.10.2016
Ref. tunnelmeter:	1,824.60 m	Overburden:	150.00 m	Operator:	G.ESCOBAR
Scale:	1:1000				



Rock properties charts / longitudinal and plan view



TSP - Tunnel Seismic Prediction: TSP-1515

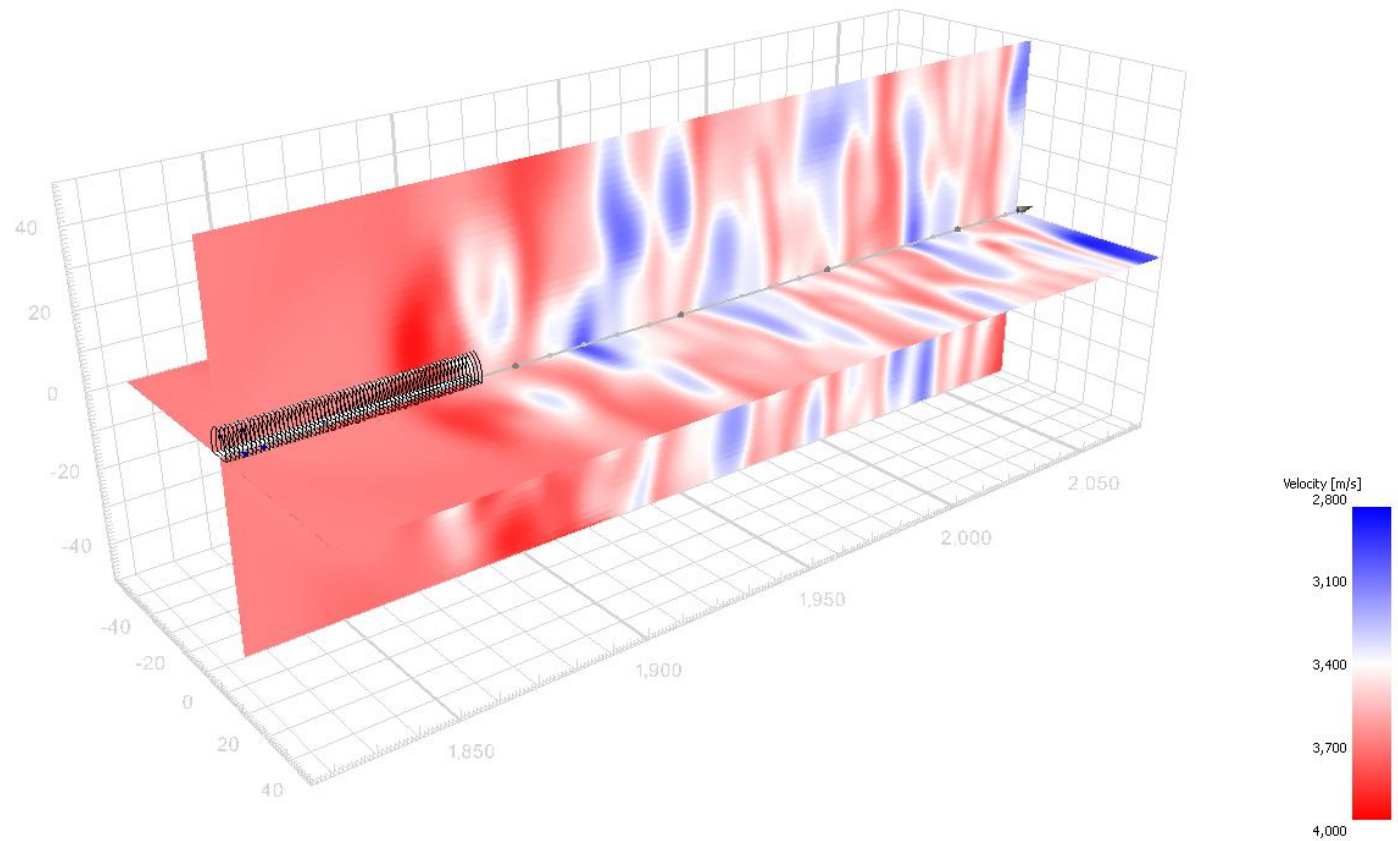
Acquisition date: 28.09.2016
Face tunnelmeter: 1,888.60 m
Ref. tunnelmeter: 1,824.60 m
Scale: 1:1000

