



FaIn·UNCo
Facultad de Ingeniería

Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas

**Caracterización geológica y geotécnica del macizo rocoso en el sitio de
emplazamiento del proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La
Invernada, Chos Malal, Provincia del Neuquén**

Alumna: Alvarez Fanessi, Micaela

Director: Gatica, José Ricardo

Neuquén, 2023

RESUMEN

La caracterización geológica y geotécnica de un macizo rocoso, permite comprender el comportamiento del mismo ante la aplicación de fuerzas externas generadas por el emplazamiento de diversas obras de ingeniería, tales como presas. Dicho comportamiento, depende directamente de las propiedades físicas del macizo donde se asentarán dichas obras, por lo que se requiere de un estudio integral de las mismas.

En el presente trabajo, se llevó a cabo una caracterización geológico-geotécnica del macizo rocoso donde se emplazará el proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada, a 18 km aguas arriba de la ciudad de Chos Malal (S 37° 22' ; O 70° 28'), en la Provincia del Neuquén. Mediante esta caracterización, se dispondrá de los parámetros geomecánicos y propiedades de las principales unidades geológicas que conforman el terreno de cimentación correspondiente a rocas de la Formación Tordillo.

Se utilizaron tanto datos de perforación correspondientes a información preliminar obtenida en la etapa de anteproyecto, como datos de campo obtenidos a partir de un relevamiento e investigación *in situ* de los afloramientos. En principio, la información de perforación fue procesada en una base de datos; y, por su parte, el relevamiento de campo en estaciones geomecánicas establecidas para la toma sistemática de datos, permitió interpretar las propiedades geológicas-geotécnicas de la matriz rocosa y las discontinuidades que afectan al macizo rocoso.

Para llevar a cabo dicha caracterización, se dividió al macizo rocoso en unidades geotécnicas con la finalidad de establecer unidades de comportamiento geomecánico homogéneo. En función de la información de perforación procesada en la base de datos, se establecieron un total de cinco unidades geotécnicas. Por otro lado, en base al relevamiento efectuado en las estaciones geomecánicas establecidas, se definieron un total de 3 unidades geotécnicas en afloramiento. Dichas unidades, fueron posteriormente correlacionadas de acuerdo a sus propiedades geotécnicas, litológicas y la ubicación de los sondeos con respecto a las estaciones geomecánicas establecidas.

A su vez, para una correcta caracterización e interpretación de los resultados, se optó por confeccionar un mapa geológico actualizado del área bajo estudio. Adicionalmente, se interpretaron perfiles de refracción sísmica realizados en la etapa de anteproyecto por empresas consultoras, con el objetivo de ampliar la información disponible e identificar condiciones geológicas en subsuelo para complementar las interpretaciones realizadas y el relevamiento de campo efectuado.

Sobre la base de los resultados obtenidos y luego de correlacionar la información de perforación con los datos relevados en campo, se aplicó la clasificación geomecánica RMR (*Rock Mass Rating*), a fin de establecer la calidad de las rocas correspondientes a cada unidad geotécnica y la calidad global del macizo rocoso. Los resultados alcanzados, constituyen un aporte científico para la ejecución del proyecto y se sugiere tener en consideración una cantidad adicional de ensayos a futuro.

Palabras clave: caracterización geomecánica, macizo rocoso, estaciones geomecánicas, unidades geotécnicas, RMR, La Invernada.

ABSTRACT

The geological and geotechnical characterization of a rock mass, allows to understand the behavior of the rock mass under the application of external forces generated by the emplacement of various engineering works, such as dams. This behavior depends straightly on the physical properties of the massif where these works will be settled. Therefore, a comprehensive study of them is required.

In this work, a geological-geotechnical characterization of the rock massif was carried out where La Invernada Multipurpose Development project will be located, 18 km upstream of the city of Chos Malal (S 37° 22'; W 70° 28') in the province of Neuquén. Through this characterization, the geomechanical parameters and properties of the main geological units that make up the foundation ground corresponding to rocks of the Tordillo Formation, will be available.

Both drilling data corresponding to preliminary information obtained at the pre-design stage as field data obtained from an in-situ survey and investigation of the outcrops were used. Initially, the drilling information was processed in a database; and, for its part, the field survey in geomechanical stations established for systematic data collection, allowed the interpretation of the geological-geotechnical properties of the rock matrix and discontinuities that affect the rock mass.

To carry out this characterization, the rock mass was divided into geotechnical units in order to establish units of homogeneous geomechanical behavior. Based on the drilling information processed in the database, a total of five geotechnical units were established. On the other hand, based on the survey carried out in the established geomechanical stations, a total of three geotechnical units were defined in outcrop. These units, were subsequently correlated according to their geotechnical and lithological properties and the location of the borings with respect to the established geomechanical stations.

In turn, for a right characterization and interpretation of the results, an updated geological map of the area under study was decided to prepare. Additionally, seismic refraction profiles carried out in the pre-design stage by consulting companies, were interpreted with the aim of expanding the available information and identifying geological conditions in subsoil to complement the interpretations made and the field survey carried out.

Based on the results obtained and after correlating the drilling information with the data collected in the field, the RMR (Rock Mass Rating) geomechanical classification was applied in order to establish the quality of the rocks corresponding to each geotechnical units and the overall quality of the rock mass. The results achieved constitute a scientific contribution for the execution of the project and it is suggested to take into consideration an additional number of trials in the future.

Key words: geomechanical characterization, rock massif, geomechanical stations, geotechnical units, RMR, La Invernada.

DEDICATORIA

*A mi mamá, mi pilar fundamental para alcanzar todas
mis metas y la mujer más fuerte que conozco.*

*¡Gracias por siempre darme tu cariño,
y enseñarme a nunca rendirme!*

AGRADECIMIENTOS

A mi hermoso país, Argentina, por brindarme la oportunidad de formarme en una Universidad pública, gratuita y de gran calidad.

Mi agradecimiento eterno a la Universidad Nacional del Comahue, institución que me permitió formarme integralmente a lo largo de estos años de estudio. Llevo con orgullo su nombre a todos lados.

A mi mamá y papá, Lorena y Héctor, por su constante amor, apoyo y contención. ¡Gracias por siempre motivarme a lograrlo y permitirme estudiar sin preocupaciones! Todo lo que soy es gracias a ustedes. Los amo.

A mis hermanos, Luca y Fran, por su amor y apoyo incondicional. ¡Gracias por tantas risas para evitar los nervios previos a rendir! Los amo.

A mi compañero de vida y colega, Tomi, gracias por tanta paciencia y horas de estudio. Te amo hasta la luna, ida y vuelta.

A mi yo de 17 años que veía este logro tan lejos allá por 2017. Por todo el estudio, esfuerzo y dedicación. ¡Valió la pena todo el tiempo invertido!

A mis facuamigos de todos estos años, gracias por tantas risas, mates, viajes y estudio. Lo hicieron todo mucho más llevadero.

A José Gatica, director de este trabajo y gran profesor, por su paciencia, dedicación y predisposición desde el día uno y durante todo el tiempo transcurrido para la realización de este trabajo.

A los grandes profesionales que conforman la carrera, los cuales tuve el gusto de tener como profesores, por brindarme sus conocimientos e inculcarme el amor y vocación por esta hermosa carrera.

Al jurado evaluador, Lic. Juan Catinari, Dr. Mauricio Giambastiani e Ing. Oscar Navarro, por su gran predisposición y valiosos aportes que contribuyeron a la mejora de este trabajo.

A mis perritos, Bono y Milo, por su fiel compañía durante largas horas de estudio. ¡Gracias!

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS	2
2.1.	OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3.	ANTECEDENTES	2
4.	ÁREA DE ESTUDIO	4
5.	MARCO GEOLÓGICO	5
6.	MARCO TEÓRICO – METODOLÓGICO	7
6.1.	RECOPIACIÓN DE MATERIAL BIBLIOGRÁFICO Y ANTECEDENTES	7
6.2.	INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE SONDEOS. GENERACIÓN DE BASE DE DATOS	7
6.3.	RELEVAMIENTO DE CAMPO	9
6.3.1.	<i>Descripción de las características geológicas de sitio</i>	9
6.3.2.	<i>Definición de estaciones geomecánicas</i>	9
6.3.3.	<i>Levantamiento sistemático de las discontinuidades y características geotécnicas</i>	10
6.4.	TRABAJO DE GABINETE POSTERIOR AL CAMPO	12
6.4.1.	<i>Confeción de mapa geológico</i>	12
6.4.2.	<i>Interpretación y análisis de perfiles de líneas sísmicas</i>	12
6.4.3.	<i>Definición de unidades geotécnicas</i>	13
6.5.	CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO	14
6.5.1.	<i>Clasificación geomecánica RMR (Rock Mass Rating)</i>	15
7.	RESULTADOS	21
7.1.	INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE SONDEOS. GENERACIÓN DE BASE DE DATOS	21
7.2.	RELEVAMIENTO DE CAMPO	30
7.2.1.	<i>Descripción de las características geológicas de sitio</i>	30
7.2.2.	<i>Definición de estaciones geomecánicas</i>	34
7.2.3.	<i>Levantamiento sistemático de las discontinuidades y características geotécnicas</i>	35
7.3.	TRABAJO DE GABINETE POSTERIOR AL CAMPO	44
7.3.1.	<i>Confeción de mapa geológico</i>	44
7.3.2.	<i>Interpretación y análisis de perfiles de líneas sísmicas</i>	45
7.3.3.	<i>Definición de unidades geotécnicas</i>	47
7.4.	CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO	58
7.4.1.	<i>Clasificación geomecánica RMR (Rock Mass Rating)</i>	58
8.	CONCLUSIONES	65
9.	BIBLIOGRAFÍA	68
10.	ANEXOS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio en su contexto regional y local.	4
Figura 2. Geología regional del área bajo estudio y áreas circundantes (Modificado de Garrido et al., 2014).....	6
Figura 3. Ubicación de los sondeos realizados en el área de estudio por las empresas consultoras.	8
Figura 4. Esquema general de ubicación de las principales obras (Emhidro SEP, 2017).	8
Figura 5. Planilla geotécnica para toma de datos en campo.	11
Figura 6. Ubicación de las líneas sísmicas realizadas en el área de estudio por las empresas consultoras.	13
Figura 7. Escala descriptiva de observación para determinar la rugosidad en campo (ISRM, 1978).	20
Figura 8. Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo SD-01 (Elaboración propia).	23
Figura 9. Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo SD-06 (Elaboración propia).	24
Figura 10. Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo SD-07 (Elaboración propia).	25
Figura 11. Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo SD-02 (Elaboración propia).	26
Figura 12. Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo SD-04 (Elaboración propia).	27
Figura 13. Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo SD-03 (Elaboración propia).	28
Figura 14. Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo SD-05 (Elaboración propia).	29
Figura 15. a) Bancos de areniscas finas rojizas aflorantes en la parte alta del macizo, a 29 metros de la ubicación del sondeo SD-06; b) Vista hacia el E, sector de la margen derecha aguas arriba del eje de la presa; afloramiento del contacto inferido entre los bancos de areniscas finas rojizas y el dominio pelítico; c) Pelitas rojizas con desarrollo de pátinas de óxidos en las paredes de las diaclasas subverticales; d) Único afloramiento de pelitas verdes, identificado a pocos metros del sondeo SD-04.	31
Figura 16. Vista hacia el E; bancos de areniscas medianas amarillentas que conforman el talud rocoso natural en la margen izquierda del macizo bajo estudio. En la parte inferior, se observa el contacto entre las areniscas y los niveles de pelitas rojizas alterada.	32
Figura 17. a) Brecha polimictica con desarrollo de venillas subverticales identificada en los puntos 1, 2 y 3; b) Zona de molienda identificada en el punto 4; c) Brecha con presencia de clastos de canto rodado y ausencia de venillas identificada en el punto 5; d) Brecha monomictica constituida por clastos angulares de areniscas identificadas en los puntos 6 y 7.	33
Figura 18. Vista hacia el SO; nivel de conglomerados polimicticos en contacto neto con lentes de arenas grises medianas a gruesas y presencia de material carbonatico hacia el tope de la secuencia.	34
Figura 19. Ubicación de las estaciones geomecánicas (Elaboración propia).	34
Figura 20. a) Areniscas finas rojizas que conforman la estación geomecánica 1. Con líneas punteadas se identifican las redes de diaclasas que afectan el afloramiento; b) Diaclasas subverticales abiertas pertenecientes a la familia de discontinuidades J1; c) Diaclasas horizontales con mayor abertura, correspondientes a la familia de discontinuidades J2.	37
Figura 21. a) Familias de discontinuidades identificadas en la estación geomecánica 2 (EG-2); b) Detalle de la familia de discontinuidades J1 con presencia de pátinas de óxidos en las paredes de las diaclasas; c) Relleno carbonatico de 1 cm de espesor en las diaclasas pertenecientes a la familia de discontinuidades J2.	39
Figura 22. Disposición de las familias de discontinuidades identificadas en la estación geomecánica 3 (EG-3).	40
Figura 23. Diaclasas correspondientes a la familia de discontinuidades J1. En: a) Diaclasa con una extensión de 1 m y abertura de 1 cm con ausencia de relleno; b) Rugosidades y alteración en las paredes de la discontinuidad.	41
Figura 24. Diaclasas verticales correspondientes a la familia de discontinuidades J2. En: a) Diaclasa con una extensión de 1 m y abertura de 1 cm con ausencia de relleno y rugosidades escalonadas; b) Ondulaciones rugosas y alteración en las paredes de la discontinuidad.	42
Figura 25. Diaclasas horizontales correspondientes a la familia de discontinuidades J3 con aberturas de hasta 3 cm y desarrollo de rugosidades escalonadas.	43
Figura 26. Mapa geológico del área de estudio (Elaboración propia).	44
Figura 27. Perfil geológico en sentido sur-norte donde se esquematiza la disposición de las unidades litológicas en el área bajo estudio (Elaboración propia).	45
Figura 28. Perfiles de refracción correspondientes a las líneas sísmicas 1A, 2A, 3A, 4A y 5A (Emhidro SEP, 2017).	46
Figura 29. Mapa de unidades geotécnicas con el esquema de las obras que comprenden el proyecto y la propuesta de estudios a futuro (Elaboración propia).	63
Figura 30. Sección geotécnica que ilustra la disposición de las unidades geotécnicas en subsuelo y su relación con las estaciones geomecánicas en superficie donde fueron relevadas.	64
Figura 31. Planilla geotécnica correspondiente a la estación geomecánica EG-1.	77
Figura 32. Planilla geotécnica correspondiente a la estación geomecánica EG-2.	78
Figura 33. Planilla geotécnica correspondiente a la estación geomecánica EG-3.	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estudios de anteproyecto realizados por las empresas consultoras, cuya información fue utilizada para el presente trabajo.....	7
Tabla 2. Grado de meteorización de la matriz rocosa (ISRM, 1981).....	11
Tabla 3. Parámetros de clasificación y puntuación asignada para el cálculo del índice RMR (González de Vallejo et al., 2002).....	16
Tabla 4. Calidad y características geotécnicas de los macizos rocosos de acuerdo al valor asignado al índice RMR (González de Vallejo et al., 2002).....	17
Tabla 5. Rango de valores de resistencia de la matriz rocosa para diferentes tipos de roca (González de Vallejo et al., 2002).	17
Tabla 6. Valores de resistencia a la compresión simple de areniscas y pelitas, obtenido a partir de ensayos de compresión uniaxial realizados en la etapa de anteproyecto por las empresas consultoras.....	18
Tabla 7. Calidad del macizo rocoso según los valores del parámetro RQD (Palmstrom, 2005).....	18
Tabla 8. Rangos de valores utilizados para definir el valor de continuidad y abertura de las discontinuidades en campo (basado en González de Vallejo et al. 2002).....	19
Tabla 9. Resumen de las características de los testigos relevados en los siete sondeos realizados en la etapa de anteproyecto por las empresas consultoras.	22
Tabla 10. Clasificación de macizos rocosos en función de la permeabilidad en unidades Lugeon (Olalla & Sopeña, 1991)..	22
Tabla 11. Resumen de los valores Lugeon obtenidos en los siete sondeos realizados en la etapa de anteproyecto por las empresas consultoras.	23
Tabla 12. Ubicación de los puntos relevados.....	32
Tabla 13. Coordenadas y litología de los puntos donde se establecieron las estaciones geomecánicas.	35
Tabla 14. Resumen de las características de la UG-1 (s) para el tramo comprendido entre los 33 y 43,7 metros para el sondeo SD-01 y entre los 7,6 y 15,4 metros en el sondeo SD-06.....	48
Tabla 15. Resumen de las características de la UG-2 (s) para el tramo comprendido entre los 15,4 y 29 metros en el sondeo SD-06.....	49
Tabla 16. Resumen de las características de la UG-3 (s) para el tramo comprendido entre los 29 y 65,7 metros en el sondeo SD-06.....	50
Tabla 17. Resumen de las características de la UG-4 (s) para el tramo comprendido entre los 20,6 y 40 metros en el sondeo SD-07.....	51
Tabla 18. Resumen de las características de la UG-5 (s) para los 45 metros del sondeo SD-05.	51
Tabla 19. Clasificación de la permeabilidad de las unidades geotécnicas en función de los ensayos Lugeon.....	52
Tabla 20. Resumen de las características de las unidades geotécnicas a partir de la información de los testigos relevados, considerando los tramos en los que fueron identificadas dichas unidades.	52
Tabla 21. Resumen del valor de RCS para unidades geotécnicas definidas en afloramiento. Comparación entre el valor obtenido mediante índices de campo y el valor obtenido en ensayos de laboratorio por las empresas consultoras.	53
Tabla 22. Índice RQD obtenido para cada una de las unidades geotécnicas determinadas en afloramiento, estimado a partir de la correlación empírica de Palmstrom (1975).....	56
Tabla 23. Litología, sondeo de identificación y parámetros geomecánicos para las unidades geotécnicas determinadas a partir de sondeos. La información correspondiente a separación, longitud y abertura de las discontinuidades se determinó en base a observaciones de campo.	56
Tabla 24. Litología, estación geomecánica y parámetros geomecánicos para las unidades geotécnicas determinadas en afloramiento.	57
Tabla 25. Correlación entre unidades geotécnicas definidas a partir de sondeos y unidades geotécnicas en afloramiento.	57
Tabla 26. Puntuación asignada a los parámetros geomecánicos para las unidades geotécnicas determinadas a partir de sondeos, en base a la metodología propuesta por Bieniawski (1973).....	59
Tabla 27. Puntuación asignada a los parámetros geomecánicos para las unidades geotécnicas determinadas en afloramiento, en base a la metodología propuesta por Bieniawski (1973).....	59
Tabla 28. Síntesis de los valores de RMR obtenidos para cada unidad geotécnica, tanto para las determinadas a partir de sondeos como para las definidas en afloramiento, para su posterior ponderación.	62
Tabla 29. Valores de RMR promedio, específicos para cada unidad geotécnica, de acuerdo a la correlación realizada entre unidades geotécnicas de sondeo y de afloramiento.....	62
Tabla 30. Base de datos correspondiente al sondeo SD-01.	70
Tabla 31. Base de datos correspondiente al sondeo SD-02.	71
Tabla 32. Base de datos correspondiente al sondeo SD-03.	72
Tabla 33. Base de datos correspondiente al sondeo SD-04.	73
Tabla 34. Base de datos correspondiente al sondeo SD-05.	74
Tabla 35. Base de datos correspondiente al sondeo SD-06.	75
Tabla 36. Base de datos correspondiente al sondeo SD-07.	76

1. INTRODUCCIÓN

A diferencia del río Limay, el río Neuquén posee una potencialidad de aprovechamiento hidroeléctrico aun no desarrollada, por lo que frente a la necesidad de garantizar un mayor abastecimiento de agua asociado a un aporte de energía eléctrica renovable, se desarrolló un plan de energía conformado por un conjunto de proyectos de aprovechamiento ubicados en la cuenca media del río Neuquén, los cuales corresponden a: La Invernada, Cerro Rayoso, Chihuido I y Chihuido II.

Particularmente, el desarrollo del proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada no solo tiene como objetivo garantizar el abastecimiento de agua tanto para consumo humano como para sistemas de riego y uso industrial, sino que también, su importancia radica en la regulación y el control de crecidas para brindar mayor seguridad a la población. Conjuntamente con la necesidad de atenuar las crecidas de los ríos, los proyectos establecidos a lo largo de la cuenca media del río Neuquén, y en particular el proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada, permitirán la generación y aporte de energía limpia y renovable al Sistema Interconectado Nacional, siendo una obra fundamental para el incremento de la actividad económica y el desarrollo energético en la región.

La construcción de obras de ingeniería tales como presas, requieren de un entendimiento preciso de las propiedades del macizo rocoso donde se asentarán las mismas. La aplicación de fuerzas externas producto del emplazamiento de estas obras, genera una modificación en las condiciones iniciales del macizo rocoso, lo cual depende directamente de las propiedades físicas del mismo, tales como litología y composición mineralógica de la matriz, presencia de agua, grado de meteorización, alteración y fracturación de la roca, entre otras. Dichas propiedades, definen el comportamiento mecánico del macizo rocoso, por lo que en conjunto con el conocimiento del estado tensional al que se encuentra sometido el medio rocoso, permiten obtener la información necesaria para caracterizar el macizo y evaluar su comportamiento.

En síntesis, la caracterización geomecánica de los macizos rocosos abarca un estudio integral de los mismos, teniendo en cuenta una serie de aspectos geológicos tales como la litología, estructuras y discontinuidades, en conjunto con factores hidrogeológicos, geomorfológicos y geosísmicos, los cuales permiten determinar la calidad del macizo rocoso.

Desde la década del 50 aproximadamente, la aplicación de la mecánica de rocas ha permitido la caracterización de los macizos rocosos a partir de numerosos parámetros propuestos por distintos autores. En general, se emplean parámetros tales como la resistencia de la matriz rocosa; el espaciado, orientación y condición de las discontinuidades, entre otros. Estos parámetros, constituyen sistemas de clasificación de macizos rocosos y surgen a partir de la observación directa del afloramiento en campo y mediante la realización de una serie de ensayos.

Las clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos tienen como objetivo determinar el comportamiento mecánico y la calidad de las rocas, así como también, su respuesta ante la aplicación de fuerzas producto de la construcción de obras superficiales y subterráneas (González de Vallejo *et al.*, 2002). Una de las clasificaciones más utilizadas para la caracterización de macizos rocosos y que será empleada en el presente trabajo, corresponde a la clasificación de Bieniawski (1973), mediante la cual se obtiene el índice RMR (*Rock Mass Rating*) a partir de la combinación de un conjunto de parámetros geomecánicos que

corresponden a propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades presentes en el macizo.

Por lo expuesto, el propósito del presente proyecto, radica en la necesidad de realizar una caracterización geológico-geotécnica del macizo rocoso donde ha sido proyectado el emplazamiento de las obras que comprenden el proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada, de forma que se disponga de la información geológica necesaria, en conjunto con los parámetros geomecánicos de las principales unidades geológicas que conforman el terreno de cimentación. La necesidad de la investigación, surge a partir de la complejidad y cantidad de variables que presenta cada macizo rocoso, por lo que la caracterización de los mismos, posibilita realizar diferenciaciones de acuerdo a su comportamiento (Cartaya Pire, 2006) y garantizar la seguridad de las obras.

El proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada consiste en una presa CFRD (*Concrete Face Rockfill Dam*), constituida por un terraplén de materiales sueltos, correspondientes a gravas provenientes del río Neuquén, con una losa de hormigón en su cara aguas arriba (Emhidro S.E.P, 2017). Dicho proyecto generará la presencia de un lago de 5.300 Ha con un volumen total de 2.500 Hm³ de agua, que alcanzará un nivel máximo normal de 1014 msnm generando un salto bruto de 138 metros.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

- Caracterizar desde el punto de vista geológico y geomecánico el macizo rocoso en el cual se emplazará el proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada.

2.2. Objetivos Específicos

- Recopilar y analizar la información obtenida en la etapa de anteproyecto.
- Realizar un levantamiento sistemático de las discontinuidades y características geológicas de sitio, y su correlación con la información de perforación del estudio de anteproyecto.
- Identificar y sectorizar variaciones en el comportamiento geomecánico del macizo rocoso.

3. ANTECEDENTES

El área bajo estudio, correspondiente al macizo rocoso que se encuentra en el sitio de emplazamiento de las obras que conforman el proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada, carece, hasta el momento, de estudios en los que se realice una caracterización geomecánica del mismo. Los trabajos e informes realizados se limitan a relevamientos geológicos y geotécnicos para identificar los materiales presentes en el sitio de interés, sin aplicar metodologías respecto a clasificaciones geomecánicas para definir la calidad del macizo rocoso.

A partir de la década del 90 es que se registran informes técnicos y trabajos de campo que se desarrollaron con el objetivo de disponer de la información geológica y geotécnica requerida para el diseño de las presas pertenecientes a un plan de energía que incluye un conjunto de proyectos denominados, actualmente, “Neuquén Medio”, integrado por La Invernada. En el presente, estos estudios se encuentran enmarcados en el Programa de Estudios del Sector

Energético (PESE), el cual incluye todos los trabajos efectuados para el futuro desarrollo de proyectos hidroeléctricos pertenecientes al Plan Hidroeléctrico de la Provincia del Neuquén, localizados en la cuenca media del río Neuquén. En dichos trabajos, Emhidro S.E.P llevó a cabo un relevamiento geológico para caracterizar la geología regional del área bajo estudio en conjunto con un análisis de las características topográficas, mediante un convenio con la Dirección Provincial de Minería del Neuquén.

Vinculado a la geología del área, la Dirección General de Minas, Geología e Hidrología realizó el Informe N° 58 “Líneas fundamentales de la geología del Neuquén, sur de Mendoza y regiones adyacentes”, a cargo de Groeber (1929) donde se define a las rocas aflorantes en la zona bajo estudio corresponden a areniscas y tufitas sequaniano – kimmeridgianas que infrayacen depósitos de calizas neocomianas tithonianas.

Entre los trabajos destinados a la descripción geológica del área bajo estudio, se encuentran también los desarrollados por Valicenti (1994) y Valicenti (1995), quien, a pedido del Consejo Federal de Inversiones y por requerimiento de la Provincia del Neuquén, realizó un análisis y descripción de los sitios de emplazamiento de un conjunto de aprovechamientos hidráulicos en la zona norte de la Provincia del Neuquén, con la finalidad de determinar su potencial hidroeléctrico. El autor señaló que la litología de los depósitos aflorantes corresponde a tobas kimmeridgianas intercaladas con pelitas y con un buzamiento de 20° al NNE, calificando el sitio de emplazamiento como “apto”, sin embargo, sugiere la realización a futuro de estudios pertinentes que garanticen un registro de la calidad del macizo rocoso.

En marzo de 2017, la empresa Consulval S.R.L realizó cuatro calicatas en el área de La Invernada (por encargo del grupo consultor), siguiendo una serie de criterios geológicos, geomorfológicos y geotécnicos, con el objetivo de describir el material aluvial presente a orillas del río Neuquén y efectuar perfiles estratigráficos de las muestras obtenidas. Adicionalmente, se llevó a cabo un estudio petrográfico de las muestras obtenidas con el fin de realizar un análisis granulométrico de las mismas bajo la norma IRAM 1649, a cargo de Cano *et al.* (2017), desarrollado en el Instituto de Investigaciones Mineras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan. Los autores aplicaron una metodología que permite determinar la resistencia a la abrasión del material muestreado por medio de la Máquina “Los Ángeles”, de forma que se pudo determinar la calidad del material a partir de la pérdida del mismo con respecto a la masa inicial. Se estudiaron un total de 12 muestras sedimentológicas, 3 por calicata, de las cuales solo 2 se consideraron representativas y fueron seleccionadas para la realización del ensayo de desgaste “Los Ángeles”.

En mayo del mismo año, se llevó a cabo una investigación geotécnica del subsuelo en el área bajo estudio, mediante la realización de sondeos verticales y perforaciones para la extracción de muestras y testigos. Se realizaron, respectivamente, 7 sondeos a cargo de las empresas Intertechne Consultores S.A, Oscar G. Grimaux Consultora, H.I.S.S.A. Hidronor Ingeniería y Servicio S.A y HCA Consultora S.R.L, en el marco del ya mencionado, Programa de Estudios en el Sector Energético (PESE) de la República Argentina.

Posteriormente, en cuanto a los estudios geosísmicos de la zona bajo estudio, se cuenta con estudios de investigación geofísica desarrollados por el grupo consultor, realizados en la etapa de anteproyecto. Estos trabajos consistieron en la aplicación de los métodos de Tomografía Sísmica y Sísmica de Refracción (medición de ondas sísmicas) para obtener resultados que permitan interpretar y cartografiar las propiedades físicas y condiciones geológicas del subsuelo. Se efectuaron 5 perfiles de refracción y 4 ensayos MASW, a partir de 5 líneas sísmicas ubicadas sobre el macizo que se encuentra en la margen derecha del río.

4. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio del presente proyecto se ubica en el centro-oeste de Argentina, respectivamente en la región noroeste de la Provincia del Neuquén (S 37° 22' ; O 70° 28'), a 18 km al oeste, en línea recta, de la localidad de Chos Malal (Fig. 1), y comprende los afloramientos situados al norte de la Ruta Provincial 6, al margen del río Neuquén, los cuales constituyen el macizo rocoso donde se asentará la presa de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada. Particularmente, dicho proyecto, se ubicará sobre el río Neuquén en la provincia homónima, a 18 km aguas arriba de la ciudad de Chos Malal.

La vía de acceso principal al afloramiento es a pie, realizando un descenso de 320 metros, por medio de un camino desarrollado para el tránsito de maquinaria, al cual se accede por la Ruta Provincial 6, luego de un trayecto de 36 km desde la localidad de Chos Malal.

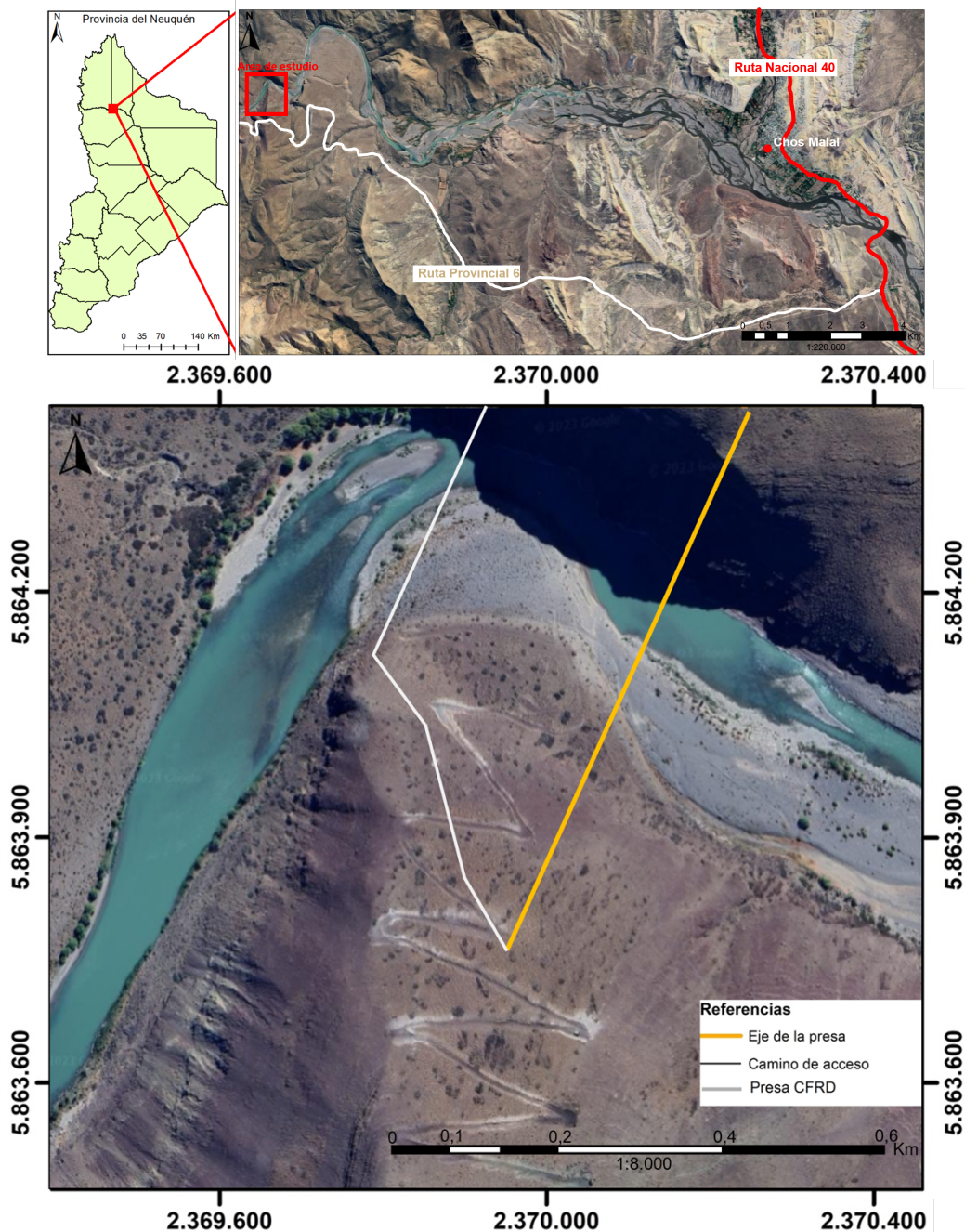


Figura 1. Ubicación del área de estudio en su contexto regional y local.

5. MARCO GEOLÓGICO

La caracterización de un macizo rocoso y el comportamiento mecánico de las rocas dependen, entre otros factores, de las condiciones a las que se encuentran sometidos en la naturaleza, es decir, de los procesos y estructuras tectónicas que afectan a las rocas. Por esta razón, resulta necesario exponer, de forma general, el conocimiento geológico de las unidades aflorantes y el contexto geotectónico de la zona, ya que permitirán analizar y comprender los resultados obtenidos.

El área de trabajo se encuentra emplazada en el sector interno de la faja corrida y plegada de Chos Malal, una zona de intensa deformación desarrollada durante la orogenia Andina, como resultado de la subducción de una serie de placas Pacíficas por debajo de la placa Sudamericana (Turienzo *et al.*, 2018). Esta unidad morfoestructural forma parte de la Cordillera Principal (Sánchez *et al.*, 2014) y se caracteriza por involucrar en la deformación a las rocas mesozoicas que constituyen el relleno de la Cuenca Neuquina. Sin embargo, autores como Garrido *et al.* (2014) definen el área de estudio como parte integrante del sector interno de la faja corrida y plegada del Agrio, por lo cual es importante destacar que en este sector coexisten dos megaestructuras de deformación, ambas producto de la dinámica de placas en el margen occidental de América del Sur y la contracción generada en la región de retroarco de los Andes Centrales. Autores como Lebinson *et al.* (2018), describen en el sector bajo estudio, es decir, en el sector norte de la faja corrida y plegada del Agrio, la presencia de diversas estructuras de deformación tales como pliegues anticlinales y sinclinales, de vergencia y escala variable, con una orientación predominantemente NNW-SSE (Fig. 2)

Con respecto a las unidades geológicas involucradas, el sitio de emplazamiento del proyecto se caracteriza por la presencia de afloramientos jurásicos que incluyen los depósitos basales del Grupo Mendoza, correspondientes a las formaciones Tordillo y Vaca Muerta, de edad kimmeridgiana y tithoniana, respectivamente (Casadío & Montagna, 2015) (Fig. 2).

