



Universidad Nacional de San Juan
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Departamento de Geología
Licenciatura en Ciencias Geológicas

*“CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA, GEOTÉCNICA Y
EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DEL MACIZO
ROCOSO EN LA ZONA DEL PORTAL ZONDA DEL
TÚNEL DE ZONDA, PRECORDILLERA ORIENTAL,
SAN JUAN”*

Trabajo Final de Licenciatura
Andrea Isabel Vernieri Herrera

Asesor: Lic. Juan P. Ceballos
Co-Asesor: Dr. Pablo Ormeño

**San Juan - Argentina
2024**

ÍNDICE

PREFACIO	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	7
Ubicación y Vías de Acceso	8
Objetivos	9
Metodología	9
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES	11
CAPÍTULO 3: GEOGRAFÍA	14
Orografía	14
Hidrografía	14
Clima	15
Suelo	15
Flora y Fauna	15
CAPÍTULO 4: MARCO GEOLÓGICO	17
Geología Regional	17
Estratigrafía	17
Neotectónica	20
Estructura	20
CAPÍTULO 5: MARCO CONCEPTUAL	21
Mecánica de rocas	21
Taludes	23
Clasificación Geomecánica	26
GSI	27
RMR de Bieniawski	29
SMR de Romana	33
Sostenimiento	35
CAPÍTULO 6: MAPEO GEOLÓGICO	40
Relevamiento Geológico	40
Relevamiento Geomecánico	56
CAPÍTULO 7: SONDEO GEOTÉCNICO	84
Perforación Diamantina	84
Logueo geotécnico	85
Mediciones de Desviación	93
Ensayos de laboratorio	95
CAPÍTULO 8: CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO	106
CAPÍTULO 9: SOSTENIMIENTO	109
CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES	116
ANEXO	118
BIBLIOGRAFÍA	123

PREFACIO

Este trabajo tiene como principal objetivo dar cumplimiento con el requisito necesario para la obtención del título de Licenciada en Ciencias Geológicas, que otorga la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, dependiente de la Universidad Nacional de San Juan.

La investigación y todo el análisis se realizó en uno de los portales del proyecto “Túnel de Zonda” a cargo de la empresa constructora ALYA, que tuvo sus comienzos en enero del año 2023, y fue a partir de la etapa inicial que se comenzó con las observaciones y labores de campo, que luego dieron forma y estructura a este trabajo final de licenciatura.

En el área se han llevado a cabo trabajos de investigación, la gran mayoría hace énfasis en la unidad deprimida definida como “Valle Ullum-Zonda”, con muchos estudios de suelo e hidrogeología, estudios geomorfológicos en los piedemontes de la Precordillera Oriental, e investigaciones en toda la región, que se orientan al análisis estructural y neotectónico.

El proyecto y la construcción de una obra civil que implica cortes en el terreno y excavaciones subterráneas requiere de un análisis geológico completo, y un exhaustivo estudio geotécnico destinado al control de la estabilidad de taludes, selección del método de excavación, diseño de los sostenimientos, entre otros factores.

Con este trabajo se pretende llevar a cabo dicho análisis, lograr un modelo geológico que defina las estructuras presentes, caracterizar la roca en función de la litología y de la condición del macizo, para poder vincular dichas condiciones geomecánicas con métodos de sostenimiento, preservar la obra y evitar el riesgo potencial para la circulación de vehículos sobre la ruta.

RESUMEN

El Túnel de Zonda forma parte del proyecto de obra “Conexión Ruta Provincial N°12 – Ruta Provincial N°38 a través de la Sierra del Marquesado”, entre los departamentos Rivadavia y Zonda de la provincia de San Juan.

Se trata de una obra civil, que conecta dos de los diecinueve departamentos de la provincia de San Juan por medio de una excavación subterránea de 1,14 km de longitud, desarrollada para conducir servicios para las zonas involucradas, principalmente la tubería troncal del Acueducto “Gran San Juan”.

La provincia de San Juan, ubicada en el centro-oeste de Argentina, posee la mayor evidencia de deformación de Argentina debido a la complejidad estructural que se generó entre los 28° y 33° de latitud Sur en la Cordillera de los Andes como resultado de la convergencia entre las placas Nazca y Sudamericana, originando un estilo tectónico de deformación complejo, que involucra un intenso fallamiento, corrimientos, retrocorrimientos y fajas plegadas y corridas en las provincias geológicas de Cordillera frontal, Precordillera y Sierras Pampeanas.

El portal Zonda del túnel se ubica en la ladera occidental de la Sierra de Marquesado, que forma parte de la provincia geológica Precordillera Oriental junto con una serie de cordones montañosos de rumbo general N-S, elevados por la falla regional Villicum-Zonda-Pedernal, de carácter regional y de tipo inversa con buzamiento hacia el este, se ubica en el piedemonte occidental, posee una longitud total de 145 km y, localmente, un rumbo N20°E.

El estudio geológico y geomecánico de los materiales que conforman el talud son indispensables para poder conocer los modelos o mecanismos de rotura, y los factores que pueden influir, condicionar y/o desencadenar situaciones de inestabilidad que signifiquen un riesgo y produzcan accidentes directos en las vías de acceso al túnel. Es por esto que se realizó un estudio exhaustivo en la zona de influencia del Portal de Zonda, que incluye la descripción y relevamiento geológico de superficie en todo el sector, con la caracterización geomecánica en afloramientos para poder determinar la calidad del macizo, estabilidad de los taludes y lograr propuestas de sostenimiento requerido según el tramo analizado.

ABSTRACT

The Zonda Tunnel belongs to the construction project “Conexión Ruta Provincial N°12 – Ruta Provincial N°38 through the Sierra de Marquesado” located in Rivadavia and Zonda.

It is a civil engineering road job connecting two out of the nineteen departments in the province of San Juan by a 1,14-kilometre-long underground excavation. The purposes of the project are both road-related and service-related, mainly to provide the areas involved with access to the mainline pipeline from the “Gran San Juan” aqueduct.

The province of San Juan, which is located in the middle-west region of Argentina, has the most overt evidence of deformation in the country given the structural complexity present between the latitudes of 28° S and 33° S originated as a result of the convergence between the Nazca Plate and the South American Plate, originating a complex tectonic style of deformation, which involves intense faulting, landslides, backthrusts and folded and thrust belts in the geological provinces of Frontal Cordillera, Precordillera and Sierras Pampeanas.

The tunnel portal is located on the western slope of “Sierra de Marquesado”, which belongs to the geologic province “Precordillera Oriental” together with another series of mountain ranges with North-South orientation in general. The 145 - kilometer long regional fault “Villicum-Zonda-Pedernal” running N20°E can be found in this occidental foothill.

The geological and geomechanical study of the materials forming the slope are essential to learn about the break mechanisms, and the factors which may affect, condition and/or lead to instability which might trigger hazards and cause direct accidents at the access areas of the tunnel. This is why thorough research has been carried out in areas surrounding the “Portal de Zonda”, including the description and geological survey of the surface, together with the geomechanical characterization of outcrops to determine the mass quality as well as the stability of the slopes, so as to develop support designs for each type of rock.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Este análisis geotécnico implica un relevamiento de estructuras que se correlacionan con las descritas en el logueo del pozo geotécnico de 100 m realizado sobre la traza del túnel, y se complementan con análisis en terreno, geomorfológicos, morfotectónicos y estructurales para generar un perfil y mapa, y discernir la influencia tectónica en el macizo rocoso, y asignar medidas de sostenimiento para las distintas condiciones definidas con criterios geotécnicos.

El valle de Ullum-Zonda es una depresión tectónica intermontana que forma parte del corredor tectónico Matagusanos-Maradona-Acequión (Perucca 1990), el cual evidencia una evolución geológica compleja, donde convergen dos fajas plegadas y corridas (FPC) de vergencia opuesta que definen una división tectónica-estructural de la provincia geológica Precordillera en, FPC de piel fina con vergencia oriental y FPC de piel gruesa con vergencia occidental (Precordillera Central y Precordillera Oriental respectivamente), que interactúan con antiguos lineamientos y estructuras que controlan y segmentan la deformación, siendo uno de ellos el lineamiento Salinas Grandes, de rumbo NE (Baldis *et al.* 1979).

La Precordillera Oriental está constituida por sierras elongadas en sentido norte-sur, con predominio de rocas carbonáticas, y una fuerte impronta tectónica. El portal oeste del Túnel de Zonda se sitúa en el piedemonte occidental de la Sierra de Marquesado, donde se destaca la falla regional Villicum-Zonda-Pedernal con una longitud total de 145 km y un rumbo local N20°E. Hacia el norte del río San Juan se denomina falla Loma de Las Tapias con buzamiento de 78° E, y hacia el sur, falla Sierra Chica con buzamiento entre 40° y 66° (ver Figura 1).

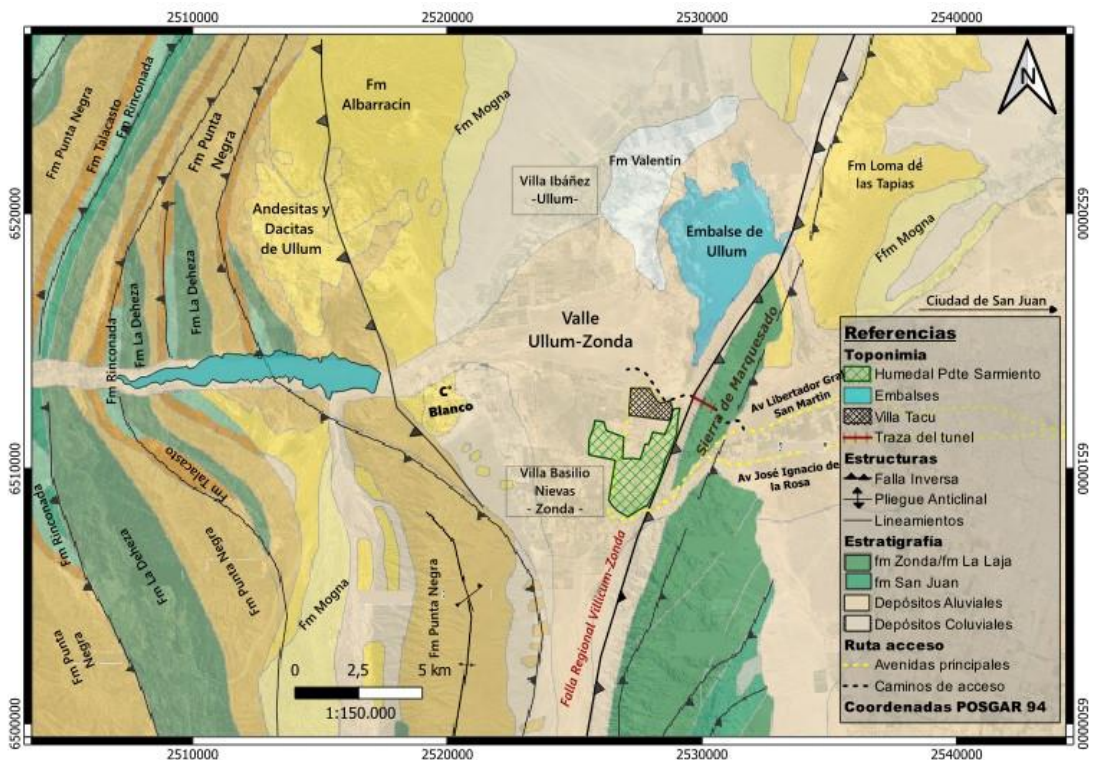


Figura 1. Mapa geológico regional. Muestra el entorno del sector de estudio, sus áreas de influencia y vínculo regional. Estratigrafía extraída de WMS del SEGEMAR (servicios web)

Ubicación y Vías de Acceso

El sector donde se llevaron a cabo las investigaciones se sitúa en el Departamento Zonda de la Provincia de San Juan, corresponde al portal del túnel situado en la margen occidental de la Sierra de Marquesado, parte del proyecto Túnel de Zonda, al cual se accede desde la ciudad de San Juan a través de la Ruta Provincial N°12, por la Avenida principal José Ignacio de la Roza o por Avenida Libertador General San Martín hacia el oeste. A una distancia aproximada de 25 km está el acceso, circulando por el camino que conduce a Zonda, localidad de Villa Tacú, se llega hacia el portal atravesando el camping "Dique Lateral", por el camino de acceso al Proyecto (Figura 2).