Campaign name: TSP-1515
Direction: Increasing
Overburden: 150.00 m

Processing name: tsp-1515_pros 2
Report date: 03.10.2016
Operator: G.ESCOBAR

CHAVIMOCHIC

3D seismic model

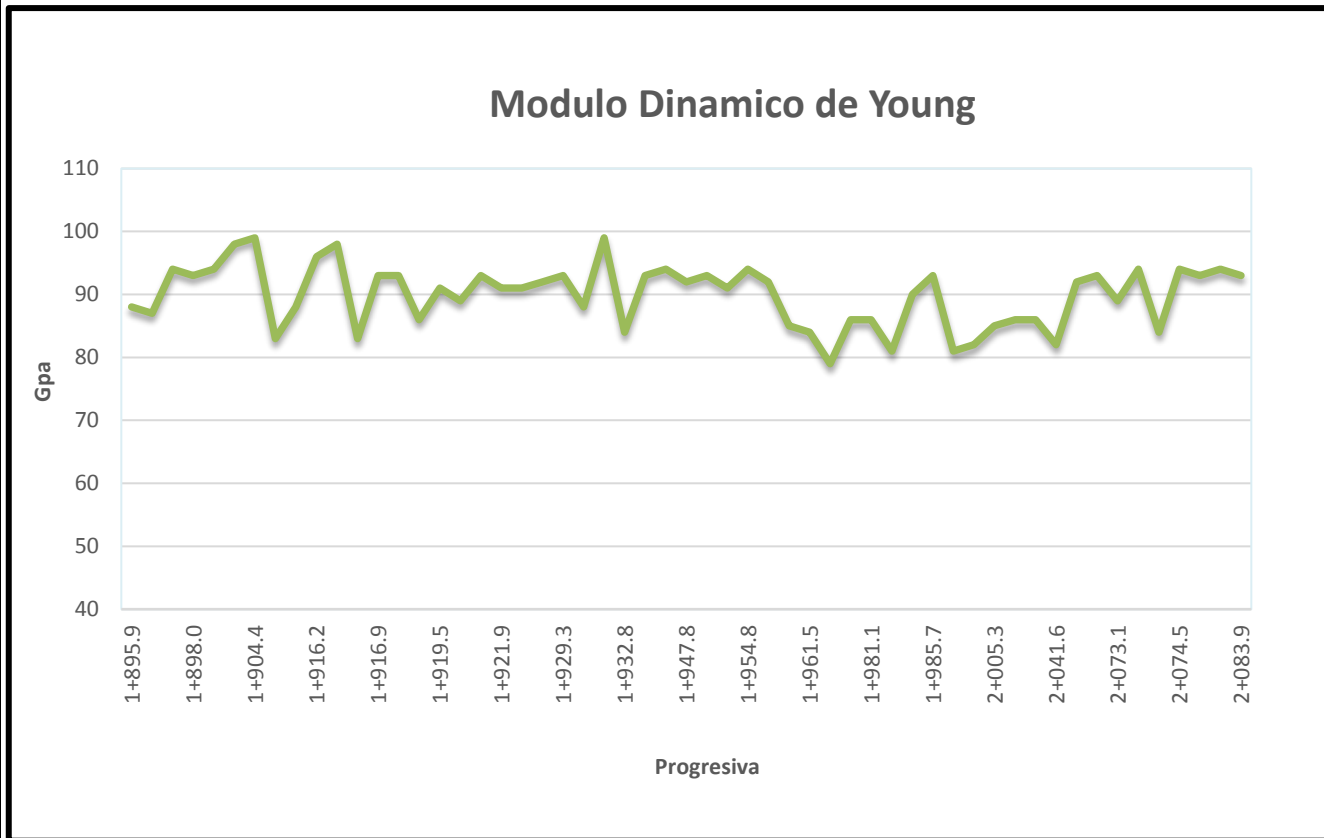


TSP - Tunnel Seismic Prediction: TSP-1515

Acquisition date: 28.09.2016 Campaign name: TSP-1515 Processing name: tsp-1515_pros 2
 Face tunnelmeter: 1,888.60 m Direction: Increasing Report date: 03.10.2016
 Ref. tunnelmeter: 1,824.60 m Overburden: 150.00 m Operator: G.ESCOBAR Scale:
 1:1000