El Grupo Mendoza, antiguamente definido como Mendociano, da inicio, según Groeber (1946) y Groeber *et al.* (1953), a la depositación de una sucesión litológica correspondiente a un segundo ciclo sedimentario en la Cuenca Neuquina, denominado ciclo Ándico. Este ciclo sedimentario desarrollado desde el Jurásico Superior hasta el Cretácico Inferior, integra un extenso registro de depósitos continentales y marinos intercalados, correspondientes a ciclos de continentalización e inundación de la cuenca. Hacia la base, las sedimentitas clásticas continentales correspondientes al Grupo Mendoza Inferior, se encuentran limitadas por la discordancia Intramálmica, vinculada a una etapa de reactivación tectónica de la cuenca (Casadío & Montagna 2015) hace 155 millones de años.

Estos depósitos se acumularon producto del desarrollo de un régimen de subducción en el margen occidental de Gondwana, lo cual, dio lugar a la generación y alzamiento del primer arco volcánico mesozoico y a una etapa de cuenca de retroarco. Como resultado de la desconexión temporaria de la cuenca con el océano Pacífico (Zavala *et al.*, 2008a) y de la generación de un mayor espacio de acomodación producto de la extensión generalizada detrás del arco, se produjeron períodos sedimentarios de carácter continental que se alternarían, posteriormente, con facies marinas producto de sucesivas transgresiones pacíficas, conformando así, los depósitos correspondientes a la etapa de *sag* de la cuenca.

La secuencia litológica del intervalo Kimmeridgiano-Tithoniano de la Cuenca Neuquina, se compone de potentes depósitos de sedimentos clásticos correspondientes a sistemas aluviales,

fluviales efímeros y de *playa lake* (Gulisano, 1988) asignados a la Formación Tordillo, en la cual también se registran depósitos continentales de origen eólico (Maretto *et al.*, 2002) y depósitos asociados a sistemas lacustres. Cabe destacar que en el área bajo estudio del presente trabajo, se define a la Formación Tordillo como una asociación predominantemente fluvial con facies de depósitos proximales asignados a abanicos aluviales (Spalletti *et al.*, 2011). Estos depósitos continentales culminan con la depositación de lutitas negras de ambiente marino profundo correspondientes a la Formación Vaca Muerta, producto de una de las máximas transgresiones provenientes del océano Pacífico.

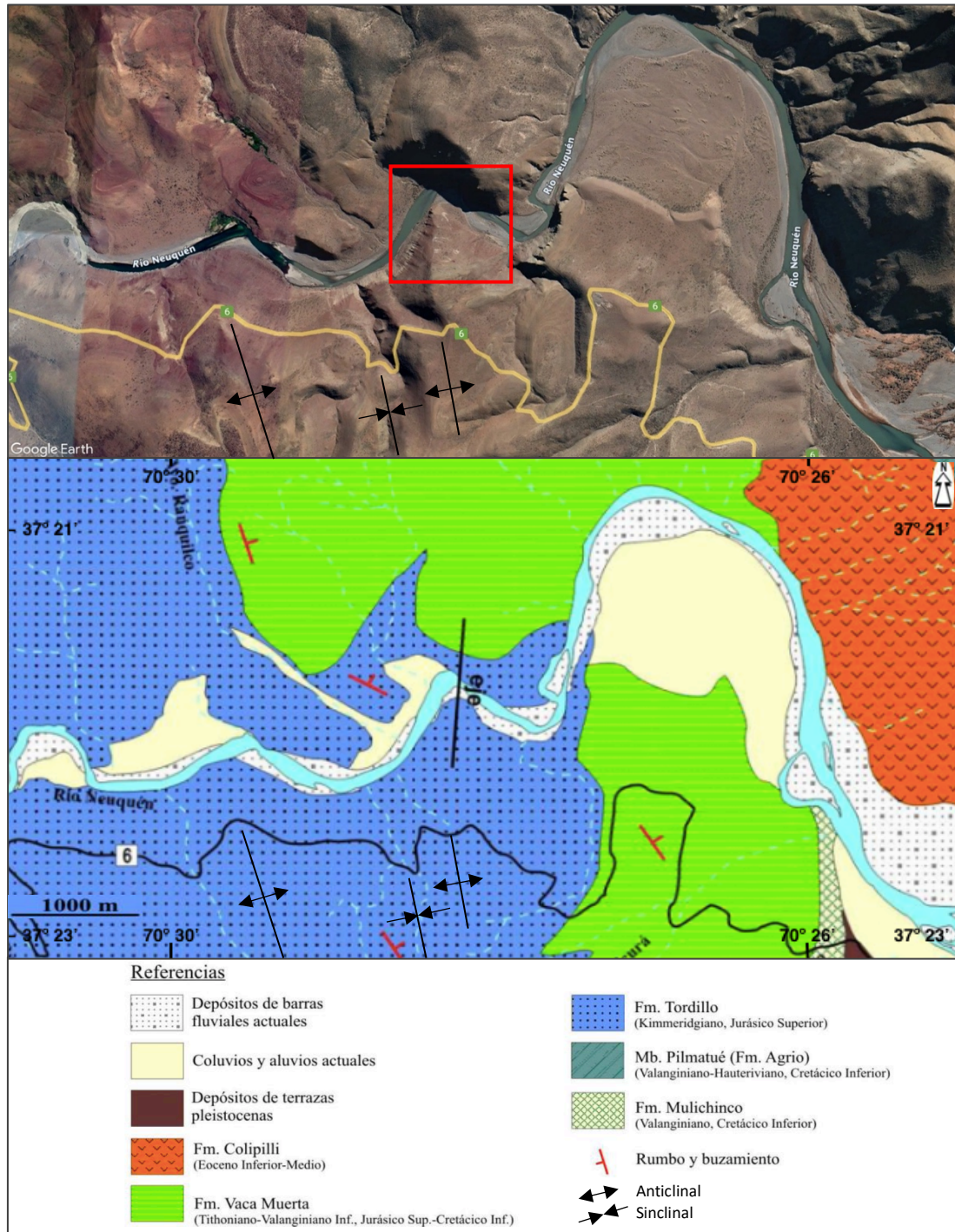


Figura 2. Geología regional del área bajo estudio y áreas circundantes (Modificado de Garrido *et al.*, 2014).

6. MARCO TEÓRICO – METODOLÓGICO

6.1. Recopilación de material bibliográfico y antecedentes

Previo al trabajo de campo, se estableció el área de investigación condicionada a la ubicación de las obras, por lo que se definió como objeto de estudio al macizo rocoso ubicado en la margen derecha del río Neuquén, ya que el mismo conforma el terreno de cimentación y, a su vez, cuenta con información perteneciente a estudios realizados en la etapa de anteproyecto.

Se realizó una investigación bibliográfica en la que se analizaron trabajos efectuados en nuestro país y en el resto del mundo, con el fin de evaluar los procedimientos que fueron empleados en el estudio geotécnico de macizos rocosos. Sobre la base de esta información existente, fue posible definir una metodología apropiada para la caracterización de macizos rocosos asociados a sitios de emplazamiento de presas.

Posteriormente, se llevó a cabo una recopilación y revisión de antecedentes bibliográficos y cartográficos del área bajo estudio, utilizados como base para la posterior caracterización geológica del área. A su vez, para la elaboración del presente trabajo, se utilizaron datos de sondeos y sísmica de refracción provistos por la empresa Emhidro S.E.P, a partir de los cuales se procedió al análisis e interpretación de la información disponible para caracterizar el objeto de estudio, es decir, el macizo rocoso (Tabla 1).

Estudios de anteproyecto realizados por las empresas consultoras		
Tipo de estudio	Cantidad	Descripción
Sondeos	7	Seis en la margen derecha y uno en la margen izquierda del río Neuquén. Se extrajeron datos correspondientes a: RQD, recuperación y características de las discontinuidades.
Ensayos de compresión uniaxial	3	Tres ensayos para determinar la RCS; dos en areniscas y uno en pelitas.
Perfiles de refracción	5	A partir de cinco líneas sísmicas sobre el macizo rocoso ubicado en la margen derecha del río Neuquén.
Ensayos Lugeon	?	En tramos de cinco metros. No se realizó Lugeon en el sondeo SD-01.

Tabla 1. Estudios de anteproyecto realizados por las empresas consultoras, cuya información fue utilizada para el presente trabajo

6.2. Interpretación y análisis de sondeos. Generación de base de datos

La testificación geológica-geotécnica de sondeos consiste en la generación de un registro y descripción de los testigos obtenidos, de forma que se cuente con una descripción detallada de aquellas muestras que son representativas de las características y propiedades del terreno. La descripción de los testigos consiste en registrar el tipo de litología, consistencia, grado de alteración y recuperación de las rocas, como así también, realizar una descripción de las características de las discontinuidades tales como tipo de fractura, alteración, rugosidad, relleno y abertura.

Con el fin de reunir los criterios adecuados que permitan conocer y cuantificar los parámetros geológicos y geotécnicos de la zona, y de esta manera cumplir con los objetivos propuestos, se realizó la revisión e interpretación de siete sondeos realizados en el área de estudio por las empresas consultoras (Fig. 3). Dichas empresas realizaron un total de seis perforaciones sobre la margen derecha del río Neuquén, en el sector donde se emplazarán el eje de la presa y los túneles de desvío; mientras que sobre la margen izquierda se realizó un único sondeo denominado SD-05, donde se ubicará la sala de máquinas y el circuito de aducción de la presa (Fig. 4). Particularmente, el sondeo SD-03 se perforó sobre los depósitos aluviales del río Neuquén.

El procedimiento consistió en extraer los datos de interés de los registros de las perforaciones realizadas, lo cual permitió contar con información preliminar de cada sondeo para su posterior descripción y análisis. Para el procesamiento de la información obtenida, se generó una base de datos en una planilla Excel en formato .xls, asignando distintos atributos de interés, útiles para catalogar la información de cada uno de los siete sondeos y realizar una correlación con la geología aflorante.

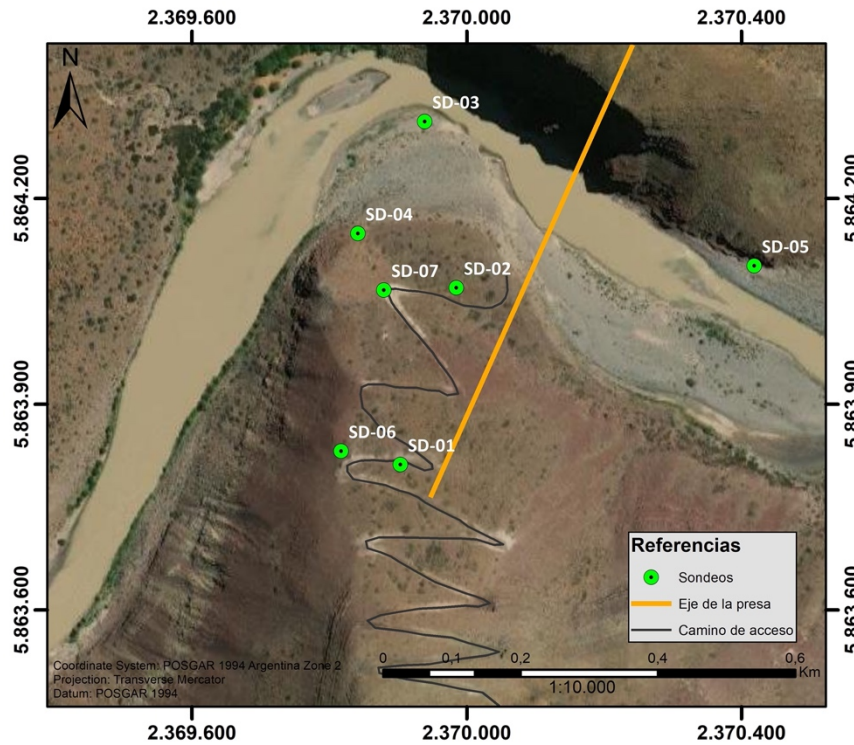


Figura 3. Ubicación de los sondeos realizados en el área de estudio por las empresas consultoras.

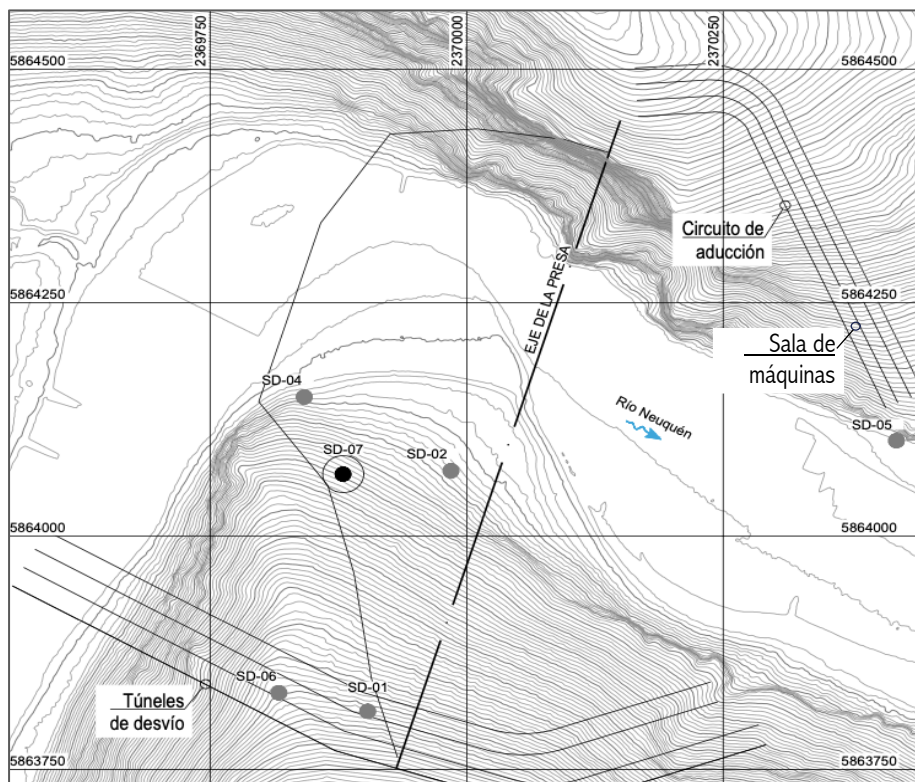


Figura 4. Esquema general de ubicación de las principales obras (Emhidro SEP, 2017).

6.3. Relevamiento de campo

La descripción del macizo rocoso en campo es un procedimiento fundamental para, a partir de todos los datos obtenidos, clasificar geomecánicamente el macizo rocoso mediante, en este caso, el índice RMR (*Rock Mass Rating*). Según González de Vallejo *et al.* (2002), la primera etapa para evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos consiste en realizar una investigación *in situ* del afloramiento, en la que se describan, de forma precisa y sistemática, todas las características físicas y aspectos observados en el mismo, los cuales son la base para la posterior interpretación de los datos y caracterización de los componentes de un macizo.

Para la elaboración del presente trabajo, se llevó a cabo un relevamiento geológico de campo, el cual tuvo una duración de tres días, donde se realizó un análisis detallado de la geología y características geotécnicas de las rocas en el macizo bajo estudio. El reconocimiento de campo se llevó a cabo, respectivamente, a lo largo del eje de la presa y en zonas de interés de acuerdo a la ubicación de obras como los túneles de desvío (Fig. 4).

Se tuvieron en cuenta una serie de etapas de trabajo de acuerdo a los datos de campo requeridos, para la posterior correlación de los mismos con la información de perforación del estudio de anteproyecto.

6.3.1. Descripción de las características geológicas de sitio

Se recorrió el área de estudio examinando las unidades litológicas aflorantes y recopilando datos geológicos correspondientes al tipo de material, composición litológica dominante, alteración y relaciones estratigráficas, como así también, la presencia de estructuras que afectan a cada litología. El relevamiento se llevó a cabo en el sentido del eje de la presa, es decir, de sur a norte y de cotas mayores a menores. Se efectuó, a su vez, un relevamiento exhaustivo en sectores que no se encontraban mapeados y se cotejaron los datos recopilados con la geología de superficie preliminar del estudio de anteproyecto, para la realización de un mapa geológico actualizado.

6.3.2. Definición de estaciones geomecánicas

Las estaciones geomecánicas son zonas de observación de un afloramiento rocoso en las que se realiza una toma sistemática de datos cuantitativos que permiten, posteriormente, interpretar las propiedades geológicas y características geomecánicas de las rocas. Si bien esta información se complementa con los datos obtenidos de los registros de perforación, su utilidad recae en que cierta información como la longitud, espaciamiento y el estado general de las juntas, no puede ser medida en un testigo de roca debido a que los sondeos brindan únicamente información en profundidad de las rocas en un sector puntual del macizo rocoso.

Luego de realizar el reconocimiento de campo a lo largo del eje de la presa, se definieron las zonas para establecer estaciones geomecánicas para la toma de datos en campo, ubicadas en bancos rocosos representativos de las unidades litológicas reconocidas en la sección 6.3.1. Estas estaciones geomecánicas se situaron estratégicamente siguiendo el esquema de obras del proyecto La Invernada y de acuerdo a la localización de los sondeos, para la posterior correlación de la información. La cantidad de estaciones geomecánicas definidas en campo se vio condicionada por la accesibilidad a los afloramientos, ya que, en determinadas áreas, la unidad objetivo aflora en sectores del macizo que poseen una elevada pendiente.

6.3.3. Levantamiento sistemático de las discontinuidades y características geotécnicas

La disposición de las estaciones geomecánicas permitió realizar una descripción de las discontinuidades y de la matriz rocosa, en sectores representativos de unidades litológicas de interés. Durante el relevamiento, en cada estación geomecánica se realizaron las mediciones y observaciones pertinentes siguiendo la planilla de la Figura 5, en el que se tomaron los siguientes datos:

- Localización: coordenadas geográficas y cota.
- Tipo de roca.
- Alteración: estimación visual del grado de meteorización de la matriz rocosa según la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1981) (Tabla 2).
- Resistencia a la compresión simple estimada mediante los índices de campo definidos por la ISRM (1981).
- Grado de fracturamiento.
- Estado de las discontinuidades: tipo, familia, espaciamiento, longitud, abertura, rugosidad, relleno, alteración y presencia de filtraciones.

PLANILLA GEOTÉCNICA													
PROYECTO						Fecha:							
GEÓLOGO:						COORDENADAS:							
SECTOR DESCRIPTIVO:													
CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS GENERALES													
Litología:													
Alteración:						Observaciones:							
CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS													
Resistencia a la compresión simple:		R ₀	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆					
Número de juntas por longitud analizada:		n° J ₁	L ₁	n° J ₂	L ₂	n° J ₃	L ₃	n° J ₄	L ₄	n° J ₅	L ₅	n° J ₆	L ₆
Agua freática:		Seco		Lig. Húmedo		Húmedo		Goteando		Agua fluyendo			
CARACTERÍSTICAS DE LAS DISCONTINUIDADES										RCS de la matriz rocosa			
Tipo	Familia	Azmut	Inclinación	Espaciamiento	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Indices de campo para la identificación en campo de la resistencia a la compresión simple (ISRM, 1981):			
										R ₀	Se puede marcar con la uña		
										R ₁	Al golpear con la punta del martillo la roca se desmenuza. Con navaja se talla fácilmente.		
										R ₂	Al golpear con la punta del martillo se producen ligeras marcas. Con la navaja se talla con dificultad.		
										R ₃	Con un golpe fuerte puede fracturarse. Con navaja puede tallarse.		
										R ₄	Se requiere más de un golpe de martillo para fracturarla.		
										R ₅	Se requieren muchos golpes de martillo para fracturarla.		
										R ₆	Al golpear con el martillo solo saltan esquirlas.		

Figura 5. Planilla geotécnica para toma de datos en campo.

Termino	Descripción
Fresca (sana)	No se observan signos de meteorización en la matriz rocosa, tal vez ligera decoloración sobre las superficies de las discontinuidades principales.
Ligeramente meteorizada	Se observan cambios en el color original de la roca matriz. Es conveniente indicar el grado de cambio. Todo el material rocoso puede estar decolorado por meteorización y puede ser algo más débil externamente que en su condición fresca. Si se observa que el cambio de color se restringe a uno o algunos minerales se debe mencionar.
Moderadamente meteorizada	Menos de la mitad del material rocoso está descompuesto y/o desintegrado en suelo. Roca fresca decolorada está presente aún, formando un esqueleto discontinuo o como núcleos de roca
Completamente meteorizada o descompuesta	Más de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada a suelo. La roca se ha alterado al estado de un suelo, manteniéndose la fábrica original formando un esqueleto discontinuo o como núcleos de roca. La roca es friable, pero los granos minerales no están descompuestos.
Suelo residual	Todo el macizo rocoso se ha transformado en un suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material.

Tabla 2. Grado de meteorización de la matriz rocosa (ISRM, 1981).

Los discontinuidades presentes en el macizo rocoso constituyen planos preferentes de alteración, meteorización y fractura, por lo cual condicionan tanto las propiedades como el comportamiento geomecánico del macizo. Debido a su importancia para caracterizar geotécnicamente un macizo rocoso, se realizó un reconocimiento y descripción de las familias de discontinuidades presentes en las estaciones geomecánicas definidas, aplicando conceptos pertenecientes a la técnica *scanline mapping* o mapeo por línea de detalle (Priest & Hudson, 1981). El proceso de toma de datos de campo consistió en un muestreo geológico en una línea, con una longitud determinada, extendida a lo largo del banco representativo de cada estación geomecánica. A lo largo de esta línea, se tomaron datos de orientación, espaciamento,

continuidad, abertura, rugosidad, alteración, relleno y presencia de agua; para cada una de las familias de discontinuidades definidas.

Para la medición de los datos, se acudió al uso de brújulas Brunton para la recolección de datos estructurales y de dispositivos GPS para la localización de puntos de toma de datos. Se realizó un registro de documentación fotográfica como respaldo visual de la condición de las estaciones geomecánicas en el momento en que fue realizado el relevamiento.

Con la información obtenida del relevamiento de cada estación geomecánica, se procedió a evaluar las unidades litológicas en gabinete, realizando un análisis conjunto de la información de campo y la información interpretada de sondeos.

6.4. Trabajo de gabinete posterior al campo

6.4.1. Confección de mapa geológico

Con el objetivo de contar con un mapa geológico actualizado del área bajo estudio, para la correcta interpretación de los resultados al momento de identificar y sectorizar variaciones en el comportamiento geomecánico del macizo rocoso, se realizó un mapa geológico (escala 1:8.000) centrado en el sector donde se emplazará la presa, utilizando la herramienta ArcGIS.

A su vez, se digitalizó un perfil geológico en sentido sur-norte utilizando el programa CorelDRAW®, donde se representan las unidades litológicas y sus relaciones estratigráficas, de acuerdo a las observaciones realizadas en campo y su correlación con la información de perforación.

6.4.2. Interpretación y análisis de perfiles de líneas sísmicas

La sísmica de refracción es un método geofísico de prospección que permite determinar espesores, velocidades y propiedades de los materiales presentes en el subsuelo. El método se basa en la medición del tiempo de propagación de las ondas sísmicas entre una fuente, desde la cual se emiten las ondas, y receptores, a los cuales arriban las perturbaciones generadas.

La interpretación de perfiles de refracción sísmica, permite caracterizar las condiciones geológicas del subsuelo en distintas zonas e identificar cambios litológicos o cambios en las condiciones en las que se encuentran las unidades geológicas en cuanto a su alteración y fracturamiento. Estos análisis se realizan en base a la velocidad de propagación de las ondas sísmicas P en las distintas unidades que componen el subsuelo, lo cual permite realizar interpretaciones de las propiedades de los materiales presentes en el subsuelo, ya que las velocidades de propagación pueden correlacionarse con numerosas propiedades geomecánicas debido a que depende de los parámetros elásticos del material. En líneas generales, los medios rocosos presentan mayores velocidades de propagación de las ondas sísmicas, mientras que las velocidades bajas corresponden a suelos o aluviones. El valor de velocidad de propagación de las ondas sísmicas para rocas varía entre 1000 y 6000 m/s, con valores elevados que se encuentran en un rango entre 2500 y 5000 m/s para rocas intactas de buena calidad, y valores bajos de 1400 a 2000 m/s para rocas muy fracturadas, alteradas o meteorizadas. Para los suelos, la velocidad de propagación varía entre 170 y 900 m/s; y en el caso de materiales saturados como depósitos aluviales próximos a un río, se obtienen valores de hasta 1800 m/s, ya que la humedad aumenta la velocidad sísmica.

Con el fin de complementar la información de perforación y poseer información adicional acerca de la disposición de las unidades en el subsuelo para discriminar cambios litológicos o definir distintos estados de alteración de los materiales, se analizaron los perfiles de refracción obtenidos a partir de la ejecución de cinco líneas sísmicas realizadas en el área de estudio por las empresas consultoras (Fig. 6).

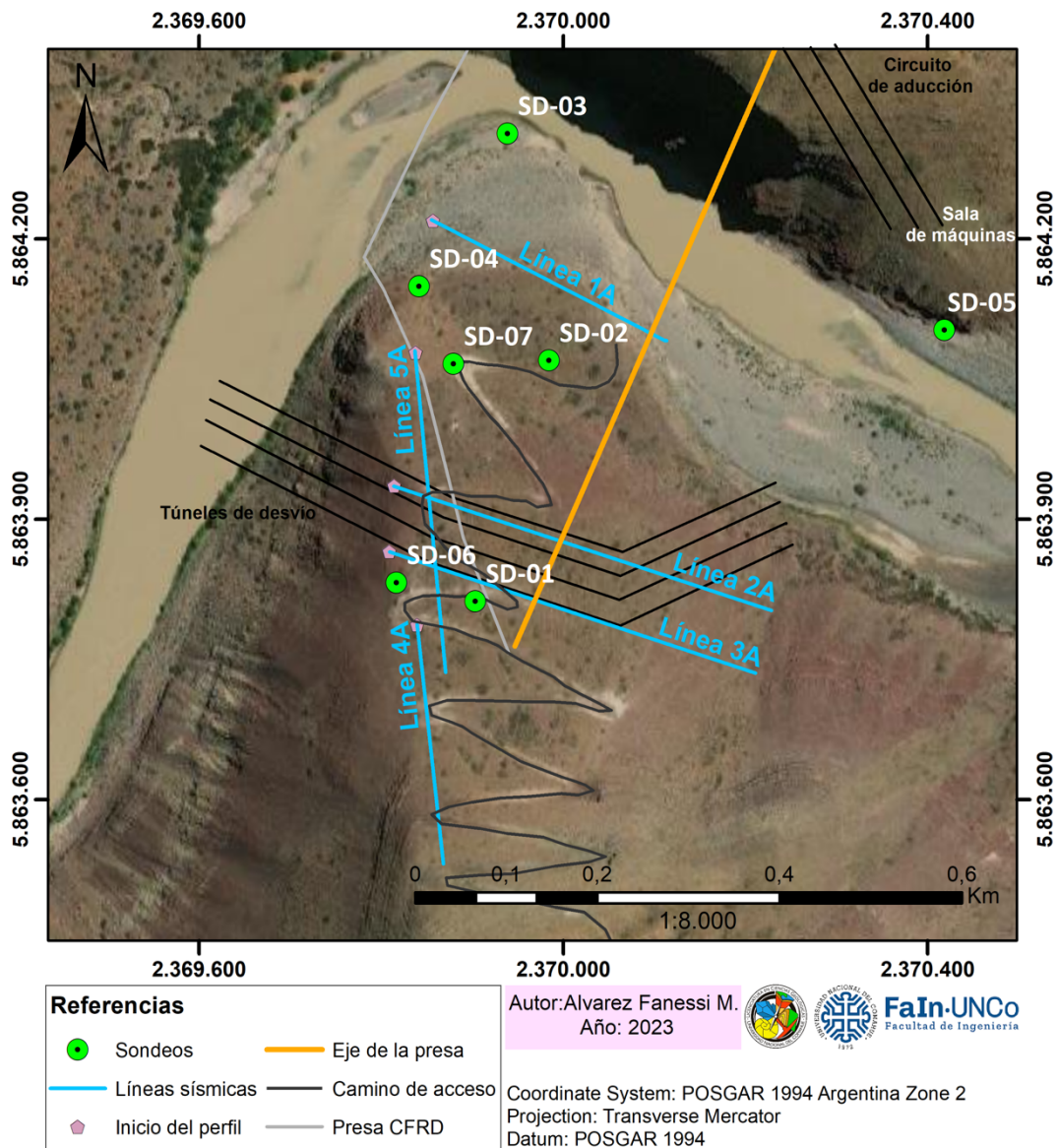


Figura 6. Ubicación de las líneas sísmicas realizadas en el área de estudio por las empresas consultoras.

6.4.3. Definición de unidades geotécnicas

Las unidades geotécnicas son capas del terreno que se caracterizan por presentar un determinado comportamiento geomecánico. Una unidad geotécnica puede estar compuesta por dos o más unidades geológicas independientes que presentan características físicas y mecánicas en común; o incluso, en algunos casos, puede ocurrir que la división del terreno en unidades geotécnicas coincida con las unidades geológicas.

En el área bajo estudio, se realizó un análisis de la información disponible sobre la configuración del subsuelo a partir del perfil geológico realizado, la información recopilada en estaciones geomecánicas, los datos extraídos de sondeos procesados en la base de datos y la

interpretación de perfiles de refracción sísmica. En base a esta información, la división del macizo en unidades geotécnicas se efectuó de acuerdo a las propiedades geotécnicas de cada unidad litológica, con la finalidad de establecer unidades de comportamiento geomecánico homogéneo.

Para el presente trabajo, se optó por definir, en principio, unidades geotécnicas a partir de los datos de perforación y, por otro lado, unidades geotécnicas en afloramiento de acuerdo al relevamiento de campo realizado en las estaciones geomecánicas establecidas.

Posteriormente, se realizó una correlación de unidades geotécnicas de sondeo con unidades geotécnicas de campo, de acuerdo a la relación existente entre los datos cuantitativos y ensayos de laboratorio correspondientes a la información de perforación del estudio de anteproyecto con las observaciones y mediciones realizadas en campo. Para su correlación se tuvo en cuenta la semejanza entre unidades relevadas en campo con unidades identificadas en los testigos de perforación de acuerdo a sus propiedades geotécnicas, litológicas y conforme a la ubicación de los sondeos con respecto a las estaciones geomecánicas establecidas en campo.

De esta forma, se correlacionó la información relevada en campo con la información de perforación del estudio de anteproyecto, para su posterior caracterización geomecánica.

6.5. Caracterización geomecánica del macizo rocoso

Los macizos rocosos se definen como medios heterogéneos con un comportamiento anisótropo, lo cual implica zonas con diferentes comportamientos y propiedades resistentes de acuerdo a las condiciones geológicas y a las tensiones naturales a las que se encuentran sometidos (González de Vallejo *et al.* 2002). La descripción y caracterización de los macizos rocosos permite pronosticar el comportamiento que tendrá un macizo ante la aplicación de fuerzas externas, tales como el emplazamiento de obras civiles, donde el material rocoso constituye el soporte de grandes estructuras.

El comportamiento geomecánico de un macizo rocoso es función de las propiedades intrínsecas de los materiales que lo constituyen, tales como el tipo de roca y su grado de alteración, el grado de fracturación definido por los planos de discontinuidad que afectan a un macizo y la presencia de agua. La gran variabilidad de estas propiedades, se refleja en comportamientos mecánicos diferentes, por lo que en la descripción no debe omitirse información sobre el afloramiento y se deben incluir todos los aspectos y parámetros que sean observados y medidos tanto en la matriz rocosa como en las discontinuidades.

- Matriz rocosa: bloques de roca intacta que, a pesar de poseer una fábrica microscópica, no se encuentran afectados por discontinuidades, sino que se ocurren entre las discontinuidades.
- Discontinuidad: planos de debilidad que separan bloques de matriz rocosa.

6.5.1 Clasificación geomecánica RMR (Rock Mass Rating)

Las clasificaciones geomecánicas permiten evaluar las propiedades y características de los macizos rocosos, con el fin de determinar la calidad de los mismos en función de determinados parámetros geomecánicos. La obtención de estos parámetros, se realiza mediante observaciones rigurosas en el campo y a través de un análisis e interpretación de datos de perforación.

En general, según el uso o función del macizo, se aplican distintos sistemas de clasificación geomecánica y se consideran distintos parámetros geotécnicos. Por lo tanto, la necesidad de evaluar la calidad de los macizos rocosos sobre los cuales han sido proyectadas obras de ingeniería, constituye un procedimiento fundamental no solo para su caracterización, sino también para garantizar la estabilidad de las obras.

La clasificación geomecánica RMR, propuesta por Bieniawski en 1973, es uno de los sistemas de clasificación de macizos rocosos más utilizado para estimar la respuesta de un macizo rocoso ante acciones antrópicas. Esta clasificación, permite establecer un índice de la calidad del macizo rocoso, denominado RMR (*Rock Mass Rating*), a partir de la valoración numérica de cinco parámetros geomecánicos que influyen en el comportamiento del macizo:

- Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa.
- RQD (*Rock Quality Designation*).
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Agua freática.

En el caso bajo estudio, el macizo fue dividido en unidades geotécnicas de acuerdo a la información de perforación y de acuerdo a los datos recopilados en la etapa de relevamiento de campo en las estaciones geomecánicas. Por lo que serán los parámetros geomecánicos de cada unidad geotécnica, los que en gabinete, serán valorados numéricamente.

En principio, en el caso de unidades geotécnicas establecidas a partir de los sondeos, los parámetros geomecánicos se determinaron a partir de la información correspondiente a registros de perforación, y se acudió a datos de campo en caso de ser necesario. Para las unidades geotécnicas determinadas a partir del relevamiento de campo en estaciones geomecánicas, los parámetros de clasificación anteriormente mencionados se determinaron a partir de un análisis cuali-cuantitativo en campo.

A partir de la obtención de los parámetros geomecánicos para cada unidad geotécnica, se procedió a realizar la calificación de los mismos de acuerdo a los valores de puntuación definidos por Bieniawski (1973) (Tabla 3).

Luego de establecer la puntuación correspondiente a cada parámetro de clasificación, se realizó la sumatoria de los valores asignados, para obtener el índice RMR, cuyos valores varían entre 0 y 100; el cual establece cinco clases de macizo que difieren de acuerdo a su calidad y a sus propiedades geotécnicas, como lo son la cohesión y el ángulo de rozamiento.

De esta forma, se obtuvo un RMR específico para cada unidad geotécnica, tanto para las determinadas a partir de sondeos como para las determinadas en campo. Posteriormente, de acuerdo a la correlación realizada entre unidades geotécnicas de sondeo y de campo, se obtuvo un RMR promedio específico para cada unidad y, por último, un RMR global del macizo rocoso.

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)			
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1	
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25%			
	Puntuación		20	17	13	6	3			
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	< 0,06 m			
	Puntuación		20	15	10	8	5			
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m			
		Puntuación		6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	> 5 mm			
		Puntuación		6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave			
		Puntuación		6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm			
		Puntuación		6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta			
		Puntuación		6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min			
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5			
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo			
	Puntuación		15	10	7	4	0			

Tabla 3. Parámetros de clasificación y puntuación asignada para el cálculo del índice RMR (González de Vallejo *et al.*, 2002)

Finalmente, se realizó el análisis e interpretación del valor numérico obtenido con el objetivo de establecer a que clase o categoría corresponde el macizo rocoso, para la determinación de su calidad (Tabla 4).