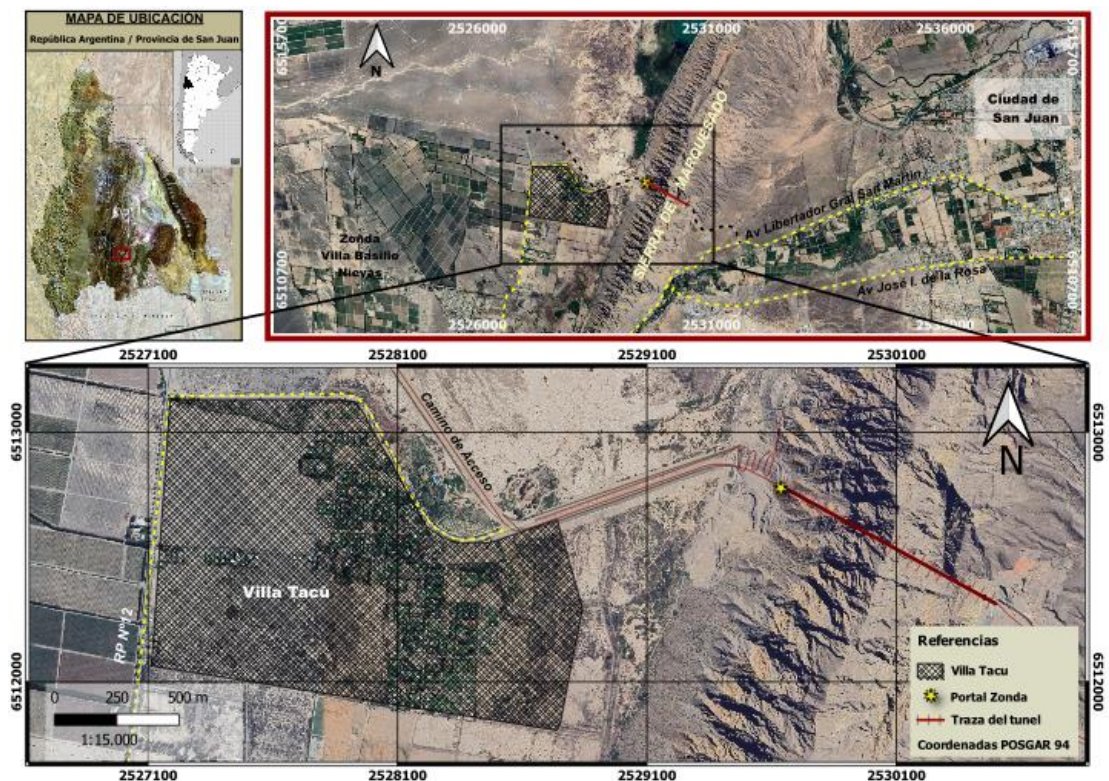


Figura 2. Imagen de ubicación del sector de estudio.

El Departamento Zonda tiene una población actual de 6.508 habitantes registrada en el Censo Nacional 2022. Evidenció un incremento súbito de su número de habitantes, pasando de 2.905 habitantes en el año 1991 a 4.038 en el año 2001, y alcanzando los 4.863 en el año 2010.

Es una zona con predominio de plantaciones de vides y frutales. Según datos obtenidos del primer Relevamiento Digital de Cultivos realizado por el Programa de Servicios Agrícolas Provinciales (PROSAP), al año 2015, el departamento Zonda posee 2.953 hectáreas cultivadas (2,09% del total de la superficie cultivada de la provincia).

Destaca en el sector, el humedal "Parque Presidente Sarmiento" con una extensión de 748 ha, el ecosistema de característica lagunar se forma partir de las aguas subterráneas y alberga una gran biodiversidad de flora y fauna, la cual queda totalmente supeditada a la variación del acuífero en la parte distal del abanico aluvial del río San Juan en el Valle de Ullum - Zonda.

Objetivos

El objetivo general es lograr una caracterización geológica, estructural y geomecánica del área, con la determinación de la estabilidad de taludes vinculados al acceso del túnel por el Portal Zonda mediante el método Slope Mass Rating (SMR), y sugerir el tipo de sostenimiento adecuado según las condiciones del macizo determinadas.

Específicamente:

- Integrar conocimientos adquiridos durante el cursado de la carrera, para lograr las tareas de campo y gabinete necesarias para el desarrollo de este trabajo de investigación.
- Estudiar y describir las unidades litológicas y estructuras en el área de estudio.
- Delimitar y caracterizar ventanas geomecánicas, haciendo uso de las herramientas geotécnicas para poder lograr una clasificación del macizo y caracterización de taludes ajustada por orientación de discontinuidades y método de excavación, y proponer medidas de sostenimiento en caso de ser necesario.
- Analizar de forma exhaustiva los datos del sondeo geotécnico para poder correlacionar con la información de superficie.
- Capacitarse en el uso del software libre DIPS para poder lograr un complemento gráfico en el estudio y análisis de los taludes involucrados.
- Generar mapa geológico.
- Generar perfiles geológicos
- Lograr un modelo que involucre las unidades mapeadas, las estructuras presentes, y la relación que existe con la traza del túnel.

Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se realizó un análisis geológico, estructural y geotécnico en el sector de estudio (portal oeste del túnel de Zonda). El relevamiento de superficie se correlacionó con información de subsuelo obtenida en el sondeo geotécnico realizado sobre la traza del túnel, para poder lograr una caracterización geotécnica del macizo rocoso y asignar las medidas de sostenimiento adecuadas según la calidad definida.

Las actividades en terreno consistieron en la observación y toma de datos en los diferentes sectores y estaciones geomecánicas elegidas.

Como parte de actividades de gabinete, el procesamiento y análisis de modelos digitales de elevación (DEM) se realizó con el software de licencia libre SAGA GIS, complementado con el ploteo de datos y confección de mapas con el software libre QGis 3.28.

Los trabajos se realizaron en las siguientes etapas:

I. Análisis Preliminar

En primer lugar, se procedió con la búsqueda y recopilación del material bibliográfico y cartografía sobre la geología general, estructuras, geomorfología, hidrología y clima del sector en estudio. También se consultó en tesis, publicaciones científicas, comunicaciones, informes, trabajos inéditos, presentaciones en reuniones científicas, entre otros.

En una segunda instancia se llevó a cabo el reconocimiento y observación en campo, de factores geológicos, topográficos, geomorfológicos, hidrológicos, climáticos.

II. Relevamiento Superficial

Mapeo geológico completo, siguiendo la secuencia propuesta por Ferrer y González de Vallejo 1999. Para esto se realizó un relevamiento de las estructuras presentes en los afloramientos de la zona, descripción litológica, y confección de mapa y perfiles. Se definieron ventanas geotécnicas, las cuales fueron relevadas siguiendo el método de caracterización geomecánica SMR propuesta por Romana 1997, complementando con el procesamiento y generación de red estereográfica del software Dips de Rocscience.

III. Sondeo Geotécnico

Perforación realizada con fines geotécnicos exploratorios, direccionada sobre la traza del túnel para clasificar el macizo en esos primeros metros del túnel a través de un registro completo de los testigos recuperados, tanto descriptivo como fotográfico, acompañado de toma de muestras para ensayos de laboratorio.

Este trabajo incluirá los resultados de laboratorio, los cuales se corresponden con ensayos de mecánica de rocas, identificación de sulfatos y anhidrita, y difracción en minerales arcillosos.

IV. Caracterización del Macizo

Consistió en la caracterización geotécnica del macizo siguiendo la clasificación geomecánica de taludes propuesta por Romana 1997, y con base en el mapeo geológico de superficie y la correlación con la información del sondeo. Se pretende lograr perfiles geológicos y estructurales que muestren la correcta vinculación de la información de superficie con la existente en profundidad, respaldados con gráficos de ventanas geotécnicas.

V. Sostenimiento

Con base en la clasificación geomecánica de los macizos, se definen los tipos de sostenimiento que se corresponden en cada caso. Una vez definidos, se pretende profundizar sobre sus características generales, especificaciones técnicas y dinámica de funcionamiento.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES

La Precordillera Oriental se corresponde con el sector del retroarco andino perteneciente al segmento de subducción subhorizontal Pampeano (28°-33°S) (Ramos *et al.* 2002). Esta unidad morfoestructural se encuentra limitada al oeste por el sistema de corrimientos Villicum-Zonda-Pedernal (CVZ) el cual posee vergencia occidental y se extiende por 145 km con rumbo submeridiano, limitando las sierras homónimas (Bastías 1984, Siame *et al.* 2002, Perucca y Vargas 2014). Este sistema de corrimientos yuxtapone las rocas paleozoicas sobre sedimentitas continentales neógenas (Ortiz y Zambrano 1981, Uliarte *et al.* 1987, von Gosen 1992, Gardini 1993, Ramos *et al.* 1997, Siame *et al.* 2002, Meigs *et al.* 2006, Ahumada y Costa 2009), entre otros. Estos autores identificaron a la Precordillera Oriental como una morfoestructura con diferentes características que la faja plegada y corrida de Precordillera Central y Occidental, en parte por la afinidad de sus estructuras con las fábricas predominantes del basamento cristalino de las Sierras Pampeanas.

(Meigs *et al.* 2006, Vergés *et al.* 2007, Meigs y Nabelek 2010, y Bellahsen *et al.* 2016), interpretan que la vergencia occidental de la Precordillera Oriental es producto de retrocorrimientos asociados a la manifestación superficial de un acuñamiento en la corteza superior, donde el basamento cristalino no está involucrado en el levantamiento andino de bloques.

En la ladera occidental del sector norte de la sierra Chica de Zonda, Suvires (2013) realizó un estudio geomorfológico para conocer la evolución del relieve durante el Cuaternario, analizando las acumulaciones aluviales en el piedemonte y las cuencas de drenaje desde el punto de vista morfométrico y de la dinámica de procesos intervinientes. En esta zona sometida a esfuerzos compresivos andinos y pampeanos, el relieve se expresa con la presencia de al menos dos modelos de abanicos aluviales: telescópicos primigenios o antiguos y depósitos aluviales sobreimpuestos actuales. Los desniveles topográficos entre el área de cuenca y área de acumulación provocados por la falla Villicum-Zonda y los concomitantes reajustes entre erosión y sedimentación facilitaron la evolución del relieve y formación de modelos aluviales. El piedemonte actualmente es un gran reservorio clásico aluvial, dispuesto a ser removido ante potenciales cambios alocíclicos. Las características geológicas locales de la sierra Chica de Zonda, tales como: interestratificación de calizas paleozoicas con brechas carbonáticas, relieves debilitados por plegamiento y posiciones homoclinales, alto diaclasamiento, corrientes temporarias ubicadas en valles de rumbo y de buzamiento, facilitan los procesos de disolución que forman desfiladeros y quebradas secundarias y procesos de captura de cuencas, entre otros, culminando en una provisión abundante de material sedimentario listo a ser transportado aguas abajo y conformar lóbulos Suvires (2013).

Perucca *et al.* (2012) analizan la evidencia de actividad neotectónica en la depresión situada entre los ríos San Juan y La Flecha, en el valle de Zonda-Maradona. En esta región, se identificaron trazas de falla que cortan y desplazan rocas sedimentarias paleozoicas, neógenas y depósitos cuaternarios, que se ubican en la zona de interacción entre dos frentes morfoestructurales de rumbo meridional y vergencia opuesta. Las deformaciones cuaternarias reconocidas en el piedemonte oriental del cordón de Las Osamentas poseen vergencia al este y las situadas en el piedemonte occidental de la sierra Chica de Zonda tienen vergencia al oeste, poniendo en evidencia que ambos sistemas de fallas siguen activos. Las evidencias de actividad tectónica cuaternaria relevadas, asociadas a la interacción entre dos sistemas de vergencias opuestas, permiten interpretar la formación de una zona triangular.

Entre los 28° y 33° 30' de latitud sur se pueden ubicar y definir las principales fuentes sismogénicas de la región, que se caracteriza también por la sub-horizontalidad actual de la placa de Nazca, y por concentrar gran parte de las deformaciones cuaternarias conocidas en la Argentina ya que prácticamente el 90% se concentra en estas latitudes Costa *et al.* (2000). Generalmente, las fallas asociadas a esta sismicidad son subparalelas con rumbo general meridional. Los terremotos destructivos más importantes ocurridos en el país se produjeron en esta región vinculados a rupturas superficiales en un ambiente de intraplaca (terremotos de 1944 (Ms 7,4) y 1977 (Ms 7,4) en San Juan y el terremoto de 1861 (Ms 7,1) en Mendoza).

El abanico aluvial depositado por el río San Juan se habría formado en la depresión de Zonda en el Pleistoceno tardío, debido a los grandes aportes hídricos y descargas de sedimentos aluvionales provenientes de los derretimientos y retrocesos de los glaciares de los Andes centrales (Colombo *et al.* 2000, y Lloret y Suvires 2006).