Rock properties



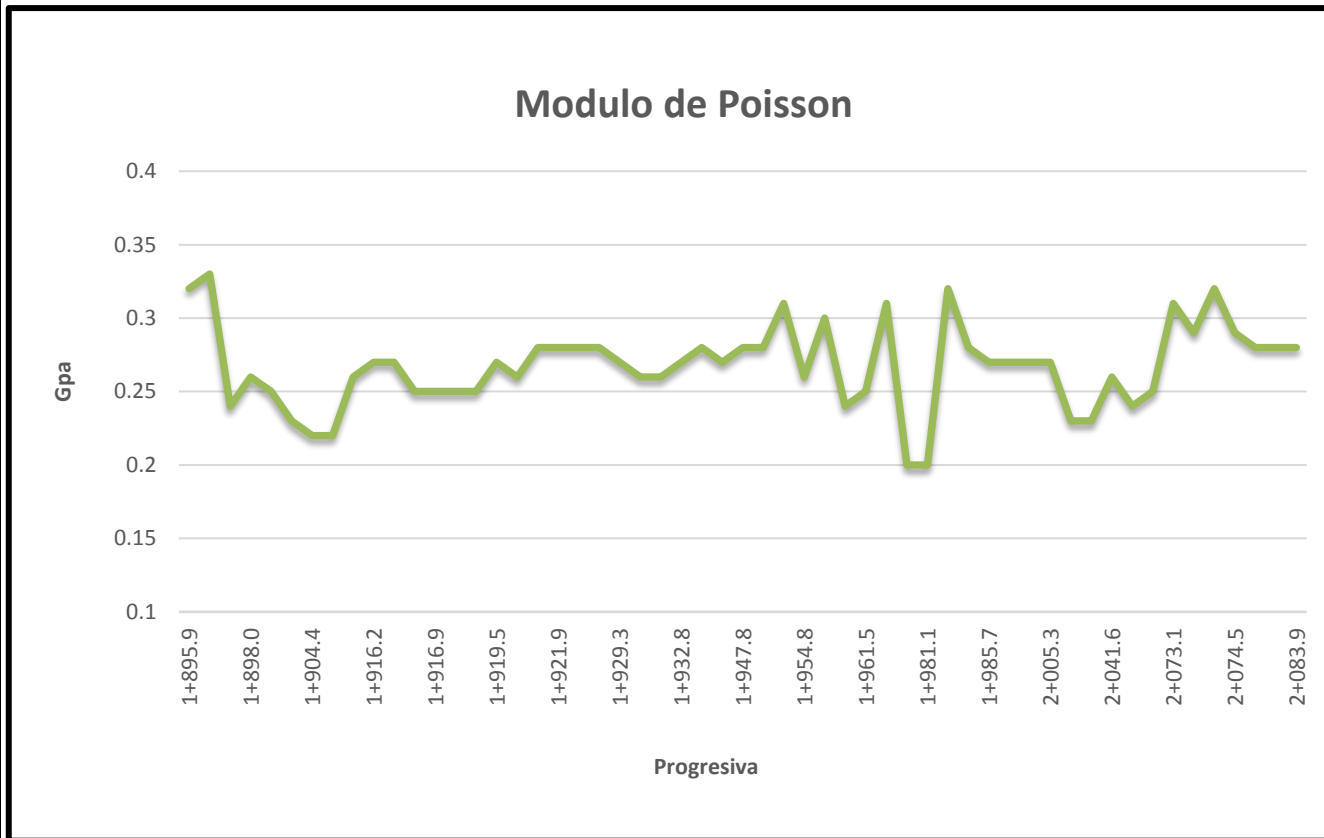
Axis [m]	Dyn. Young's mod. [GPa]	Axis [m]	Dyn. Young's mod. [GPa]	Axis [m]	Dyn. Young's mod. [GPa]
1+895.9	88	1+929.9	65	2+062.8	92
1+896.7	87	1+932.8	85	2+063.5	93
1+897.7	94	1+940.2	85	2+073.1	89
1+898.0	93	1+940.9	85	2+073.5	94
1+898.2	94	1+947.8	58	2+073.5	84
1+904.2	98	1+948.3	59	2+074.5	94
1+904.4	99	1+954.2	54	2+080.4	93
1+909	83	1+954.8	54	2+080.6	94
1+914.4	88	1+956.4	53	2+083.9	93
1+916.2	96	1+961.0	53		
1+916.4	98	1+961.5	54		
1+916.7	83	1+980.6	54		
1+916.9	93	1+980.6	63		
1+917.1	93	1+981.1	60		
1+917.1	86	1+982.0	62		
1+919.5	91	1+984.8	58		
1+920.8	89	1+985.7	62		
1+921.7	93	1+986.7	60		
1+921.9	91	1+987.6	56		
1+924.3	91	2+005.3	62		
1+924.5	92	2+008.4	55		
1+929.3	93	2+008.4	60		
1+929.6	88	2+041.6	58		