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Ángulo de rozamiento
I	Muy Buena	100-81	> 4 kg/cm ²	> 45°
II	Buena	80-61	3-4 kg/cm ²	35°-45°
III	Media	60-41	2-3 kg/cm ²	25°-35°
IV	Mala	40-21	1-2 kg/cm ²	15°-25°
V	Muy mala	< 20	< 1 kg/cm ²	< 15°

Tabla 4. Calidad y características geotécnicas de los macizos rocosos de acuerdo al valor asignado al índice RMR (González de Vallejo *et al.*, 2002)

Los parámetros geomecánicos que se consideran en esta clasificación geomecánica son:

6.5.1.a Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa (RCS)

La resistencia a la compresión simple (RCS) representa el esfuerzo de compresión axial máximo que puede soportar la roca antes de fracturarse. La resistencia de la matriz rocosa puede ser definida en laboratorio a partir de ensayos de compresión uniaxial o estimada mediante la utilización de índices campo definidos según la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1981) (Tabla 5), los cuales consisten en una serie de criterios o mediciones estadísticas en el afloramiento para establecer rangos de valores aproximados de resistencia.

De esta forma, se llevaron a cabo mediciones y sencillos ensayos en las estaciones geomecánicas del afloramiento bajo estudio, para la estimación *in situ* de la resistencia de la matriz rocosa, para las unidades geotécnicas definidas en afloramiento. En el caso de las unidades geotécnicas definidas a partir de sondeos, la resistencia a la compresión simple se obtuvo a partir del resultado de ensayos de compresión uniaxial realizados por las empresas consultoras en la etapa de anteproyecto, sobre los tipos de rocas más representativas del área, es decir, areniscas y pelitas (Tabla 6).

Clase	Descripción	Identificación de campo	≈ Resistencia a la compresión (MPa)
S ₁	Suelo muy blando	El puño penetra fácilmente varios cm.	< 0,0025
S ₂	Suelo blando	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0,0025 – 0,05
S ₃	Suelo firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo.	0,05 – 0,10
S ₄	Suelo rígido	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo.	0,10 – 0,25
S ₅	Suelo muy rígido	Con cierta presión puede marcarse con la uña.	0,25 – 0,50
S ₆	Suelo duro	Se marca con dificultad al presionar con la uña.	> 0,50
R ₀	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25 – 1,0
R ₁	Roca muy blanda	Al golpear con la punta del martillo la roca se desmenuza. Con navaja se talla fácilmente.	1,0 – 5,0
R ₂	Roca blanda	Al golpear con la punta del martillo se producen ligeras marcas. Con la navaja se talla con dificultad.	5,0 – 25
R ₃	Roca moderadamente dura	Con un golpe fuerte del martillo puede fracturarse. Con la navaja no puede tallarse.	25 – 50
R ₄	Roca dura	Se requiere más de un golpe del martillo para fracturarla.	50 – 100
R ₅	Roca muy dura	Se requiere muchos golpes del martillo para fracturarla.	100 – 250
R ₆	Roca extremadamente dura	Al golpear con el martillo sólo saltan esquirlas.	> 250

Tabla 5. Rango de valores de resistencia de la matriz rocosa para diferentes tipos de roca (González de Vallejo *et al.*, 2002).

COMPRESIÓN SIMPLE PELITAS Y TRANSICION (MPa)		
MAXIMO	PROMEDIO	MINIMO
163,76	107,52	69,33

COMPRESIÓN SIMPLE ARENISCAS (MPa)		
MAXIMO	PROMEDIO	MINIMO
105,65	84,57	69,33

Tabla 6. Valores de resistencia a la compresión simple de areniscas y pelitas, obtenido a partir de ensayos de compresión uniaxial realizados en la etapa de anteproyecto por las empresas consultoras.

6.5.1.b RQD (Rock Quality Designation)

El índice *RQD*, desarrollado por Deere (1963), es una expresión del grado de fracturación que proporciona una estimación cuantitativa de la calidad del macizo rocoso (Tabla 7) y se obtiene a partir de los registros de perforación (Palmstrom, 2005). Se basa, principalmente, en la recuperación de fragmentos de testigos con una longitud mayor a 10 cm, y su relación con respecto a la longitud total del testigo recuperado.

Calidad del macizo	RQD (%)
Muy mala	0 – 25
Mala	25 – 50
Mediana	50 – 75
Buena	75 – 90
Excelente	90 – 100

Tabla 7. Calidad del macizo rocoso según los valores del parámetro RQD (Palmstrom, 2005).

Para las unidades geotécnicas definidas a partir de sondeos, los valores de RQD utilizados en el presente trabajo, fueron extraídos de los registros de perforación correspondientes a siete sondeos realizados en la etapa de anteproyecto. Se optó por realizar un promedio general de los valores de RQD pertenecientes a cada unidad geotécnica, para obtener un único valor de RQD representativo de cada unidad.

En el caso de las unidades geotécnicas definidas en afloramiento, el índice RQD fue estimado a partir de la correlación empírica de Palmstrom (1975) mediante el conteo volumétrico de discontinuidades J_v (*Volumetric Joint Count*), utilizando la siguiente expresión:

$$RQD = 115 - 3,3 \cdot J_v$$

El conteo volumétrico de discontinuidades J_v , se calcula contabilizando las discontinuidades de cada familia que interceptan una longitud determinada (González *et al.*, 2002), mediante la fórmula expuesta a continuación:

$$J_v = \sum \frac{n^{\circ} \text{ de discontinuidades de cada familia } J}{\text{Longitud de medida } L}$$

$$J_v = \frac{n^{\circ} \text{ de discontinuidades familia } J1}{\text{Longitud de medida } L1} + \frac{n^{\circ} \text{ de discontinuidades familia } J2}{\text{Longitud de medida } L2}$$

Cabe destacar que la expresión de Palmstrom (1975) es únicamente válida para un rango de valores de $4,5 < J_v < 35$. Se considera que el RQD es igual a 100 para valores de $J_v < 4,5$. Y en el caso de valores de $J_v > 35$, el RQD es igual a 0.

6.5.1.c Espaciamiento de las discontinuidades

El espaciado de las discontinuidades se define como la distancia media entre los planos de debilidad de cada familia de discontinuidades, medida en la dirección perpendicular a los planos de discontinuidad (Bieniawski, 1973). El espaciamiento medio de las discontinuidades condiciona de forma significativa el comportamiento mecánico del macizo rocoso. Según la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM), la resistencia de un macizo rocoso se reduce mientras mayor es el número de discontinuidades que afectan al mismo, es decir, cuando disminuye el espaciado entre los planos de discontinuidad.

En este trabajo, se contabilizaron en campo las discontinuidades que afectan al macizo rocoso, en cada una de las estaciones geomecánicas establecidas, y se definió la distancia entre discontinuidades adyacentes utilizando una cinta métrica, de forma que se obtuvo un valor promedio para cada familia de discontinuidades. De acuerdo a la magnitud de dicha distancia, la roca se clasifica dentro de cinco rangos de espaciamiento entre discontinuidades: mayor a 2 m, entre 2 y 0,60 m, entre 0,60 y 0,20 m, entre 0,20 y 0,06 m, o menor a 0,06 m.

6.5.1.d Condiciones de las discontinuidades

Los parámetros tenidos en cuenta para definir las condiciones generales de las discontinuidades son la continuidad, rugosidad, abertura, relleno y alteración.

- *Continuidad o longitud de la discontinuidad*: Se define como la extensión superficial de los planos de discontinuidad. Este parámetro se establece ya que, por lo general, la mayor continuidad de los planos de debilidad de una familia de discontinuidades, condicionará el comportamiento del macizo rocoso, y por tanto, la calidad del mismo. De acuerdo a la magnitud de dicha extensión, medida con cinta métrica, las discontinuidades se clasificaron en alguna de las cinco clases de la Tabla 8.
- *Abertura*: Es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no hay presencia de relleno (González de Vallejo *et al.*, 2002). En este trabajo se consideran las dimensiones de la abertura como rangos de valores (Tabla 8).

Continuidad	Abertura
< 1 m	Sin abertura
1-3 m	< 0,1 mm
3-10 m	0,1-1 mm
10-20 m	1-5 mm
> 20 m	> 5 mm

Tabla 8. Rangos de valores utilizados para definir el valor de continuidad y abertura de las discontinuidades en campo (basado en González de Vallejo *et al.* 2002).

- *Rugosidad*: Hace referencia a las ondulaciones e irregularidades presentes en la pared de los planos, y su importancia se debe a que provee una evaluación de la resistencia al corte de los planos de discontinuidad. Para su estimación cualitativa, se realizó una comparación visual de las juntas con los perfiles estándar de rugosidad que se muestran en la Figura 7.

- *Relleno*: En determinadas ocasiones, las discontinuidades aparecen rellenas por materiales cuyas características difieren de las propiedades de la roca pudiendo condicionar el comportamiento de la discontinuidad.
- *Alteración*: Este parámetro se contempla al momento de realizar los sondeos. Sin embargo, las paredes de las discontinuidades fueron evaluadas en campo ya que su grado de alteración brinda información sobre la exposición de la roca a condiciones atmosféricas o a la acción del agua, entre otros factores. Por tanto, contribuye a determinar las propiedades resistentes del macizo.

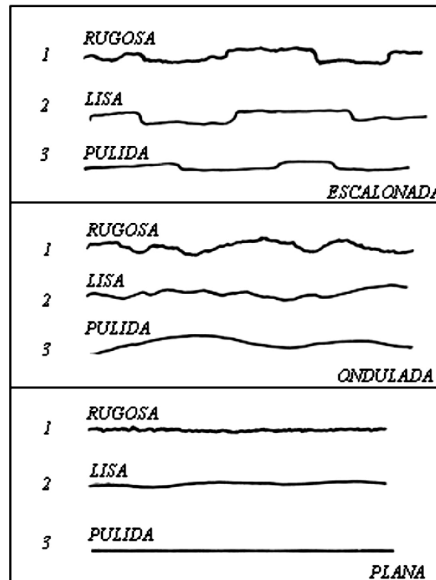


Figura 7. Escala descriptiva de observación para determinar la rugosidad en campo (ISRM, 1978).

6.5.1.e Agua freática

La presencia de agua en el interior de un macizo rocoso influye en el comportamiento mecánico del mismo. Generalmente, el flujo de agua se debe, principalmente, a la presencia de discontinuidades por las que circula el agua, lo cual se define como permeabilidad secundaria; y en algunos casos, a filtraciones a través de areniscas y otras rocas porosas, denominado permeabilidad primaria.

La clasificación geomecánica RMR realiza una valoración del agua freática presente en el macizo rocoso de acuerdo a si el mismo se encuentra seco, ligeramente húmedo, húmedo, goteando o con agua fluyendo. Para ello, se procedió a analizar la presencia de filtraciones en el macizo mediante observaciones en campo, teniendo en cuenta las características globales del mismo y cotejando lo observado con la información de los sondeos; para así, poder adjudicar una puntuación precisa a este parámetro geomecánico.

7. RESULTADOS

7.1. Interpretación y análisis de sondeos. Generación de base de datos

Se interpretaron los siete sondeos ejecutados en el área bajo estudio. A partir de un análisis detallado de la información que contienen, se reconocieron las unidades litológicas que conforman el subsuelo en el área bajo estudio, pertenecientes a la Formación Tordillo. Los depósitos analizados alcanzan los 40 y 90 m de profundidad dependiendo de la ubicación de los sondeos a lo largo del macizo, aunque se estima que esta formación tiene un desarrollo total de hasta 490 m en subsuelo. Sin embargo, para la función que cumplirá el macizo, la cantidad de información disponible hasta la profundidad perforada en los sondeos resulta adecuada.

La base de datos generada a partir de la información relevante al estudio se muestra en el Anexo 1, junto con las referencias para comprender las características de los testigos. Para la misma, se seleccionó información correspondiente al estado de las discontinuidades y de la matriz rocosa. Dicha información de interés, se seleccionó en base al relevamiento geológico y geotécnico realizado en el área de estudio. Esto permitió analizar las características geomecánicas de las unidades en profundidad para su posterior correlación con los datos relevados en campo. Si bien, posteriormente se realizó un relevamiento de campo, en esta etapa se analizaron y resumieron las descripciones de los registros de perforación, de forma que se pudo realizar una división preliminar del macizo en función de los cambios litológicos. A su vez, a partir de esta información de base, se pudieron establecer las unidades geotécnicas correspondientes de acuerdo a los datos de perforación.

Los sondeos se describen de acuerdo a su ubicación en el macizo rocoso, desde cotas de boca de pozo mayores a cotas de boca de pozo menores. Los sondeos SD-01, SD-02, SD-03, SD-04, SD-06 y SD-07 se localizan sobre la margen derecha del río Neuquén, en el sector donde se emplazarán el eje de la presa y los túneles de desvío; mientras que sobre la margen izquierda se realizó un único sondeo denominado SD-05, donde se ubicarán la sala de máquinas y el circuito de aducción de la presa. Particularmente, el sondeo SD-03 se perforó sobre los depósitos aluviales del río Neuquén. Adicionalmente, en la Tabla 10 se muestra un resumen de las características de los testigos relevados, con valores promedios, máximos y mínimos de cada parámetro.

Para evaluar las condiciones hidrológicas del macizo en gabinete, se utilizaron los resultados obtenidos de los ensayos Lugeon realizados *in situ* en la etapa de anteproyecto por las empresas consultoras. Este ensayo se realiza en el interior de las perforaciones y permite determinar la permeabilidad de un macizo rocoso de forma semicuantitativa, midiendo las admisiones de agua inyectada bajo presión. Cabe destacar que en el caso bajo estudio, los valores son válidos debido a que las perforaciones atraviesan un número representativo de discontinuidades (Giaconi *et al.*, 2014).

SONDEO	Recuperación (%)	RQD (%)	Alteración	Consistencia	Características de las discontinuidades				
					Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Fracturamiento
SD-01									
Promedio	60	19	4	4	2	4	4	1	4
Máximo	100	90	4	4	2	4	5	2	5
Mínimo	25	0	3	4	2	2	2	1	2
SD-02									
Promedio	95	42	4	4	2	4	2	1	4
Máximo	100	98	4	4	2	4	5	2	4
Mínimo	50	0	3	3	2	3	2	1	2
SD-03									
Promedio	99	47	3	3	2	3	2	1	3
Máximo	100	93	4	4	2	4	3	2	4
Mínimo	88	0	3	3	2	3	2	1	3
SD-04									
Promedio	93	30	4	4	2	3	3	1	4
Máximo	100	95	4	5	2	4	4	2	5
Mínimo	64	0	3	3	2	3	2	1	3
SD-05									
Promedio	93	63	3	3	2	4	2	1	3
Máximo	100	91	4	4	2	4	3	2	4
Mínimo	60	0	3	3	2	3	2	1	3
SD-06									
Promedio	90	44	3	3	2	4	2	1	3
Máximo	100	100	4	4	2	4	5	2	4
Mínimo	20	0	3	3	2	3	2	1	2
SD-07									
Promedio	83	41	3	4	2	3	2	1	3
Máximo	100	100	4	4	2	4	3	2	4
Mínimo	0	0	3	3	2	3	2	1	2

Tabla 9. Resumen de las características de los testigos relevados en los siete sondeos realizados en la etapa de anteproyecto por las empresas consultoras.

Los resultados del ensayo se encuentran expresados en unidades Lugeon (U.L), lo cual permite realizar una clasificación del macizo rocoso en función de la permeabilidad (Tabla 11) y calificar si las condiciones en las que se encuentra el mismo son favorables o desfavorables. En la Tabla 11, se muestra un resumen que exhibe los valores promedio, máximo y mínimo de Lugeon obtenidos en los siete sondeos, junto con la condición de permeabilidad de las rocas que atravesó cada sondeo.

TIPO DE MACIZO	U.L.
Muy impermeable	0 - 1
Prácticamente impermeable	1 - 3
Permeable	> 3
	1,5 - 6
Muy permeable	> 3
	> 6

Tabla 10. Clasificación de macizos rocosos en función de la permeabilidad en unidades Lugeon (Olalla & Sopena, 1991).

SONDEO	Lugeon (L/m)			Clasificación
	Promedio	Máximo	Mínimo	
SD-01				Tramo no ensayado; roca alterada y meteorizada
SD-02	2	4,64	0,38	Impermeable
SD-03	6	34,31	0,1	Permeabilidad baja
SD-04	2	12,27	0,04	Impermeable
SD-05	3	10,6	0,42	Impermeable
SD-06	8	34,32	0,45	Permeabilidad baja
SD-07	16	35,09	2,57	Permeabilidad media

Tabla 11. Resumen de los valores Lugeon obtenidos en los siete sondeos realizados en la etapa de anteproyecto por las empresas consultoras.

Sondeo SD-01 (37° 21' 57,9" S ; 70° 28' 06" O): El sondeo tiene 51 m de profundidad, por lo que los registros comienzan a partir de la cota 1001,7 msnm hasta la cota 950,7 msnm. El sondeo SD-01 es el de mayor cota y se localiza aguas arriba del eje de la presa, en la zona correspondiente a los túneles de desvío. Cabe destacar que el mismo se localiza 13 metros por debajo de la cota máxima de embalse (1014 msnm).

El techo rocoso se localiza a los 33 m de profundidad, por sobre el mismo se describe un suelo residual profundo compuesto por arenas gruesas y gravas con aporte de cenizas volcánicas. Desde los 33 m hasta el final del sondeo, se desarrollan areniscas rojizas medianas a finas muy fracturadas que gradan transicionalmente a pelitas rojizas con laminación paralela. La arenisca superficial presenta una baja recuperación y un bajo RQD, por lo que, probablemente, se encuentre muy fracturada y meteorizada a diferencia de la arenisca a mayor profundidad, donde aumentan, considerablemente, la recuperación y el RQD (Fig. 8).

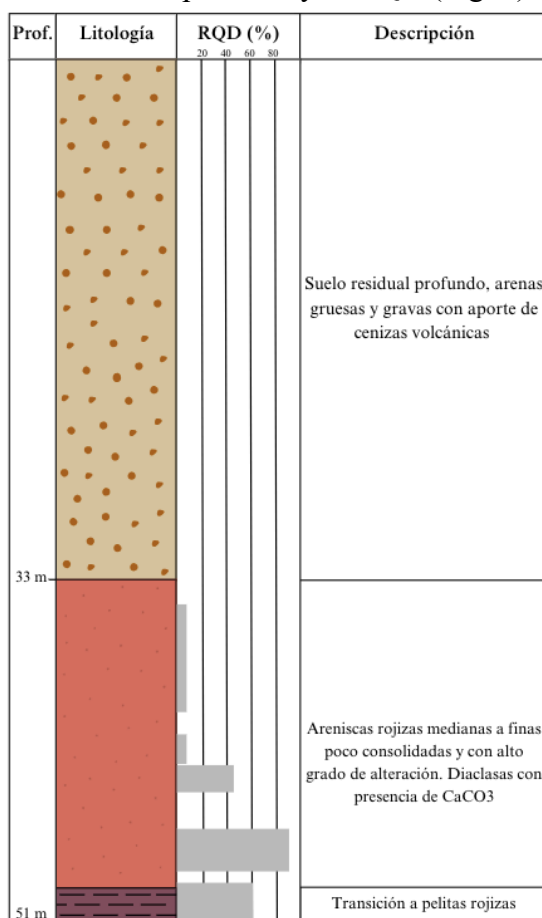


Figura 8. Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo SD-01 (Elaboración propia).

Sondeo SD-06 (37° 21' 57,6" S ; 70° 28' 10,4" O): El sondeo tiene 95,4 m de profundidad y los registros comienzan a partir de la cota 999,2 msnm hasta la cota 903,8 msnm. El sondeo SD-06 se localiza 60 metros al oeste del sondeo SD-01, en el sector donde se excavarán los túneles de desvío.

Hasta los 7,60 m se registran rocas meteorizadas y alteradas, que podrían corresponder, en realidad, a arenas del suelo residual profundo descrito en el sondeo 1. A partir de los 7,60 m se desarrollan areniscas rojizas finas muy fracturadas con las mismas características geomecánicas que las areniscas del sondeo SD-01, por lo que corresponderían a una misma unidad litológica. Estas areniscas se extienden hasta los 29 m, donde comienza a desarrollarse un dominio pelítico que se extiende hasta los 65,7 m, caracterizado por una intercalación de pelitas rojizas laminadas con areniscas rojizas finas en menor proporción. Esta unidad se diferencia de la anterior por su mayor recuperación y su alto RQD a lo largo de toda la perforación, como así también, por la presencia de diaclasas rellenas de CaCO₃.

Por debajo de los 65,7 m se desarrollan areniscas amarillas medianas a finas con alta recuperación y alto RQD, intercaladas, en algunos tramos, con pelitas verdes grisáceas fracturadas. A los 92,6 m se localiza un contacto neto con areniscas rojizas finas con alta recuperación y alto RQD, que se extienden hasta el final del sondeo (Fig. 9).

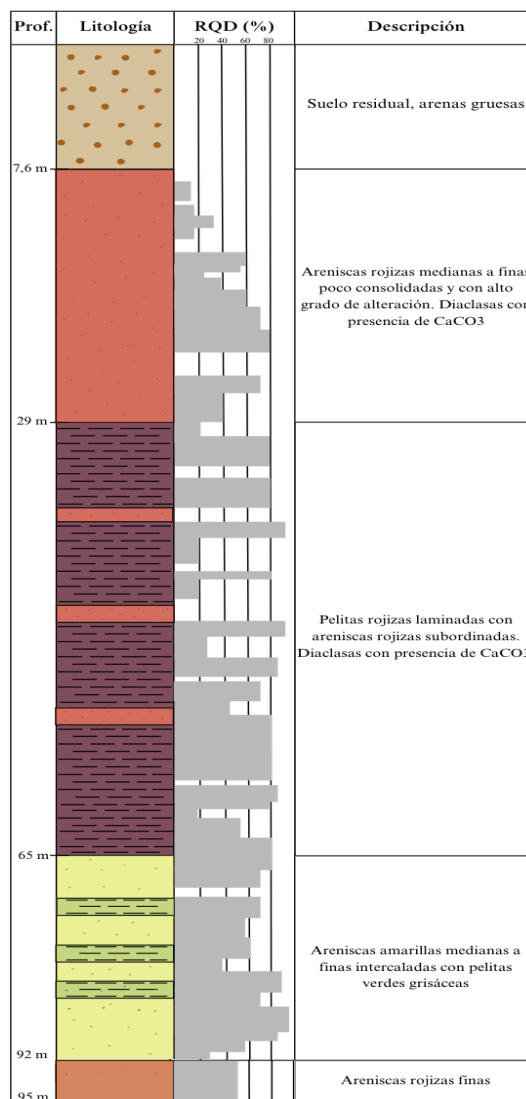


Figura 9. Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo SD-06 (Elaboración propia).

Sondeo SD-07 (37° 21' 49,9" S ; 70° 28' 07,8" O): El sondeo tiene 40 m de profundidad y los registros comienzan a partir de la cota 920 msnm hasta la cota 880 msnm. El sondeo SD-07 se localiza, al igual que los sondeos SD-02 y SD-04, en el sector más bajo del macizo donde se apoyará la presa de cierre, sobre un talud rocoso natural situado aguas arriba del eje de la presa.

El techo rocoso se localiza a los 7,60 m de profundidad, debajo de conglomerados polimicticos cementados con carbonato pertenecientes a los depósitos aluviales antiguos del río Neuquén.

Desde los 7,6 m hasta los 20,6 m se desarrolla una intercalación de pelitas rojizas y areniscas rojizas finas muy fracturadas con presencia de diaclasas rellenas de CaCO₃. Este nivel, corresponde a la intercalación descrita en el sondeo SD-06 a los 30 m de profundidad. Sin embargo, el valor de RQD indica una muy mala calidad de la roca y la presencia de abundantes arcillas en las paredes de las diaclasas, las cuales aparecen a lo largo de todo el sondeo, podrían asociarse a un alto grado de alteración del macizo rocoso en su parte baja.

Por debajo de la secuencia anterior, se describen 6,30 m de pelitas verdes grisáceas de muy buena calidad con alta recuperación y alto RQD asociado al bajo grado de fracturamiento de la roca.

Posteriormente y hasta el final del sondeo, se desarrollan areniscas amarillentas o de color marrón medianas a finas con presencia de abundantes filosilicatos, arcillas y cristales de piritita indicando, probablemente, un alto grado de alteración (Fig. 10). Sin embargo, la calidad de estas rocas es muy buena, presentando valores de RQD de hasta 100%, y el resultado de los ensayos Lugeon indica una roca prácticamente impermeable.

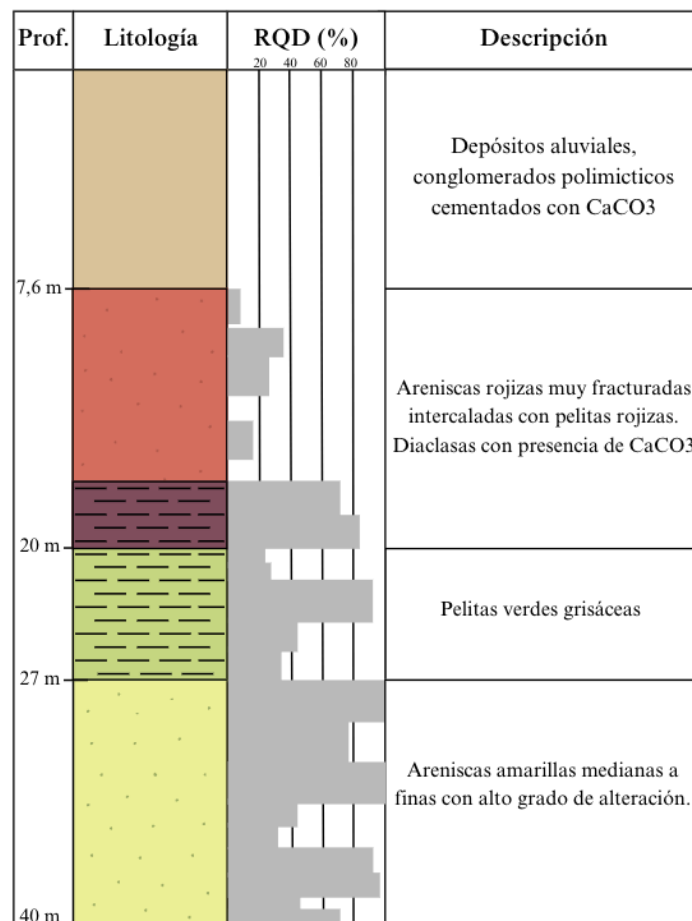


Figura 10. Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo SD-07 (Elaboración propia).

Sondeo SD-02 (37° 21' 49,8" S ; 70° 28' 03,5" O): El sondeo tiene 80 m de profundidad y los registros comienzan a partir de la cota 895 msnm hasta la cota 815 msnm. El sondeo SD-02 se ubica 100 metros al este del sondeo SD-07, en el sector más bajo del macizo rocoso, donde se proyectó la ubicación del eje de la presa.

En los primeros 22 m se perforó el suelo residual profundo con presencia de arenas gruesas y conglomerados polimicticos con aporte de cenizas volcánicas.

A partir de los 22 m y hasta los 45,5 m se desarrolla un nivel de pelitas verdes grisáceas muy alteradas y meteorizadas con alta recuperación y bajo RQD. A lo largo de la secuencia, las pelitas presentan cristales de piritita como mineral secundario por alteración y se describen intercalaciones de areniscas amarillas silicificadas con abundantes micas. Estas pelitas corresponden al mismo nivel de pelitas descrito en el sondeo SD-06 a los 65,7 m de profundidad y en el SD-07 a los 20 m de profundidad. Sin embargo, en este sector, presentan distintas características geomecánicas, ya que si bien tienen muy buena recuperación, el grado de alteración aumenta considerablemente, el grado de fracturamiento es mayor y los valores de RQD denotan una mala calidad.

Desde los 45,5 m y hasta el final del sondeo, se describe una transición hacia areniscas rojizas medianas a finas, muy alteradas, con abundantes diaclasas a 30°, en algunos casos rellenas de carbonato, y presencia de venillas de cuarzo y yeso alterados. A mayor profundidad, la alteración disminuye y tanto la recuperación como el RQD, aumentan considerablemente, indicando una roca de buena calidad que podría correlacionarse con las areniscas rojizas descriptas al final del sondeo SD-07 (Fig. 11).

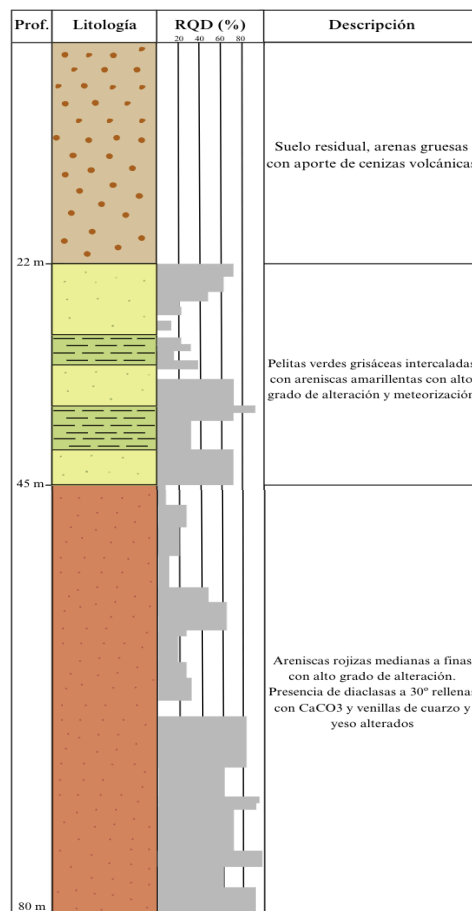


Figura 11. Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo SD-02 (Elaboración propia).

Sondeo SD-04 (37° 21' 47,2" S ; 70° 28' 09,2" O): El sondeo tiene 40 m de profundidad y los registros comienzan a partir de la cota 886 msnm hasta la cota 846 msnm. El sondeo SD-04 también se localiza en el sector más bajo del macizo rocoso donde se apoyará la presa de cierre, 160 metros al oeste del sondeo SD-02 y a 90 metros del sondeo SD-07.

En este caso, el techo rocoso se localiza a una menor profundidad en comparación con sondeos anteriores, a 2,90 m de la superficie. Estos 2,90 m se componen de arenas gruesas con aporte de cenizas volcánicas y conglomerados polimicticos con un tamaño menor que en sectores previamente descriptos.

A partir de los 2,90 m y hasta los 11 m, aproximadamente, se desarrollan pelitas grisáceas altamente fracturadas y muy descompuestas con valores de RQD iguales a cero. Estas pelitas se corresponden con las pelitas verdes de mala calidad descriptas en el sondeo SD-02, y se debe prestar particular atención al alto grado de alteración que presentan las rocas en este sector del macizo rocoso.

Desde los 11 m y hasta el final del sondeo, se describen areniscas rojizas medianas a finas intercaladas con algunos niveles menores de pelitas grisáceas. Las areniscas presentan una calidad regular a buena, con valores de RQD que varían entre 50 y 95%, y son impermeables de acuerdo a los resultados de los ensayos Lugeon. Únicamente en unos pocos niveles, donde aumenta la alteración y el grado de fracturamiento, disminuye la calidad de la roca.

Hacia el final del sondeo, a los 37 m de profundidad aproximadamente, comienza una transición hacia fangolitas rojizas que parecen presentar una excelente calidad (Fig. 12).

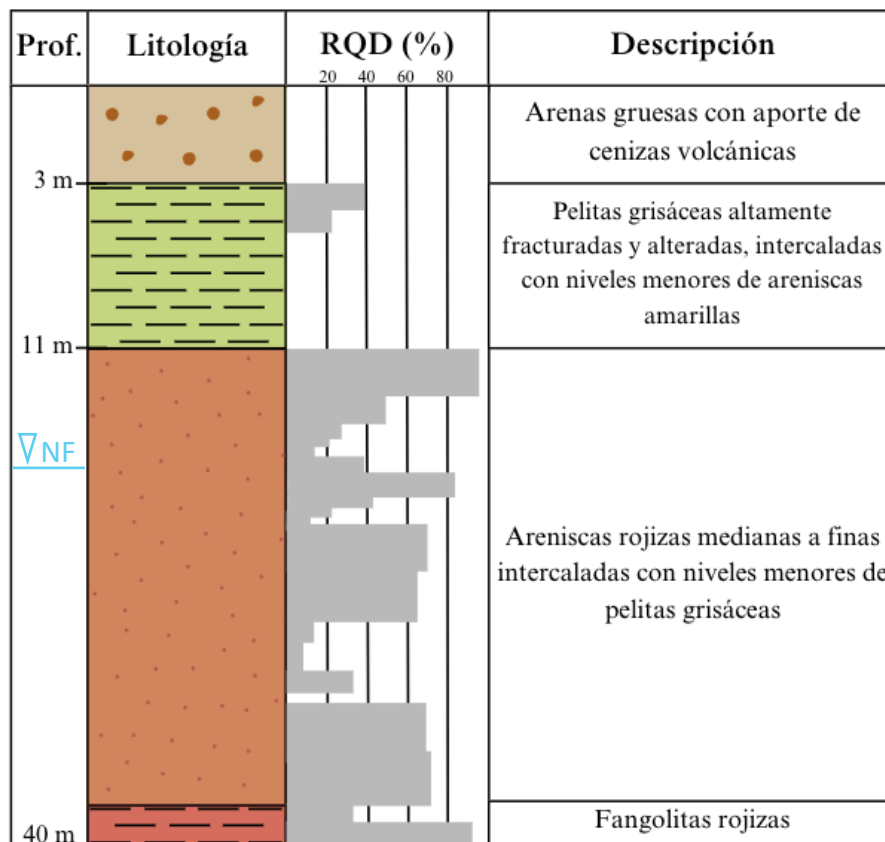


Figura 12. Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo SD-04 (Elaboración propia).

Sondeo SD-03 (37° 21' 41,6" S ; 70° 28' 05" O): El sondeo tiene 32 m de profundidad y los registros comienzan a partir de la cota 876 msnm (cota del lecho del río) hasta la cota 844 msnm, y se ubica sobre los depósitos aluviales del río Neuquén. El nivel freático se localiza a los 1,5 metros.

En los primeros 13 metros se perforaron depósitos aluviales constituidos por conglomerados polimicticos inmersos en arenas medianas y limos.

Por debajo y hasta los 23 m se desarrollan areniscas finas rojizas intercaladas con pelitas rojizas muy fracturadas y alteradas, con presencia de arcillas en las paredes de las discontinuidades, que corresponden a la intercalación descrita en el sondeo SD-07 a 7 m de profundidad, con bajos valores de RQD. Esta correlación puede realizarse ya que, si bien los sondeos se encuentran distanciados entre sí, la intercalación de pelitas y areniscas detallada en el sondeo SD-07 aflora en el margen izquierdo del macizo rocoso, en cercanías a la ubicación del sondeo SD-03.