Por su parte Smalley (1988), registra la actividad sísmica indicando que los epicentros se ubican a profundidades variables entre 20 y 30 km. Otros autores asocian a este sistema varios sismos con magnitudes superiores a 5, algunos de ellos profundos y otros superficiales. La actividad del sistema está registrada en datos del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), analizados por Castano (1993) quién vincula el epicentro del terremoto del 11 de junio de 1952, de magnitud Ms=7.0, con este sistema. Todo esto, sumado al alto ángulo de la falla (70° E), y su persistencia longitudinal en más de 200 km, indicarían que el basamento de la Precordillera Oriental es mecánicamente activo y que la falla Villicum-Zonda es profunda afectando al basamento y elevándolo cerca de la superficie. Según Bastías (1986) este sistema de fallamiento posee un rango de levantamiento de 0.6 mm/año.

La depresión tectónica de Zonda está asociada a los bordes de las áreas montañosas de Precordillera. En general, estas cuencas son áreas deprimidas, rellenas con materiales sedimentarios fluviales y aluviales de espesores potentes que pueden sobrepasar los 900 m Zambrano (1985). Estos relieves son el resultado de una acción combinada de una actividad

tectónica que generó una depresión primigenia de una intensa depositación aluvional post-glaciaria.

Uliarte *et al.* (1987) y Perucca *et al.* (2011) presentan una síntesis del estado del conocimiento neotectónico de la provincia de San Juan, con los resultados de los últimos estudios sobre fallas con actividad tectónica cuaternaria en la región. En el ámbito de Precordillera Oriental se ubica la falla El Mocho caracterizada por su traza rectilínea, con rumbo N2°E y escarpa a contrapendiente, que afecta el abanico aluvial del Pleistoceno. La falla inversa posee vergencia al oeste con ángulos elevados (70° E). Su longitud aproximada es de 8.5 km. En el piedemonte occidental de la Precordillera Oriental se destaca la falla regional Villicum-Zonda-Pedernal, posee una longitud de 145 km y un rumbo N20°E. Al norte del río San Juan se denomina falla Loma de Las Tapias, con longitud de 18 km, rumbo N22° y buzamiento 78° E, afecta depósitos aluviales de edad cuaternaria, con escarpas degradadas y discontinuas que miran al oeste, de unos 10 m de altura. En el piedemonte oriental de la Precordillera Oriental, la zona de fracturación moderna constituye un sistema de fallas inversas con escarpas subparalelas, que afectan los distintos niveles de abanicos aluviales.

Blanc *et al.* (2020) realizaron un análisis geomorfológico, morfotectónico y neotectónico del valle Ullum-Zonda, además, un análisis litofacial y geocronológico en afloramientos de la formación Valentín con el objetivo de poder determinar el ambiente sedimentario de la misma. Esta formación es el último registro sedimentario de las facies de cuenca de este valle durante la transición Pleistoceno-Holoceno, vinculada a la estructuración final de la faja plegada y corrida de Precordillera Oriental. Blanc (2019) determinó, además, que en los piedemontes de las unidades montañosas de Precordillera Central y Oriental que limitan con el valle Ullum-Zonda, predominan las geoformas de acumulación definidas por abanicos aluviales, abanicos coluviales y conos de derrubios, y geoformas de erosión como glacís, pedimentos y terrazas fluviales.

Sardiña (2021) elaboró un informe de ingeniería en el cual abordó el estudio completo del proyecto de un túnel carretero. Este estudio está basado en el proyecto del túnel vial "Túnel de Zonda, y el informe incluye capítulos relevantes a este trabajo final de licenciatura, tales como información básica del túnel y sus accesos, diseño geométrico básico del túnel, diseño de portales, auscultación, cálculos y verificaciones estructurales, entre otros.

CAPÍTULO 3: GEOGRAFÍA

Orografía

La región se caracteriza por la presencia de cordones montañosos de variada altitud, y rumbo predominante norte-sur, separados por depresiones intermontanas longitudinales, de formas y dimensiones variables. El valle de Ullum-Zonda constituye una depresión tectónica de fondo plano, elongada en sentido norte-sur con una extensión de aproximadamente 30 km y un ancho máximo de 14 km en su sector central (abarca un área aproximada de 290 km² y se halla a una altura promedio de 830 m.s.n.m), y lo limitan al este y oeste los cordones montañosos de la Precordillera Oriental y Central respectivamente.

La Precordillera Oriental, está conformada de sur a norte por la sierra de Pedernal, sierra Chica de Zonda, sierra de Marquesado (limitada por la quebrada de Zonda y la quebrada de Ullúm en los extremos sur y norte respectivamente), los cerrillos de baja altura Loma de Las Tapias y Lomas de Ullum, y la sierra de Villicum. Las principales manifestaciones topográficas corresponden a rocas de plataforma carbonática, con sedimentitas de aporte clástico y depósitos sinorogénicos de edades más modernas.

Hidrografía

La Cuenca de Ullum-Zonda-Matagusanos se extiende en forma elongada norte-sur, abarca unos 650 km² de superficie. La confluencia de los ríos de los Patos y Castaño genera el cauce del río San Juan, que con una alimentación nival y glacial, aguas abajo atraviesa a lo largo de 100 km el orógeno de la Precordillera, alcanzando la depresión tectónica de los valles de Zonda y Ullum (830 m s.n.m), hacia el este el valle de Tulum (720 m s.n.m.), y finalmente alcanza el nivel de base regional en el grupo de lagunas de Huanacache (520 m s.n.m.). El cauce forma un abanico aluvial sobre el valle Ullúm-Zonda, cuyos depósitos corresponden a gravas y arenas, con algunos limos en la parte distal, en parte acumulados en zonas de descarga de agua subterránea. Predominan los limos arcillosos acumulados en lagunas o pantanos temporarios, que se secan estacionalmente.

De la superficie total de la provincia de San Juan que es de 89.650 km², las cuencas subterráneas ocupan el 29,04 %. El volumen total de agua subterránea almacenado en el subsuelo es de aproximadamente 406.730 hm³ Zambrano *et al.* (1994).

En el valle de Ullum-Zonda, el acuífero es libre, salvo en la porción noreste que predominan los limos superficiales y las intercalaciones limo-arcillosas y favorecen las condiciones de confinamiento o semiconfinamiento. La permeabilidad del abanico aluvial del río San Juan es elevada, y los caudales y rendimientos obtenidos en las perforaciones son altos, con un coeficiente de almacenamiento estimado no menor de 0,2 Rocca (1969).

Clima

El clima de esta región es árido y pertenece al tipo BWWKA (Köppen 1923), donde el término BW refiere a clima seco de desierto con vegetación xerófita o sin vegetación, W hace referencia a concentraciones estivales de las precipitaciones que son inferiores a 100 mm/año, K alude a la temperatura media anual menor a 18°C, y A, a la temperatura mayor a 22°C del mes más cálido.

Predomina una gran radiación solar y transparencia atmosférica, además de una notable amplitud térmica anual y diurna/nocturna (Poblete *et al.* 1989). Los vientos provienen del sur y del noroeste, la precipitación media anual es de 86.1 mm y la temperatura media de 25.7°C. Las descargas de agua en la depresión provienen desde el oeste, por parte de los caudales estacionales del río San Juan que se recarga y “alimenta” en la Cordillera de los Andes, de precipitaciones nívicas y derretimiento de glaciares (Flores *et al.* 2012).

Suelo

Los suelos representados en los depósitos de bajada se corresponden con un conjunto de paraconglomerados formados por calizas, dolomías y margas de las formaciones Zonda y San Juan, con clastos de gran tamaño, angulosos a subangulosos formados a partir de la rápida progradación de conos de deyección y abanicos en el piedemonte occidental de la sierra de Marquesado.

Están constituidos por capas de gravas intercaladas con arenas, limos y con depósitos de canales abandonados. Estos suelos son altamente permeables, tienen alta pedregosidad y una pendiente media de 0,3% hacia el S-SE. Corresponden al Orden Entisol y se destacan los subórdenes Torrifuentes y Torriorthents (INTA 1990).

Actualmente la región atraviesa por un periodo de sequía, que implica un notorio déficit hídrico y el consecuente descenso de los niveles de agua subterránea. Sin embargo, eventuales recargas hacen que los niveles se recuperen y se produce la descarga del acuífero libre con formación de suelos anegados o salinizados Liotta (2011).

Flora y Fauna

La vegetación pertenece a la provincia fitogeográfica del Monte (Cabrera 1994). A nivel regional, el inventario florístico permitió identificar 97 especies pertenecientes a 37 familias, siendo las gramíneas (Poaceae) las más abundantes con 16 especies, siguiendo en valores las familias Asteraceae y Fabaceae con 15 y 9 especies, respectivamente. Las especies con mayor cobertura son: retamo (*Bulnesia retama*), jarilla (*Larrea divaricata*, *Larrea cuneifolia*), chaguar (*Deuterocohnia longipetala*), cactus (*Tephrocactus aoracanthus*) y algarrobo dulce (*Prosopis flexuosa*). Los cambios de vegetación se relacionan con los cambios texturales del suelo o depósitos presentes en las distintas unidades geomorfológicas y con los rangos altitudinales Flores *et al.* (2015).

Las características zoogeográficas quedan definidas dentro del Distrito Subandino Cabrera (1957).

Abundan insectos, roedores, aves, reptiles y especies de mamíferos adaptadas a las altas y bajas temperaturas (amplitud térmica) y el clima con características rigurosas. En general, se destaca la presencia del guanaco (*Lama guanicoe*), puma (*Félix concolor*), zorro colorado (*Pseudalopex culpaeus*), liebre europea (*Lepus eurapaeus*), vizcacha (*Logostamus máximus*), etc. Entre los reptiles se encuentran algunas especies endémicas del género *Liolaemus*. Las aves están representadas por jilguero grande (*Ci cláis auriventris*), cabecita negro andino (*Carduelis uropygialis*), dormilona cenicienta (*Muscisaxicola alpina*), cauquén (*Chloephaga melanoptera*), gorrión (*Passer domesticus*) y torcacita (*Columbina picui*).

CAPÍTULO 4: MARCO GEOLÓGICO

Geología Regional

La subhorizontalización de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana se habría iniciado entre los 8 y 10 Ma (Kay *et al.* 1991), y determinó la migración del frente orogénico, la ausencia de volcanismo, la intensa sismicidad de intraplaca y la actividad tectónica durante el Cuaternario (Ramos *et al.* 1997).

A raíz de esto, la región de los Andes comprendida en el centro sur de la provincia de San Juan, geológica y estructuralmente es el resultado de la convergencia entre las placas, que origina un estilo de deformación tectónica de diferentes características en Cordillera Frontal, Precordillera y Sierras Pampeanas. En esta zona, la geometría sub-horizontal de la placa de Nazca es atribuida a la subducción de la dorsal Juan Fernández por debajo de la Placa Sudamericana (Pilger 1981 y Anderson *et al.* 2007).

La provincia geológica Precordillera posee una extensión aproximada de 550 km de largo y 100 km de ancho, se ubica al este de la Cordillera de los Andes, presenta dirección norte-sur y la conforman rocas sedimentarias paleozoicas afectadas por intensa actividad tectónica. Con base en sus características estructurales y litológicas, fue dividida en tres subunidades: Occidental, Central y Oriental (Ortiz y Zambrano 1981). La estructura de la Precordillera es compleja, predominan los cabalgamientos y retrocabalgamientos longitudinales, combinados con fallas oblicuas de orientación noroeste, asociados a una notoria reactivación cuaternaria del relieve (Perucca y Vargas 2014). Precordillera Occidental y Central forman parte de una faja plegada y corrida de piel fina con vergencia oriental (*thin skinned*), y Precordillera Oriental al involucrar el bloque de basamento en su estructura, se define como una faja plegada y corrida de piel gruesa (*thick skinned*) con vergencia occidental, y está constituida por sierras elongadas en sentido norte-sur, con predominio de rocas de plataforma carbonática, y una fuerte impronta tectónica que genera estructuras plegadas en forma de grandes anticlinales asimétricos al oeste, cuyos ejes son paralelos a los ejes de los cordones montañosos, y con planos axiales buzando hacia al este con alto ángulo. Posee estructuras con vergencia occidental (Ortiz y Zambrano 1981), controladas por fábricas de basamento que inclinan al este y por un nivel de despegue profundo (Zapata y Allmendinger 1996).

Estratigrafía

La litología que predomina en las sierras que conforman la Precordillera Oriental, corresponde a rocas de plataforma carbonática, con algunos aportes clásticos y depósitos sinorogénicos de edades más modernas. Además de estas potentes secuencias calcáreas cambro-ordovícicas, aparecen areniscas, lutitas y conglomerados correspondientes a edades ordovícico-silúricas y carboníferos (las secuencias clásticas sobreyacen a las calcáreas de forma discontinua en el faldeo oriental de las sierras).