TSP - Tunnel Seismic Prediction: TSP-1515

Acquisition date: 28.09.2016 Campaign name: TSP-1515 Processing name: tsp-1515_pros 2
 Face tunnelmeter: 1,888.60 m Direction: Increasing Report date: 03.10.2016
 Ref. tunnelmeter: 1,824.60 m Overburden: 150.00 m Operator: G.ESCOBAR Scale:
 1:1000



Rock properties



Axis [m]	Poisson ratio	Axis [m]	Poisson ratio	Axis [m]	Poisson ratio
1+895.9	0.32	1+929.9	0.26	2+062.8	0.24
1+896.7	0.33	1+932.8	0.27	2+063.5	0.25
1+897.7	0.24	1+940.2	0.28	2+073.1	0.31
1+898.0	0.26	1+940.9	0.27	2+073.5	0.29
1+898.2	0.25	1+947.8	0.28	2+073.5	0.32
1+904.2	0.23	1+948.3	0.28	2+074.5	0.29
1+904.4	0.22	1+954.2	0.31	2+080.4	0.28
1+909	0.22	1+954.8	0.26	2+080.6	0.28
1+914.4	0.26	1+956.4	0.3	2+083.9	0.28
1+916.2	0.27	1+961.0	0.24		
1+916.4	0.27	1+961.5	0.25		
1+916.7	0.25	1+980.6	0.31		
1+916.9	0.25	1+980.6	0.2		
1+917.1	0.25	1+981.1	0.2		
1+917.1	0.25	1+982.0	0.32		
1+919.5	0.27	1+984.8	0.28		
1+920.8	0.26	1+985.7	0.27		
1+921.7	0.28	1+986.7	0.27		
1+921.9	0.28	1+987.6	0.27		
1+924.3	0.28	2+005.3	0.27		
1+924.5	0.28	2+008.4	0.23		
1+929.3	0.27	2+008.4	0.23		
1+929.6	0.26	2+041.6	0.26		

ANEXO 04
PANEL FOTOGRAFICO

Fotos de Campo



Foto 1: Armado de equipo de TSP-303 (Receptores) para la preparación de obtención de datos.



Foto 2: Ubicación del Receptor 3 (RCV3) en el hastial derecho del Túnel Restitución



Foto 3: Medición de los Puntos de disparo en el lateral derecho del túnel Restitución



Foto 4: Carga explosiva utilizada como fuente sísmica para la prueba del Tunnel Seismic Prediction (TSP).



Foto 5: Preparación de la carga explosiva y apisonamiento del taladro de disparo con agua.



Foto 6: Instalación del cable de rotura con el alambre de fulminante el cual va conectado a la caja disparadora.



Foto 7: Equipo de Adquisición de datos sísmicos TSP 303 (Tunnel Seismic Prediction)



Foto 8: Adquisición de datos en campo con el TSP 303.