A partir de los 23 m y hasta el final del sondeo, se desarrolla una roca de muy buena calidad, con una recuperación del 100% y con valores de RQD que varían entre 60 y 93%. Las rocas corresponden a un nivel de 8,40 m de pelitas grisáceas con alto contenido de piritita y a un banco de 8,60 m de areniscas medianas silicificadas con alto contenido de filosilicatos (Fig. 13). Si bien presentan una alteración considerable, el grado de fracturamiento es bajo en comparación con las pelitas grisáceas y areniscas silicificadas registradas en el sondeo SD-02, razón por la que los valores de RQD son muy elevados y la roca presenta una muy buena calidad.

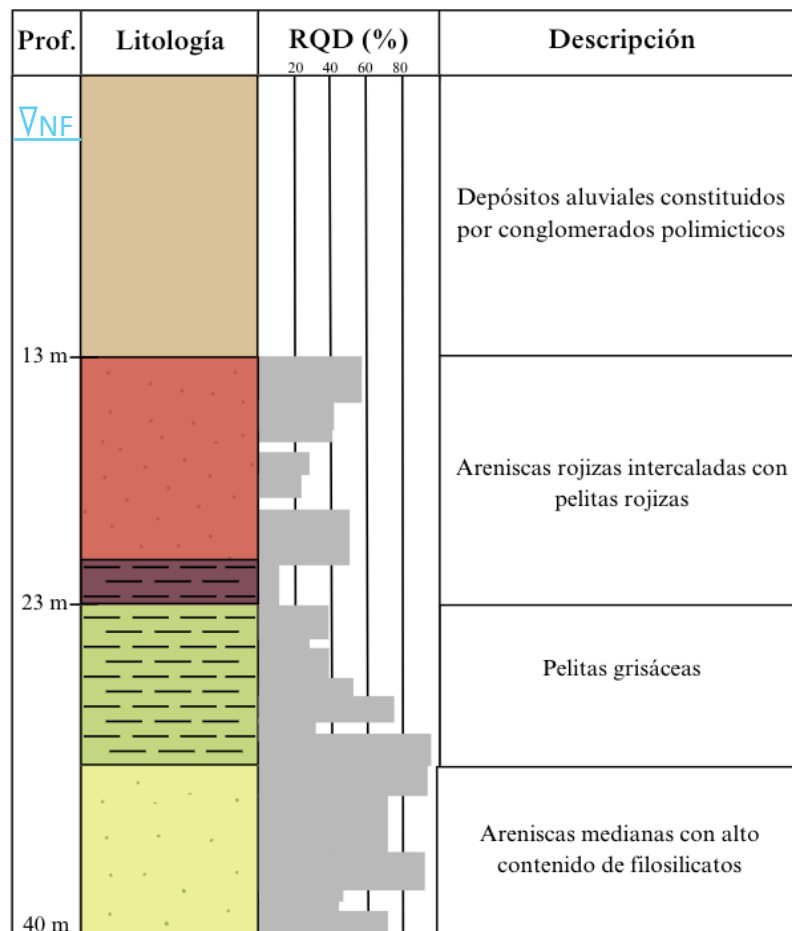


Figura 13. Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo SD-03 (Elaboración propia).

Sondeo SD-05 (37° 21' 48,6" S ; 70° 27' 45,8" O): El sondeo tiene 45 m de profundidad y los registros comienzan a partir de la cota 877 msnm hasta la cota 832 msnm. El sondeo SD-05 se localiza en la margen izquierda del río Neuquén, sobre la zona donde se ubicarán el canal de aducción y la sala de máquinas de la presa. El nivel freático se localiza a los 9 metros de profundidad.

A lo largo de todo el sondeo se registran pelitas rojizas, unidad que solo se registró en los metros finales del sondeo SD-04, de excelente calidad con una recuperación del 100% y valores de RQD entre 70 y 90%, con presencia de diaclasas a 30° y venillas de CaCO₃ (Fig. 14).

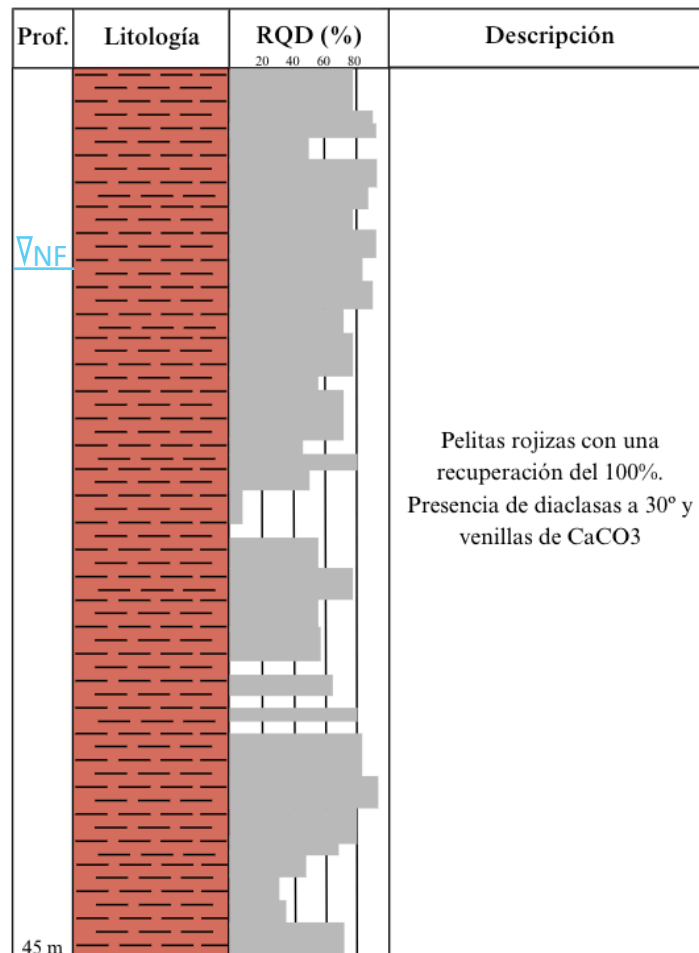


Figura 14. Perfil estratigráfico correspondiente al sondeo SD-05 (Elaboración propia).

Finalmente, la interpretación de los sondeos permitió dividir al macizo rocoso, de forma preliminar, en cinco unidades litológicas. Estas corresponden, desde lo más superficial a lo más profundo, a areniscas finas rojizas, pelitas rojizas intercaladas con areniscas rojizas, pelitas verdes, areniscas rojizas y pelitas rojizas. En la parte alta del macizo, donde se apoyará el eje de la presa, las unidades se disponen por debajo de un nivel de, aproximadamente, 30 metros de suelo residual profundo compuesto por arenas gruesas, gravas, y conglomerados polimicticos que, en algunos casos, se encuentran cementados por carbonatos; y en cercanías al lecho del río, las unidades mencionadas se encuentran por debajo de 10 metros, aproximadamente, de depósitos aluviales. El nivel freático se localiza a los 870 m.

Cabe destacar que si bien pueden correlacionarse las unidades litológicas a partir de los sondeos, una misma unidad litológica presenta variaciones a lo largo del macizo en cuanto a su comportamiento geomecánico y calidad, lo cual se tuvo en cuenta para analizar en el relevamiento de campo.

7.2. Relevamiento de campo

7.2.1. Descripción de las características geológicas de sitio

En La Invernada, los depósitos de la Formación Tordillo, unidad que conforma la zona de cierre de la presa, se caracterizan por ser una sucesión de areniscas de tamaño de grano mediano a fino y pelitas, presentes en proporciones variables a lo largo de todo el perfil. Estos depósitos, con una orientación de rumbo N-S, presentan un marcado buzamiento de 15° a 20° hacia el SE.

En la parte alta del macizo, fuera del sector donde se emplazará el eje de la presa, los afloramientos se componen de areniscas rojizas medianas a gruesas, que se presentan en forma de potentes bancos de hasta 2 m, intercalados con niveles pelíticos de coloración verdosa con laminación paralela. Por debajo, y en contacto neto, se dispone un dominio compuesto por bancos tabulares de areniscas rojizas de granulometría fina intercaladas con pelitas rojizas subordinadas (Figura 15a). Los bancos de areniscas presentan una gran continuidad lateral y abundantes diaclasas dispuestas en hasta dos familias de discontinuidades. Si bien estas rocas afloran en gran parte del macizo bajo estudio, a partir de los 1120 msnm de altura, estos depósitos se encuentran cubiertos por arenas mal graduadas y gravas que conforman un nivel de suelo que se extiende hasta la parte baja de macizo.

En contacto neto con los niveles de areniscas finas rojizas previamente descriptos, se desarrolla un dominio pelítico (Figura 15b) caracterizado por la alternancia de finos rojizos dominantes con bancos de escasa potencia de areniscas rojizas de grano fino que presentan un alto grado de fracturamiento. En algunos sectores, estas intercalaciones se encuentran afectadas por una red de diaclasas subverticales rellenas con material carbonático. A su vez, las diaclasas presentan fuertes patinas de óxidos en las paredes (Figura 15c).

Si bien no se pudo localizar el contacto ni realizar las descripciones pertinentes debido a la dificultad de acceso a los afloramientos, hacia el este y por debajo de las intercalaciones de pelitas y areniscas rojizas, se observaron algunos niveles de escasa potencia compuestos por pelitas de coloración verdosa que, según la información preliminar, forman parte del talud ubicado aguas arriba del eje de la presa, es decir, en la margen izquierda del área bajo estudio.

En el relevamiento de campo realizado, únicamente se identificaron estas pelitas verdes en cercanías al sondeo SD-04 (Figura 15d), formando un nivel de 1 metro de potencia en contacto con la intercalación de areniscas y pelitas rojizas. Sin embargo, no presentan gran continuidad lateral.

En la sección inferior del macizo, por debajo del nivel de pelitas verdosas identificado con anterioridad, se reconocieron potentes bancos tabulares de areniscas medianas de color amarillento/ocre intercalados con niveles menores de pelitas verdosas. Estos afloramientos conforman un talud rocoso natural de entre 25 y 35 m de altura en la margen izquierda del macizo bajo estudio, es decir, situado aguas arriba en cercanías al eje de la presa. Si bien en los registros de perforación se identifica a las areniscas amarillentas y pelitas verdes como dos litologías con características diferentes, en el relevamiento de campo fue posible determinar que dichas litologías conforman una única unidad litológica con predominio de areniscas amarillentas que se intercalan con niveles de pelitas verdes subordinadas. Estos potentes bancos de areniscas y pelitas intercaladas se apoyan de forma concordante y mediante un contacto neto, sobre niveles de pelitas rojizas muy alteradas (Figura 16).

De esta forma, a diferencia de lo interpretado a partir de los sondeos, se optó por dividir al macizo rocoso en cuatro unidades litológicas de acuerdo al relevamiento de campo efectuado. Estas unidades corresponden a areniscas finas rojizas, pelitas rojizas intercaladas con areniscas rojizas, areniscas amarillentas intercaladas con pelitas verdes subordinadas y pelitas rojizas.

Cabe destacar que el orden de mención y descripción de dichas unidades inicia en la zona más alta del macizo (donde se instalará el coronamiento de la presa) y finaliza en la parte más baja del mismo, hacia el valle del río Neuquén.

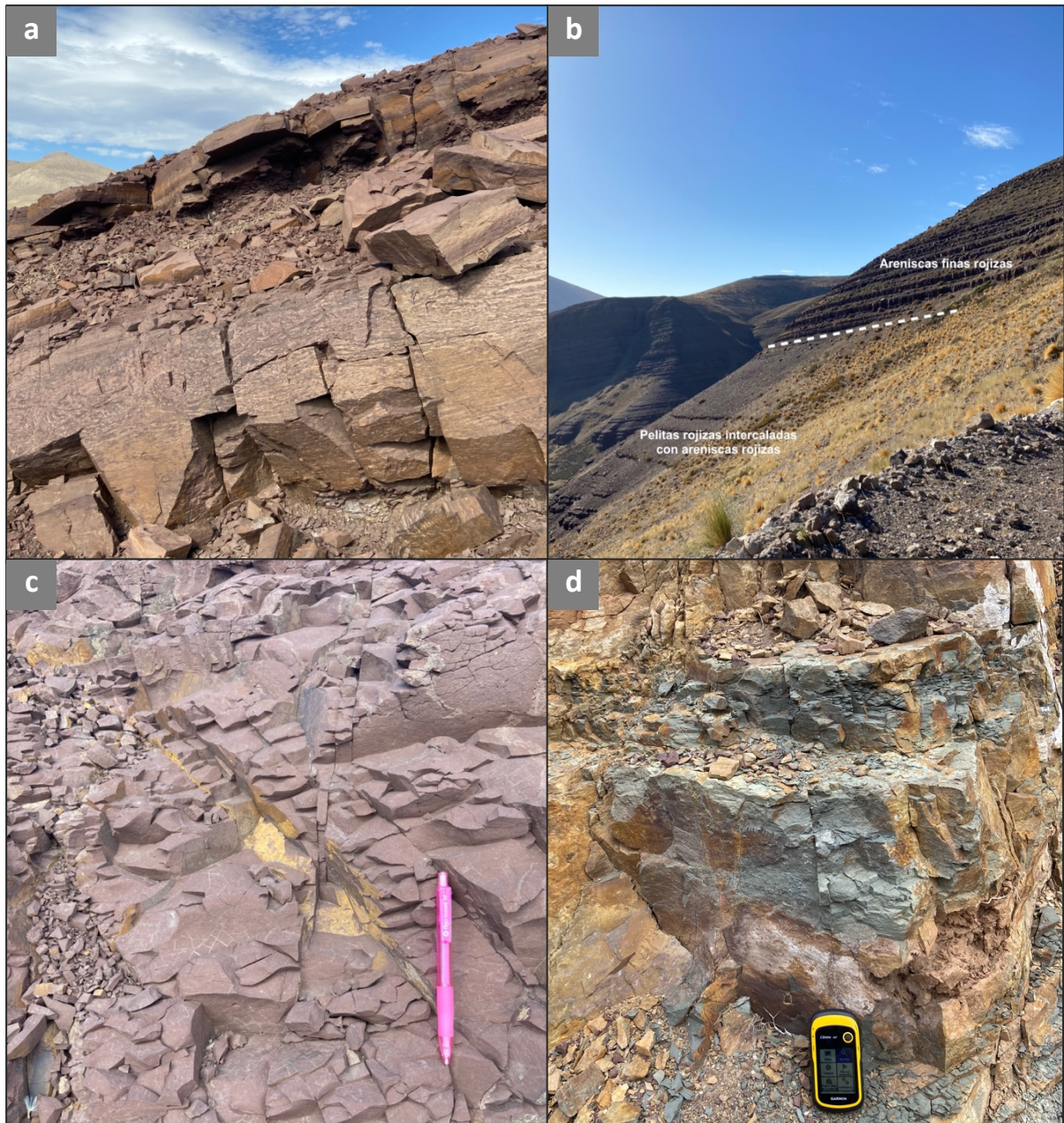


Figura 15. a) Bancos de areniscas finas rojizas aflorantes en la parte alta del macizo, a 29 metros de la ubicación del sondeo SD-06; b) Vista hacia el E, sector de la margen derecha aguas arriba del eje de la presa; afloramiento del contacto inferido entre los bancos de areniscas finas rojizas y el dominio pelítico; c) Pelitas rojizas con desarrollo de pátinas de óxidos en las paredes de las diaclasas subverticales; d) Único afloramiento de pelitas verdes, identificado a pocos metros del sondeo SD-04.



Figura 16. Vista hacia el E; bancos de areniscas medianas amarillentas que conforman el talud rocoso natural en la margen izquierda del macizo bajo estudio. En la parte inferior, se observa el contacto entre las areniscas y los niveles de pelitas rojizas alterada

Al descender por el macizo en el sentido del eje de la presa, se ha podido observar, por debajo del material suelto que conforma el suelo residual, que la arenisca se encuentra brechada. Estas brechas no fueron reconocidas ni mapeadas en trabajos anteriores, por lo que en la Tabla 12 se muestra información acerca de su ubicación y de los puntos que no se encontraban relevados y que fueron analizados durante la salida de campo.

Punto N°	Coordenadas geográficas
1	37° 22' 01,6" S ; 70° 28' 08,6" O
2	37° 22' 01,8" S ; 70° 28' 08,6" O
3	37° 21' 59,1" S ; 70° 20' 07,6" O
4	37° 22' 58,7" S ; 70° 28' 09,2" O
5	37° 21' 57,8" S ; 70° 28' 09,6" O
6	37° 21' 53,4" S ; 70° 28' 4,3" O
7	37° 21' 52,2" S ; 70° 28' 5,3" O
8	37° 21' 50,3" S ; 70° 28' 7,4" O

Tabla 12. Ubicación de los puntos relevados.

En los puntos 1 a 3, las brechas son de color blanquecino a gris. Son del tipo clasto-sostén y están constituidas por clastos polimicticos angulares a subangulares de areniscas y pelitas de hasta 20 cm. Las mismas se caracterizan por la presencia de abundante cemento carbonatico y el desarrollo de extensas venillas subverticales (Figura 17a). Por sectores, hay zonas de molienda y un aumento en la cantidad de venillas (Figura 17b).

Estas rocas con textura de brecha se observaron nuevamente en el punto 5. En este caso, la brecha es muy similar a la previamente descrita. Es del tipo clasto-sostén, constituida por clastos polimicticos angulares de gran tamaño y con presencia de abundante cemento carbonatico. Sin embargo, en este sector, dentro la brecha se identificaron clastos de canto rodado de hasta 15 cm y las venillas se encuentran ausentes (Figura 17c).

En los puntos 6 y 7 afloran, nuevamente, una serie de rocas con textura de brecha. En este sector, las brechas son de color amarillento a gris y no presentan desarrollo de venillas (Figura 17d). Son monomíticas constituidas por clastos angulares de areniscas de hasta 5 cm, es decir, se componen de clastos de menor tamaño que las brechas aflorantes en cotas más elevadas.



Figura 17. a) Brecha polimítica con desarrollo de venillas subverticales identificada en los puntos 1, 2 y 3; b) Zona de molienda identificada en el punto 4; c) Brecha con presencia de clastos de canto rodado y ausencia de venillas identificada en el punto 5; d) Brecha monomítica constituida por clastos angulares de areniscas identificadas en los puntos 6 y 7.

En el sector aluvial del macizo, a lo largo de la cota 890 msnm, se desarrollan abundantes depósitos aluviales pertenecientes a terrazas antiguas y planicies aluviales actuales del río Neuquén. Particularmente, en el punto 8, los depósitos aluviales afloran con un nivel conglomerádico compuesto por clastos polimicticos muy bien redondeados de hasta 50 cm. Hacia el techo, disminuye el aporte clástico de material grueso y estos conglomerados se encuentran en contacto neto y erosivo con lentes de arena. Por encima de esta secuencia, puede observarse la presencia de abundante material carbonatico, cuyo origen, probablemente, se encuentre relacionado al material carbonatico presente en las brechas aflorantes a lo largo de todo el macizo (Figura 18).



Figura 18. Vista hacia el SO; nivel de conglomerados polimícticos en contacto neto con lentes de arenas grises medianas a gruesas y presencia de material carbonático hacia el tope de la secuencia.

7.2.2. Definición de estaciones geomecánicas

Se establecieron un total de tres estaciones geomecánicas con el fin de realizar la medición de parámetros geomecánicos de interés para el presente trabajo. Para su ubicación se tuvo en cuenta un criterio geológico-geotécnico según el sector de emplazamiento del eje de la presa, la cercanía a los sondeos y la unidad litológica aflorante. En función de lo observado en campo, se optó por establecer las estaciones geomecánicas en las unidades litológicas de mayor representación y extensión en el área. En la Figura 19 y en la Tabla 13, se muestra información acerca de su ubicación.

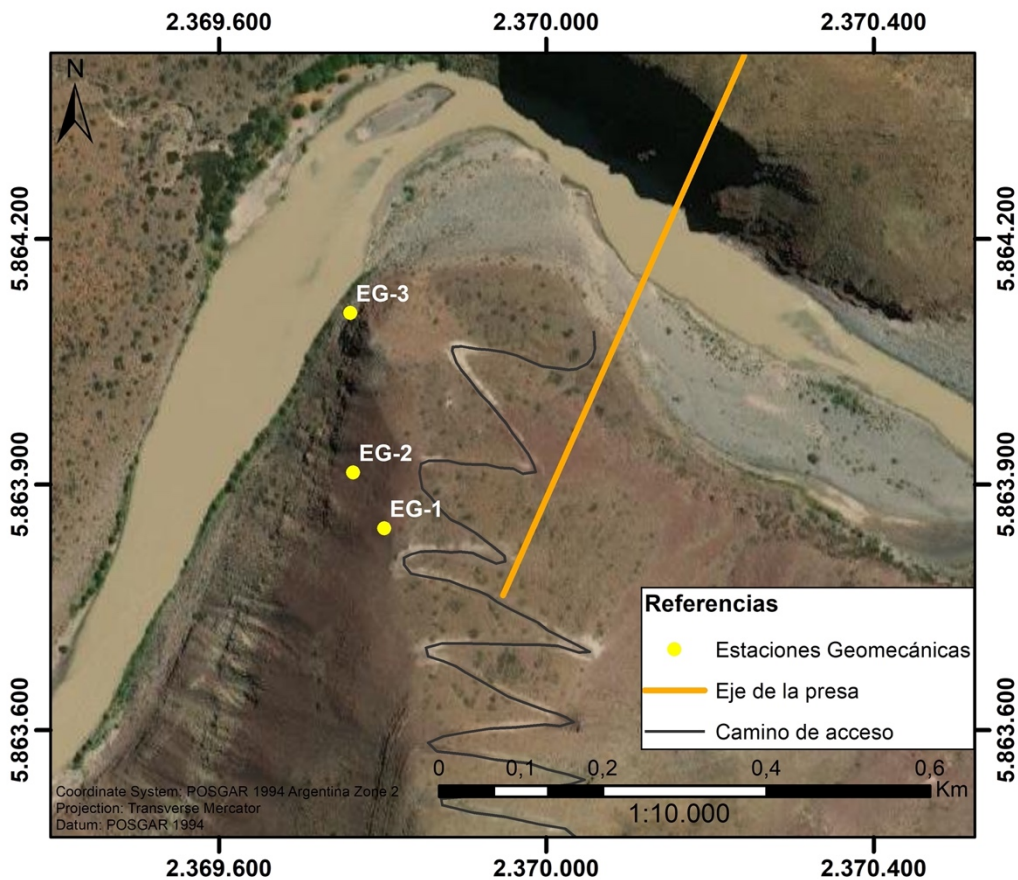


Figura 19. Ubicación de las estaciones geomecánicas (Elaboración propia).

Estación geomecánica N°	Coordenadas geográficas	Litología	Ubicación respecto a sondeos/obras
1	37° 21' 56,8" S ; 70° 28' 11" O	Areniscas finas rojizas	A 20 m del sondeo SD-06. Zona donde se ubicará la estructura de desvío del río.
2	37° 21' 55,5" S ; 70° 28' 12,5" O	Pelitas rojizas	A 70 m del sondeo SD-06 y a 50 m de la EG-1. Zona donde se ubicarán los túneles de desvío.
3	37° 21' 48,3" S ; 70° 28' 12,6" O	Areniscas medianas amarillentas	A 90 m del sondeo SD-04 y a 130 m del sondeo SD-07. Sector más bajo donde se apoyará la presa de cierre.

Tabla 13. Coordenadas y litología de los puntos donde se establecieron las estaciones geomecánicas.

La estación geomecánica 1 (EG-1) se localizó sobre bancos de areniscas finas rojizas aflorantes en la parte alta del macizo sobre la cota 996 msnm y a 20 metros del sondeo SD-06. Este sector fue seleccionado ya que las rocas aflorantes son representativas de la unidad litológica compuesta por areniscas rojizas identificada en el sondeo SD-06. A su vez, según el esquema de obras del proyecto (Ver Figura 4 en el apartado 6.3), esta zona conforma el sitio donde se ubicarán la estructura de desvío del río, constituida por túneles excavados, y el descargador de fondo que permitirá controlar el llenado del embalse.

La estación geomecánica 2 (EG-2) se estableció sobre afloramientos de escasa potencia compuestos por pelitas rojizas pertenecientes al dominio pelítico descrito en el apartado 7.2.1, en el cual se describió la alternancia de estas pelitas con bancos de escasa potencia de areniscas rojizas. Esta estación se encuentra localizada sobre la cota 960 msnm, a 70 metros del sondeo SD-06 y a 50 metros, aproximadamente, de la estación geomecánica 1. Si bien la estación geomecánica no es muy extensa, en el sector seleccionado afloran rocas identificadas en el sondeo SD-06 con características muy diferentes a las definidas para la litología analizada en la estación geomecánica 1. A su vez, de acuerdo al esquema de obras, estas rocas se ubican en el sitio donde se encuentra proyectada la ubicación de los túneles de desvío, al igual que en el sector donde se localiza la estación geomecánica 1.

La estación geomecánica 3 (EG-3), situada en proximidad al río Neuquén, se encuentra localizada sobre bancos tabulares de areniscas medianas amarillentas sobre la cota 886 msnm, a 90 metros del sondeo SD-04 y a 130 metros del sondeo SD-07. Estos bancos afloran en la parte baja del macizo, sobre el talud rocoso natural situado aguas arriba en cercanías al eje de la presa, es decir, en la margen izquierda del macizo bajo estudio. Las rocas aflorantes constituyen el sector más bajo del macizo donde se apoyará la presa de cierre, constituida por un terraplén de materiales sueltos y una losa de hormigón.

7.2.3. Levantamiento sistemático de las discontinuidades y características geotécnicas

En este apartado, se exponen los datos recopilados en las estaciones geomecánicas previamente definidas, para su posterior evaluación en gabinete. Estos datos permitirán caracterizar geotécnicamente el macizo rocoso.

Estación geomecánica 1 (EG-1)

La estación geomecánica 1, cuya ubicación se expone en la Figura 19 y en la Tabla 13, presenta una altura de 5 metros y se extiende a lo largo de 8 metros. La misma se compone de areniscas finas rojizas dispuestas en bancos tabulares de hasta 0,3 metros de espesor. A pesar de que los bancos arenosos presentan gran continuidad lateral, la extensión de la estación geomecánica se vio limitada por la presencia de fragmentos de roca provenientes de niveles superiores y suelo.

Los estratos que conforman la estación geomecánica presentan un rumbo de 20° respecto al norte e inclinan 15° hacia el este. En base al relevamiento de campo realizado, las rocas aflorantes se encuentran bien consolidadas, con buena dureza y competencia. Sin embargo,

presentan un alto grado de fracturamiento con desarrollo de diaclasas abiertas y se encuentran ligeramente meteorizadas, ya que se observa una decoloración superficial del material rocoso debido a su exposición a agentes atmosféricos.

Al emplear los índices de campo propuestos por la ISRM (1981) para la estimación *in situ* de la resistencia de la matriz rocosa, la roca no se fracturó al efectuar un golpe con la piqueta, sino que se observaron algunas marcas. En este afloramiento, se estimaron valores de resistencia relativamente bajos, de entre 5 y 25 MPa. Los resultados derivados de los ensayos de resistencia a la compresión simple, indican que se trata de una roca blanda, pudiendo ser correlacionable con el grado de alteración general que presenta la roca en su totalidad. Sin embargo, en el apartado 7.3.3.b. *Unidades geotécnicas definidas en afloramiento*, se expone la metodología empleada para valorar la resistencia a la compresión simple, debido al grado de incertidumbre que conlleva estimar la misma mediante índices de campo y su poca coherencia respecto a los resultados de laboratorio.

Tanto el grado de fracturamiento como el grado de alteración observados en campo, coinciden con los datos de los registros de perforación. Por lo que es posible afirmar que estas areniscas finas rojizas corresponden a los tramos que se extienden desde el techo rocoso hasta los 48 y 29 metros de profundidad en los sondeos SD-01 y SD-06, respectivamente.

Las características de las discontinuidades y de la matriz rocosa medidas en campo, se muestran en la planilla geotécnica de la Figura 31 en el Anexo 2. De acuerdo a las mediciones y observaciones realizadas en la estación geomecánica, se obtuvo que las diaclasas se agrupan en dos familias de discontinuidades, a las cuales se les asignó la denominación de J1 y J2 para su identificación (Figura 20a).

La familia de discontinuidades J1 está compuesta por diaclasas subverticales cuyo azimut es de 205° y presentan una inclinación de 80°. La longitud que caracteriza a estas discontinuidades no supera los 0,3 metros de extensión y se encuentra limitada, tanto en la parte superior como en la parte inferior, por las discontinuidades pertenecientes a la familia J2. A lo largo de los 8 metros de extensión que conforman el afloramiento, se pudieron identificar un total de 27 juntas, lo cual permitió determinar un espaciamiento medio entre las mismas de 0,2 metros. En mayor parte, las discontinuidades se encuentran cerradas. Sin embargo, en ciertos sectores y al igual que en las discontinuidades pertenecientes a la familia J2, las mismas se caracterizan por presentar aberturas que superan los 5 mm y no cuentan con relleno. En las paredes o caras de las discontinuidades se observaron algunos rasgos tales como ligeras rugosidades y presencia de meteorización y alteración en los bordes. Las juntas se encuentran secas sin evidencia de flujo de agua, lo cual posiblemente se deba a la aridez que caracteriza a la región, la ausencia de surgencias y debido a la altura en la que se encuentra la estación geomecánica respecto a la cota del río Neuquén (Figura 20b).

Por otro lado, las diaclasas horizontales que por lo general, son discontinuas en el sentido de la estratificación, son aquellas que corresponden a la familia de discontinuidades J2. Las mismas se caracterizan por presentar una longitud que no supera el metro de extensión ya que en la mayor parte de las mediciones efectuadas, la extensión varía en un rango entre los 20 y 40 cm. Se pudo contabilizar un total de ocho discontinuidades a lo largo de los 5 metros de altura que conforman la estación geomecánica. En cuanto al espaciamiento y abertura de las discontinuidades, se pudo estimar que las mismas se encuentran espaciadas, en promedio, a 0,60 metros de distancia y presentan una abertura entre 1 y 2 cm. Las superficies de las paredes de las discontinuidades se caracterizan por la presencia de ligeras rugosidades y ondulaciones.

Cabe destacar, que si bien en los sondeos SD-01 y SD-06 se identifica un relleno carbonatico dentro de las discontinuidades que afectan a esta unidad litológica, durante el relevamiento de campo no fue posible observar dicho relleno.

A diferencia de la matriz rocosa y de la información expuesta en los registros de perforación, en las paredes de las discontinuidades no se observaron signos de alteración. En semejanza con las juntas de la familia J1, no se observaron evidencias de flujo de agua (Figura 20c).



Figura 20. a) Areniscas finas rojizas que conforman la estación geomecánica 1. Con líneas punteadas se identifican las redes de diaclasas que afectan el afloramiento; b) Diaclasas subverticales abiertas pertenecientes a la familia de discontinuidades J1; c) Diaclasas horizontales con mayor abertura, correspondientes a la familia de discontinuidades J2.

Estación geomecánica 2 (EG-2)

La estación geomecánica 2, no presenta una gran extensión ya que los afloramientos se encuentran en gran parte cubiertos por fragmentos de roca provenientes de niveles superiores. Sin embargo, los datos recopilados son consistentes con la información extraída de los registros de perforación, por lo que son representativos de la litología analizada.

Las pelitas rojizas laminadas que componen esta estación geomecánica, se encuentran poco consolidadas y a diferencia de la unidad suprayacente, se encuentran altamente fracturadas con desarrollo de abundantes diaclasas cerradas. Al emplear los índices de campo propuestos por la ISRM (1981), la roca no se desmenuzó al ser golpeada con la punta de la piqueta pero si fue fracturada e incluso, se talla fácilmente con una navaja. De esta forma, se estimó una resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa de 1 a 5 MPa debido a que se consideró la situación más desfavorable, es decir, la que más afecta la resistencia del macizo rocoso. Dicho valor, no es coherente con los resultados de laboratorio obtenidos por las empresas consultoras, ya que

para una pelita se espera un promedio de 107,52 MPa con 163,76 MPa como máximo y 69,33 MPa como mínimo. Sin embargo, en el apartado 7.3.3.b. *Unidades geotécnicas definidas en afloramiento*, se expone la metodología empleada para valorar la resistencia a la compresión simple, debido al grado de incertidumbre que conlleva estimar la misma mediante índices de campo.

Es posible identificar estas pelitas en el sondeo SD-06, entre los 29 y los 65,7 metros de profundidad. Según los datos extraídos de registros de perforación, la roca se encuentra completamente meteorizada o prácticamente descompuesta. Sin embargo, de acuerdo a las observaciones efectuadas en el relevamiento de campo, no se identifican signos de meteorización en la matriz rocosa. Por el contrario, el alto grado de fracturamiento observado si coincide con los datos de los registros de perforación.

Las mediciones efectuadas en campo en cuanto a características de las discontinuidades y de la matriz rocosa, se muestran en la planilla geotécnica de la Figura 32 en el Anexo 2. De acuerdo al relevamiento efectuado en la estación geomecánica, se obtuvo que las diaclasas se agrupan en tres familias de discontinuidades, a las cuales se les asignó la denominación de J1, J2 y J3 para su identificación (Figura 21a).

La familia de discontinuidades J1 está compuesta por diaclasas verticales cuyo azimut es de 330° y presentan una inclinación de 90° aproximadamente. La longitud que caracteriza a estas discontinuidades, alcanza el metro de extensión como máximo. En cuanto al espaciamiento de las discontinuidades, se pudo estimar que las mismas se encuentran espaciadas, en promedio, a 0,2 metros de distancia. En todas las mediciones efectuadas, se pudo observar que las discontinuidades se caracterizan por ser cerradas o presentan aberturas menores a 0,1 mm y ocurren sin presencia de relleno en todos los casos analizados. Las paredes de los planos de discontinuidad presentan ligeras rugosidades las cuales son casi imperceptibles, por lo que considerando la situación que más afecte la resistencia del macizo, podría definirse que en general, las paredes presentan leves ondulaciones. A su vez, se pudieron observar signos de una ligera alteración afectando las paredes de las juntas, debido a la presencia de numerosas pátinas de óxidos en la superficie de las principales diaclasas (Figura 21b).

Por otro lado, las diaclasas subverticales cuyo azimut es de 190° y que presentan una inclinación de 85°, son asignadas a la familia de discontinuidades J2. Al igual que las diaclasas de la familia J1, presentan una extensión de hasta 1 metro como máximo y la separación entre las mismas varía en un rango menor a los 0,2 y 0,1 metros de distancia. En base a las observaciones realizadas, las discontinuidades ocurren sin presencia de relleno, con ausencia de rugosidad u ondulaciones, y la distancia perpendicular que separa las paredes de las mismas no supera el milímetro. Sin embargo, a escasos metros de la estación geomecánica fue posible observar la presencia de un relleno carbonático de hasta 1 cm de espesor en el interior de las diaclasas (Figura 21c), lo cual debe tenerse en consideración al realizar la caracterización geomecánica de estas rocas. Otra notable diferencia con respecto a las diaclasas pertenecientes a la familia J1, es que no se observaron signos de una alteración significativa en las paredes de las discontinuidades.

La familia de discontinuidades J3 se encuentra constituida por diaclasas horizontales en el sentido de la estratificación, cuya extensión alcanza el metro de longitud. Se contabilizaron abundantes discontinuidades en el sentido de la estratificación a lo largo del metro de altura que presenta la estación geomecánica, y es posible afirmar que las mismas se encuentran espaciadas a 10 cm como máximo. Las discontinuidades no se encuentran rellenas y predominan las

diaclasas con aberturas de hasta 1 mm con paredes lisas. Si bien debido a la extensión de la estación geomecánica, no fue posible observar signos de alteración en las paredes de las discontinuidades. Según los registros de perforación, las paredes de las diaclasas presentan una alteración moderada. Por lo tanto, si bien debido a la extensión del afloramiento no fue posible observar signos de alteración, se tendrá en cuenta dicha información al momento de realizar la caracterización geomecánica.