Los depósitos del Neógeno tardío están constituidos por fanolomerados aluviales con depósitos de remoción en masa. Se destacan los depósitos aluviales y coluviales del Pleistoceno-Holoceno y depósitos finos de barreal y lacustres principalmente reconocidos en el extremo sur de la depresión Ullum - Zonda, en el área. Salinas (1979) describe limos y arcillas con intercalaciones de bancos de arenas y gravas finas. Los limos son amarillos, grisáceos, pardos y rojizos, con variadas proporciones de arena, algunas laminillas muy finas de moscovita, y en parte arcillosos. La fracción arcillosa presenta montmorillonita, illita y cloritas mientras que en la fracción limo se encuentra plagioclasa, cuarzo, calcita, sales de yeso, thenardita y caolinita.

Formación La Laja

Fue definida inicialmente por Borrello (1962) modificada posteriormente por Bordonaro (2003). Se distribuye a lo largo del flanco occidental de Precordillera Oriental. Es una unidad predominantemente calcárea que presenta intervalos con sedimentación mixta (silicoclástica-carbonática). Baldi y Bordonaro (1981) distinguieron cuatro miembros en la quebrada de Zonda, de base a techo son: El Estero, Soldano, Rivadavia y Juan Pobre, que suman un espesor de 1.200 m de calizas, calizas dolomíticas, calizas arcillosas y margas, con algunos estratos de rocas clásticas como lutitas y cuarcitas. Bordonaro (2003) define el miembro Las Torres compuesto por calizas grises oscuras y oolitas hacia la parte superior. La Formación La Laja abarca desde el Cámbrico inferior tardío hasta el Cámbrico medio tardío, dada su correlación con las biozonas de trilobites homologadas con las de la plataforma norteamericana, tales como las Zonas de Olenellus, Plagiura-Poliella, Albertella, Glossopleura y Ehmaniella y Bolaspidella (Bordonaro 1986). Estudios realizados por Berkowski *et al.* (1990) señalan litofacies de mudstones, wackestones, packstones, grainstones, margas y limolitas, asociadas a secuencias cíclicas dentro de una plataforma abierta y poco profunda.

Formación Zonda

Fue definida por Bordonaro (1980) como una sucesión de dolomías, dolomías calcáreas y calizas dolomíticas de color gris claro a gris amarillento y blanquecino, que hacia el techo se intercalan con bancos arcillosos muy finos, presentan estructuras sedimentarias de poca profundidad (grietas de desecación, bird eyes, conglomerados de clastos planos, cristales pseudomorfos de yeso, estratificación entrecruzada, laminación criptoalgal y estromatolitos), que indican un ambiente de sabkha marino. Sus afloramientos se encuentran distribuidos principalmente sobre las vertientes occidentales de Precordillera Oriental. Posee un espesor máximo de 400 m, Bordonaro (1986) interpreta para esta formación una serie de ciclos somerizantes originados en un ambiente hipersalino intertidal medio a superior con episodios temporarios de exposición subaérea (Armella 1990). A falta de fósiles diagnósticos que

precisen su edad, se le asigna una edad tentativa Cámbrico superior temprano (*sensu lato*) por su ubicación y relación estratigráfica con la Formación La Laja que la infrayace.

Formación Valentín

Definida por Pandolfo (1975), asignó a estos depósitos una edad holocena temprana, basándose en evidencia arqueológica y paleontológica (sin definir un estratotipo). Se corresponde con depósitos finos compuestos por niveles de fangolitas color castaño claro de hasta 30 metros de espesor Cuerda *et al.* (1983), de limos, arenas y arcillas de colores rojizo, amarillento claro y verdosas, con intercalaciones esporádicas de gravas, que afloran en forma discontinua a lo largo y ancho del valle. Blanc y Perucca (2017) realizaron seis dataciones radiocarbónicas mediante las cuales identificaron dos unidades cronoestratigráficas: una unidad Pleistoceno-tardía (16.700 a 15.200 años cal. AP) y una unidad Holoceno temprano (Groenlandiano a medio Northgrippiano, 9.475 a 7.685 años cal. AP) sin poder determinar la relación estratigráfica entre ambas unidades.

Depósitos coluviales

Forman parte de los piedemontes actuales de los cordones montañosos de Precordillera y constituyen los depósitos de los conos de derrubios y abanicos coluviales. La litología dominante es muy variada, textural y composicionalmente, controlada por la litología local del área de procedencia. Los depósitos de talud se caracterizan por el predominio de brechas clasto-soportadas (con exiguos porcentajes de matriz), frecuentemente macizas, fábrica planar o mostrando imbricación de alto ángulo de clastos. En los abanicos coluviales dominados por flujos de gravedad dominan las brechas matriz-soportadas y macizas y en menor proporción las brechas clasto-soportadas. Por su parte, los depósitos de abanicos coluviales dominados por flujos fluidos muestran menor tamaño de grano y están dominados por canales amalgamados rellenos tanto de brechas clasto como matriz-soportadas, y escasas brechas gradadas (Suriano y Limarino 2009).

Depósitos aluviales

Constituidos por los abanicos aluviales y las planicies de inundación de los principales ríos, río San Juan, de la Ciénaga y de la Travesía. En los valles Ullum-Zonda y Tulum, la planicie de inundación se expande formando mega abanicos aluviales. Estudios realizados por Milana (1991) indican que la procedencia de las fracciones gruesas corresponde a rocas plutónicas y volcánicas del Grupo Choyoi. Los depósitos de abanicos aluviales están mayormente compuestos por conglomerados polimícticos clasto-soportados con estructuras entrecruzadas, y en menor proporción conglomerados y brechas matriz soportadas en los sectores proximales. Los piedemontes dominados por flujos canalizados están formados por brechas clasto-soportadas, en menor proporción con clastos imbricados o con estructuras entrecruzadas.

Neotectónica

Condicionada por la subducción con bajo ángulo de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana, la región presenta una elevada sismicidad y una consecuente y predominante actividad tectónica cuaternaria (Ramos *et al.* 1986). Se registran numerosos sismos en profundidades cercanas a los 100 km (delimitan la posición de contacto interplacas y se correlacionan con la subducción de la dorsal Juan Fernández), y cabe destacar que los principales terremotos destructivos se localizan en niveles menos profundos, y están relacionados con estructuras que deforman los depósitos cuaternarios (Alvarado y Beck 2006).

El régimen compresivo genera los relieves observados y es el responsable de los sistemas de fallas con actividad cuaternaria que afectan la región. En general, predominan los cabalgamientos y retrocabalgamientos longitudinales, combinados con fallas oblicuas de orientación noroeste, asociados a una notoria reactivación cuaternaria del relieve (Perucca *et al.* 2013).

Durante el Cuaternario, la evolución tectónica estuvo afectada por la actividad compresiva regional del fallamiento inverso Villicum-Zonda, que limita el borde occidental de la sierra Chica de Zonda y es una falla profunda que involucra al basamento y lo eleva cerca de la superficie (Gardini 1993).

Estructura

La interacción entre corrimientos con vergencias opuestas durante el Cenozoico favoreció el desarrollo de una zona triangular de piel gruesa que habría comenzado después de los 2.7 Ma cuando comenzó a formarse el sistema deformacional de piel gruesa de la Precordillera Oriental (Zapata y Allmendinger 1996). La Precordillera Oriental está constituida por sierras de rumbo submeridional, en general integradas por estructuras plegadas y replegadas, en forma de grandes anticlinales asimétricos al oeste con ejes paralelos a los ejes de los cordones montañosos. Los planos axiales buzan al este con alto ángulo, en tanto que en la mayoría de los casos los flancos occidentales se presentan verticales, rebatidos o suelen estar suprimidos por fallas inversas de alto ángulo y rumbo predominantemente norte-sur, que constituyen el límite occidental de Precordillera Oriental.

CAPÍTULO 5: MARCO CONCEPTUAL

Geotecnia es una rama de la geología que estudia las propiedades físicas y mecánicas de los materiales del medio geológico, el comportamiento y la aplicación de la mecánica de rocas y suelo, para analizar cómo afectan a las estructuras y garantizar estabilidad y seguridad en las obras de construcción de la ingeniería civil. Este concepto tiene un vínculo directo con la ingeniería civil, ya que determina y evalúa la interrelación entre las obras de ingeniería y el ambiente geológico.

Los principales objetivos son la evaluación de riesgos geológicos y geotécnicos, determinación de aspectos relacionados con la capacidad de carga, deformaciones, tensiones, comportamiento estructural y otras posibles interacciones entre la roca, suelo, y las estructuras vinculadas a la obra civil, con un análisis minucioso del comportamiento del medio geológico. Es fundamental conocer los aspectos geotécnicos y cómo afectan al desarrollo de obras civiles, para prevenir, mitigar, y controlar los riesgos geológicos y sus consecuencias.

Mecánica de rocas

La mecánica de rocas es la ciencia integrada en la geotecnia que se encarga del estudio teórico y práctico de las propiedades, el comportamiento mecánico de los materiales rocosos, y de su respuesta ante la acción de fuerzas aplicadas en su entorno físico. Contempla el estudio y análisis de la reología y propiedades de los materiales del medio geológico.

La caracterización de las rocas y macizos rocosos, junto con el estudio del comportamiento mecánico y deformacional, son complejos debido a los factores que condicionan y determinan gran variabilidad en sus características y propiedades.

La mecánica de rocas tiene estrecha relación con disciplinas de la geología, el estudio de las estructuras y discontinuidades es fundamental ya que los planos de debilidad controlan y condicionan los procesos de deformación y rotura de los macizos, siendo la geología estructural y la tectónica las disciplinas más influyentes para los estudios geotécnicos.

Los macizos rocosos están formados por matriz rocosa separada por planos de discontinuidades, presentan variación en su composición mineralógica, orientación de cristales, porosidad, micro fisuración, estructura y grado de alteración, a su vez, los macizos presentan sectores meteorizados y/o tectonizados. Estas características heterogéneas, discontinuas y anisótropas condicionan la respuesta mecánica del macizo frente a fuerzas externas, produciendo cambios en sus propiedades físicas y mecánicas que pueden generar una serie de efectos internos, como desplazamientos, deformaciones y modificación del estado tensional o de esfuerzos.

Para definir el comportamiento de una roca en rotura se hace mediante el estado de tensiones o el estado de deformaciones. El más utilizado es el estado de tensiones, tomando como resistencia de la roca, la máxima tensión que ésta puede soportar Gonzalez de Vallejo (2002).

El estado tensional de un sistema es consecuencia de las fuerzas que actúan sobre él. Al variar las fuerzas, varía el estado de tensiones asociado. El esfuerzo sobre un plano se representa con un vector de esfuerzo, cuya magnitud es igual a la relación entre la fuerza y el área, y dirección es paralela a la dirección de la fuerza que actúa sobre dicho plano (el vector puede ser descompuesto en sus componentes normal σ_n y tangencial τ).

Criterio de Rotura de Mohr-Coulomb

Define el criterio de rotura en función de la tensión tangencial y la tensión normal en un plano. En este caso la superficie de fluencia es de la forma $\tau = f(\sigma)$

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi$$

Donde:

- c es la cohesión, una constante que representa la tensión cortante que puede ser resistida sin que haya ninguna tensión normal aplicada.
- φ es el ángulo de fricción.
- τ es la tensión tangencial que actúa en el plano de rotura.
- σ_n es la tensión normal que actúa en el plano de rotura.

El criterio de Mohr-Coulomb se representa en el espacio de tensiones normal y tangencial. Se puede apreciar que la ecuación de la superficie de rotura es la ecuación de la recta tangente a todos los círculos de falla (Figura 3).

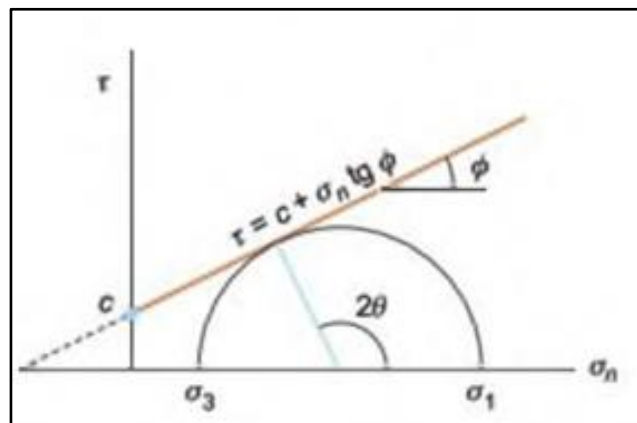


Figura 3. Envolvente de Mohr-Coulomb, criterio de rotura. Tomado de Gonzalez de Vallejo (2002).