No se observaron evidencias de flujo de agua en el interior del afloramiento, lo cual se debe, probablemente, a la lejanía de las rocas con respecto al nivel freático. De forma que todas las discontinuidades descritas en la estación geomecánica 2, se encuentran secas.

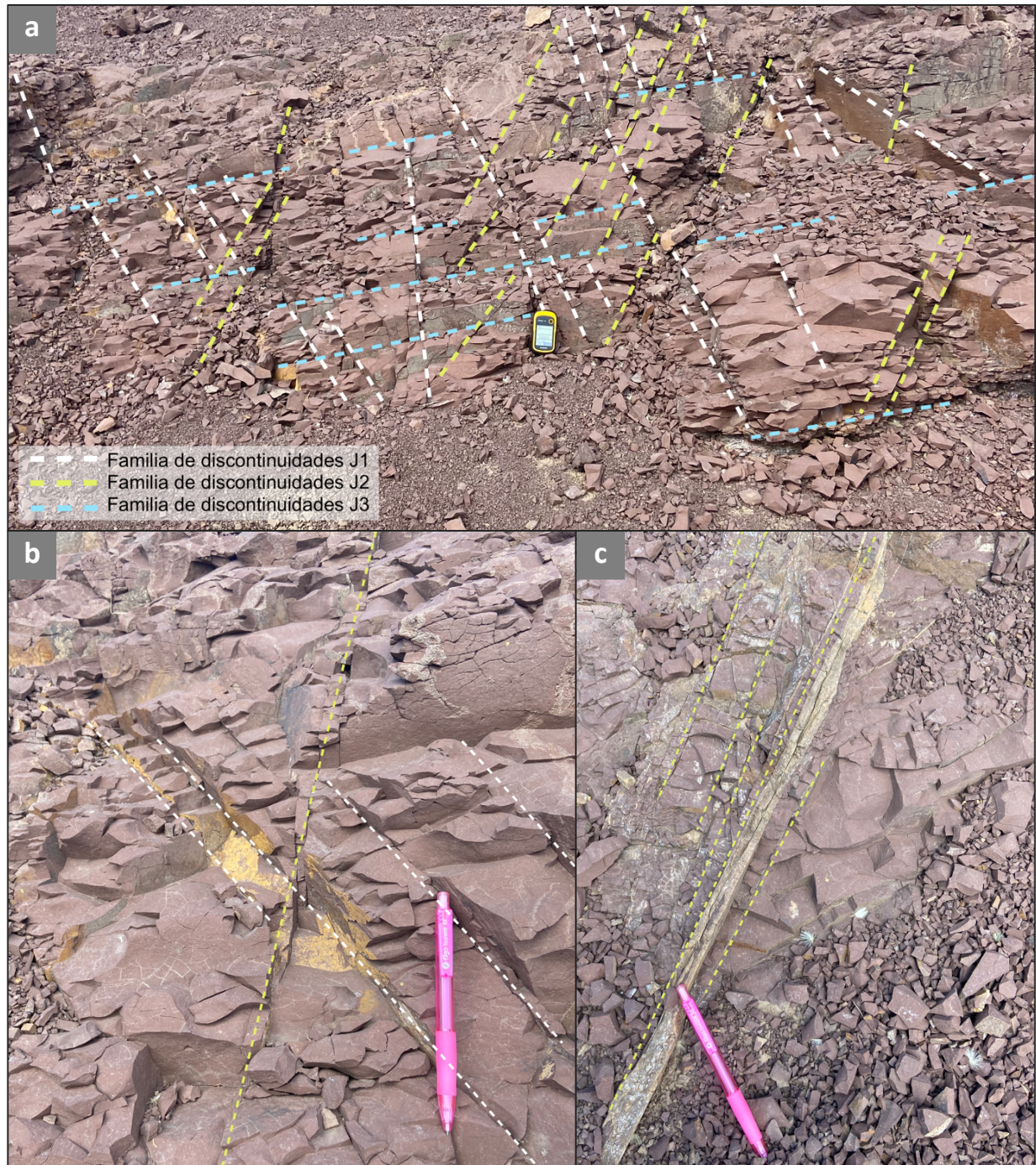


Figura 21. a) Familias de discontinuidades identificadas en la estación geomecánica 2 (EG-2); b) Detalle de la familia de discontinuidades J1 con presencia de pátinas de óxidos en las paredes de las diaclasas; c) Relleno carbonatico de 1 cm de espesor en las diaclasas pertenecientes a la familia de discontinuidades J2.

Estación geomecánica 3 (EG-3)

Debido a que la estación geomecánica 3 se localiza en bancos tabulares de areniscas de gran espesor que presentan una gran continuidad lateral, la misma se prolonga por 50 metros de largo y 25 metros de alto (Figura 22).

Los bancos de areniscas amarillentas se orientan 10° respecto al norte y presentan un leve buzamiento hacia el este, con un ángulo variable de 15° a 20° . La roca presenta elevada dureza y se encuentra muy consolidada, por lo que se puede inferir, en forma relativa, su elevada resistencia a la rotura. Sin embargo, la roca se encuentra medianamente fracturada con desarrollo de diaclasas abiertas y cerradas.



Figura 22. Disposición de las familias de discontinuidades identificadas en la estación geomecánica 3 (EG-3).

En base al grado de meteorización de la matriz rocosa propuesto por el ISRM (1981), se estima que la roca se encuentra ligera a moderadamente meteorizada, ya que, si bien el material rocoso no presenta signos de descomposición en suelo, la roca se encuentra completamente decolorada por meteorización. Incluso, en escasos niveles de pelitas verdosas intercaladas se observan cambios en el color original de la roca matriz. Por otro lado, de acuerdo a la información extraída de los registros de perforación, presentan una conductividad hidráulica baja a nula siendo rocas prácticamente impermeables, lo cual puede visualizarse en campo.

A pesar del grado de alteración observado en las rocas, se estimó una resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa de más de 250 MPa, ya que al emplear los índices de campo propuestos por la ISRM (1981), la roca no se fracturó al recibir numerosos golpes con el martillo, sino que únicamente saltaron algunas esquirlas. De forma que se la puede definir como una roca extremadamente dura. Sin embargo, dicho valor no presenta coherencia con los resultados de laboratorio obtenidos por las empresas consultoras ya que para una arenisca se

espera un promedio de 84,57 MPa con 105,65 MPa como máximo y 69,33 MPa como mínimo. Es por ello que en el apartado 7.3.3.b. *Unidades geotécnicas definidas en afloramiento*, se expone la metodología empleada para valorar la resistencia a la compresión simple, debido al grado de incertidumbre que conlleva estimar la misma mediante índices de campo.

Estas areniscas se identifican en el SD-07 a los 27 metros de profundidad respectivamente, intercaladas con niveles de pelitas verdosas subordinadas. Tanto el grado de fracturamiento como el grado de alteración observados en campo, coinciden con los datos de los registros de perforación.

Los datos obtenidos a partir del levantamiento de las discontinuidades y la caracterización de la matriz rocosa en campo se muestran en la planilla geotécnica de la Figura 33 en el Anexo 2. En base a las mediciones realizadas en esta estación geomecánica, se obtuvo que las diaclasas se agrupan en tres familias de discontinuidades, a las cuales se les asignó la denominación de J1, J2 y J3 para su identificación.

La familia de discontinuidades J1 está compuesta por diaclasas subverticales cuyo azimut es de 290° y presentan una inclinación de 90°. Las mismas se caracterizan por presentar una extensión cuyo rango varía entre 1 a 3 metros de longitud, aproximadamente. Se pudo contabilizar un total de 20 discontinuidades a lo largo del talud rocoso natural cuya extensión lateral alcanza los 50 metros. En cuanto al espaciamiento de las discontinuidades, se pudo estimar que las mismas se encuentran espaciadas, en promedio, a 2,5 metros de distancia formando grandes bloques de roca que caracterizan este sector del macizo. En todas las mediciones efectuadas, se pudo observar, que en su gran mayoría, las discontinuidades se caracterizan por ser abiertas presentando aberturas mayores a 5 mm con ausencia de relleno, e incluso, se identificaron sectores donde las aberturas alcanzan los 2 cm de espesor. En las paredes de las discontinuidades se desarrollan ligeras rugosidades sobre las que se pudieron observar signos de alteración moderada debido a cambios en la coloración de las caras de las juntas con respecto al color de la roca matriz (Figura 23).



Figura 23. Diaclasas correspondientes a la familia de discontinuidades J1. En: a) Diaclasa con una extensión de 1 m y abertura de 1 cm con ausencia de relleno; b) Rugosidades y alteración en las paredes de la discontinuidad.



Figura 24. Diaclasas verticales correspondientes a la familia de discontinuidades J2. En: a) Diaclasa con una extensión de 1 m y abertura de 1 cm con ausencia de relleno y rugosidades escalonadas; b) Ondulaciones rugosas y alteración en las paredes de la discontinuidad.

Por otro lado, las diaclasas verticales cuyo azimut es de 220° y presentan una inclinación de 85° , corresponden a la familia de discontinuidades J2. La longitud que caracteriza a estas discontinuidades, al igual que las pertenecientes a la familia J1, alcanza los 3 metros de extensión como máximo, y cabe destacar, que son diaclasas prolongadas, de 1 metro de largo como mínimo. A lo largo de los 50 metros de extensión que conforman el afloramiento, se pudieron identificar un total de 15 juntas, lo cual permitió determinar un espaciamiento medio entre las mismas de 3 metros. Sin embargo, en base a las observaciones realizadas, es posible afirmar que en general, la separación entre diaclasas varía en un rango entre 0,60 y 2 metros de distancia. Al igual que en la familia J1, las discontinuidades ocurren sin presencia de relleno y la distancia perpendicular que separa las paredes de las discontinuidades supera los 5 mm, alcanzando valores de hasta 1 cm. Las paredes de los planos de discontinuidad se encuentran muy rugosas a diferencia de las paredes de las juntas pertenecientes a la familia J1, con desarrollo de ondulaciones rugosas y rugosidades escalonadas. A su vez, se distingue la presencia de cambios en la coloración de la roca, lo cual se debe, probablemente, a su exposición a agentes atmosféricos (Figura 24).

La familia de discontinuidades J3 se encuentra constituida por diaclasas horizontales en el sentido de la estratificación, cuya extensión alcanza, como máximo, los 20 metros de longitud. Se identificaron un total de 13 discontinuidades a lo largo de los 25 metros de altura que conforman el talud rocoso natural de la presente estación geomecánica, por lo que en cuanto al espaciamiento de las discontinuidades, se pudo estimar que las mismas se encuentran espaciadas, en promedio, a 1,9 metros de distancia. Sin embargo, de acuerdo a las mediciones realizadas, fue posible definir que la separación entre diaclasas horizontales varía en un rango entre 0,2 y 0,6 metros de espaciamiento en algunos sectores, con valores máximos de espaciado

correspondientes a 1,5 metros. En semejanza con las familias J1 y J2, las discontinuidades no se encuentran rellenas y presentan aberturas mayores a 5 mm, de hasta 3 cm como máximo. En las paredes o caras de las juntas, se observaron algunos rasgos tales como rugosidades escalonadas y presencia de manchas correspondientes a procesos de meteorización y alteración (Figura 25).

A pesar de la cercanía de la estación geomecánica con respecto al río Neuquén, no fue posible observar evidencia alguna de presencia de agua en el interior del afloramiento, por lo que todas las discontinuidades pertenecientes a las tres familias se encuentran secas.



Figura 25. Diaclasas horizontales correspondientes a la familia de discontinuidades J3 con aberturas de hasta 3 cm y desarrollo de rugosidades escalonadas.

En el Anexo 3 del presente trabajo, se exponen los diagramas estereográficos de las discontinuidades relevadas en cada una de las estaciones geomecánicas establecidas.

7.3. Trabajo de gabinete posterior al campo

7.3.1. Confección de mapa geológico

A partir del relevamiento de campo, y particularmente, de la identificación de las unidades litológicas aflorantes, se generó un mapa geológico (1:8.000) actualizado del área bajo estudio (Figura 26), para posteriormente, realizar una correcta zonificación geotécnica del macizo rocoso en base al comportamiento geomecánico de las unidades.

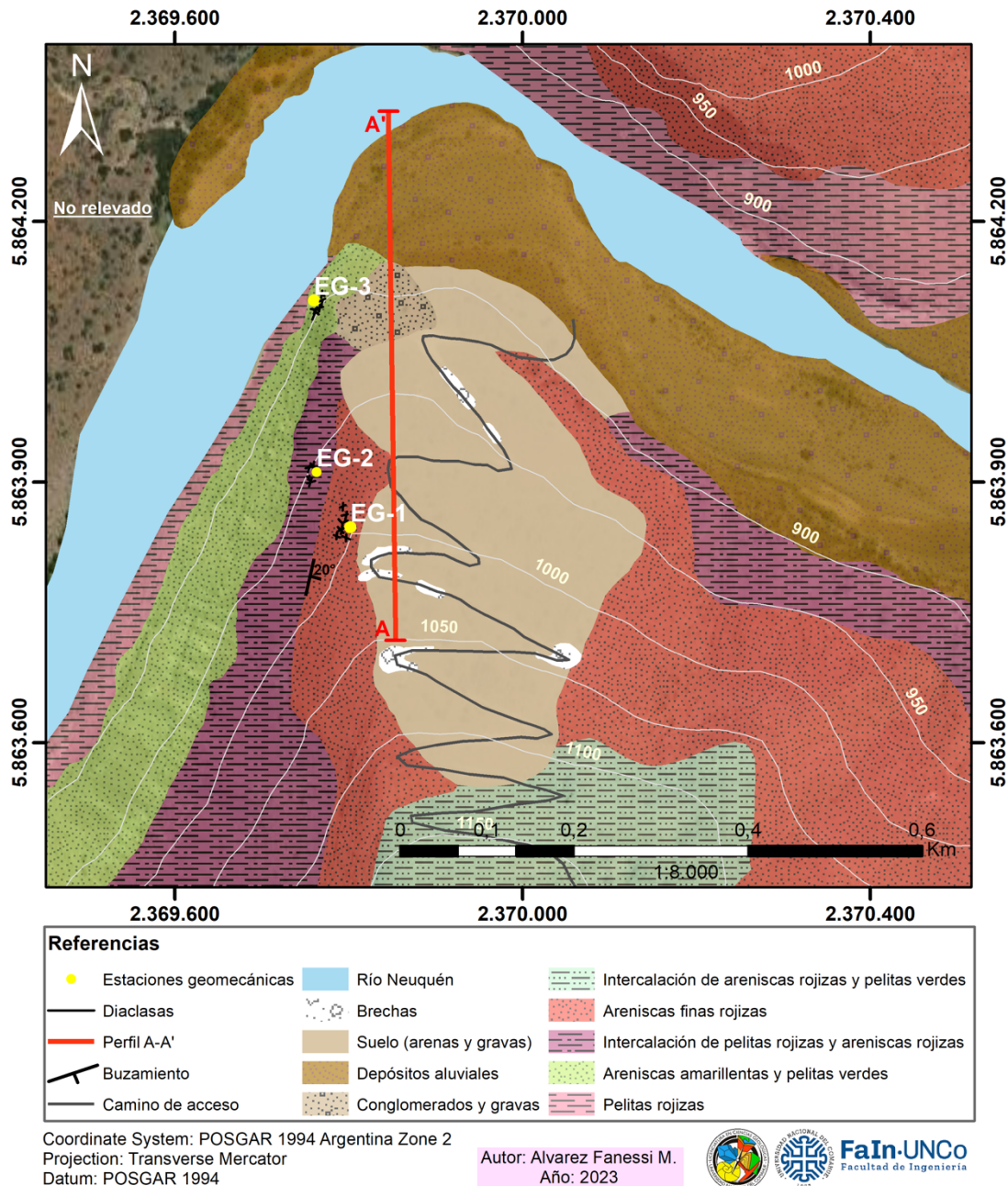


Figura 26. Mapa geológico del área de estudio (Elaboración propia).

En la Figura 27 se detalla un perfil geológico del área bajo estudio en sentido sur-norte, sobre el sitio en el cual se realizaron las observaciones de campo. La confección del perfil geológico permitió esquematizar las relaciones estratigráficas observadas entre las distintas unidades litológicas y realizar un mejor análisis de la información para la definición de unidades geotécnicas y caracterización del macizo rocoso.

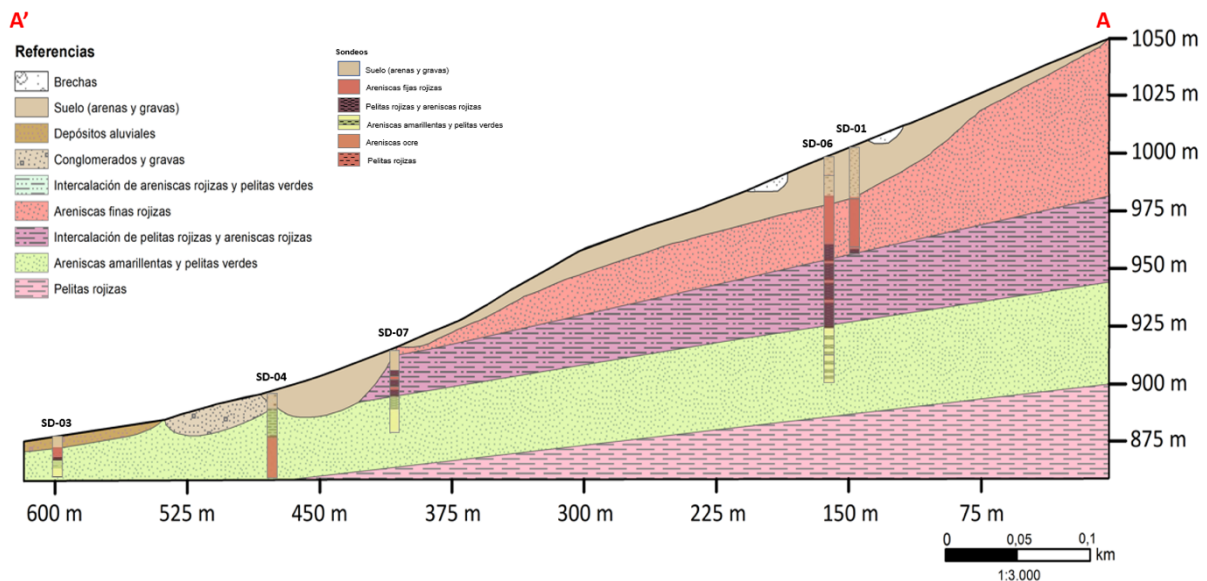


Figura 27. Perfil geológico en sentido sur-norte donde se esquematiza la disposición de las unidades litológicas en el área bajo estudio (Elaboración propia).

7.3.2. Interpretación y análisis de perfiles de líneas sísmicas

La interpretación de perfiles de refracción sísmica permitió identificar cambios litológicos y determinar sectores donde las rocas presentan distintos comportamientos geomecánicos, de acuerdo a cambios en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas.

En general, en todos los perfiles de refracción sísmica, es posible identificar la presencia de un espeso nivel de materiales superficiales que se caracterizan por presentar valores bajos de velocidad de propagación de las ondas sísmicas, los cuales oscilan entre los 300 y 900 m/s. Comparando las líneas sísmicas entre sí, es posible observar cómo disminuye el espesor de esta capa de baja velocidad hacia la parte inferior del macizo rocoso, lo cual coincide con la información interpretada a partir de las perforaciones y el relevamiento de campo. Mientras que en los perfiles de refracción correspondientes a las líneas sísmicas 3A y 2A se identifica un espesor de este material de aproximadamente 30 metros, en la línea sísmica 1A es posible observar que esta capa no supera los 10 metros de espesor. Estos niveles de baja velocidad corresponden a arenas y gravas que conforman un nivel de suelo que disminuye su espesor hacia la parte baja del macizo rocoso (Fig. 28).

Por debajo de los niveles de suelo, se identifica una capa con valores de velocidad de propagación de las ondas sísmicas que varían en un rango entre 1300 y 1500 m/s. Estas capas, corresponden a rocas superficiales que se encuentran muy alteradas, meteorizadas o fracturadas evidenciado por la baja velocidad de propagación de las ondas sísmicas. Dichas rocas corresponden a niveles de areniscas finas rojizas superficiales, las cuales, de acuerdo a los registros de perforación, presentan un alto grado de alteración y fracturamiento, baja recuperación y bajo RQD. Principalmente, en la línea sísmica 5A, es posible visualizar la ocurrencia de esta capa con velocidades de 1300 a 1500 m/s inmediatamente por debajo de los niveles de suelo y a lo largo de toda la extensión del macizo rocoso. De acuerdo a lo interpretado a partir de los sondeos, esta capa de areniscas finas rojizas muy descompuestas y fracturadas de mala calidad, se identifica en los sondeos SD-01 y SD-06, entre los 33 y 43,7 metros para el sondeo SD-01 y entre los 7,6 y 15,4 metros para el sondeo SD-06. Sin embargo, correlacionando la información sísmica con los registros de perforación, es posible afirmar que en la ubicación del sondeo SD-01, tanto el suelo como la capa de areniscas finas rojizas de mala calidad, presentan un mayor espesor y, por lo tanto, se extienden a mayor profundidad.

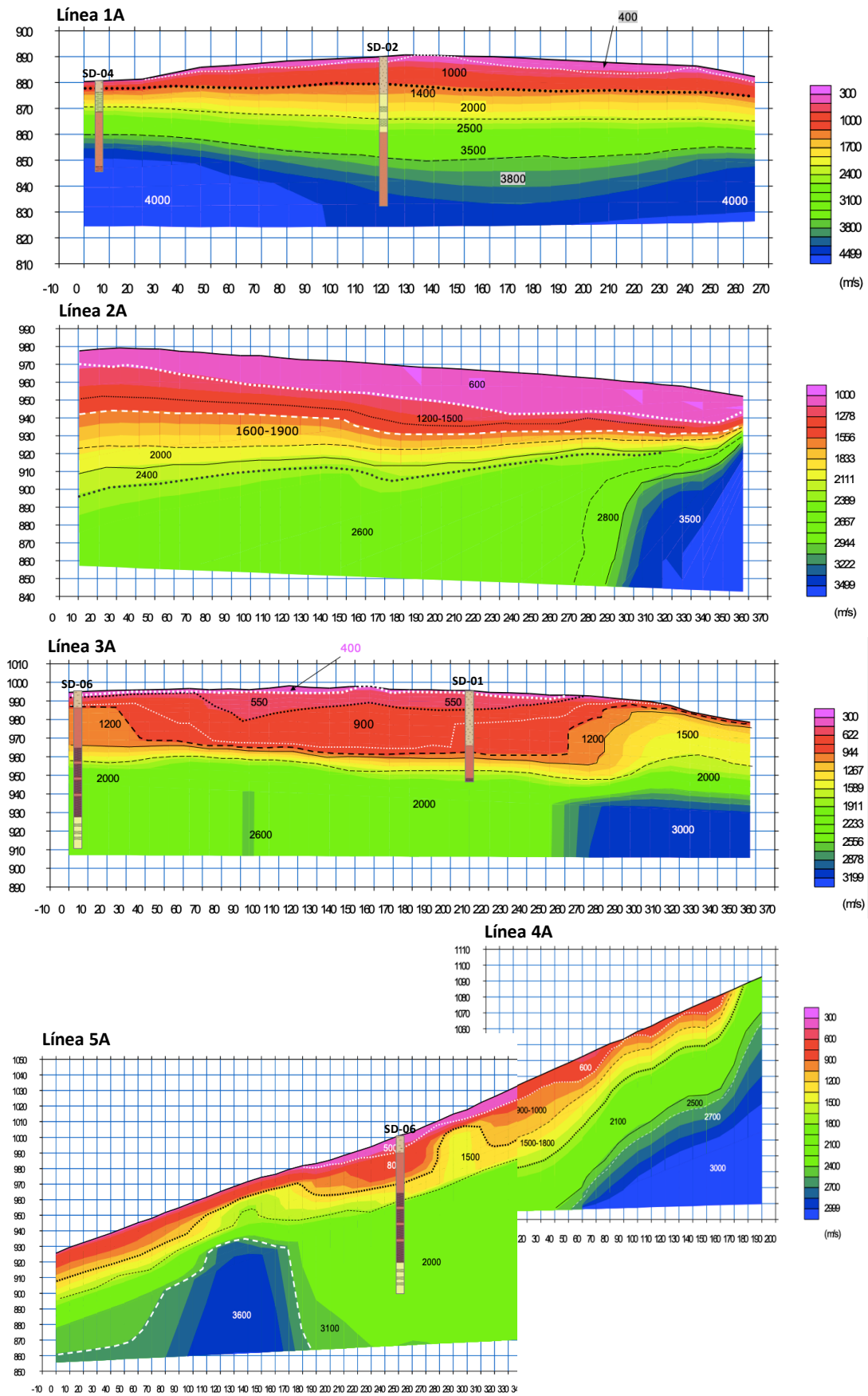


Figura 28. Perfiles de refracción correspondientes a las líneas sísmicas 1A, 2A, 3A, 4A y 5A (Emhidro SEP, 2017).

En cambio, en la ubicación del sondeo SD-06, la capa de areniscas de mala calidad presenta un espesor menor de acuerdo a los perfiles de refracción, e inmediatamente por debajo de la misma, se dispone una roca de mayor calidad con velocidades de 2000 a 2300 m/s.

Las interpretaciones realizadas también se observan en la línea sísmica 3A. Hacia el centro de la línea sísmica, donde la misma intersecta el sondeo SD-01, es posible observar como la capa de suelo es muy espesa a diferencia del espesor de suelo identificado en el sondeo SD-06. A su vez, el sondeo SD-01 atraviesa areniscas de mala calidad y se extiende hasta la cota 950 msnm, por lo que no alcanza niveles de roca de mejor calidad. Por el contrario, el sondeo SD-06 atraviesa un espesor de aproximadamente 10 metros de suelo y 20 metros de areniscas finas rojizas de mala calidad. Por lo tanto, en el sondeo SD-06 puede realizarse una diferenciación entre las areniscas finas rojizas de mala calidad y las areniscas finas rojizas de mejor calidad dispuestas inmediatamente por debajo, lo cual no es posible de visualizar en el sondeo SD-01. Esto se debe a que el sondeo SD-06 se extiende hasta la cota 903 msnm y atraviesa una columna más espesa de rocas. Por lo tanto, de acuerdo a los perfiles de refracción, se visualiza que a partir de la cota 965 msnm, aproximadamente, se desarrolla una capa de areniscas de mejor calidad con velocidades de 2000 m/s. Incluso, a mayor profundidad, se alcanzan velocidades de hasta 2600 m/s, las cuales posiblemente correspondan a los niveles de areniscas amarillentas y pelitas verdes intercaladas, identificados en el sondeo SD-06 a partir de los 30 metros de profundidad.

De acuerdo a los registros de perforación, la unidad litológica compuesta por areniscas amarillentas intercaladas con pelitas verdes subordinadas, presenta un alto grado de alteración evidenciado por la presencia de cristales de pirita, micas y otros filosilicatos. Esta unidad litológica fue analizada en la EG-3, a escasos metros del sondeo SD-07, en el cual la unidad es identificada entre los 20,4 y los 40 metros de profundidad; y a pocos metros del sondeo SD-04.

En la intersección de la línea sísmica 1A con el sondeo SD-04, es posible observar como las rocas que poseen una mala calidad se disponen en un rango de hasta 10 metros como máximo, e inmediatamente por debajo, a partir de la cota 870 msnm, aumenta la velocidad de las ondas sísmicas, lo cual se asocia a rocas de mejor calidad, las cuales posiblemente correspondan a la unidad litológica descrita en la EG-3. Incluso, el sondeo SD-04 se extiende hasta la cota 846 msnm y alcanza rocas de muy buena calidad con velocidades de 3800 a 4000 m/s.

Por último, comparando los sondeos SD-04, SD-07 y SD-02 y correlacionándolos con la línea sísmica 1A, es posible observar como las unidades presentan una variación lateral en cuanto a sus características geotécnicas. Es decir, el sondeo SD-04 atraviesa menos de 10 metros de roca de mala calidad, mientras que el sondeo SD-02 atraviesa un espesor de roca de mala calidad de 25 metros aproximadamente. De acuerdo a los registros de perforación, estas rocas presentan un índice RQD muy bajo y un alto grado de alteración en comparación con las rocas identificadas en los sondeos SD-04 y SD-07 y analizadas en la EG-3, lo cual coincide con la información interpretada en la línea sísmica 1A.

7.3.3. Definición de unidades geotécnicas

En función de la información preliminar de perforación procesada en la base de datos del Anexo 2, se identificaron un total de cinco unidades geotécnicas a partir de los sondeos. En base a las observaciones y mediciones realizadas en campo, se definieron un total de 3 unidades geotécnicas en afloramiento de acuerdo al relevamiento realizado en las tres estaciones geomecánicas establecidas. Las mismas se definieron en función de la litología y de acuerdo a su comportamiento geomecánico.

7.3.3.a. Unidades geotécnicas definidas a partir de sondeos:

Unidad geotécnica 1 – UG-1 (s): Se encuentra constituida por material rocoso perteneciente a la porción superior de la unidad litológica compuesta por areniscas finas rojizas. Es posible identificar esta unidad geotécnica en los sondeos SD-01 y SD-06, a profundidades cuyos rangos varían entre los 33 y 43,7 metros para el sondeo SD-01 y entre los 7,6 y 15,4 metros en el sondeo SD-06 (ver Figura 8 y Figura 9 en el apartado 7.1). Esta unidad, se caracteriza por presentar, en general, valores de recuperación relativamente bajos, que oscilan, en promedio, entre el 47 y el 65%. Los valores promedio de RQD característicos de esta unidad geotécnica, los cuales oscilan entre el 4 y el 9%, se obtuvieron a partir de los datos de perforación procesados en la base de datos. Se realizó un promedio de los valores de RQD en los tramos y sondeos en los que fue identificada la unidad geotécnica; para así obtener un único valor de RQD representativo de la unidad. Se extendió este criterio a todas las unidades geotécnicas definidas a partir de sondeos.

En el Anexo 1 del presente trabajo, se exponen las características de las discontinuidades y de la matriz rocosa de la unidad geotécnica 1. En síntesis, de acuerdo a los informes y los ensayos de compresión uniaxial realizados en la etapa de anteproyecto por las empresas consultoras, la matriz rocosa presenta un valor promedio de resistencia a la compresión simple de 84,57 MPa, de acuerdo a los datos RCS de los tipos de rocas más representativas (Ver Tabla 6).

Debido a que la información de perforación no cuenta con datos concisos de determinados parámetros que caracterizan a las discontinuidades, como el espaciamiento, longitud y magnitud de la abertura, se optó por asignarle un valor a los mismos de acuerdo a las observaciones realizadas en campo. Ambas familias de discontinuidades identificadas sobre esta unidad en la estación geomecánica 1 (EG-1), presentan espaciamientos medios que oscilan entre los 0,2 y los 0,6 metros y la longitud que caracteriza a estas discontinuidades, no supera el metro de extensión y las juntas aparecen con aberturas mayores a 5 mm. De acuerdo a la información de perforación, las juntas presentan paredes rugosas y se describe la presencia de diaclasas de entre 2 a 5 mm rellenas con CaCO₃. Las paredes de las discontinuidades presentan una alteración moderada a alta. Sin embargo, se tiene en cuenta la condición más desfavorable al momento de evaluar la unidad geotécnica, por lo que se considera una alteración alta de las mismas. Las rocas pertenecientes a esta unidad geotécnica no muestran evidencias de flujo de agua, por lo que es posible determinar un estado general seco de las mismas.

En la Tabla 15, se adjunta un resumen de las características de la UG-1 (s) considerando los tramos en los que fue identificada dicha unidad en los sondeos SD-01 y SD-06.

					Características de las discontinuidades				
UG-1 (s)	Recuperación (%)	RQD (%)	Alteración	Consistencia	Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Fracturamiento
SD-01									
Promedio	47	4	4	4	2	4	3	1	4
Máximo	100	9	4	4	2	4	5	2	4
Mínimo	25	0	4	4	2	4	2	1	4
Características de las discontinuidades									
UG-1 (s)	Recuperación (%)	RQD (%)	Alteración	Consistencia	Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Fracturamiento
SD-06									
Promedio	65	9	4	4	2	4	3	1	4
Máximo	100	33	4	4	2	4	5	2	4
Mínimo	20	0	3	3	2	3	2	1	3

Tabla 14. Resumen de las características de la UG-1 (s) para el tramo comprendido entre los 33 y 43,7 metros para el sondeo SD-01 y entre los 7,6 y 15,4 metros en el sondeo SD-06.

Unidad geotécnica 2 – UG-2 (s): Se compone de areniscas finas rojizas al igual que las correspondientes a la UG-1 (s). Sin embargo, estas se encuentran a mayor profundidad y se diferencian de las areniscas descritas en la UG-1 (s) debido a que presentan un comportamiento geomecánico distinto. Es decir, si bien las unidades geotécnicas 1 y 2 corresponden a una misma litología, se las diferencia, en un principio, debido a que la arenisca superior se encuentra muy fracturada y meteorizada a diferencia de la arenisca identificada a mayor profundidad en los sondeos SD-01 y SD-06.

La diferenciación entre unidades previamente mencionada, se observa tanto en el sondeo SD-01 como en el SD-06. Sin embargo, en el sondeo SD-06, es posible visualizar con mayor claridad la diferenciación geotécnica de la unidad litológica compuesta por areniscas finas rojizas, ya que se cuenta con mayor cantidad de datos de recuperación y RQD (ver Figura 9 en el apartado 7.1).

Es posible identificar a la UG-2 (s) en el sondeo SD-06, entre los 15,4 y los 29 metros de profundidad. En dicho sondeo, se visualiza como a partir de los 15,4 metros de profundidad y hasta los 29 metros, aumenta significativamente la calidad de la roca. Este cambio en el comportamiento geotécnico de la roca, se evidencia debido a valores de recuperación mayores, que oscilan, en promedio, entre el 65 y el 85%; y debido a un aumento en el índice RQD, cuyo valor alcanza el 45% a diferencia de los niveles superiores de areniscas. A su vez, se puede observar cómo disminuye el grado de alteración de la matriz rocosa en conjunto con un leve aumento en la consistencia de la roca.

Debido a que las rocas asignadas a la UG-2 (s) corresponden a la misma litología descrita en la UG-1 (s), se considera que la matriz rocosa presenta un valor promedio de resistencia a la compresión simple de 84,57 MPa.

En cuanto al estado de las discontinuidades, se describirán únicamente de acuerdo a los datos de perforación del estudio de anteproyecto, ya que en campo no se pudo definir una estación geomecánica para la obtención de datos debido a la inaccesibilidad a los afloramientos. De acuerdo a los sondeos, las juntas se describen como diaclasas con aberturas cuyo rango varía entre 1 a 5 mm de espesor, con relleno carbonatico, paredes rugosas y moderadamente alteradas. Debido al relevamiento de campo efectuado, es posible afirmar que los afloramientos de areniscas se encuentran secos, sin presencia de filtraciones.

En la Tabla 16, se adjunta un resumen de las características de la UG-2 (s) considerando los tramos en los que fue identificada dicha unidad en el sondeo SD-06.

UG-2 (s)	Recuperación (%)	RQD (%)	Alteración	Consistencia	Características de las discontinuidades				
					Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Fracturamiento
SD-06									
Promedio	85	45	3	3	2	3	3	1	3
Máximo	100	77	4	4	2	4	5	2	4
Mínimo	33	0	3	3	2	3	2	1	3

Tabla 15. Resumen de las características de la UG-2 (s) para el tramo comprendido entre los 15,4 y 29 metros en el sondeo SD-06.

Unidad geotécnica 3 – UG-3 (s): Se compone de niveles de pelitas rojizas que se intercalan con niveles subordinados de areniscas rojizas. Es posible identificar casi 37 metros de esta unidad geotécnica en el sondeo SD-06, entre los 29 y 65,7 metros de profundidad (ver Figura 9 en el apartado 7.1). De acuerdo a la información extraída de registros de perforación, procesada en

la base de datos (Anexo 2), esta unidad presenta, en promedio, valores de recuperación del 93% y el índice RQD alcanza un valor promedio del 44%.

De acuerdo a los resultados obtenidos a partir de la información de anteproyecto brindada por las empresas consultoras, la matriz rocosa se caracteriza por presentar un valor promedio de resistencia a la compresión simple de 107,52. Se considera este valor debido a que la unidad geotécnica bajo análisis cuenta con un predominio de pelitas a diferencia de las unidades UG-1 (s) y UG-2 (s).

Debido a que la información de perforación no cuenta con datos concisos de determinados parámetros que caracterizan a las discontinuidades, como el espaciamiento y longitud, se optó por asignarle un valor a los mismos de acuerdo a las observaciones realizadas en campo. En síntesis, con respecto al espaciamiento y extensión de las discontinuidades visualizadas en campo, las mismas presentan una extensión de hasta 1 metro de longitud como máximo y se encuentran poco espaciadas entre sí, con separaciones de 0,1 metros en su mayoría y otras, en general, que no superan los 0,2 metros. De acuerdo a la información de perforación, las diaclasas son predominantemente cerradas con aberturas de hasta 2 mm como máximo. Las mismas son verticales a subverticales y se encuentran rellenas con abundante material carbonático. Las paredes de las discontinuidades se describen como rugosas a lisas. Sin embargo, de acuerdo a las observaciones de campo, es posible afirmar que las paredes de las discontinuidades no cuentan con desarrollo de rugosidades, sino que únicamente presentan leves ondulaciones. Debido a que se tiene en cuenta la condición más desfavorable al momento de evaluar la unidad geotécnica, se considera que las discontinuidades se encuentran muy alteradas de acuerdo a los datos de perforación, con abundantes pátinas de óxidos en las paredes de las mismas. Por último, no se observó en campo la presencia de filtraciones a lo largo de las discontinuidades, por lo que los afloramientos se encuentran secos.

En la Tabla 17, se adjunta un resumen de las características de la UG-3 (s) considerando los tramos en los que fue identificada dicha unidad en el sondeo SD-06.

UG-3 (s)	Recuperación (%)	RQD (%)	Alteración	Consistencia	Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Fracturamiento
SD-06									
Promedio	93	44	4	3	2	3	3	1	4
Máximo	100	100	4	4	2	4	5	2	4
Mínimo	62	0	3	3	2	3	2	1	3

Tabla 16. Resumen de las características de la UG-3 (s) para el tramo comprendido entre los 29 y 65,7 metros en el sondeo SD-06.

Unidad geotécnica 4 – UG-4 (s): Se encuentra compuesta, principalmente, por areniscas amarillentas que corresponden, probablemente, a los niveles identificados en el sondeo SD-07 entre los 20,6 y los 40 metros de profundidad (Ver Figura 10 en el apartado 7.1). Esta unidad, se caracteriza por presentar, en general, valores de recuperación del 100% y el índice RQD característico de esta unidad geotécnica alcanza un valor promedio del 56%. A diferencia de las unidades geotécnicas previamente descritas, la UG-4 (s) presenta los mayores valores de recuperación y RQD.

Si bien la UG-4 (s) presenta niveles subordinados de pelitas verde grisáceas, para el valor de resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa se considerará el valor asignado a las areniscas en la etapa de anteproyecto por las empresas consultoras, es decir, 84,57 MPa respectivamente. En campo, las discontinuidades presentan una extensión de entre 1 y 3 metros, y el espaciamiento medio entre las mismas, oscila entre los 0,2 y 0,6 metros de distancia. De

acuerdo a la información de perforación, todas las discontinuidades se encuentran abiertas, con paredes rugosas y presencia de arcillas y rellenos de CaCO₃ en algunos casos. Las caras de las juntas presentan una alteración moderada a alta con leve desarrollo de pátinas de óxidos. Por último, no se observó en campo la presencia de filtraciones ni evidencias de flujo de agua, por lo que las discontinuidades se encuentran secas.

En la Tabla 18, se adjunta un resumen de las características de la UG-4 (s) considerando los tramos en los que fue identificada dicha unidad en el sondeo SD-07.

UG-4 (s)	Recuperación (%)	RQD (%)	Alteración	Consistencia	Características de las discontinuidades				
					Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Fracturamiento
SD-07									
Promedio	92	56	3	3	2	3	3	1	3
Máximo	100	100	4	4	2	4	3	2	4
Mínimo	40	0	3	3	2	3	2	1	2

Tabla 17. Resumen de las características de la UG-4 (s) para el tramo comprendido entre los 20,6 y 40 metros en el sondeo SD-07.

Unidad geotécnica 5 – UG-5 (s): Esta unidad se encuentra compuesta por 40 metros de pelitas rojizas laminadas que se disponen inmediatamente por debajo de la UG-4 (s). Esta unidad fue identificada en los registros de perforación procesados en la base de datos (Anexo 1), a lo largo de toda la columna correspondiente al sondeo SD-05, respectivamente (Ver Figura 14 en el apartado 7.1). Si bien se pudo identificar en campo a las rocas que pertenecen a esta unidad geotécnica, los afloramientos no superan el metro de altura y comprenden niveles superficiales de la unidad. A su vez, los afloramientos relevados se disponen al margen del río Neuquén, por lo que se encuentran fuertemente alterados superficialmente y cubiertos por vegetación. Por lo tanto, se optó por analizar y caracterizar a esta unidad únicamente a partir de la información disponible, perteneciente a estudios realizados en la etapa de anteproyecto. Esta unidad, se caracteriza por presentar una recuperación elevada con un valor promedio del 92%, y el valor promedio del índice RQD característico de esta unidad geotécnica es el más elevado en comparación con las otras unidades geotécnicas definidas, correspondiente al 65%.

Debido a que las rocas asignadas a la UG-5 (s) corresponden a pelitas, se considera que la matriz rocosa presenta un valor de resistencia a la compresión simple de 107,52 MPa de acuerdo a la información brindada por las empresas consultoras. En cuanto al estado de las discontinuidades, los datos de espaciamiento y longitud de las discontinuidades se establecerán a partir del afloramiento de esta unidad visualizado en campo. La UG-5 (s) se caracteriza por presentar diaclasas subverticales o con un ángulo de 45° respecto al eje de la perforación, abiertas, con ausencia de relleno, y paredes rugosas a lisas en algunos casos. Las caras de las juntas se encuentran muy alteradas con presencia de pátinas de óxidos en las paredes. Por último, en cuanto a la permeabilidad que presentan las rocas que conforman las unidades geotécnicas, se optó por realizar un promedio de los valores obtenidos en los ensayos Lugeon para cada unidad geotécnica, los cuales fueron extraídos de los registros de perforación y procesados en la base de datos. En la Tabla 15, se adjunta un resumen de las características de la UG-5 (s) considerando el tramo en el que fue identificada dicha unidad en el sondeo SD-05.

UG-5 (s)	Recuperación (%)	RQD (%)	Alteración	Consistencia	Características de las discontinuidades				
					Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Fracturamiento
SD-05									
Promedio	93	63	3	3	2	3	3	1	3
Máximo	100	91	4	4	2	4	5	2	4
Mínimo	60	0	3	3	2	3	2	1	3

Tabla 18. Resumen de las características de la UG-5 (s) para los 45 metros del sondeo SD-05.

De acuerdo a los valores obtenidos, las tres unidades geotécnicas que cuentan con ensayos Lugeon realizados, pueden ser clasificadas como rocas de permeabilidad baja o impermeables. De esta forma, se puede considerar al macizo rocoso como un macizo relativamente impermeable.

En el caso de la UG-1 (s) y la UG-3 (s), no se cuenta con ensayos Lugeon realizados en los tramos en los que se extienden ambas unidades (Tabla 19). Sin embargo, es de suma importancia considerar la ausencia de ensayos Lugeon en los tramos en los que se extienden dichas unidades geotécnicas, ya que se evidencia el alto grado de fracturamiento del macizo rocoso en dichos sectores producto de que no se alcanzó la presión de inyección de agua necesaria para realizar el ensayo correspondiente. A su vez, es relevante destacar que, en dichos tramos, los valores de RQD permiten identificar una roca de calidad muy mala a mala.

Unidad geotécnica	Lugeon (L/m)	Clasificación
UG-1 (s)	Tramo no ensayado; roca alterada y meteorizada	
UG-2 (s)	8	Permeabilidad baja
UG-3 (s)	Tramo no ensayado; roca alterada y meteorizada	
UG-4 (s)	11	Permeabilidad baja
UG-5 (s)	3	Impermeable

Tabla 19. Clasificación de la permeabilidad de las unidades geotécnicas en función de los ensayos Lugeon.

En la Tabla 20 se muestra un resumen de las características de los testigos relevados para los tramos en los que fueron identificadas las cinco unidades geotécnicas en los sondeos. La importancia de esta tabla radica en establecer una tendencia en el comportamiento de las unidades geotécnicas, en los tramos en los cuales fueron identificadas dentro de los sondeos. De esta forma, se dispone de un resumen preliminar, complementario al análisis realizado.

UNIDAD GEOTÉCNICA	Recuperación (%)	RQD (%)	Alteración	Consistencia	Características de las discontinuidades				
					Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Fracturamiento
UG-1 (s)									
Promedio	56	7	4	4	2	4	4	1	4
Máximo	100	33	4	4	2	4	5	2	4
Mínimo	20	0	3	3	2	3	2	1	3
UG-2 (s)									
Promedio	85	45	3	3	2	3	3	1	3
Máximo	100	77	4	4	2	4	5	2	4
Mínimo	0	0	3	3	2	3	2	1	3
UG-3 (s)									
Promedio	93	44	4	3	2	4	3	1	3
Máximo	100	100	4	4	2	4	5	2	4
Mínimo	62	0	3	3	2	3	2	1	3
UG-4 (s)									
Promedio	92	56	3	3	2	3	2	1	3
Máximo	100	100	4	4	2	4	5	2	4
Mínimo	40	0	3	3	2	3	2	1	2
UG-5 (s)									
Promedio	93	63	3	3	2	4	2	1	3
Máximo	100	91	4	4	2	4	3	2	4
Mínimo	60	0	3	3	2	3	2	1	3

Tabla 20. Resumen de las características de las unidades geotécnicas a partir de la información de los testigos relevados, considerando los tramos en los que fueron identificadas dichas unidades.

7.3.3.b. *Unidades geotécnicas definidas en afloramiento:*

Unidad geotécnica 1 – UG-1 (a): Al igual que la unidad geotécnica 1 definida a partir de sondeos, esta unidad se encuentra compuesta por areniscas finas rojizas. La unidad geotécnica 1 determinada en afloramiento corresponde a las rocas analizadas en la estación geomecánica 1 (EG-1), por lo que en el apartado 7.2.3 y en el Anexo 2 del presente trabajo, se exponen las características de las discontinuidades y de la matriz rocosa medidas en campo.

El índice RQD se estimó mediante el conteo volumétrico de discontinuidades J_v (*Volumetric Joint Count*) de Palmstrom (1975) mediante la fórmula $RQD = 115 - 3,3 \cdot J_v$.

De acuerdo a la información relevada en campo y expuesta en la planilla geotécnica de la estación geomecánica 1 del Anexo 2, para la familia de discontinuidades J1 se contabilizaron un total de 27 juntas a lo largo de los 8 metros de extensión que conforman el afloramiento. Por su parte, para la familia de discontinuidades J2 se identificaron un total de 8 juntas a lo largo de los 5 metros de altura que conforman la estación geomecánica. De esta forma, se procedió al cálculo del J_v implementando la metodología expuesta en el apartado 5.4.1.b.

$$J_v = \frac{n^{\circ} \text{ de discontinuidades familia J1}}{\text{Longitud de medida L1}} + \frac{n^{\circ} \text{ de discontinuidades familia J2}}{\text{Longitud de medida L2}}$$

Entonces, $J_v = \frac{27}{8} + \frac{8}{5} = 4,97$; y por tanto, $RQD = 115 - 3,3 \cdot 4,97 = 98,5$.

De esta forma, se obtuvo un índice RQD de 98% para la unidad geotécnica 1.

Por otro lado, de acuerdo a los índices de campo empleados, la matriz rocosa presenta valores de resistencia a la compresión simple relativamente bajos, entre los 5 a 25 MPa, lo cual difiere de los informes de anteproyecto. Debido a la gran incertidumbre que conlleva estimar la RCS mediante índices de campo y su poca coherencia respecto a los resultados obtenidos en laboratorio por las empresas consultoras (Ver apartado 6.5.1.a.), se optó por valorar a la RCS de las unidades geotécnicas definidas en afloramiento utilizando el valor promedio obtenido en ensayos de laboratorio (Tabla 21). Se extendió este criterio a todas las unidades geotécnicas definidas en afloramiento, para el posterior cálculo del índice RMR.

Resistencia a la compresión simple (RCS) para unidades geotécnicas en afloramiento					
RCS mediante índices de campo			RCS mediante ensayos de laboratorio (Tabla X)		
UG-1 (a)	UG-2 (a)	UG-3 (a)	UG-1 (a)	UG-2 (a)	UG-3 (a)
5 a 25 MPa	1 a 5 MPa	250 MPa	84,57 MPa	107,52 MPa	84,57 MPa

Tabla 21. Resumen del valor de RCS para unidades geotécnicas definidas en afloramiento. Comparación entre el valor obtenido mediante índices de campo y el valor obtenido en ensayos de laboratorio por las empresas consultoras.

En cuanto al estado de las discontinuidades, ambas familias presentan espaciamentos medios que oscilan entre los 0,2 y los 0,6 metros y la longitud que caracteriza a estas discontinuidades, no supera el metro de extensión. Las juntas aparecen con aberturas mayores a 5 mm, con ausencia de relleno y con paredes ligeramente rugosas de acuerdo a todas las mediciones efectuadas. En cuanto a la alteración de las paredes de las discontinuidades, si bien gran parte de las juntas no muestran signos de una alteración significativa de sus paredes, se tiene en cuenta la condición más desfavorable al momento de evaluar la unidad geotécnica, por lo que se considera una alteración ligera de las mismas. Las rocas pertenecientes a esta unidad geotécnica no muestran evidencias de flujo de agua, por lo que es posible determinar un estado general seco de las mismas.

Unidad geotécnica 2 – UG-2 (a): Esta unidad se encuentra constituida, mayormente, por pelitas rojizas laminadas que se intercalan con bancos de escasa potencia de areniscas rojizas de grano fino. La unidad geotécnica 2 corresponde a las rocas analizadas en la estación geomecánica 2, por lo que en el apartado 7.2.3 y en el Anexo 2 del presente trabajo, se exponen las características de las discontinuidades y de la matriz rocosa medidas en campo.

El índice RQD se estimó mediante la fórmula $RQD = 115 - 3,3 \cdot J_v$, utilizando la misma metodología que para la unidad geotécnica UG-1 (a). Para su cálculo, de acuerdo a la información expuesta en la planilla geotécnica de la estación geomecánica 2 en el Anexo 2, se identificaron un total de 15 juntas para la familia de discontinuidades J1 y 10 juntas para la familia de discontinuidades J2, a lo largo de los 3 metros que conforman la estación geomecánica. Para la familia de discontinuidades J3, se contabilizaron un total de 5 juntas a lo largo del metro de extensión que conforma el afloramiento bajo análisis.

Entonces, $J_v = \frac{15}{3} + \frac{10}{3} + \frac{5}{1} = 13,33$; y por tanto, $RQD = 115 - 3,3 \cdot 13,33 = 70,6$.

De esta forma, se obtuvo un índice RQD de 70% para la unidad geotécnica 2.

De acuerdo a los resultados obtenidos al emplear los índices de campo propuestos por la ISRM (1981), la matriz rocosa se caracteriza por presentar una resistencia a la compresión simple cuyo rango varía entre 1 a 5 MPa, siendo una roca blanda a muy blanda. Si bien este resultado es poco coherente con los resultados de laboratorio obtenidos por las empresas consultoras, al aplicar la metodología descrita en la UG-1 (a) para obtener la RCS en afloramiento, se la clasifica con un valor de 107,52 MPa para el cálculo del índice RMR (Tabla 21).

En síntesis, con respecto al estado de las discontinuidades, las mismas presentan una extensión de hasta 1 metro de longitud como máximo y se encuentran poco espaciadas entre sí, con separaciones de 0,1 metros en su mayoría y otras, en general, que no superan los 0,2 metros. Las juntas se disponen con aberturas que oscilan entre 0,1 y 1 mm de espesor, y fue posible observar la presencia abundante relleno carbonatico en una de las familias de discontinuidades. De acuerdo a las observaciones de campo, las paredes de las discontinuidades no cuentan con desarrollo de rugosidades, sino que únicamente presentan leves ondulaciones. Debido a que se tiene en cuenta la condición más desfavorable al momento de evaluar la unidad geotécnica, se considera que las discontinuidades presentan una alteración moderada de acuerdo a los datos de cada una de las familias reconocidas. Por último, no se observó la presencia de filtraciones a lo largo de las discontinuidades, por lo que los afloramientos se encuentran secos.

Unidad geotécnica 3 – UG-3 (a): Se encuentra compuesta, principalmente, por areniscas amarillentas con niveles de pelitas verdes subordinadas que corresponden a las rocas analizadas en la estación geomecánica 3, por lo que en el apartado 7.2.3 y en el Anexo 2 del presente trabajo, se exponen las características de las discontinuidades y de la matriz rocosa medidas en campo.

Para la estimación del índice RQD se consideraron la cantidad de juntas por longitud de medida. En base a la información relevada en campo, se pudo contabilizar un total de 20 discontinuidades pertenecientes a la familia J1, a lo largo del talud rocoso natural que conforma esta estación geomecánica, cuya extensión alcanza los 50 metros. Para la familia de discontinuidades J2, se contabilizaron un total de 15 juntas a lo largo de los 50 metros de extensión que ocupa el afloramiento. Por su parte, para la familia de discontinuidades J3 se identificaron 13 discontinuidades a lo largo de los 25 metros de altura que posee la estación geomecánica 3.

Entonces, $Jv = \frac{20}{50} + \frac{15}{50} + \frac{13}{25} = 1,22$; y por tanto, $RQD = 100$. De esta forma, debido a que el valor del Jv es menor a 4,5, se obtuvo un índice RQD de 100% para la unidad geotécnica 3.

En síntesis, de acuerdo a los índices de campo empleados en el afloramiento, la matriz rocosa se caracteriza por presentar valores de resistencia a la compresión simple elevados, mayores a 250 MPa respectivamente. Debido a la poca coherencia de este resultado con el valor obtenido mediante ensayos de laboratorio por las empresas consultoras, se aplicó la metodología descrita en la UG-1 (a) y se define un valor de RCS de 84,57 MPa para la UG-3 (a) (Tabla 21).

Con respecto al estado de las juntas, debido a que las tres familias de discontinuidades que afectan a esta unidad presentan valores de espaciamiento y longitud que difieren entre sí, se optará por aplicar el criterio de tener en consideración aquellos los valores que más afectan la resistencia del macizo rocoso, es decir, se considerará la situación más desfavorable. Dicho esto, las discontinuidades presentan una extensión de entre 1 y 3 metros, y el espaciamiento medio entre las mismas, oscila entre los 0,2 y 0,6 metros de distancia. De acuerdo a las mediciones efectuadas, todas las discontinuidades ocurren con aberturas mayores a 5 mm, con ausencia de relleno y paredes rugosas. Debido a los cambios de coloración observados en las caras de las juntas, se considera que las mismas presentan una alteración moderada. Por último, no se observó la presencia de filtraciones ni evidencias de flujo de agua, por lo que todas las discontinuidades se encuentran secas.

En la Tabla 22 se resumen las mediciones efectuadas en cada afloramiento con los valores de RQD obtenidos. Cabe destacar que la metodología empleada para el cálculo del índice RQD representa una ventaja con respecto a la estimación original ya que permite obtener un valor de RQD únicamente a partir de mediciones superficiales; pero, a su vez, los resultados obtenidos son mucho más elevados en comparación con el índice RQD obtenido para cada unidad geotécnica a partir de la información de perforación. En efecto, es de suma importancia realizar una comparación y correlación de estos resultados con los valores de RQD adquiridos a partir de la información de perforación, para no sobredimensionar el índice RQD de la unidad. Para el caso de la UG-1 (a), si bien el $RQD = 98\%$, se castigó su valoración debido a que es muy elevado para la poca recuperación que presenta la litología que compone dicha unidad.

Unidad geotécnica en afloramiento	Familia de discontinuidades	n° de discontinuidades	Longitud de medida	Jv	RQD (%)
UG-1 (a)	J1	27	8	4,97	98
	J2	8	5		
UG-2 (a)	J1	15	3	13,33	70
	J2	10	3		
	J3	5	1		
UG-3 (a)	J1	20	50	1,22	100
	J2	15	50		
	J3	13	25		

Tabla 22. Índice RQD obtenido para cada una de las unidades geotécnicas determinadas en afloramiento, estimado a partir de la correlación empírica de Palmstrom (1975).

Una vez definidas las unidades geotécnicas a partir de los sondeos y en afloramiento, se correlacionaron las unidades de acuerdo a sus propiedades geotécnicas, litológicas y su ubicación, es decir, la ubicación de los sondeos con respecto a las estaciones geomecánicas. En las Tablas 23 y 24, se presenta un resumen de las características principales de las unidades geotécnicas definidas a partir de los sondeos y en afloramiento.

		Unidades geotécnicas en afloramiento		
		UG-1 (a)	UG-2 (a)	UG-3 (a)
Litología		Areniscas finas rojizas	Pelitas rojizas	Areniscas amarillentas
Estación geomecánica		EG-1	EG-2	EG-3
Resistencia a la compresión simple (MPa)		84,57	107,52	84,57
RQD (Palmstrom, 1975)		98%	70%	100%
Separación entre diaclasas		0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	0,2-0,6 m
Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	< 1 m	1-3 m
	Abertura	> 5 mm	0,1-1 mm	> 5 mm
	Rugosidad	Ligeramente rugosa	Ondulada	Rugosa
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Ninguno
	Alteración	Ligeramente alterada	Moderada	Moderada
Agua freática		Seco	Seco	Seco

Tabla 23. Litología, sondeo de identificación y parámetros geomecánicos para las unidades geotécnicas determinadas a partir de sondeos. La información correspondiente a separación, longitud y abertura de las discontinuidades se determinó en base a observaciones de campo.

		Unidades geotécnicas a partir de sondeos				
		UG-1 (s)	UG-2 (s)	UG-3 (s)	UG-4 (s)	UG-5 (s)
Litología		Areniscas finas rojizas	Areniscas finas rojizas	Pelitas rojizas	Areniscas amarillentas	Pelitas rojizas
Sondeo de identificación		SD-01 SD-06	SD-06	SD-06	SD-07	SD-05
Profundidad de identificación		33 a 43,7 m 7,6 a 15,4 m	15,4 a 29 m	29 a 65,7 m	20,6 a 40 m	0 a 40,4 m
Resistencia a la compresión simple (MPa)		84,57	84,57	107,52	84,57	107,52
RQD		4-9%	45%	44%	56%	65%
Separación entre diaclasas		0,2-0,6 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	0,2-0,6 m	0,2-0,6 m
Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	< 1 m	< 1 m	1-3 m	< 1 m
	Abertura	> 5 mm	1-5 mm	1-5 mm	> 5 mm	> 5 mm
	Rugosidad	Ligeramente rugosa	Rugosa	Ondulada	Rugosa	Rugosa
	Relleno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro < 5 mm	Ninguno
	Alteración	Muy alterada	Moderada	Muy alterada	Muy alterada	Muy alterada
Agua freática		Seco	Seco	Seco	Seco	Ligeramente húmedo

Tabla 24. Litología, estación geomecánica y parámetros geomecánicos para las unidades geotécnicas determinadas en afloramiento.

En base a esta información, se pudo correlacionar la información relevada en campo con la información de perforación del estudio de anteproyecto. La relación establecida entre unidades geotécnicas a partir de sondeos y unidades geotécnicas en afloramiento se observa en la Tabla 25.

Unidades geotécnicas a partir de sondeos	UG-1 (s)	UG-2 (s)	UG-3 (s)	UG-4 (s)	UG-5 (s)
Unidades geotécnicas en afloramiento	UG-1 (a)		UG-2 (a)	UG-3 (a)	

Tabla 25. Correlación entre unidades geotécnicas definidas a partir de sondeos y unidades geotécnicas en afloramiento.

La unidad geotécnica UG-1 (s) definida en sondeos corresponde a la unidad geotécnica UG-1 (a) definida en afloramiento en la estación geomecánica EG-1. En este sector, afloran los niveles de areniscas finas rojizas identificados en los sondeos SD-01 y SD-06 a una profundidad de 33 y 7,6 m respectivamente. En cambio, la unidad geotécnica UG-2 (s) solo cuenta con datos de perforación del estudio de anteproyecto realizado por las empresas consultoras, ya que no se pudo definir una estación geomecánica para la obtención de datos en campo debido a la inaccesibilidad a los afloramientos.

Por su parte, en base a las características litológicas, estado de las discontinuidades y profundidad de identificación en testigos de perforación, es posible correlacionar la UG-3 (s) determinada a partir de sondeos con la UG-2 (a) definida en afloramiento. Asimismo, la UG-4 (s) en sondeos se compone de areniscas amarillentas identificadas en el sondeo SD-07 entre los 20,6 y los 40 metros de profundidad y corresponde, probablemente, a los bancos de areniscas amarillentas descritos en la estación geomecánica EG-3, es decir, a la unidad geotécnica UG-3 (a) descrita en afloramiento.

En el caso de la unidad geotécnica UG-5 (s), la misma fue determinada únicamente en sondeos debido a que en el margen derecho bajo estudio, no se cuenta con afloramientos representativos de pelitas rojizas para establecer una estación geomecánica. De forma que los datos que se tendrán en cuenta para su caracterización corresponden a información de perforación.

La correlación entre unidades geotécnicas permitió establecer, en resumen, un total de cinco unidades geotécnicas en el macizo bajo estudio; de las cuales, tres de ellas fueron analizadas tanto en campo como en registros de perforación y dos fueron determinadas, únicamente, a partir de la información extraída de los sondeos realizados por las empresas consultoras.

Si bien los valores de resistencia a la compresión simple determinados mediante índices de campo en afloramiento difieren del valor obtenido en el informe de anteproyecto para testigos de perforación, la metodología empleada permitió obtener un valor más coherente; y por su parte, la información obtenida a partir del relevamiento de campo es consistente con los datos de perforación. Es decir, se pudo realizar una correlación de acuerdo a la litología aflorante, las familias de discontinuidades identificadas y el grado de alteración y fracturamiento, ya que se corresponden con la información de perforación.

7.4. Caracterización geomecánica del macizo rocoso

7.4.1. Clasificación geomecánica RMR (Rock Mass Rating)

El cálculo del índice RMR se efectuó para las cinco unidades geotécnicas definidas a partir de sondeos y para las tres unidades geotécnicas definidas en afloramiento. En las Tablas 23 y 24 se resumen y detallan los valores o rangos de valores obtenidos de: resistencia a la compresión simple, RQD, espaciamiento, longitud, abertura, rugosidad, relleno, alteración de las discontinuidades y agua freática, para cada unidad geotécnica de acuerdo a la información analizada y las mediciones realizadas. Cabe destacar, que a fin de comprender la nomenclatura asignada a las unidades geotécnicas y para una correcta diferenciación, se optó por asignarle la letra (s) a las unidades geotécnicas que fueron determinadas a partir de sondeos y la letra (a) a las unidades geotécnicas definidas en afloramiento.

Los valores de puntuación adjudicados a los cinco parámetros geomecánicos de clasificación de Bieniawski (1973) para cada una de las unidades geotécnicas, se indican en las Tablas 26 y 27. En lo que concierne al estado de las discontinuidades, cabe aclarar que todas las puntuaciones fueron realizadas teniendo en cuenta la situación más desfavorable para cada parámetro considerado, extendiendo este criterio a todas las unidades geotécnicas por igual. De esta forma, es posible garantizar un margen de seguridad al considerar el escenario más hostil con respecto a la calidad del macizo rocoso.

RMR - Unidades geotécnicas definidas a partir de sondeos							
Parámetro geomecánico		Puntuación					
		UG-1 (s)	UG-2 (s)	UG-3 (s)	UG-4 (s)	UG-5 (s)	
R1	Resistencia a la compresión simple (MPa)	7	7	7	7	7	
R2	RQD	3	6	6	13	13	
R3	Separación entre diaclasas	10	10	8	10	10	
R4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	6	6	6	6	6
		Abertura	0	1	3	0	0
		Rugosidad	3	5	1	5	5
		Relleno	6	4	4	6	6
		Alteración	3	3	3	3	3
R5	Agua freática	15	15	15	15	10	
RMR		53 (regular)	57 (regular)	53 (regular)	65 (buena)	60 (buena)	

Tabla 26. Puntuación asignada a los parámetros geomecánicos para las unidades geotécnicas determinadas a partir de sondeos, en base a la metodología propuesta por Bieniawski (1973).

RMR - Unidades geotécnicas definidas en afloramiento					
Parámetro geomecánico		Puntuación			
		UG-1 (a)	UG-2 (a)	UG-3 (a)	
R1	Resistencia a la compresión simple (MPa)	4	4	7	
R2	RQD	13	13	20	
R3	Separación entre diaclasas	10	8	10	
R4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	6	6	4
		Abertura	0	3	0
		Rugosidad	3	1	5
		Relleno	6	4	6
		Alteración	3	3	3
R5	Agua freática	15	15	15	
RMR		60 (buena a regular)	57 (regular)	70 (buena)	

Tabla 27. Puntuación asignada a los parámetros geomecánicos para las unidades geotécnicas determinadas en afloramiento, en base a la metodología propuesta por Bieniawski (1973).

El cálculo del índice RMR de acuerdo a la clasificación de Bieniawski (1973), se efectuó de la siguiente manera:

$$RMR = R1 + R2 + R3 + R4 + R5$$

Donde:

- R1= Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa.
- R2= RQD (*Rock Quality Designation*).
- R3= Separación entre diaclasas.
- R4= Estado de las discontinuidades.
- R5= Agua freática.

La sumatoria de la valoración asignada a cada parámetro geomecánico permitió obtener un índice RMR específico para cada unidad geotécnica (Tablas 26 y 27). De esta manera, es posible determinar la calidad de las unidades geotécnicas diferenciadas, de forma que representen la condición del macizo rocoso en cada sector bajo estudio y de acuerdo a la información de perforación de anteproyecto o los datos relevados en campo.

De acuerdo a los valores obtenidos, las unidades geotécnicas UG-1 (s), UG-2 (s) y UG-3 (s), es decir, un 60% de las unidades geotécnicas determinadas a partir de sondeos, presentan valores de RMR entre 41-60, correspondiente a una calidad “media” de clase III. Mientras que el 40% restante, es decir, las unidades geotécnicas UG-4 (s) y UG-5 (s), presenta valores entre 61-80 de acuerdo a la clasificación de Bieniawski, por lo que corresponden a una calidad “buena” de clase II.

En cuanto a las unidades geotécnicas determinadas en afloramiento, la unidad UG-3 (a) es la única que presenta valores de RMR entre 61-80, correspondiente a una roca de calidad “buena” o “regular” de clase II. Por su parte, las unidades UG-1 (a) y UG-2 (a) presentan valores entre 41-60 por lo que corresponden a rocas de calidad “media” o “regular” de clase III. Sin embargo, la UG-1 (a) presenta un valor de 60, es decir, muy cercano al límite inferior de lo que se indica para una roca de calidad “buena”; pero se la asignó a la categoría de calidad “regular” para considerar el escenario más desfavorable.

En base a los resultados expuestos en la Tabla 26, es posible observar que las unidades geotécnicas UG-1 (s), UG-2 (s) y UG-3 (s) presentan valores de RMR similares y relativamente bajos, de forma que las tres unidades se ubican dentro del rango 41-60 de la clasificación RMR, por lo que presentan una calidad “media”. Si bien las tres unidades geotécnicas presentan un alto grado de fracturamiento, este resultado en cuanto a su calidad, posiblemente se deba a que el macizo no presenta un flujo de agua que disminuya su resistencia y afecte su comportamiento. A su vez, estas rocas no presentan signos de un alto grado de meteorización.

Si bien la UG-2 (s) compuesta por areniscas finas rojizas presenta una calidad “media”, cabe destacar que presenta un valor promedio de RMR = 57, el cual se diferencia del valor obtenido para la UG-1 (s) y la UG-3 (s). De acuerdo a los registros de perforación, las rocas pertenecientes a esta unidad geotécnica se encuentran a mayor profundidad que las rocas que conforman la UG-1 (s) y la UG-3 (s). Al disponerse a mayor profundidad, las rocas no se ven tan afectadas por procesos de meteorización e intemperismo, lo cual se evidencia a partir de un aumento en la calidad de la roca a partir de los 15,4 metros en el sondeo SD-06 (Ver Tabla 35 en Anexo 1) y se ve reflejado en los perfiles de refracción analizados. Particularmente, en el perfil obtenido para la línea sísmica 5A (Ver Figura 27 en el apartado 7.3.2), es posible observar como a mayor profundidad aumenta la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en la ubicación del sondeo SD-06, lo cual permite inferir que hay un incremento de la calidad de la roca. En comparación con las areniscas superficiales, las cuales, probablemente, se encuentren más fracturadas y meteorizadas, las areniscas subyacentes presentan una mejor calidad. Esta interpretación se evidencia en las características geológicas y geomecánicas de la UG-2 (s), ya

que las rocas pertenecientes a esta unidad geotécnica, presentan valores elevados de recuperación de hasta el 85% y un menor grado de fracturamiento y alteración.

A diferencia de las tres unidades geotécnicas previamente mencionadas, la UG-4 (s) presenta un índice RMR de 65, por lo que se ubica dentro del rango 61-80 de la clasificación RMR y corresponde a una unidad geotécnica que posee una calidad “buena”. Este resultado se debe a que el macizo rocoso en este sector (sondeo SD-07 entre los 20,6 y 40 metros de profundidad), se encuentra conformado por rocas duras con valores de resistencia a la compresión simple elevados y que poseen una calidad regular de acuerdo al índice RQD. A su vez, la UG-5 (s) presenta un RMR de 60, el cual también se puede ubicar dentro del rango 61-80 de la clasificación geomecánica RMR y se define como rocas que poseen una calidad “buena”. La UG-5 (s) se localiza inmediatamente por debajo de la UG-4 (s), a lo largo de toda la columna correspondiente al sondeo SD-05 ubicado en la parte baja del macizo. En este sector del macizo rocoso, si bien se analizó casi en su totalidad a partir de información preliminar, las rocas se caracterizan por presentar una resistencia a la compresión elevada y una calidad regular de acuerdo al índice RQD.