Al excavar un macizo, las condiciones iniciales se modifican y responde a estos cambios deformándose y/o rompiéndose. Las propiedades físicas controlan las características resistentes y deformacionales de la matriz rocosa, y son el resultado de procesos geológicos y tectónicos que fueron vinculados en su génesis. El estado y comportamiento mecánico son el resultado de la combinación de factores como la composición mineralógica, densidad, estructura y fábrica, porosidad y permeabilidad, dureza, entre otros, y la influencia de éstos difiere para cada situación en distinto grado de importancia.

Taludes

El concepto de talud parte de que es una superficie inclinada del terreno, la cual puede ser natural o construida para una obra civil.

Es necesario el conocimiento geológico y geomecánico de los materiales que forman el talud, de los posibles modelos o mecanismos de rotura que pueden tener lugar y de los factores que influyen, condicionan y desencadenan las inestabilidades.

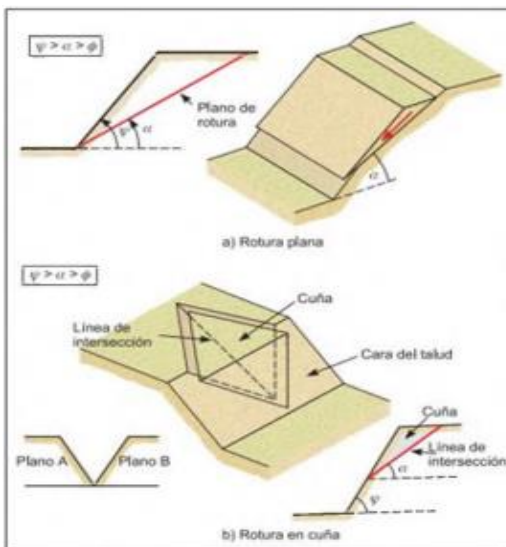
La estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos (altura e inclinación), geológicos (que condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía en el talud), hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geotécnicos o relacionados con el comportamiento mecánico del terreno (resistencia y deformabilidad). La combinación de los factores citados puede determinar la condición de rotura a lo largo de una o varias superficies, y que sea cinemáticamente posible el movimiento de un cierto volumen de masa de suelo o roca. La posibilidad de rotura, y los mecanismos y modelos de inestabilidad de los taludes están controlados principalmente por factores geológicos y geométricos.

Los factores geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos se consideran factores condicionantes o pasivos, y son intrínsecos a los materiales naturales. Los factores desencadenantes, o activos, provocan la rotura del medio geológico una vez que se cumplen una serie de condiciones, son factores externos que actúan sobre los suelos o macizos rocosos, modificando sus características y propiedades y las condiciones de equilibrio del talud.

Conocer estos factores permite un correcto análisis del talud, ya sea para conocer su estabilidad, o para garantizarla.

Los tipos de rotura que pueden experimentar los taludes están condicionados por el grado de fracturación del macizo, y por la distribución y orientación de las discontinuidades respecto a la inclinación del talud, siendo los parámetros de resistencia tanto de la matriz rocosa como de las discontinuidades los que definen la estabilidad de los taludes.

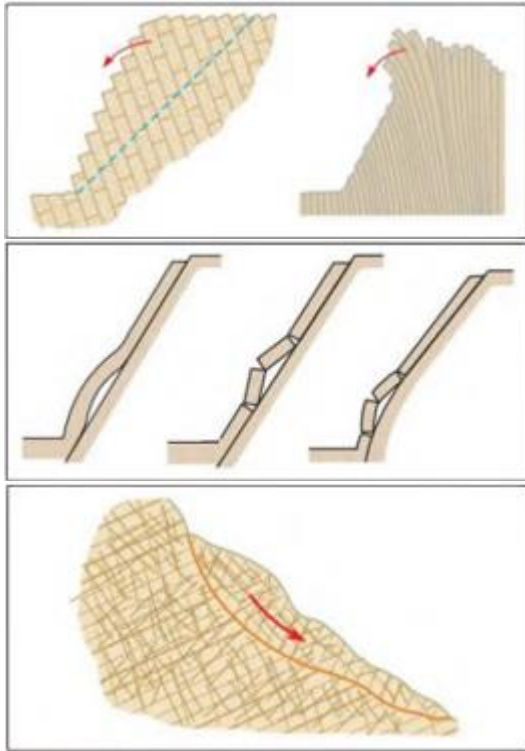
Los modelos de rotura más frecuentes en taludes son:



Rotura Plana. A favor de una superficie preexistente que esté buzando a favor del talud, con en la misma dirección, y que su buzamiento sea mayor que su ángulo de rozamiento interno.

Rotura en Cuña. Por el deslizamiento de un bloque en forma de cuña formado por dos planos de discontinuidad, a favor de su línea de intersección.

Gráficos tomados de Gonzalez de Vallejo (2002).



Rotura por Vuelco. Debido a que los estratos presentan buzamiento contrario a la inclinación del talud y dirección paralela o subparalela al mismo.

Rotura por Pandeo. Se produce con o sin flexión, a favor de planos de estratificación paralelos al talud con buzamiento mayor que el ángulo de rozamiento interno.

Rotura en Curva. Los planos de discontinuidad no controlan el comportamiento mecánico, y el macizo se comporta con condiciones de suelo blando y poco competente.

Gráficos tomados de Gonzalez de Vallejo (2002).

En la Figura 4, 5 y 6 se presentan los modelos de rotura más frecuentes y las relaciones entre ángulos y alturas en diferentes condiciones.

Tipo de rotura	Relación $\sigma_n - \tau$	Relación $H - \psi$	Descripción
			Rotura plana a favor de discontinuidad (estratificación, esquistosidad, junta).
			Superficie de rotura escalonada en macizos rocosos formados por bloques.
			Rotura circular en macizo intensamente fracturado y/o alterado.

Figura 4. Modelos de rotura más frecuentes. Rotura plana, rotura en cuña, y rotura por vuelco de estratos. (Tomado de Gonzalez de Vallejo (2002), modificado de Hoeky Bray (1981)).

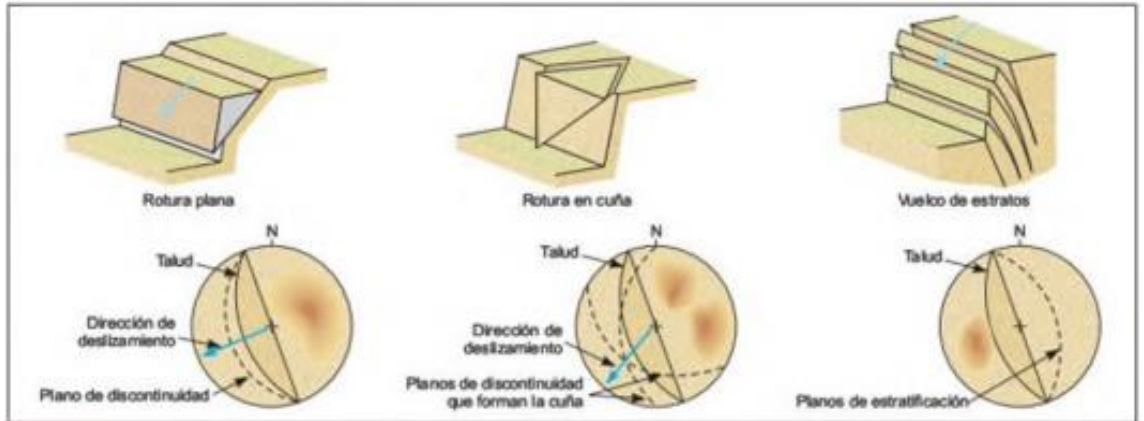


Figura 5. Representación estereográfica de los planos de discontinuidad con respecto a la orientación del talud para algunos tipos de roturas en macizos rocosos. Tomado de Gonzalez de Vallejo (2002), modificado de Hoeky Bray (1981).

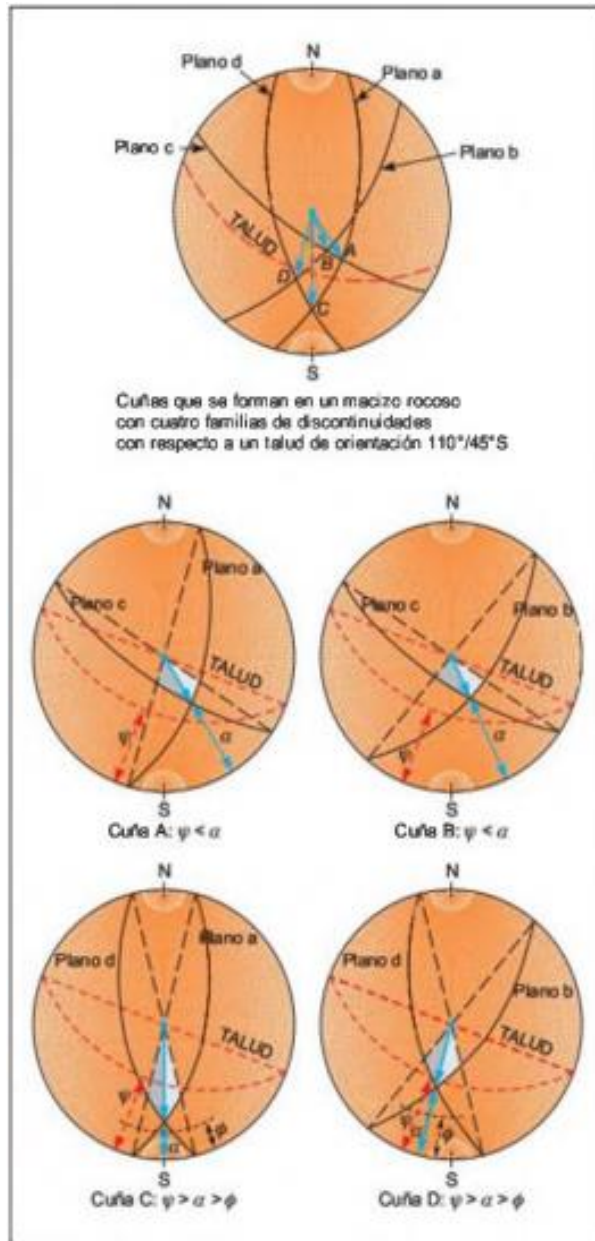


Figura 6. Representación estereográfica de cuñas. Tomado de Gonzalez de Vallejo (2002).

Clasificación Geomecánica

Al excavar en roca se pueden encontrar condiciones naturales como orientaciones desfavorables de las discontinuidades, presencia de agua, y/o generar tensiones respecto de los taludes o del eje del túnel, que dan lugar a la pérdida de resistencia del macizo y consecuentemente, problemas de estabilidad. Sumado a esto, la excavación también genera una serie de acciones inducidas, ya sea pérdida de resistencia como consecuencia de la descompresión, reorientación de los campos tensionales y algunas manifestaciones como subsidencias en superficie, movimientos de ladera, cambios en los acuíferos, entre otros.

Las tensiones que actúan sobre una excavación subterránea son naturales cuando son consecuencia de gravitación o tectonismo, e inducidas cuando corresponden a una redistribución de tensiones como consecuencia de la excavación. El diseño de la excavación necesita a priori conocer la magnitud y dirección de las tensiones naturales, para el cálculo de sostenimiento en el análisis de sección y proceso constructivo. Con un análisis completo de las características geotécnicas del medio geológico, se puede prever el impacto de la excavación sobre el macizo, y lograr un diseño del sistema constructivo en función de las condiciones del terreno y características de la obra.

Las clasificaciones geomecánicas son un elemento fundamental en el análisis de túneles y taludes que permite evaluar empíricamente la estabilidad de una excavación. Se basan en factores que determinan el comportamiento mecánico de los macizos rocosos, principalmente las propiedades de la matriz rocosa y discontinuidades, estado de tensiones in situ, presencia de agua, y grado de meteorización y alteración. Existe cierta complejidad en establecer clasificaciones geomecánicas o geotécnicas generales para los diferentes tipos de macizo rocoso, que radica en la variabilidad de estos factores y el carácter discontinuo y anisótropo de los macizos.

En estudios de mecánica de rocas, las clasificaciones más utilizadas actualmente son Q de Barton desarrollada por Barton, Lien y Lunde en 1974, RMR (Rock Mass Rating), desarrollada en 1973 por Z. T. Bieniawski, con actualizaciones en 1979 y 1989, y SMR (Slope Mass Rating). Otro método de caracterización es el índice GSI (Geological Strength Index), un método cualitativo de evaluación de la resistencia geológica. Éstos establecen diferentes grados de calidad del macizo en función de la matriz rocosa y de las discontinuidades, proporcionando valores estimativos de sus propiedades resistentes.