Por su parte, los valores de RMR obtenidos para las unidades geotécnicas determinadas en afloramiento son consistentes con la información de perforación, es decir, con las unidades geotécnicas definidas a partir de sondeos con las que fueron correlacionadas previamente. Sin embargo, debido a las distintas metodologías empleadas para el cálculo del índice RQD, los valores finales de RMR asignados a las unidades geotécnicas definidas en afloramiento pueden diferir levemente del valor de las unidades geotécnicas determinadas en sondeos con las que fueron correlacionadas.

Particularmente, la UG-1 (a) posee un índice RMR de 60, mientras que la unidad con la que fue correlacionada, es decir, la UG-1 (s), posee un RMR de 53, de forma que difieren en cuanto a la clase y calidad asignada según la clasificación de Bieniawski (1973). A su vez, la UG-2 (a) presenta un índice RMR de 57, el cual difiere del RMR asignado a la unidad con la que fue correlacionada, es decir, la UG-3 (s) con un RMR de 53. Esta diferencia se debe, principalmente, al valor asignado al índice RQD, ya que en el caso de las unidades geotécnicas determinadas en afloramiento, el mismo fue estimado mediante la correlación empírica de Palmstrom (1975). Esta metodología implicó calcular el índice RQD a partir de mediciones superficiales, contabilizando las discontinuidades visibles en el afloramiento sin utilizar los datos de perforación. De esta forma, es posible visualizar que en las unidades geotécnicas definidas en afloramiento, el valor del índice RQD es mayor debido a que se estimó de manera indirecta mediante la expresión de Palmstrom (1975), y por lo tanto, el valor del índice RMR también es mayor.

Si bien el índice RMR de la UG-2 (a) difiere levemente respecto al índice RMR de la UG-3 (s) con la que fue correlacionada, ambas presentan una calidad “media”. Tal como se visualizó en los registros de perforación, se pudo constatar en campo que las pelitas rojizas que conforman a estas unidades geotécnicas, se encuentran poco consolidadas y presentan un alto grado de fracturamiento con desarrollo de abundantes diaclasas.

Por el contrario, la UG-3 (a) presenta un índice RMR de 70, puesto que se compone de rocas con un alto grado de dureza y elevados valores de resistencia a la compresión simple. Por lo tanto, corresponde a una unidad geotécnica con una calidad “buena” al igual que la UG-4 (s) con la que fue correlacionada.

En la Tabla 28 se detalla un resumen de los valores de RMR obtenidos para cada unidad geotécnica, tanto para las determinadas a partir de sondeos como para las determinadas en afloramiento. De acuerdo a la correlación realizada entre unidades geotécnicas, se realizó un promedio entre los valores de RMR obtenidos, de forma que se obtuvo un RMR específico para cada unidad (Tabla 29). En el caso de las unidades geotécnicas UG-2 y UG-5, se cuenta con un único valor de RMR determinado a partir de la información correspondiente a registros de perforación. Dicho valor será considerado como valor de RMR final para las unidades mencionadas.

Unidades geotécnicas a partir de sondeos	UG-1 (s)	UG-2 (s)	UG-3 (s)	UG-4 (s)	UG-5 (s)
RMR	53	57	53	65	60
Unidades geotécnicas en afloramiento	UG-1 (a)	-	UG-2 (a)	UG-3 (a)	-
RMR	60	-	57	70	-

Tabla 28. Síntesis de los valores de RMR obtenidos para cada unidad geotécnica, tanto para las determinadas a partir de sondeos como para las definidas en afloramiento, para su posterior ponderación.

Unidades geotécnicas	UG-1 _{final}	UG-2 _{final}	UG-3 _{final}	UG-4 _{final}	UG-5 _{final}
RMR	56	57	55	67	60

Tabla 29. Valores de RMR promedio, específicos para cada unidad geotécnica, de acuerdo a la correlación realizada entre unidades geotécnicas de sondeo y de afloramiento.

Ponderando los valores de RMR obtenidos para cada unidad geotécnica (Tabla 29) se calculó el índice RMR global del macizo rocoso. De esta forma, se define un valor medio de RMR= 59, característico de todo el conjunto de rocas que conforman la columna estratigráfica en el área bajo estudio. El valor de RMR obtenido corresponde a la clase III de acuerdo a la clasificación RMR, por lo que el macizo presenta una calidad media. De acuerdo al resultado obtenido, fue posible establecer una correlación entre la clase de calidad de roca según el RMR del macizo rocoso y los parámetros resistentes de salida: ϕ (ángulo de rozamiento) y C (cohesión). El macizo rocoso presenta, en general, valores de ángulo de rozamiento que oscilan entre 25° y 35°, y valores de cohesión que varían en un rango entre 2 y 3 kg/cm².

En el mapa de la Figura 29, se puede observar la disposición de las unidades geotécnicas finales definidas en el presente trabajo y su relación con el esquema de las obras que comprenden el proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada. A su vez, en dicho mapa, es posible visualizar la ubicación de los estudios realizados en el área bajo estudio por las empresas consultoras y la propuesta de estudios a futuro, los cuales se detallan en las conclusiones del presente trabajo.

Finalmente, a partir del RMR obtenido y desde un punto de vista geológico-geotécnico, las propiedades geotécnicas de las rocas aflorantes permiten definir que el macizo rocoso constituye un sitio apropiado para el emplazamiento de las obras que comprenden el proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada.

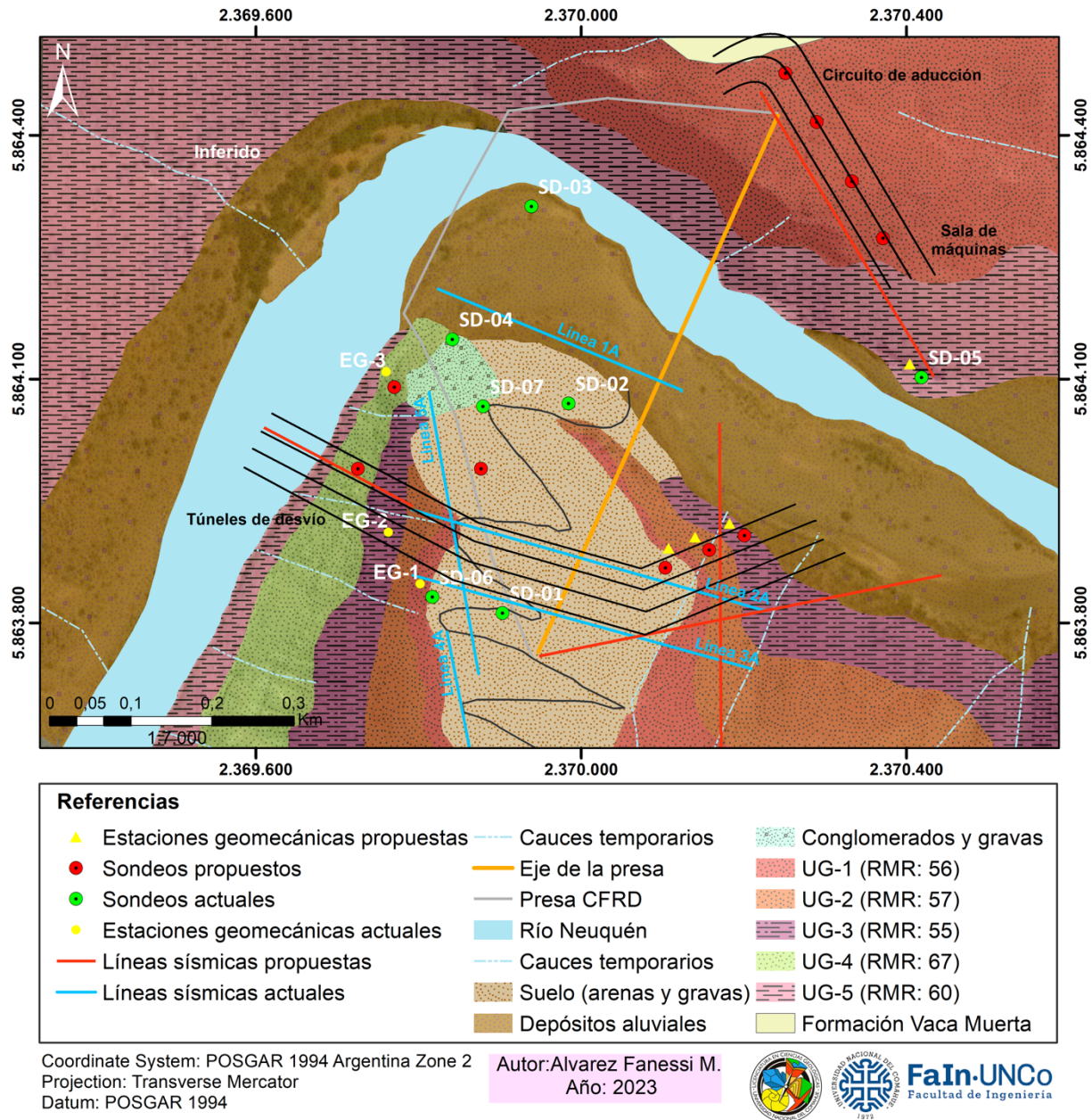


Figura 29. Mapa de unidades geotécnicas con el esquema de las obras que comprenden el proyecto y la propuesta de estudios a futuro (Elaboración propia).

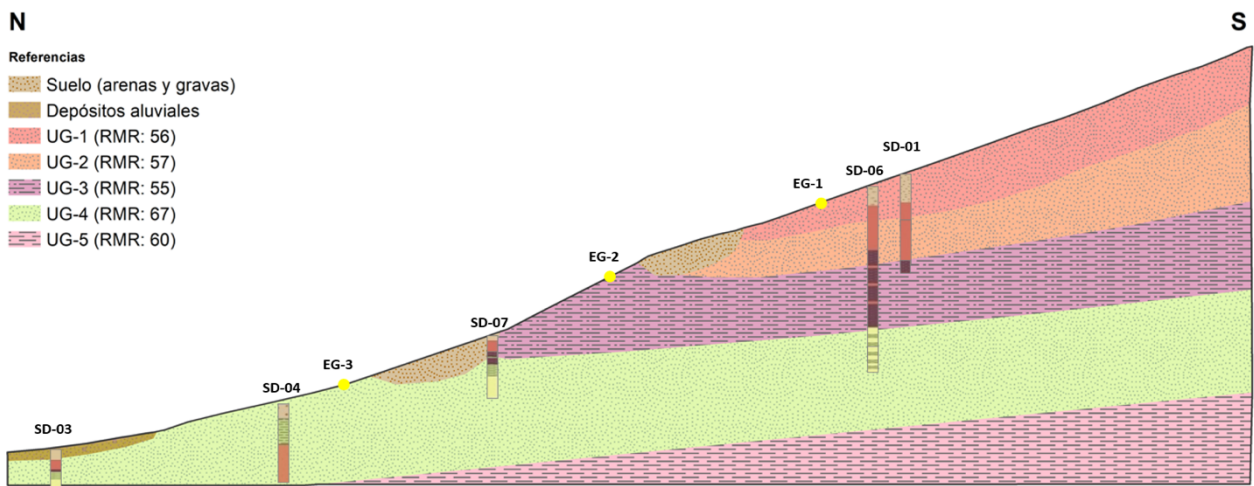


Figura 30. Sección geotécnica que ilustra la disposición de las unidades geotécnicas en subsuelo y su relación con las estaciones geomecánicas en superficie donde fueron relevadas.

8. CONCLUSIONES

En base al análisis geológico y geotécnico llevado a cabo en el macizo rocoso donde se emplazarán las obras que comprenden el proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada, se llegó a las conclusiones expuestas en este apartado.

Los sitios de emplazamiento de obras de ingeniería tales como presas, las cuales al asentarse sobre el material rocoso modifican las condiciones iniciales del mismo, requieren de un estudio integral de las condiciones ingeniero geológicas del medio rocoso, aplicando conocimientos de geotecnia, geología, geomecánica, estructural, hidrogeología y edafología. El análisis multidisciplinario resulta fundamental para sectorizar variaciones en el comportamiento geomecánico del macizo rocoso y caracterizarlo geotécnicamente.

El macizo rocoso bajo estudio, puede ser caracterizado como un macizo relativamente impermeable con calidad media compuesto por rocas con un alto grado de fracturamiento. Dado que la resistencia a la compresión simple se estimó utilizando índices de campo y mediante la extracción de datos de ensayos realizados en la etapa de anteproyecto por las empresas consultoras; es recomendable realizar, a futuro, ensayos de resistencia a la compresión simple sobre testigos de las distintas unidades geotécnicas definidas en el presente trabajo, para mejorar el análisis de las mismas y obtener datos más precisos. En cuanto al grado de fracturamiento del macizo rocoso, ponderando los valores de RQD obtenidos para cada unidad geotécnica, se estima un valor promedio del índice RQD de 60%, correspondiente a un macizo de calidad media según Palmstrom (2005).

Al aplicar la clasificación geomecánica RMR, se pudo caracterizar al macizo rocoso realizando un promedio de los valores de RMR propios de cada unidad geotécnica. De esta manera, se obtuvo un valor de RMR de 59 correspondiente a rocas de calidad media o regular.

En base a las observaciones y mediciones efectuadas, se definieron cuatro unidades litológicas aflorantes en el área bajo estudio. Sin embargo, es posible afirmar que, en síntesis, los afloramientos analizados se encuentran constituidos por una intercalación de areniscas medianas a finas y pelitas, presentes en proporciones variables a lo largo de todo el perfil.

De acuerdo al relevamiento efectuado, parte de las observaciones en campo difieren en cuanto a lo interpretado a partir de los registros de perforación. Mientras que en los trabajos de gabinete previos a asistir al campo, se reconocieron cinco unidades litológicas a partir de los registros de perforación, en campo fue posible observar y mapear únicamente cuatro litologías diferentes. Esto se debe a que la unidad compuesta por pelitas verdes identificada en los testigos de perforación, no se definió como una unidad litológica en particular ya que solo fue identificada en un afloramiento de escasa potencia, a pocos metros del sondeo SD-02.

Por su parte, si bien las unidades geotécnicas definidas en afloramiento se encuentren posiblemente afectadas por una descompresión y alteración que las haga diferir con respecto a su equivalente en el interior del macizo, se correlacionaron las unidades geotécnicas teniendo en cuenta su ubicación en el macizo rocoso y respecto a los sondeos/estaciones geomecánicas, sus características litológicas y sus propiedades geotécnicas evaluadas tanto en sondeos como en afloramiento. Es necesario destacar que en los trabajos de anteproyecto realizados por las empresas consultoras, se dividió al macizo únicamente en dos unidades: areniscas y pelitas. En el presente trabajo, se asumió que la litología en el afloramiento bajo estudio es muy variable y

se optó por subdividir esa sectorización que se realizó en trabajos previos, lo que dio lugar a poder definir un total de cinco unidades geotécnicas.

La investigación desarrollada constituye un aporte científico y una actualización acerca de las propiedades geológicas y geotécnicas de las unidades que conforman el terreno de cimentación del proyecto. Sin embargo, cabe destacar que debe tenerse en consideración la ejecución de una cantidad adicional de ensayos a futuro, empleando distintas metodologías de investigación para un mayor conocimiento del terreno. La importancia de estudios a futuro radica en la necesidad de reducir el grado de incertidumbre acerca de la calidad y estabilidad de las rocas en el sitio de emplazamiento del proyecto.

En primer lugar, considerando el esquema de obras, se recomienda la ejecución de tres sondeos en la zona de descarga de los túneles de desvío, ya que no se dispone de perforaciones realizadas en el sector este del macizo rocoso bajo estudio. Dichos sondeos permitirán obtener información adicional acerca de las características geológicas y propiedades geotécnicas de las tres unidades geotécnicas interpretadas aguas arriba del eje de la presa, respectivamente en la margen derecha del río Neuquén. De igual manera, se recomienda la ejecución de un sondeo en el sector donde se ubicará la estructura de desvío, pero ubicado aguas arriba del eje de la presa, con el objetivo de abarcar todos los puntos del macizo rocoso que se verán influenciados por la excavación de los túneles de desvío. Asimismo, se sugiere contemplar la ejecución de un sondeo entre los sondeos SD-01 y SD-07, con el fin de complementar la información disponible, realizando una correlación con los datos de las perforaciones ya ejecutadas.

Por su parte, debido a la lejanía existente entre la estación geomecánica 3 con respecto a los sondeos aledaños, es recomendable realizar un sondeo próximo a la estación mencionada con el fin de obtener un mayor grado de detalle de las propiedades geotécnicas de interés de las unidades que componen el subsuelo, para ajustar el cálculo del índice RMR efectuado. A su vez, si bien en el presente trabajo se correlacionó la información de los sondeos SD-02, SD-04 y SD-07 con la unidad aflorante en el punto de ubicación de la estación geomecánica 3, la zona se caracteriza por presentar un alto grado de alteración evidenciado por el reconocimiento en testigos de perforación de roca silicificada y presencia de minerales secundarios de alteración como cristales de pirita, filosilicatos y feldespatos. Esta zona, es un sector de suma importancia para ampliar la información disponible ya que constituye el sector más bajo del macizo donde se apoyará la presa de cierre. Cabe destacar que dicha alteración puede visualizarse en los perfiles de refracción sísmica mediante anomalías de color azul que representan velocidades de propagación de las ondas sísmicas que oscilan entre los 3000 y 3600 m/s. Por lo tanto, es recomendable evaluar dichas anomalías mediante la ejecución de sondeos en distintos sectores del macizo donde fueron identificadas, es decir, en el extremo norte de la línea sísmica 5A y en cercanías al extremo este de la línea sísmica 2A.

Adicionalmente y en función de lo observado en el margen derecho del río Neuquén, se propone la realización de cuatro sondeos en el macizo ubicado sobre el margen izquierdo del río, sector donde se instalarán el circuito de aducción y la sala de máquinas de la presa. Dichos sondeos proporcionarían información acerca de las unidades que se verán afectadas por las obras mencionadas, y de las cuales, actualmente, no se cuenta con información disponible.

A fin de complementar la información existente, la ejecución de dos líneas sísmicas adicionales, una en sentido norte-sur y otra en sentido este-oeste, en el sector este del macizo bajo estudio, permitirían profundizar el grado de detalle en cuanto a la distinción de los límites entre unidades que presentan un mismo comportamiento geomecánico. Principalmente, esto posibilitaría

obtener información adicional para una mejor comprensión y conocimiento acerca de las propiedades de los niveles de areniscas y pelitas interpretados en dicho sector. Por su parte, se propone la ejecución de una línea sísmica en el margen izquierdo del río Neuquén, en sentido noroeste-sudeste; con el fin de complementar la información de perforación de los sondeos propuestos en el sector donde se ubicarán obras como el circuito de aducción y la sala de máquinas de la presa. Con el propósito de contar con toda la información de subsuelo necesaria de acuerdo al esquema de obras, se propone realizar una línea sísmica adicional aguas arriba del eje de la presa, sobre el sector donde se excavarán los túneles de desvío.

A su vez, el comportamiento del macizo bajo estudio, se encuentra fuertemente influenciado por el contexto geotectónico circundante, debido a que se encuentra emplazado en una zona de faja corrida y plegada. Por tal motivo, los estudios complementarios permitirían reconocer y detectar posibles zonas de falla o sistemas de pliegues en el subsuelo del sector donde se emplazará el proyecto.

Por otro lado, con el objetivo de poseer una mayor cantidad de datos y realizar una caracterización geomecánica mucho más exacta, se recomienda establecer un mínimo de tres estaciones geomecánicas adicionales en el sector este del macizo bajo estudio, es decir, sobre el margen derecho (aguas arriba del eje de la presa), para analizar las unidades geotécnicas definidas. A su vez, cabe destacar que las características geomecánicas de las rocas que corresponden a la unidad geotécnica 5, se determinaron en base a la información preliminar del estudio de anteproyecto. Esto se debe a que no se pudo acceder a los afloramientos debido a las características naturales del terreno, ya que los afloramientos de mayor espesor se disponen sobre el margen izquierda del río Neuquén. Por lo tanto, para futuras investigaciones, se recomienda establecer una estación geomecánica en la margen izquierda del río Neuquén, sobre las pelitas rojizas que componen la UG-5, con el fin de realizar un análisis detallado de las mismas.

Por último, se recomienda ampliar la investigación realizada mediante estudios de detalle en aquellos sectores donde se identificó la presencia de materiales sueltos, de forma que sean correctamente delimitados y caracterizados, ya que coinciden el área donde se excavarán, a futuro, los túneles de desvío que conforman la presa. A su vez, se sugiere profundizar la investigación mediante un análisis detallado en el cauce del río para tener un mayor conocimiento acerca del espesor de los depósitos aluviales, ya que constituyen el sector donde se fundarán ciertas obras vinculadas a la presa y únicamente se cuenta con una perforación realizada.

A pesar de las consideraciones expresadas, los resultados alcanzados son consistentes con la información preliminar de la etapa de anteproyecto, ya que permiten identificar variaciones en el comportamiento geomecánico del macizo rocoso y, además, constituyen un aporte a la investigación acerca de las incertidumbres geotécnicas que influyen el comportamiento del terreno al asentarse las obras que conforman la presa.

9. BIBLIOGRAFÍA

Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. South African Institution of Civil Engineers, 15 (2): 335-344.

Cano, E.N., Meissl, A., Hidalgo, N., Caroprese, M.E., Vargas, G. y Romero M.E., 2017. Determinación de abrasión por el método de Máquina “Los Ángeles” y reactividad alcalina potencial en áridos, zona de La Invernada, Provincia del Neuquén. Instituto de Investigaciones Mineras, Universidad Nacional de San Juan (inédito), 16 pp.

Cartaya Pire, M., 2006. Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental de país (resumen de Tesis Doctoral). Revista Minería y Geología, 22 (3): 1-54.

Casadío, S.A y Montagna, A.O., 2015. Estratigrafía de la Cuenca Neuquina. En: J.J. Ponce, A.O. Montagna y N. Carmona (Eds.), Geología de la Cuenca Neuquina y sus sistemas petroleros: una mirada integradora de los afloramientos al subsuelo. Fundación YPF, Universidad Nacional de Río Negro, pp. 8-21.

Deere, D.U., 1963. Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes. Felsmechanik und Ingenieurgeologie (Rock Mechanics and Engineering Geology), 1 (1): 16-22.

Emhidro SEP, 2017. Informe La Invernada. Aprovechamientos Multipropósito en la cuenca media del río Neuquén. Programa de Estudios en el Sector Energético de la República Argentina (PESE).

Garrido, A.C., 2014. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales. Nueva Serie, 12 (2): 121-177.

Giaconi, L.M., Calvetty Amboni, B. y Giaconi, M.N., 2014. Aspectos geológicos y geotécnicos preliminares de la fundación de la presa arroyo Blanco, Tandil. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, 32: 31-52.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Otteo, C., 2002. Ingeniería Geológica. Madrid, España. Primera edición. Pearson Education.

Groeber, P., 1929. Líneas fundamentales de la geología del Neuquén, sur de Mendoza y regiones adyacentes. Dirección General de Minería, Geología e Hidrología. Publicación 58: 1-109. Buenos Aires.

Groeber, P., 1946. Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70°. 1. Hoja Chos Malal. Revista de la Sociedad Geológica Argentina, 1 (3): 177-208.

Groeber, P., Stipanovic, P.N. y Mingramm, A.R., 1953. Jurásico. Geografía de la República Argentina, 2 (1): 143-347.

Gulisano, C.A., 1988. Análisis estratigráfico y sedimentológico de la Formación Tordillo en el oeste de la provincia del Neuquén, Cuenca Neuquina, Argentina. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (inédito), 119 p.

Lebinson, F., Turienzo, M., Sánchez, N., Araujo, V., D'Annunzio, M.C. y Dimieri, L., 2018. The structure of the northern Agrio fold and thrust belt (37° 30'S), Neuquén Basin, Argentina. *Andean geology*, 45 (2): 249-273.

Maretto, H., Carbone, O., Gazzera, C. y Schiuma, M., 2002. Los reservorios de la Formación Tordillo. En: M. Schiuma, G. Hinterwimmer y G. Vergani (Eds.), *Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas Argentinas. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*, 335-358. Mar del Plata.

Olalla, C. y Sopena, L., 1991. Ensayos de campo. Monografía nº 5. Master en Ingeniería Geológica. Universidad Complutense de Madrid.

Palmstrom, A. 2005. Measurements of and correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20: 362-377.

Priest, S. D. & Hudson, J.A., 1981. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18 (3): 183–197.

Sánchez, N., Turienzo, M., Dimieri, L., Lebinson, F. y Araujo, V., 2014. Evolución de las estructuras andinas en la faja corrida y plegada de Chos Malal: interacción entre el basamento y la cubierta sedimentaria de la Cuenca Neuquina. *Revista la Asociación Geológica Argentina*, 71 (2): 233-246.

Spalletti, L.A., Arregui, C.D y Veiga, G.D., 2011. La Formación Tordillo y equivalentes (Jurásico tardío) en la Cuenca Neuquina. En: H.A. Leanza, , C.D. Arregui, O. Carbone, J.C. Danieli y J.M. Vallés (Eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. XVIII Congreso Geológico Argentino*, 99-111. Neuquén.

Turienzo, M., Sánchez, N., Lebinson, F. y Dimieri, L., 2018. The Structure of the Southern Central Andes (Chos Malal Fold and Thrust Belt). En: A. Folguera *et al.* (Eds.), *The Evolution of the Chilean-Argentinean Andes. Springer Earth System Sciences*, pp. 411–441.


Valicenti, J.L., Blasco, E.M.G., Larreguy A.M. y Arias C.G., 1994. Aprovechamientos hidráulicos en la zona norte de la Provincia del Neuquén. Consejo Federal de Inversiones. Publicación 3: 1-119. Neuquén.

Valicenti, J.L., Blasco, E.M.G., Larreguy A.M. y Arias C.G., 1995. Aprovechamientos hidráulicos en la zona norte de la Provincia del Neuquén. Inventario de su potencial hidroeléctrico. Consejo Federal de Inversiones (inédito), 138 pp.

Zavala, C., Martínez Lampe, J.M., Fernández, M., Di Meglio, M. y Arcuri, M., 2008a. El diacronismo entre las Formaciones Tordillo y Quebrada del Sapo (Kimeridgiano) en el sector sur de la cuenca neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63 (4): 754-765.

10. ANEXOS

Anexo 1. Base de datos con información de los registros de perforación.


SD - 01		BASE DE DATOS												
		Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas			Aprovechamiento Multipropósito La Invernada									
		Alumna: Alvarez Fanessi Micaela												
COORDENADAS							DATOS DEL SONDAJE			TIPO DE PERFORACIÓN				
X:	2369903,33			COTA (msnm):	1001,7		INCLINACIÓN: 0°							
Y:	5863812,14			PROFUNDIDAD FINAL (m):	950,7		TIPO BROCA: DIAMANTINA							
Latitud:	S 37° 21' 57,9"			NIVEL DEL AGUA (m):	870		DIAMETRO: NQ							
Longitud:	O 70° 28' 06"													

Intervalo de Profundidad		Características de las discontinuidades											Ensayo de permeabilidad
Desde (m)	Hasta (m)	Litología	Alteración	Consistencia	RQD (%)	Recuperación (%)	Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Abertura	Fracturamiento	Unidad Lugeon
0	33	Arenas y gravas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	34,4	Areniscas rojizas medianas a finas	4	4	0	43	2	4	3-5	1-2	A	4	
34,4	37		4	4	8	31	2	4	2-3	1	A	4	
37	37,3		4	4	0	100	2	4	3-5	1-2	A	4	
37,3	40,6		4	4	9	30	2	4	3-5	1-2	A	4	
40,6	41,8	Pelitas	4	4	0	25	2	4	2-3	1-2	A	4	
41,8	43,7		4	4	5	53	2	4	2-3	1-2	A-C	4	
43,7	45,1		4	4	43	79	2	4	3-5	1-2	A-C	4	
45,1	47		4-5	4	0	26	2	4	2-3	1-2	A	4	
47	48,8	Areniscas rojizas finas a pelitas	3	2-3	90	91	2	2-3	2-3	1	A	2-3	
48,8	49,3		4-5	4-5	0	91	2	3-4	2-3	1-2	A	5	
49,3	51		3	2-3	59	94	2	3-4	2-3	1	A	2-3	

Referencias:

ALTERACIÓN 1_NO ALTERADA 2_LEVEMENTE ALTERADA 3_MODERADAMENTE ALTERADA 4_MUY ALTERADA 5_COMPLETAMENTE ALTERADA 6_SUELO RESIDUAL	CONSISTENCIA 1_MUY CONSISTENTE 2_CONSISTENTE 3_POCO CONSISTENTE 4_DURA 5_BLANDA 6_MUY BLANDA 7_DISGREGADA	RQD (CALIDAD) 0-25 MUY MALA 26-50 MALA 51-75 REGULAR 79-90 BUENA 91-100 EXCELENTE	TIPO 1 ESTRATIFICACIÓN 2 DIACLASAMIENTO 3 FALLA 4 CONTACTO LITOLÓGICO
PARED 1_FRESCA 2_LEVE ALTERACIÓN 3_MODERADA ALTERACIÓN 4_ALTA ALTERACIÓN 5_COMPLETA ALTERACIÓN	RELLENO 1_LIMPIA 2_SUPERFICIE MANCHADA 3_NO COHESIVO 4_COHESIVO 5_YESO 6_CARONATO 7_OTROS	RUGOSIDAD 1_RUGOSA 2_LISA 3 ESTRÍAS DE FRICCIÓN	FRACTURAMIENTO 1_POCAS FRACTURAS (<1) 2_POCO FRACTURADO (1 a 5) 3_MEDIANAMENTE FRACTURADO 4_MUY FRACTURADO 5_EXTREMADAMENTE FRACT.
		ABERTURA A_ABIERTA C_CERRADA	

Tabla 30. Base de datos correspondiente al sondeo SD-01.

SD - 02		BASE DE DATOS							
		Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas		Aprovechamiento Multipropósito La Invernada					
		Alumna: Alvarez Fanessi Micaela							
COORDENADAS		X: 2369984,49		DATOS DEL SONDAJE		TIPO DE PERFORACIÓN			
Y: 5864070,05		COTA (msnm): 895		INCLINACIÓN: 0°		TIPO BROCA: DIAMANTINA			
Latitud: S 37° 21' 49,8"		PROFUNDIDAD FINAL (m): 815		DIAMETRO: NQ					
Longitud: O 70° 28' 03,5"		NIVEL DEL AGUA (m): 870							

Intervalo de Profundidad		Características de las discontinuidades										Ensayo de permeabilidad	
Desde (m)	Hasta (m)	Litología	Alteración	Consistencia	RQD (%)	Recuperación (%)	Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Abertura	Fracturamiento	Unidad Lugeon
0	22	Arenas gruesas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	24		4	4	76	100	2	4	2-3	1	A	4	-
24	27	Areniscas medianas a finas	4	4	63	100	2	4	2-3	1	A	4	0,98
27	29		4	4	46	92	2	4	2-3	1	A	4	
29	30	Pelitas grisáceas con pirita	4	4	20	100	2	4	2-3	1	A	4	
30	31,3	Areniscas silicificadas medianas con pelitas	4	4	23	100	2	4	2-3	1	A	4	
31,3	33,1		4	4	23	100	2	4	2-3	1	A	4	4,54
33,1	34	Pelitas grisáceas intercaladas con areniscas	4	4	0	94	2	4	2-3	1	A	4	
34	35,1		4	4	11	100	2	4	2-3	1	A	4	
35,1	35,9	Areniscas medianas	4	4	0	94	2	4	2-3	1	A	4	
35,9	36,6		4	4	21	100	2	4	2-4	1	A	4	
36,6	37,5	Pelitas verdes grisáceas	4	4	28	100	1-2	4	2-3	1	A	4	0,47
37,5	38,7		4	4	17	100	2	4	2-3	1	A	4	
38,7	40	Areniscas silicificadas medianas	4	4	18	100	2	4	2-4	1	A	4	
40	40,9		4	4	39	100	1-2	4-3	2-3	1	A	4	
40,9	41,7	Pelitas verdes grisáceas	4	4	19	100	2	4	2	1	A	4	
41,7	44,6		2-3	2-3	70	101	2	2-3	2	1	A	2-3	0,44
44,6	45	Transición entre nivel pelítico hacia areniscas rojas medianas a finas	2-3	2-3	90	100	2	2-3	2	1	A	2-3	
45	45,5		2-3	2-3	70	100	2	2-3	2	1	A	2-3	
45,5	47,3		3-4	3-4	29	103	2	3-4	2-3	1	A	3	4,64
47,3	50		3-4	3-4	69	98	2	3-4	2-3	1	A	3-4	
50	52,7	Areniscas rojas medianas a finas	4	3-4	4	100	1-2	3-4	2-3	1-2	A	4	0,92
52,7	54,1		4	4	25	96	1-2	3-4	2-3	1-2	A	4	
54,1	55,1	Areniscas medianas a finas con laminación de pelitas	4	4	20	100	1-2	3-4	2-3	1-2	A	4	
55,1	56,9		4	4	11	94	1-2	3-4	3	1-2	A	4	
56,9	58,6	Areniscas rojas mediana a fina con venillas de cuarzo y yeso, presencia de pelitas y areniscas gruesas	4	4	46	100	1-2	3-4	3-5	1-2	A	4	0,73
58,6	60		4	4	25	100	1-2	3-4	3-5	1-2	A	4	
60	61,7		3-4	4	18	59	1-2	3-4	3-5	2	A	4	
61,7	62,5		3-4	4	31	70	1-2	3-4	3-5	2	A	4	3,24
62,5	63,8		3-4	3-4	34	73	2	3-4	3	2	A	3-4	
63,8	65		3-4	3-4	0	50	2	3-4	3	2	A	4	
65	68		3	2-3	83	100	2	3	2-3	2	A	2-3	0,38
68	69,5	Areniscas rojas medianas a finas con venillas de cuarzo y diacclasas rellenas de CaCO ₃	3	2-3	60	100	2	3	2-3	2	A	2-4	
69,5	70		2-3	3	96	96	2	3	2-5	2	A	2	
70	71		3	2-3	90	100	2	3	2-3	2	A	2	
71	74		3	2-3	67	100	2	3	2-3	2	A	2-3	1,07
74	75,3		3	2-3	98	100	2	3	2-3	2	A	2	
75,3	77		3	2-3	59	94	2	3	2-3	2	A	2-3	
77	78		3	2-3	60	100	2	3	2-3	2	A	3	1,17
78	80		3	2-3	90	100	2	3	2-5	2	A	2-3	

Tabla 31. Base de datos correspondiente al sondeo SD-02.