A continuación, se presenta una breve síntesis de las clasificaciones utilizadas para los fines de este trabajo.

GSI

El sistema de clasificación GSI (Geological Strength Index), es un método cualitativo de descripción geológico y estructural que representa la resistencia y el estado del macizo. Se basa en el criterio de falla de Hoek-Brown. El GSI proporciona un sistema para estimar la disminución de la resistencia que presentaría un macizo rocoso con diferentes condiciones geológicas y se obtiene del análisis en conjunto de dos parámetros geológicos fundamentales, la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades (Figura 7).







INDICE DE ESFUERZO GEOLOGICO PARA ROCAS UNIDAS (HOEK & MARINOS, 2000)		CONDICIONES DE SUPERFICIE				
<p>Desde la litología, estructura y condiciones de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio del GSI. No intentar ser muy preciso. Un rango de 33 a 37 es mas real que tomar un GSI de 35. Note que la tabla no aplica a fallas controladas estructuralmente. Donde planos estructurales debiles estan presentes en una direccion desfavorable con respecto a la excavacion, estos dominaran el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de falla son propensas a la alteracion como resultado de cambios de humedad que puede reducirse cuando el agua esta presente. Cuando trabajamos en roca regular o mala calidad cambian las condiciones por el cambio de humedad. La presion del agua es tratada por analisis de esfuerzos efectivos.</p>		MUY BUENA	BUENA	REGULAR	POBRE	MUY POBRE
		Superficie muy rugosas, no meteorizadas, frescas	Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, manchadas con hierro	Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas	Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorización y rellenos compactos.	Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorización y rellenos de arcillas suave.
ESTRUCTURA		DECRECE LA CALIDAD DE LA SUPERFICIE →				
	INTACTA O MASIVA Rocas intactas o masivas in-situ, rocas con discontinuidades amplias y espaciadas	90			N/A	N/A
	FRACTURADA Macizo rocos con bloques enclavados, bloques cubicos formados tres intersecciones de sistemas de dicontinuidades	80	70			
	MUY FRACTURADA Macizo perturbado con bloques entrabados y angulares formados por la interseccion de 4 o mas sistemas		60	50		
	FRACTURADA/PERTURBADA/SORDIDA Macizo plegado formado por bloques angulares productos de la interseccion de varios sistemas de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificacion			40	30	
	DISGREGADO Pobremente enclavado, macizo altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados				20	
	LAMINADA/FOLIADA Se carece de bloques debido al debil material en los planos de esquistocidad y cizalla	N/A	N/A			10
		← DECRECE EL ENCLAVAMIENTO DE LOS BLOQUES				

Figura 7. Tabla de clasificación para el índice GSI (Geological Strength Index).

La caracterización del macizo se presenta con valores comprendidos entre los rangos expuestos en la siguiente tabla:

Calidad del Macizo	Clase	GSI
Muy mala	V	0-20
Mala	IV	21-40
Regular	III	41-60
Buena	II	61-80
Muy buena	I	81-100

Cabe destacar que el valor de GSI está basado en estimaciones cualitativas por lo cual se recomienda verificar los resultados obtenidos con datos de campo y análisis posteriores, ya que las observaciones son subjetivas y tienen una variabilidad significativa la cual hace que los resultados no se asemejen en su totalidad a la realidad.

Para soporte de los resultados, es posible establecer una relación del valor del GSI con el valor del RMR de 1989. Considerando que la condición de aguas tiene una valoración de 15, y la corrección por orientación de discontinuidades es de 0, se puede observar de manera aproximada, que se cumple la siguiente igualdad:

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

El criterio de este sistema toma en cuenta el nivel de alteración, la meteorización de las rocas, parte de su historia geológica y condiciones de formación, el estado de fracturación y la disposición de las juntas o discontinuidades. El gráfico ha sido extendido para adaptarse a la mayor variedad de macizos rocosos, incluyendo rocas de muy baja calidad, tal cual se observa en la figura 8 de la gráfica adaptada de Hoek (2006).



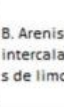
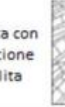
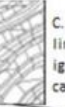



GSI PARA MACISOS HETEROGENEOS COMO FLYSCH (Marinos P. and Hoek. E, 2000)		CONDICIONES DE SUPERFICIE EN LAS DISCONTINUIDADES (Planos de foliación predominantes)				
A partir de la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades, se estima un valor promedio del GSI. No se debe tratar de ser muy preciso. Un rango de 33-37 es mas realista que un GSI=35. Note que el criterio de Hoek - Brown no aplica a estructuras controladas por fallas, donde la orientación desfavorable de los planos de debilidad esta presente pudiendo estos dominar el comportamiento del macizo rocoso. Algunos esfuerzos en el macizo son reducidos por la presencia de agua y esta puede conducir a un ligero desplazamiento y deteriorar la calidad. La presión de agua no hace cambios en el valor de GSI y este puede tratarse con esfuerzos efectivos.		MUY BUENAS	BUENAS	REGULAR	POBRE	MUY POBRE
COMPOSICION Y ESTRUCTURA		Superficies muy rugosas, superficies no meteorizadas, frescas	Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, manchadas con hierro	Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas	Superficies con espejos de falla, con alto grado de meteorización con rellenos compactos o rellenos de fragmentos	Superficies con espejos de falla, con alto grado de meteorización con rellenos de arcilla suave.
	A. El espesor de la capa de arenisca. El efecto del recubrimiento pelítico sobre los planos de las capas es minimizado por el efecto de confinamiento del macizo rocoso	70	60			
	B. Arenisca con intercalaciones de limolita		50			
	C. Arenisca y limolita en iguales cantidades.		40			
	D. Limolita con estratos de arenisca con estratos de					
	E. limolita y arcillolita con estratos de arenisca					
E, D, E y G pueden ser mas o menos foliadas como se ilustra, pero no cambian los esfuerzos. La deformación tectónica, fallas y perdida de continuidad implica desplazarse a las categorías F y H.						
	F. Tectónicamente deformado, intensamente foliado/fallado, material arcilloso cizallado de limolita y arcillolita con fragmentos de areniscas deformadas formando			30		
	G. Arcillolitas y limolitas inalteradas con o sin arenisca.			20		
	H. Limolita o arcillolita tectónicamente deformada formando una estructura caótica con paquetes de arcilla. Delgados estratos de arenisca trasformada en pequeñas			10		

Figura 8. Tabla de clasificación GSI para macizos heterogéneos. Tomado de Anexo C Hoek (2006).

RMR de Bieniawski

Es un sistema de clasificación de macizos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos, de excavación y sostenimiento. La clasificación geomecánica RMR tiene como objetivo definir un índice de calidad del macizo rocoso, que se calcula teniendo en cuenta la resistencia de la matriz rocosa, el índice RQD, condición de las discontinuidades, parámetros hidrogeológicos, y la orientación de las discontinuidades respecto al elemento de estudio (túnel, talud o cimentación).

Para aplicar este sistema, se divide el macizo rocoso en zonas con características geológicas relativamente uniformes y se lleva a cabo la toma de datos y medidas referentes a las propiedades y características de la matriz rocosa y de las discontinuidades expuestas en la tabla de parámetros de clasificación. El procedimiento para relevar dichos parámetros consiste en asignarles una valoración que es considerada luego en una sumatoria general para obtener el índice RMR (Figura 9).

Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)									
Parámetros de clasificación									
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		
Corrección por la orientación de las discontinuidades									
Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables			
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12			
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25			
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60			
Clasificación									
Clase	I	II	III	IV	V				
Calidad	Muy buena	Buena	Medía	Mala	Muy mala				
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20				

Figura 9. Tabla para la clasificación geomecánica RMR (Bieniawski 1989).

RESISTENCIA DE LA MATRIZ ROCOSA

Se puede estimar mediante ensayos de campo in situ como (carga puntual o martillo Schmidt), que se pueden correlacionar con la resistencia a la compresión simple, permitiendo una estimación del rango de resistencia de la roca. El ensayo más práctico y correlacionable con uno de carga puntual, se realiza contabilizando los golpes con piqueta que logran astillar la roca (Figura 10).

Resistencia a compresión simple (MPa)	Descripción
1-5	Muy blanda
5-25	Blanda
25-50	Moderadamente dura
50-100	Dura
100-250	Muy dura
> 250	Extremadamente dura

Figura 10. Tabla con valores de referencia para la estimación del parámetro.

RQD (Rock Quality Designation)

Es el grado de fracturación del macizo rocoso que está ligado al espaciado y a las condiciones de las discontinuidades que presenta. La descripción de la fracturación a partir de datos de afloramientos se refiere al número de familias de discontinuidades y al tamaño de los bloques. Este índice se estima en afloramientos a partir de correlaciones empíricas como la de Palmstrom, 1975 (en ISRM, 1981):

$$RQD = 115 - 3,3 J_r \quad \text{para } J_r > 4,5$$

$$RQD = 100 \quad \text{para } J_r \leq 4,5$$

A partir de relevamientos superficiales, la estimación del índice RQD puede realizarse a partir de la frecuencia de discontinuidades λ , que es la inversa del espaciado medio de las discontinuidades:

$$RQD \approx 100 \exp^{-0,1\lambda} (0,1\lambda + 1)$$

En sondeos con recuperación de testigos, el RQD se obtiene de la sumatoria de tramos de testigo mayores a 10 cm, limitados por fracturas naturales, siguiendo la siguiente expresión:

$$RQD = \frac{\sum \text{Testigos o núcleos de sondeo de longitud } > 10 \text{ cm}}{\text{Longitud total de la maniobra}} 100\%$$

SEPARACIÓN DE LAS DIACLASAS

El espaciado o separación corresponde a la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes de la misma familia, con un menor espaciado los bloques de matriz rocosa serán más pequeños y, caso contrario, entre más espaciado los bloques de serán más grandes.

ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES

Longitud

La persistencia o continuidad corresponde a la extensión en área o tamaño de una discontinuidad en el macizo rocoso. En relación a la longitud, mientras menor sea, mayor será la estabilidad de la masa rocosa, caso contrario la estabilidad se verá desfavorecida.

Abertura

Corresponde a la separación que existe entre las paredes o superficies rocosas de una discontinuidad. El parámetro evalúa discontinuidades consideradas cerradas, abiertas del orden menor al milímetro, hasta condiciones mayores a 5 milímetros.

Rugosidad

Hace referencia a las características texturales de la superficie de la discontinuidad. Estas superficies pueden ser planas, escalonadas, u onduladas, presentando texturalmente aspectos pulidos, suaves, o con distinto grado de aspereza o irregularidad.

Relleno

Los materiales de relleno pueden tener propiedades físicas y mecánicas muy variables. La presencia de relleno gobierna el comportamiento de la discontinuidad, por lo que deben ser reconocidos y descritos todos los aspectos referentes a sus propiedades y estado, si se trata de materiales blandos o alterados, pueden sufrir variaciones considerables en sus propiedades resistentes a corto plazo si cambia su contenido en humedad o si tiene lugar algún movimiento. Las características principales que se describen son su naturaleza, espesor, resistencia y permeabilidad.

Alteración

El grado de meteorización de la roca responde a factores medioambientales y procesos físicos, químicos y biológicos que descomponen la masa rocosa in situ, condicionando sus propiedades mecánicas a causa del grado de alteración presente.

CONDICIÓN HIDROGEOLÓGICA

Se valoran las filtraciones de agua en el macizo, el flujo de agua y las condiciones de humedad presente en las discontinuidades.

El índice RMR va desde 0 hasta 100 puntos, a partir de los cuales el macizo rocoso puede clasificarse en 5 categorías que corresponden a la calidad del macizo, relacionando características geotécnicas que se toman en cuenta para la aplicación de obras de ingeniería civil y minería, especialmente túneles o taludes. A partir de este índice, se obtiene la calidad del macizo y la clase de macizo que permite una aproximación el ángulo de rozamiento y cohesión del macizo rocoso, y longitud de avance de una excavación (Figura 11).

Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR				
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°

Figura 11. Calidad de Macizos rocosos en función del valor RMR Tabla tomada de Gonzalez (2002).

SMR de Romana

La clasificación geomecánica SMR de Romana (1985, 1993, 1995) es una adaptación de la clasificación RMR de Bieniawski (1973, 1979, 1989, 1993) a taludes, mediante la aplicación de factores de corrección. Para la obtención del **Índice SMR**, "Slope Mass Rating", se definen estos factores de ajuste por orientación de las discontinuidades y por el método de excavación.