Intervalo de Profundidad		Características de las discontinuidades											Ensayo de permeabilidad
Desde (m)	Hasta (m)	Litología	Alteración	Consistencia	RQD (%)	Recuperación (%)	Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Abertura	Fracturamiento	Unidad Lugeon
0	13,45	Depósitos aluviales											
13,45	14,85	Arenisca rojiza fina	3-4	3-4	57	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3	
14,85	15,83		3	3	41	93	2	3-4	2	1	A	3	9,52
15,83	16,33		3-4	4	40	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	6,46
16,33	17,18		3-4	3-4	0	94	2	3-4	2-3	1-2	A	4	5,04
17,18	18,35		3-4	3-4	26	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	3,78
18,35	19,55		3-4	3-4	21	88	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	9,35
19,55	20		3-4	3-4	0	100	2	3-4	2	1	A	3-4	11,02
20	21,6	Pelitas rojizas	3-4	3-4	50	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	8,07
21,6	23,05		3-4	3-4	10	99	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	6,18
23,05	24,65		3-4	3-4	38	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	5,27
1,45	24,65	Pelitas grisáceas con pirla y arcillas	3-4	3-4	29	100	2	3-4	2	1	A	3-4	14,99
24,65	25		3-4	3-4	38	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	4,66
25	26,4		3-4	3-4	38	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	3,18
26,4	27,5		3-4	3-4	55	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	2,61
27,5	29,1		3-4	3-4	75	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	1,87
29,1	30		3-4	3	34	100	2	3-4	2-5	1	A	3-4	5,27
30	31,4		3	3	93	100	2	3	2	1	A	2-3	0,37
31,4	32,4		3	3	90	100	2	3	2	1	A	2-3	0,62
32,4	33,5	3	3	73	100	2	3	2	1	A	2-3	0,68	
33,5	35	Arenisca mediana silicificada con filossilicatos y pirla	3	3	73	100	2	3	2	1	A	2-3	0,1
35	36,6		3	3	87	100	2	3	2	1	A	2-3	1,1
36,6	38,2		3-4	3-4	41	100	2	3-4	2	1-2	A	3-4	34,31
38,2	38,56		3-4	3-4	42	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	
38,56	40		3-4	3-4	69	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	
			3-4	3-4	69	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	

Tabla 32. Base de datos correspondiente al sondeo SD-03.

Intervalo de Profundidad		Características de las discontinuidades										Ensayo de permeabilidad	
Desde (m)	Hasta (m)	Litología	Alteración	Consistencia	RQD (%)	Recuperación (%)	Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Abertura	Fracturamiento	Unidad Lugeon
0	2,9	Arenas gruesas											
2,9	3,4	Arenisca amarilla silicificada	3	3	40	100	1-4	3-4	2-3	1	A	3	12,27
3,4	4,3		3	3	22	100	2	3-4	2-3	1	A	3-4	
4,3	5,3	Pelitas grisáceas	4	4	0	68	2	3-4	2-3	1	A	4	9,29
5,3	6,4		4	4	0	64	2	3-4	3	1	A	4	
6,4	7	Areniscas medianas	4	4	0	100	2	4	2-3	1	A	4	12
7	7,6		4	4	0	100	2	3-4	2-3	1	A	4	
7,6	8,4	Pelitas grisáceas con areniscas	4	4	0	87	2	3-4	2-3	1	A	4	4,51
8,4	9		4-5	4-5	0	100	2	3-4	2-3	1-2	A	5	
9	10	Pelitas grisáceas	4-5	4-5	0	90	2	3-4	2-3	1-2	A	5	3,66
10	11,2		4-5	4-5	0	87	2	3-4	2-3	1-2	A	5	
11,2	13,1	Areniscas medianas color marón con arcillas	3	3	95	100	2	3	2	1	A	3	4,39
13,1	15,1		3	3	45	90	2	3	2	1	A	3-4	
15,1	16,4	Arenisca rojiza mediana	4	4	28	96	2	3-4	2-3	1	A	4	1,78
16,4	17,3	Pelitas grisáceas con arcillas	4	4	21	95	2	3-4	2-3	1	A	4	1,88
17,3	18		4	4	15	100	2	3-4	2-3	1	A	4	
18	20,1	Areniscas medianas	3-4	3-4	38	99	2-4	2-3	2-3	1-2	A	4	1,74
20,1	20,7		3	3	83	100	2	2-3	2	1	A	3	
20,7	22,1	Areniscas rojizas medianas a finas	3-4	3-4	43	100	2	3-4	2-3	1	A	3-4	1,98
22,1	24,3		3-4	3-4	23	64	2	3-4	2-3	1	A	3	
24,3	25,1	Pelitas grisáceas	3-4	3-4	13	87	2	3-4	2-3	1	A	3	1,73
25,1	26,5		3	3	64	100	2	3-4	2-3	1	A	3	
26,5	28,1	Areniscas rojizas medianas a finas	3-4	3-4	62	94	2	3-4	2-3	1	A	3	1,33
28,1	29,3		4	4	16	98	2	3-4	3	1	A	4	
29,3	30,8	Pelitas grisáceas con venillas de yeso y cuarzo	4	3-4	7	95	2	3-4	3	1	A	4	1,48
30,8	31,7		3	3-4	35	100	2	3-4	2-3	1	A	3-4	
31,7	32,1	Areniscas rojizas medianas a finas	4	4	0	100	2	3-4	3-6	1-2	A-C	4	2,2
32,1	35,1		3	3	67	83	2	3	3-6	1	A-C	3	
35,1	37,8	Transición de areniscas finas a fangolitas rojizas	3	3	70	78	2	3	2-3	1-2	A	3	1,76
37,8	39,7		4	4	32	100	2	3-4	2-3	1	A	4	
39,7	40		3	3	88	100	2	3	2-3	1-2	A	3	1,65

Tabla 33. Base de datos correspondiente al sondeo SD-04.


SD - 05		BASE DE DATOS		Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas		Aprovechamiento Multipropósito La Invernada								
		Alumna: Alvarez Fanessi Micaela												
COORDENADAS				DATOS DEL SONDAJE				TIPO DE PERFORACIÓN						
X:	2370418,67			COTA (msnm):	877			INCLINACIÓN:	0°					
Y:	5864102,24			PROFUNDIDAD FINAL (m):	832			TIPO BROCA:	DIAMANTINA					
Latitud:	S 37° 21' 48,6"			NIVEL DEL AGUA (m):	868			DIAMETRO:	NQ					
Longitud:	O 70° 27' 45,8"													
Intervalo de Profundidad		Litología	Alteración	Consistencia	RQD (%)	Recuperación (%)	Características de las discontinuidades					Ensayo de permeabilidad		
Desde (m)	Hasta (m)						Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Abertura		Fracturamiento	Unidad Lugeon
0	1,4	Pelitas rojizas con laminación paralela y presencia de venillas de CaCO ₃ y diaclasas > a 30°	3	3	79	100	2	3	2-3	1-2	A	3		
1,4	2		3	3	87	87	2	3	2-3	1	A	3		
2	2,9		3	3	89	100	2	3	2-3	1	A	3		
2,9	3,9		4-3	4-3	50	60	2	4	2-3	1-2	A	4-3		
3,9	5,4		4-3	4-3	87	100	2	4-3	2-3	1	A	3		
5,4	7		4-3	4-3	84	88	2	4-3	2-3	1	A	3		
7	8,3		4-3	4-3	79	94	2	4-3	2-3	1	A	3		
8,3	9,9		4-3	4-3	89	96	2	4-3	2-3	1	A	3		
9,9	11,5		4-3	4-3	83	89	2	4-3	2-3	1	A	3		3,67
11,5	13,1		4-3	4-3	87	89	2	4-3	2-3	1	A	3		2,68
13,1	14,6		4-3	4-3	75	100	2	4-3	2-3	1-2	A	3		2,15
14,6	16		4-3	4-3	79	100	2	4-3	2-3	1	A	3		1,94
16	17,5		4-3	4-3	58	78	2	4-3	2-3	1	A	4-3		3,76
17,5	19,1		4-3	4-3	75	94	2	4-3	2-3	1-2	A	4-3		2,62
19,1	20,3		4-3	4-3	75	83	2	4-3	2-3	1-2	A	4-3		2,19
20,3	21,9		4-3	4-3	75	100	2	4-3	2-3	1-2	A	4-3		1,76
21,9	23		4-3	4-3	45	91	2	4-3	2	1	A	4-3		1,45
23	23,5		4-3	4-3	80	100	2	4-3	2	1	A	3		3,19
23,5	25		4-3	4-3	53	73	2	4-3	2	1	A	4-3		2
25	26,6		4-3	4-3	6	69	2	4-3	2-3	1-2	A	4-3		0,87
26,6	27		4	4	0	100	2	4	2-3	1-2	A	4		2,15
27	28,6		4-3	4-3	58	97	2	4-3	2	1-2	A	4		0,42
28,6	30		4-3	4-3	79	100	2	4-3	2-3	1-2	A	4-3		1,33
30	31,3	4-3	4-3	58	100	2	4-3	2-3	1-2	A	4-3	1,81		
31,3	32,9	4-3	4-3	59	88	2	4-3	2-3	1-2	A	4-3	0,48		
32,9	33,4	4	4	0	80	2	4	2-3	1-2	A	4	3,07		
33,4	34,2	4-3	4-3	62	87	2	4-3	2-3	1-2	A	4-3	2,9		
34,2	35	4-3	4-3	0	100	2	4-3	2-3	1-2	A	4-3	5,33		
35	35,5	4-3	4-3	80	100	2	4-3	2-5	2	A	3	2,9		
35,5	37	4-3	4-3	83	100	2	4-3	2-3-5	1-2	A	3	2,9		
37	37,9	4-3	4-3	91	100	2	4-3	2-3-5	1-2	A	4-3	0,9		
37,9	39,4	4-3	4-3	79	99	2	4-3	2-3	1-2	A	4-3	1,87		
39,4	40	4-3	4-3	67	100	2	4-3	2	1	A	4-3	0,73		
40	40,9	4-3	4-3	44	100	2	4-3	2-3	1-2	A	4-3	1,44		
40,9	42,3	Pelitas verdes grisáceas poco consolidadas con diaclasas subverticales	4-3	4-3	25	100	2	4-3	2-3	2	A	4	2,46	
42,3	43,5		4-3	4-3	37	100	2	4-3	2-3	2	A	4	1,52	
43,5	45		4-3	4-3	73	100	2	4-3	2-3	2	A	4	6,6	
													1,52	
													2,76	
													10,6	

Tabla 34. Base de datos correspondiente al sondeo SD-05.


SD - 06		BASE DE DATOS		Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas		Aprovechamiento Multipropósito La Invernada							
		Alumna: Alvarez Fanessi Micaela											
COORDENADAS		X: 2369816,89		DATOS DEL SONDAJE		COTA (msnm): 999,27		TIPO DE PERFORACIÓN					
Y: 5863831,95				COTA (msnm): 999,27				INCLINACIÓN: 0°					
Latitud: S 37° 21' 57,6"				PROFUNDIDAD FINAL (m): 903,8				TIPO BROCA: DIAMANTINA					
Longitud: O 70° 28' 10,4"				NIVEL DEL AGUA (m): 870				DIAMETRO: NQ					
Intervalo de Profundidad		Características de las discontinuidades										Ensayo de permeabilidad	
Desde (m)	Hasta (m)	Litología	Alteración	Consistencia	RQD (%)	Recuperación (%)	Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Abertura	Fracturamiento	Unidad Lugeon
0	7,6	Roca meteorizada y alterada											
7,6	8	Areniscas rojizas finas con diaclasas cerradas rellenas de CaCO ₃	3-4	3-4	0	100	2	3-4	3-5	1	A	3	
8	8,8		3-4	3-4	13	45	2	3-4	2-5	1	A	3-4	
8,8	10		4	4	0	50	2	4	2-3	1	A-C	4	
10	11		4	4	14	70	2	4	2-5	1-2	A-C	4	
11	12,4		3-4	3	33	65	2	3-4	2-3	1	A	3-4	34,32
12,4	13,9		3-4	3-4	15	86	2	4	2-5	1	A-C	3-4	
13,9	14,9		3-4	3-4	0	80	2	3-4	2-3	1	A	3-4	
14,9	15,4		3-4	3-4	0	20	2	3-4	2-5	1-2	A	3-4	
15,4	16,9		3	3	60	100	2	3-4	2-5	1	A-C	3	
16,9	18		3	3	55	100	2	3-4	2-5	1	A-C	3	
18	18,7		3	3	26	90	2	3-4	2-5	1	A-C	3	
18,7	20		3	3	38	100	2	3-4	2-3	1	A	3-4	
20	22		3	3	60	90	2	3-4	2-5	1	A-C	3-4	13,3
22	23,7		3	3	71	94	2	3-4	2-5	1-2	A-C	3-4	6,48
23,7	25		3	3	77	100	2	3-4	2-5	1	A-C	3	3,84
25	26,2		4	4	0	33	2	4	3	1-2	A	4	6,07
26,2	27,4		4	4	0	33	2	3	3	1-2	A	4	8,56
27,4	28,2		3	3	75	100	2	3	2-5	1-2	A	3	8,88
28,2	29	3-4	3-4	38	100	2	3-4	2-5	1-2	A-C	3-4	9,14	
29	29,5	3-4	3-4	20	100	2	3-4	2-5	1	A-C	3-4	6,44	
29,5	31	3-4	3-4	80	100	2	3-4	2-5	1	A-C	3-4		
31	32	4	4	0	80	2	4	3	1-2	A	4		
32	32,7	3-4	3	86	100	2	3-4	2-3	1	A	3		
32,7	34	3-4	4	19	73	2	3-4	2-3	1	A	3-4		
34	34,5	3-4	4	0	80	2	3-4	2-3	1	A	4		
34,5	35	3-4	3	80	100	2	3-4	2-5	1	A-C	3		
35	36	3-4	3-4	20	70	2	3-4	2-5	1	A-C	3-4		
36	37	3-4	3-4	0	75	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4		
37	39,6	3-4	3-4	19	62	2	3-4	2-5	1-2	A-C	4		
39,6	40,6	3-4	3-4	35	90	2	3-4	2-3	1	A	3-4		
40,6	41,5	3-4	3	83	100	2	3-4	2-5	1	A-C	3		
41,5	42,5	3-4	3	49	100	2	3-4	2-5	1-2	A-C	3		
42,5	44	3-4	3-4	48	97	2	4	2-5	1-2	A-C	3-4		
44	45	3-4	3	100	100	2	3	2-3	1-2	A	3		
45	45,3	3-4	3-4	0	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4		
45,3	46,9	3-4	3-4	62	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3		
46,9	48,4	3-4	3-4	27	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4		
48,4	50	3-4	3-4	34	97	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4		
50	51,7	3-4	3	79	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3		
51,7	53,3	3-4	3	79	100	2	3-4	2-3	1	A	3		
53,3	54,9	3-4	3-4	6	72	2	4	3-5	1-2	A-C	3-4		
54,9	55,9	3-4	3	82	100	2	3	2	1	A	3		
55,9	57,5	3-4	3	72	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3		
57,5	59,1	3-4	3	69	100	2	3-4	2-5	1	A-C	3-4		
59,1	60,7	3-4	3-4	19	100	2	3-4	2-5	1	A-C	3-4		
60,7	62,3	3-4	3-4	47	100	2	3-4	2-5	1	A-C	3-4		
62,3	63,6	3-4	3-4	32	100	2	3-4	2-5	1	A-C	3-4		
63,6	65,2	3-4	3	81	100	2	3-4	2-5	1	A	3		
65,2	65,7	3-4	3-4	0	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4		
65,7	67,3	3-4	3-4	69	100	2-4	3-4	2-3	1-2	A	3-4		
67,3	68,8	3	3	87	100	2	3-4	2	1-2	A	3		
68,8	70,4	3	3	72	100	2	3-4	2	1	A	3		
70,4	71	3-4	4	0	83	2	3-4	2-3	1-2	A	4		
71	72,5	3-4	3-4	70	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4		
72,5	74,1	3-4	3-4	53	94	2	3-4	2-3	1	A	3-4		
74,1	75,6	3-4	3-4	62	100	2	3-4	2-3	1	A	3-4		
75,6	77,2	3-4	3-4	56	100	2	3-4	2-3	1	A	3-4		
77,2	78,5	3-4	3-4	40	96	2-4	3-4	2-3	1-2	A	3		
78,5	80,1	3-4	3	91	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3		
80,1	81,7	3-4	3	75	100	2-4	3-4	2-3	1-2	A	3		
81,7	83,3	Pelitas verdes grisáceas con diaclasas subhorizontales	3-4	3	97	97	2-4	3	2	1	A	3	
83,3	84,1	Areniscas amarillas mediana a fina con niveles pelíticos grisáceos	3-4	4	12	94	2	3-4	2-3	1-2	A	4	
84,1	85,7		3-4	3-4	87	100	2	3	2-5	1	A	3-4	
85,7	86,6		3-4	3-4	78	100	2	3-4	2	1	A	3-4	
86,6	88,2		3-4	3-4	44	100	2	4-5	2-3	1-2	A	3-4	
88,2	89,7		4	4	27	100	2	3-4	2-3	1	A	4	
89,7	91,1		4	4	14	93	2	3-4	2-3	1-2	A	2	2,43
91,1	92,6		3-4	3-4	57	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	4,41
92,6	93,8		3-4	3-4	50	96	2	3-4	3-5	1-2	A	3-4	5,72
93,8	95,4		3-4	3-4	50	100	2	3	2	1	A	3-4	1,93

Tabla 35. Base de datos correspondiente al sondeo SD-06.


SD - 07		BASE DE DATOS				Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas		Aprovechamiento Multipropósito La Invernada						
		Alumna: Alvarez Fanessi Micaela												
COORDENADAS		X: 2369879,31		DATOS DEL SONDAJE		COTA (msnm): 918,89		TIPO DE PERFORACIÓN		INCLINACIÓN: 0°				
Y: 5864066,43				PROFUNDIDAD FINAL (m): 878,89				TIPO BROCA: DIAMANTINA						
Latitud: S 37° 21' 49,9"				NIVEL DEL AGUA (m): 870				DIAMETRO: NQ						
Longitud: O 70° 28' 07,8"														
Intervalo de Profundidad		Características de las discontinuidades										Ensayo de permeabilidad		
Desde (m)	Hasta (m)	Litología	Alteración	Consistencia	RQD (%)	Recuperación (%)	Tipo de fractura	Pared	Relleno	Rugosidad	Abertura	Fracturamiento	Unidad Lugeon	
0	7,65	Depósitos aluviales												
7,65	9,05	Areniscas rojizas finas con arcillas	3-4	4	14	97	2	3-4	2-3	1-2	A	4	Tramo no ensayado	
9,05	10,4		3-4	4	7	87	2	3-4	2-3	1-2	A	4		
10,4	10,6		3-4	3	0	75	2	3-4	2-3	1-2	A	4		
10,6	11,45		3-4	4	39	59	2	3-4	2-3	1-2	A	4		
11,45	13,05		3-4	4	25	100	2	3-4	2-3	1-2	A	4		
13,05	13,63		3-4	4	0	0	2	3-4	2-3	1-2	A	4		
13,63	14,53		3-4	4	0	60	2	3-4	2-3	1-2	A	4		35,09
14,53	15,73		3-4	4	0	62	2	3-4	2-3	1-2	A	4		21,43
15,73	16,38		3-4	4	15	100	2	3-4	2-3	2	A	4		31,91
16,38	17,45		3-4	4	0	28	2	3-4	2-3	1-2	A	4		
17,45	19	3-4	3-4	74	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	29,11		
19	20,6	Pelitas rojizas	3-4	3-4	81	100	2	3-4	2-3-5	1-2	A	3	18,4	
20,6	21,35	Pelitas verdes grisáceas con arcillas	3-4	3-4	20	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	27,23	
21,35	22,2		3-4	3-4	24	88	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4		
22,2	23,75		3	3	93	100	2	3	2	1	A	2	28,18	
23,75	25,35		3-4	3-4	38	100	2	3-4	2-3-5	1-2	A	3-4	23,75	
25,35	26,95	3-4	3-4	34	97	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	26,36		
26,95	28,55	Areniscas color marrón medianas a finas con filosilicatos	3	3	100	100	2	3	2	1	A	2	2,57	
28,55	30,15		3-4	3-4	78	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3	3,88	
30,15	31,8		3	3	100	100	2	3	2-3	1-2	A	2	3,11	
31,8	33,38		3-4	3-4	43	85	2	3-4	2-3	1-2	A	3	3,49	
33,38	34,78		3-4	3-4	29	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	Tramo no ensayado	
34,78	36,23		3-4	3-4	92	100	2	3	2-3	1-2	A	3-4		
36,23	37,26		Areniscas color marrón medianas a finas con pirita	3	3	97	100	2	3-4	2-3	1-2	A	3	7,57
37,26	37,91			3-4	3-4	31	83	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	6,88
37,91	38,76	Areniscas color marrón medianas a finas con arcillas y brechas de CaCO ₃	3-4	3-4	66	82	2	3-4	2-3	1-2	A	3-4	6,07	
38,76	40		3-4	3-4	0	40	2	3-4	2-3	1-2	A	4		

Tabla 36. Base de datos correspondiente al sondeo SD-07.

Anexo 2. Planillas geotécnicas con mediciones realizadas en las estaciones geomecánicas.


PLANILLA GEOTÉCNICA													
		PROYECTO: Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas "Caracterización geológica y geotécnica de macizo rocoso en el sitio de emplazamiento del proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada, Chos Malal, Provincia del Neuquén"								Chos Malal, Provincia del Neuquén, 2023			
		GEÓLOGO: Alvarez Fanessi Micaela				COORDENADAS: 37° 21' 56,8" S ; 70° 28' 11" O							
SECTOR DESCRIPTO: Estación geomecánica 1 (EG-1)													
CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS GENERALES													
Litología: Areniscas finas rojizas.													
Alteración: Ligeramente meteorizadas. Desarrollo de decoloración superficial de la matriz rocosa.										Observaciones:			
CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS													
Resistencia a la compresión simple:		R ₀	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆					
Número de juntas por longitud analizada:		n° J ₁	L ₁ (m)	n° J ₂	L ₂ (m)	n° J ₃	L ₃	n° J ₄	L ₄	n° J ₅	L ₅	n° J ₆	L ₆
		27	8	8	5								
Agua freática:		Seco	X	Lig. Húmedo		Húmedo		Goteando		Agua fluyendo			
CARACTERÍSTICAS DE LAS DISCONTINUIDADES										RCS de la matriz rocosa			
Tipo	Familia	Azmut	Inclinación	Espaciamiento	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Indices de campo para la identificación en campo de la resistencia a la compresión simple (ISRM, 1981):			
Diaclasas	J1	110°	15°	0,60 m	0,40 m	> 5 mm	Ligera	No	No	R ₀	Se puede marcar con la uña		
Diaclasas	J2	205°	80°	0,2 m	0,30 m	1-5 mm	Ligera	No	Moderada	R ₁	Al golpear con la punta del martillo la roca se desmenuza. Con navaja se talla fácilmente.		
										R ₂	Al golpear con la punta del martillo se producen ligeras marcas. Con la navaja se talla con dificultad.		
										R ₃	Con un golpe fuerte puede fracturarse. Con navaja puede tallarse.		
										R ₄	Se requiere más de un golpe de martillo para fracturarla.		
										R ₅	Se requieren muchos golpes de martillo para fracturarla.		
										R ₆	Al golpear con el martillo solo saltan esquirlas.		

Figura 31. Planilla geotécnica correspondiente a la estación geomecánica EG-1.


PLANILLA GEOTÉCNICA													
		PROYECTO: Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas "Caracterización geológica y geotécnica de macizo rocoso en el sitio de emplazamiento del proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada, Chos Malal, Provincia del Neuquén, 2023"								Chos Malal, Provincia del Neuquén, 2023			
		GEÓLOGO: Alvarez Fanessi Micaela				COORDENADAS: 37° 21' 55,5" S ; 70° 28' 12,5" O							
SECTOR DESCRIPTIVO: Estación geomecánica 2 (EG-2)													
CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS GENERALES													
Litología: Pelitas rojizas.													
Alteración: Ligeramente meteorizada. Presencia de pátinas de óxido.										Observaciones:			
CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS													
Resistencia a la compresión simple:		R ₀	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆					
Número de juntas por longitud analizada:		n° J ₁	L ₁ (m)	n° J ₂	L ₂ (m)	n° J ₃	L ₃ (m)	n° J ₄	L ₄	n° J ₅	L ₅	n° J ₆	L ₆
		15	3	10	3	5	1						
Agua freática:		Seco	X	Lig. Húmedo			Húmedo		Goteando		Agua fluyendo		
CARACTERÍSTICAS DE LAS DISCONTINUIDADES										RCS de la matriz rocosa			
Tipo	Familia	Azmut	Inclinación	Espaciamiento	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Indices de campo para la identificación en campo de la resistencia a la compresión simple (ISRM, 1981):			
Diaclasas	J1	330°	90°	0,2 m	1 m	< 0,1 mm	Ondulaciones	No	Ligera	R ₀	Se puede marcar con la uña		
Diaclasas	J2	190°	85°	0,2 m	1 m	< 1 mm	No	CaCO3	No	R ₁	Al golpear con la punta del martillo la roca se desmenuza. Con navaja se talla fácilmente.		
Diaclasas	J3	100°	5°	0,1 m	1 m	< 1 mm	Lisas	No	Moderada		Al golpear con la punta del martillo se producen ligeras marcas. Con la navaja se talla con dificultad.		
											Con un golpe fuerte puede fracturarse. Con navaja puede tallarse.		
											Se requiere más de un golpe de martillo para fracturarla.		
											Se requieren muchos golpes de martillo para fracturarla.		
											Al golpear con el martillo solo saltan esquirlas.		
										R ₆			

Figura 32. Planilla geotécnica correspondiente a la estación geomecánica EG-2.


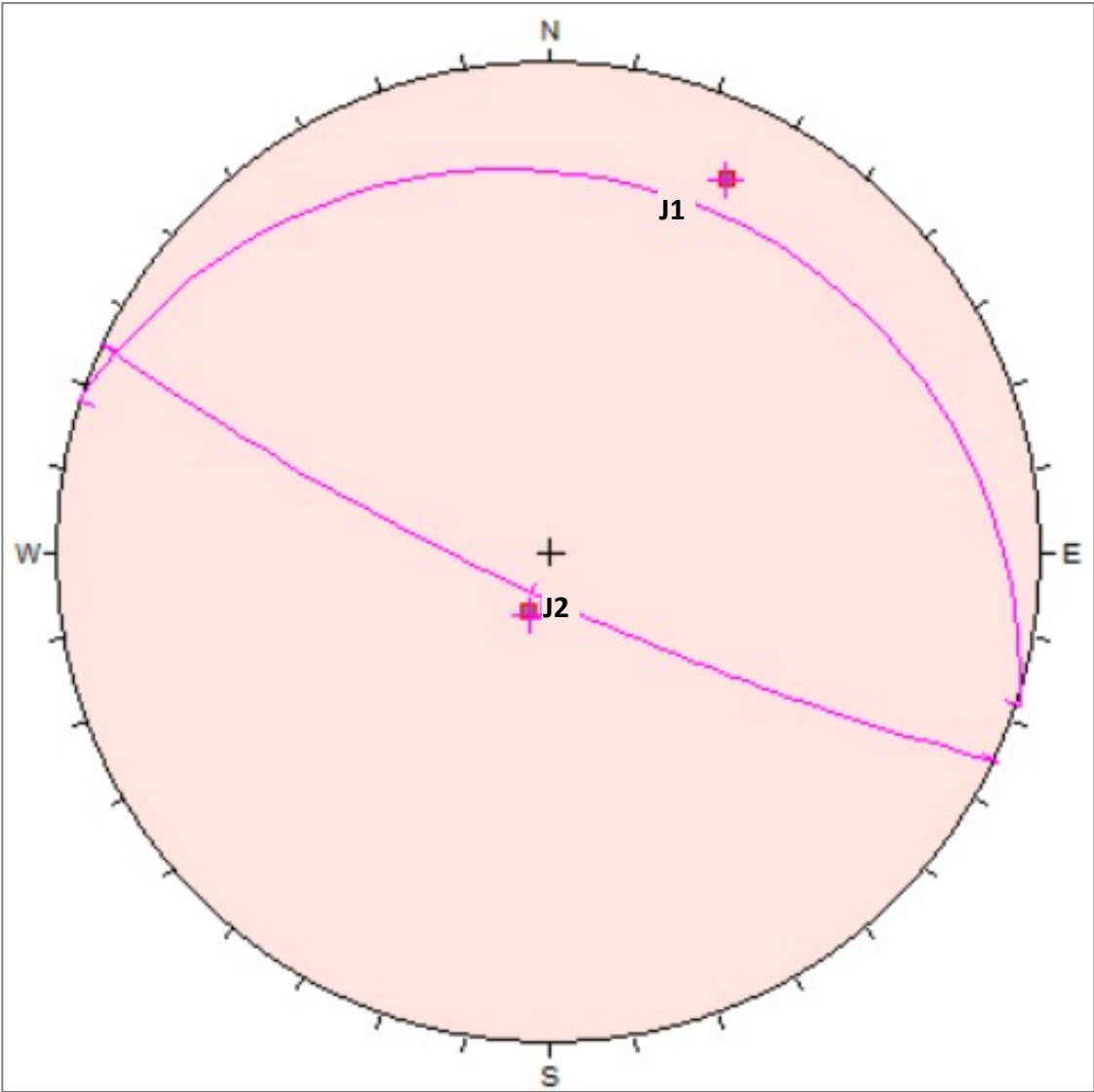
PLANILLA GEOTÉCNICA													
		PROYECTO: Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas "Caracterización geológica y geotécnica de macizo rocoso en el sitio de emplazamiento del proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada, Chos Malal, Provincia del Neuquén"								Chos Malal, Provincia del Neuquén, 2023			
		GEÓLOGO: Alvarez Fanessi Micaela				COORDENADAS: 37° 21' 48,3" S ; 70° 28' 12,6" O							
SECTOR DESCRIPTIVO: Estación geomecánica 3 (EG-3)													
CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS GENERALES													
Litología: Areniscas medianas amarillentas.													
Alteración: Ligera a moderadamente meteorizadas. Decoloración de la matriz rocosa.								Observaciones:					
CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS													
Resistencia a la compresión simple:		R ₀	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆					
Número de juntas por longitud analizada:		n° J ₁	L ₁ (m)	n° J ₂	L ₂	n° J ₃	L ₃	n° J ₄	L ₄	n° J ₅	L ₅	n° J ₆	L ₆
Agua freática:		Seco	X	Lig. Húmedo			Húmedo		Goteando		Agua fluyendo		
CARACTERÍSTICAS DE LAS DISCONTINUIDADES										RCS de la matriz rocosa			
Tipo	Familia	Azmut	Inclinación	Espaciamiento	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Indices de campo para la identificación en campo de la resistencia a la compresión simple (ISRM, 1981):			
Diaclasas	J1	220°	85°	2,5 m	1-3 m	> 5 mm	Ligera	No	Moderada	R ₀	Se puede marcar con la uña		
Diaclasas	J2	290°	90°	0,6-2 m	1-3 m	> 5 mm	Muy rugosas	No	Moderada	R ₁	Al golpear con la punta del martillo la roca se desmenuza. Con navaja se talla fácilmente.		
Diaclasas	J3	100°	5°	0,2-0,6 m	10-20 m	> 5 mm	Muy rugosas	No	Moderada				
										R ₂	Al golpear con la punta del martillo se producen ligeras marcas. Con la navaja se talla con dificultad.		
										R ₃	Con un golpe fuerte puede fracturarse. Con navaja puede tallarse.		
										R ₄	Se requiere más de un golpe de martillo para fracturarla.		
										R ₅	Se requieren muchos golpes de martillo para fracturarla.		
										R ₆	Al golpear con el martillo solo saltan esquirlas.		

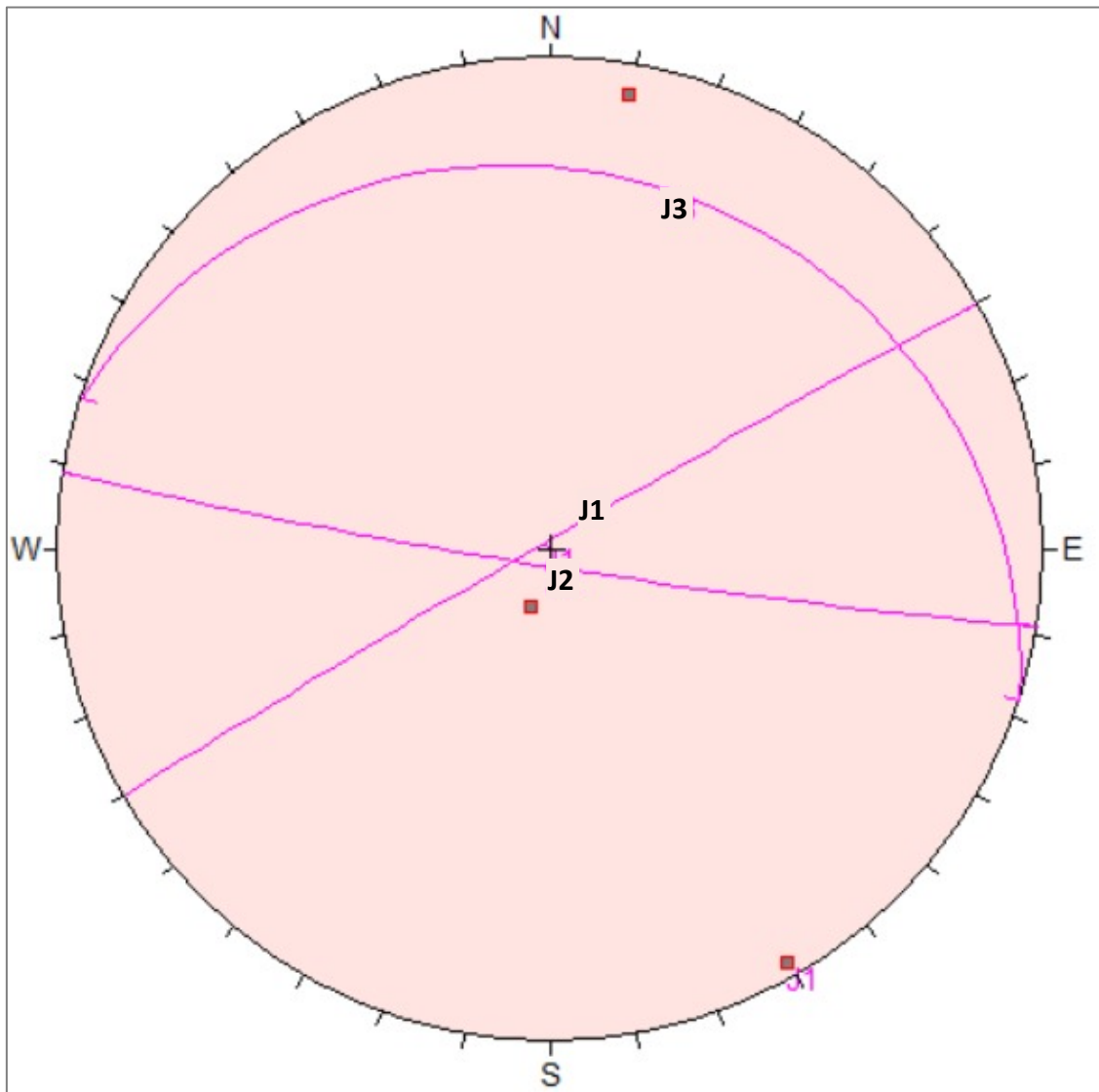
Figura 33. Planilla geotécnica correspondiente a la estación geomecánica EG-3.

Anexo 3. Diagramas estereográficos de las discontinuidades relevadas en cada una de las tres estaciones geomecánicas establecidas.

- EG-1



- EG-2



- EG-3