El ajuste por la orientación de las discontinuidades es producto de los subfactores F_1 , F_2 y F_3 los cuales se describen a continuación:

- F_1 depende del paralelismo entre la dirección de las juntas o discontinuidades y la del plano del talud. Varía entre 1,0 y 0,15 (respectivamente, cuando ambas direcciones son paralelas, y cuando el ángulo entre ambas es mayor de 30° , con probabilidad de rotura muy baja). Siendo α_j y α_t , los ángulos de dirección de la junta y del talud respectivamente, los valores se ajustan a la expresión dada por:

$$F_1 = [1 - \text{sen}(\alpha_j - \alpha_t)]^2$$

- F_2 depende del buzamiento de la junta. Para roturas por vuelco, F_2 vale 1,0. En roturas planas, varía entre 1,0 y 0,15 (respectivamente para juntas con buzamiento inferior a 20° , y para juntas con buzamiento superior a 45°). Siendo β_j el buzamiento de la junta, el valor se ajusta aproximadamente según la relación:

$$F_2 = \text{tg}^2 \beta_j$$

- F_3 refleja la relación entre los buzamientos de la junta y el talud.

El valor final para el índice se obtiene sumando al RMR básico, un "factor de ajuste" en función de la orientación de las juntas, y un "factor de excavación" que depende del método de excavación, tal como lo define la siguiente expresión:

$$\text{SMR} = \text{RMR} + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

Estos factores involucrados en los ajustes por orientación de las discontinuidades y método de excavación se expresan en la Tabla de Clasificación Geomecánica de Taludes SMR que se muestra en la figura 12.

Clasificación geomecánica de taludes SMR						
Factores de ajuste por la orientación de las juntas (F_1, F_2 y F_3)						
Caso		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
P	$ \alpha_j - \alpha_s $	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
T	$ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ $					
P/T	F_1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
P	$ \beta_j $	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
	F_2	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
T	F_2	1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_s$	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0°	$0 - (-10^\circ)$	$< -10^\circ$
T	$\beta_j + \beta_s$	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	—	—
P/T	F_3	0	-6	-25	-50	-60
Factor de ajuste por el método de excavación (F_4)						
Método	Talud natural	Precorte	Voladura suave	Voladura o excavación mecánica	Voladura deficiente	
F_4	+ 15	+ 10	+ 8	0	- 8	
Clases de estabilidad						
Clase	V	IV	III	II	I	
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 40	61 - 80	81 - 100	
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena	
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable	
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna	
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno	
P: rotura plana		α_s : dirección del talud		β_s : buzamiento del talud		
T: rotura por vuelco		α_j : dirección de las juntas		β_j : buzamiento de las juntas		

(Romana, 1997)

Figura 12. Clasificación geomecánica SMR, con factores de ajuste por orientación para taludes. Tabla tomada de Gonzalez (2002).

Se debe obtener el índice SMR para cada una de las familias de juntas y adoptar el valor menor obtenido. En rocas meteorizadas la clasificación debe ser aplicada para la situación inicial de roca sana, y para la situación de roca real.

Según sea el valor del índice SMR se obtienen 5 clases de estabilidad definidas en el cuadro de la figura 12. Respecto a las medidas de sostenimiento a aplicar, para taludes se definen 6 clases diferentes:

SMR > 65: Sin sostenimiento (ejecución de saneo).

70 > SMR > 45: Protección (zanjas de pie; vallas de pie o de talud; redes sobre la superficie del talud).

75 > SMR > 30: Refuerzo (bulones; anclajes).

60 > SMR > 20: Hormigón (gunita, contrafuertes y/o vigas, muros de pie).

40 > SMR > 10: Drenaje (superficial; profundo).

30 > SMR > 10: Reexcavación (tendido, muros de contención)

Sostenimiento

Se define como sostenimiento a los elementos estructurales de sujeción del terreno, aplicados inmediatamente después de la excavación, con el fin de asegurar su estabilidad durante la construcción y después de ella, así como garantizar las condiciones de seguridad.

La excavación implica una descompresión del terreno, pudiendo permitir que éste se relaje parcialmente al punto de que la presión de equilibrio, cuando se coloca sostenimiento, sea relativamente baja.

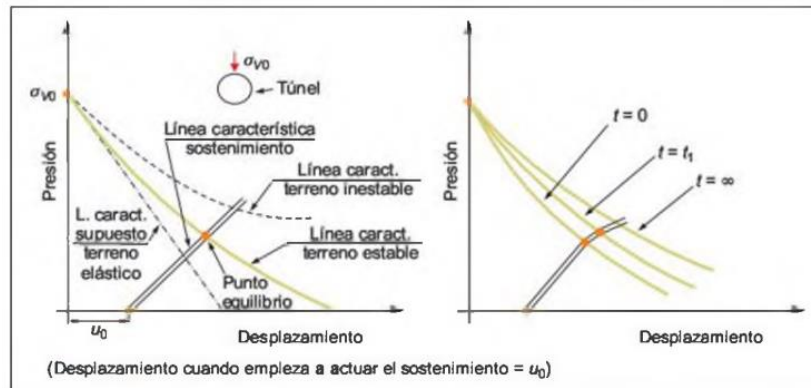


Figura 13. Gráfico Presión/Desplazamiento en relación al sostenimiento aplicado. Tomado de Gonzalez (2002).

El gráfico de la Figura 13 representa la relación entre la presión del terreno y los desplazamientos. Cuando se excava el túnel, las presiones bajan, si se supone un terreno elástico la línea característica es una recta, y si no hablamos de condiciones elásticas, esta línea es una curva. El sostenimiento se coloca cuando se produjo un cierto desplazamiento, y es el punto de intersección entre ambas líneas características el que se denomina "punto de equilibrio de la excavación". Pasado cierto tiempo, y con la fluencia de los materiales, ese punto de equilibrio puede variar tal cual se observa en la gráfica. El Nuevo Método Austríaco de Túneles (NATM) considera que los desplazamientos por relajación tensional movilizan la resistencia de la roca alrededor de la excavación y, junto con la instalación de sostenimiento flexible, permite llegar a presiones de trabajo relativamente bajas, y en fases posteriores el revestimiento definitivo tendrá que absorber pequeñas presiones además de las variaciones que se produzcan por influencia de los materiales a largo plazo.

El proyecto y construcción de una obra de excavación requiere de datos geológicos y geomecánicos para el diseño de los sostenimientos, selección del método de excavación y los tratamientos del terreno. El diseño de sostenimiento se realiza en la etapa de proyecto, según sea la calidad de la roca. Durante la ejecución de la obra, los sostenimientos se optimizan con la información que aporta la instrumentación del túnel. Este se colocará de forma que el terreno pueda deformarse dentro de rangos aceptables de estabilidad, con el objeto de que la roca desarrolle su capacidad autoportante.

Aquellos sistemas que regulan el terreno para que no pierda sus propiedades resistentes, evitando el desprendimiento de bloques o cuñas, limitan las deformaciones en la cavidad y controlan los procesos de meteorización y condición hídrica, se definen como Sostenimiento Primario, imparten seguridad durante la ejecución. Sostenimiento Secundario son aquellos elementos que la excavación requiera adicionales para reforzar zonas de mayor debilidad.

Los tipos de sostenimiento más utilizados son el hormigón lanzado con y sin fibras, pernos, mallas y cerchas. Existen otros sistemas que también tienen la capacidad de cumplir simultáneamente con las funciones de estabilización y reforzamiento, como son el sistema de enfilaje frontal, marchiavanti, que abarcan desde barras o perfiles laminados cortos que se colocan antes de un avance formando una corona protectora, hasta tubos perforados largos, que se colocan en posición similar y se inyectan para estabilizar el terreno y crear una “visera” protectora que asegura la estabilidad para varios avances consecutivos.

A continuación, se presentan mediante una breve síntesis los elementos mencionados. Sus características y propiedades serán descritas con especificaciones y detalles en el Capítulo 9 de Sistemas de Sostenimiento.

Hormigón Projectado

El hormigón proyectado, shotcrete, o gunita, es hormigón que reviste la superficie de la roca o cualquier material, cerrando las juntas y discontinuidades, evitando la descompresión y alteración de la roca (Figura 14). Cuando se requiere que este funcione como elemento resistente, se refuerza con malla electrosoldada o mediante el implemento de fibras. Se proyecta neumáticamente a alta velocidad sobre una superficie a través de una manguera. En comparación con el concreto hidráulico, la mezcla contiene una mayor dosis y contenido de cemento y arena, un menor tamaño de los agregados gruesos, y mayor cantidad de aditivos. En obras subterráneas, está sujeto a esfuerzos de tensión inducidos por flexiones, contracciones, y fuerzas cortantes. Como la capacidad del concreto a la tensión es reducida, se refuerza con materiales adecuados para que el elemento absorba fuerzas, aumente su ductilidad y pueda controlarse el agrietamiento (durabilidad). Es recomendable el uso de fibras en macizos de calidad regular, y adicionar malla electrosoldada para calidad muy mala.

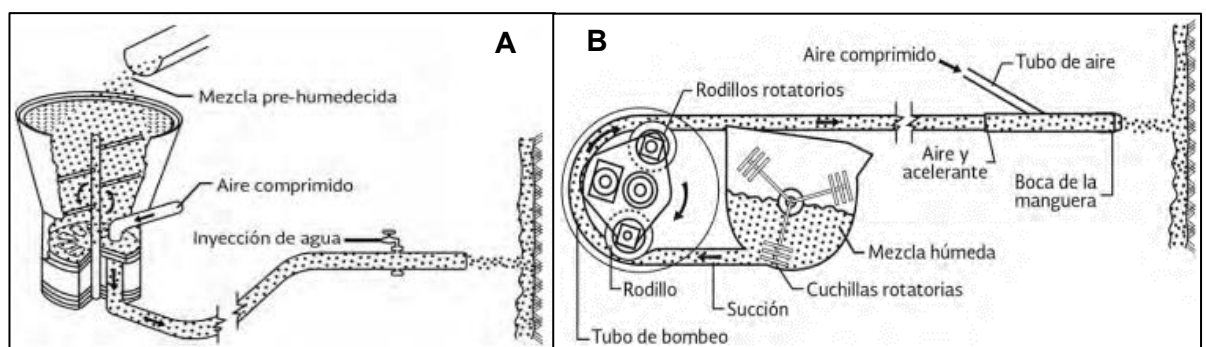


Figura 14. Gráfico esquemático de la preparación de hormigón vía húmeda (A), y vía seca (B). Tomado de Manual de diseño y construcción de túneles de carretera (2016).

Malla Electrosoldada

Malla formada por un enrejado de barras de hierro corrugadas, unidas por electrosoldadura (Figura 15). Se utiliza como refuerzo para el revestimiento con hormigón. Generalmente se usan mallados de diámetros de 4, 5 o 6 mm con separaciones comprendidas entre 10 y 20 centímetros.



Figura 15. Malla electrosoldada.

Pernos

Los bulones o pernos de anclaje son barras de acero de 20 a 40 mm de sección y longitudes variables (generalmente entre 3 y 6 m, hasta 8 m), que se instalan en el terreno previamente. Los pernos más utilizados son aquellas barras corrugadas, ancladas en toda su longitud con resina o cemento. Otros tipos de bulones son los de fricción, instalados mediante hinchado por agua a presión y de resina con fibras de vidrio. Por su forma de actuar los bulones pueden ser activos o pasivos, funcionando respectivamente como un anclaje con un fuste libre, y la cabeza sobresaliente que se ajusta mediante una placa y una rosca, o como aquel que se adhiere a la roca en toda su longitud y no se le aplica tensión. Estos sistemas de anclaje principalmente actúan “cosiendo” las discontinuidades para impedir deslizamientos o caídas, y aportando un efecto de confinamiento (Figura 16).

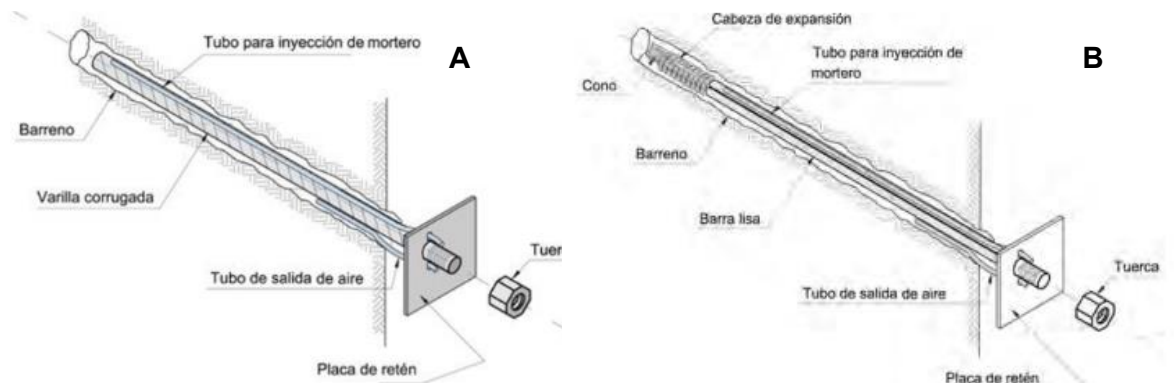


Figura 16. Gráfico esquemático de pernos pasivos (A) y pernos activos (B). Tomado de Manual de diseño y construcción de túneles de carretera (2016).

Cerchas

Cerchas, cimbras, o marcos metálicos, son perfiles de acero laminados en forma de arco que ejercen una función resistente en contacto con el terreno a lo largo de toda su longitud y firmemente apoyadas en el suelo (ver Figura 17).

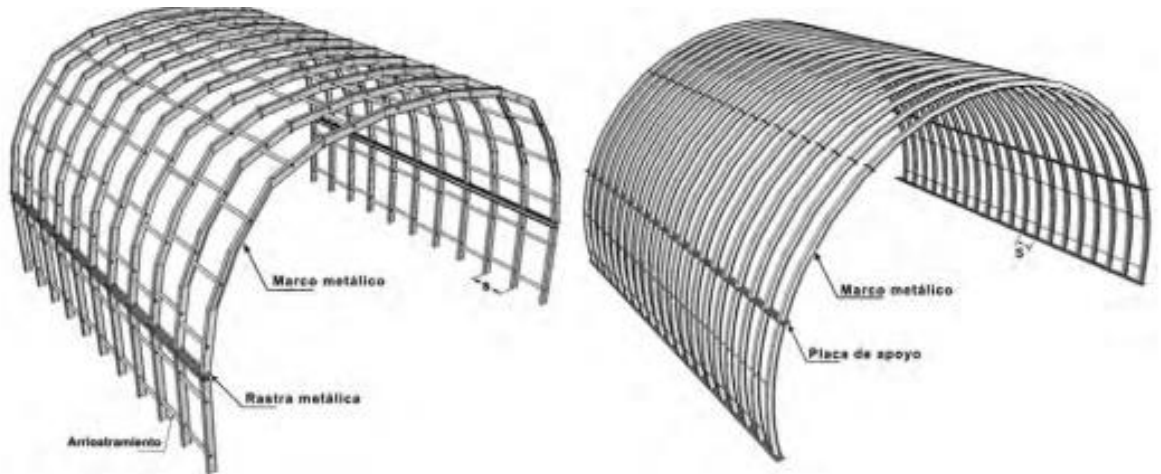


Figura 17. Gráfico esquemático de marcos metálicos. Tomado de Manual de diseño y construcción de túneles de carretera (2016).

Enfilajes.

Son bulones inclinados unos 40° - 45° hacia el frente de avance, colocados para evitar el desprendimiento y caída de cuñas, principalmente cuando se atraviesa roca muy fracturada (Figura 18). El término paraguas se aplica para pernos o micropilotes instalados alrededor de la sección o de la clave del túnel, cuando existe riesgo de desprendimientos al efectuar el avance, a causa de condiciones severa de alteración de la roca, o con mayor fracturamiento.

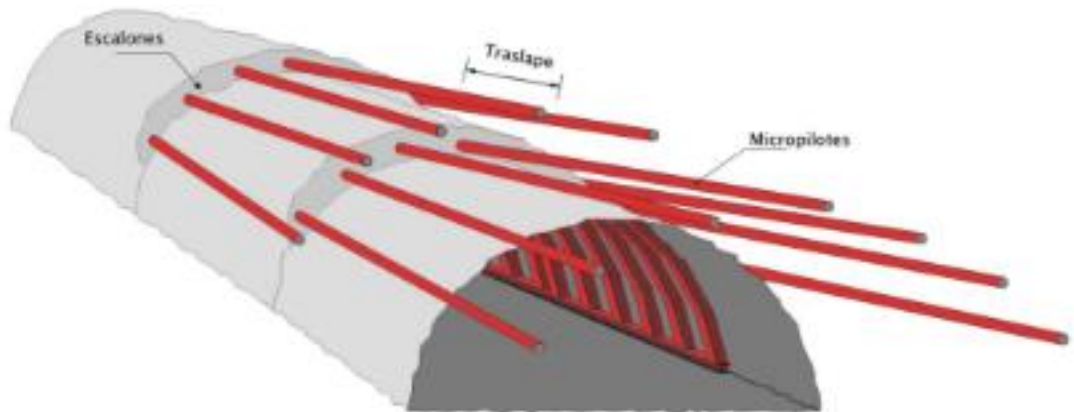


Figura 18. Gráfico esquemático de enfilajes. Tomado de Manual de diseño y construcción de túneles de carretera (2016).

Drenaje

Sistema de perforaciones realizados para captación de filtraciones, mediante taladros o galerías de drenaje. Sirven como puntos de desconfinamiento importantes al considerar las condiciones para la estabilidad del macizo (ver Figura 19).

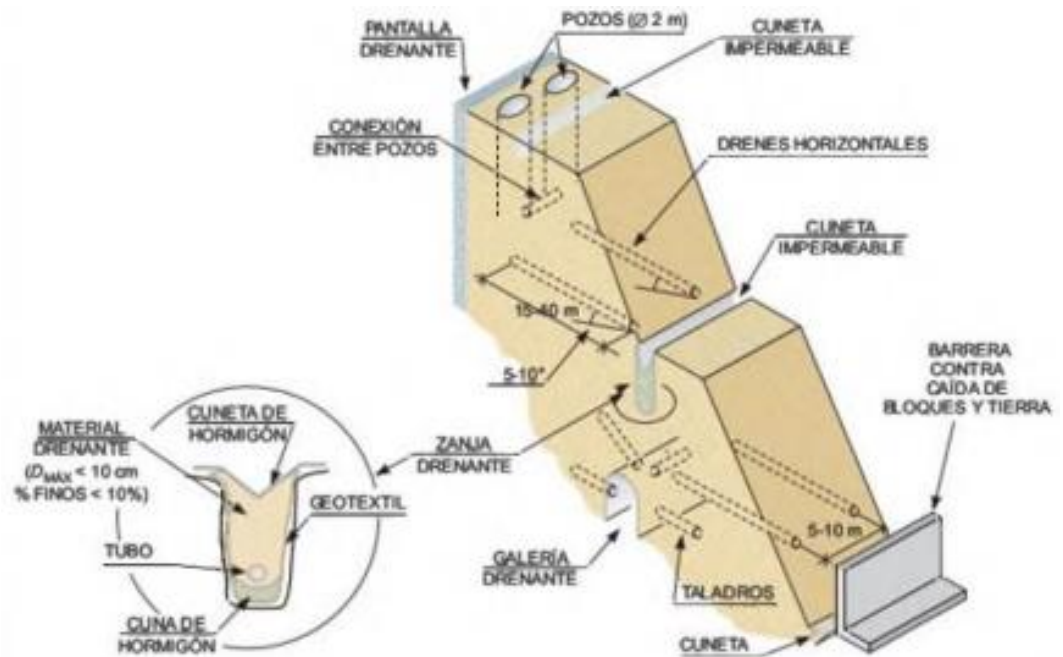


Figura 19. Gráfico esquemático de Sistemas de Drenaje en taludes. Tomado de Gonzalez (2002).

CAPÍTULO 6: MAPEO GEOLÓGICO

La Sierra de Marquesado posee una longitud de 11 km, ancho promedio de 1,1 km, y está conformada predominantemente por rocas calcáreas de edad cámbrica, y en menor medida rocas sinorogénicas clásticas de edad Neógena y cubierta detrítica de laderas y conos aluviales del Cuaternario. Presenta una orientación casi N-S, limitada en los extremos norte y sur por las Quebradas de Ullum y Zonda, y los Valles Tulum y Ullum-Zonda en los bordes oriental y occidental respectivamente. La sierra está directamente influenciada por el sistema de fallas de Precordillera Oriental (Bastías 1985), presenta estructuras asociadas a estos sistemas de fallamiento. Destaca su flanco oeste u occidental, afectado por la falla regional Villicum – Zonda, y su piedemonte oriental por la falla Marquesado, generando evidencia de actividad cuaternaria en toda la unidad morfoestructural (Figura 20).

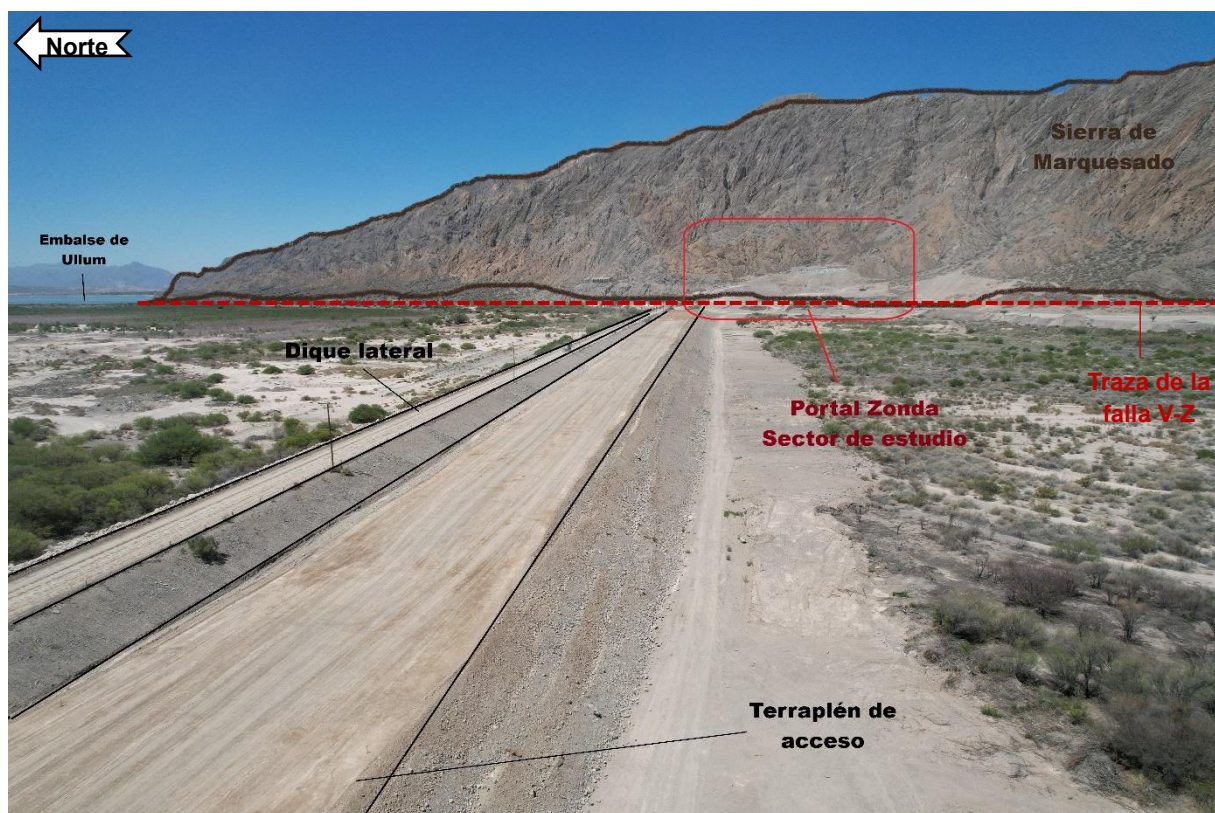


Figura 20. Vista general del sector de estudio "Portal Zonda", y sus áreas de influencia.

Relevamiento Geológico

Para lograr un relevamiento completo, se llevó a cabo un mapeo superficial de afloramientos que incluyen el análisis de la litología y estructuras presentes, considerando el grado de fracturación, intensidad de alteración y meteorización, y otras consideraciones en relación a factores y parámetros que permiten definir el comportamiento geomecánico del macizo, para luego poder correlacionarlo con el análisis realizado en el sondeo geotécnico y lograr una caracterización geotécnica unificada del macizo rocoso.

A continuación, se describen las zonas relevadas:

Área general

El sector de estudio se compone de afloramientos elegidos estratégicamente con el fin de relevar las zonas de influencia del túnel en construcción, incluyendo los principales taludes del portal, y sectores con evidencia del fallamiento regional. Uno de ellos fue definido como afloramiento principal sobre el portal, situado sobre la traza proyectada del túnel, y otros se corresponden con áreas hacia el norte y el sur del mismo.

En el área del portal del túnel aflora una secuencia conformada por la intercalación de caliza, con caliza margosa y margas, plegadas y fracturadas. La estructura general responde a un régimen tectónico compresivo, con fallas y plegamientos asociados.

La topografía manifiesta los planos de falla y el plegamiento debido a la erodabilidad de las rocas. Esto tiene una correlación directa con la competencia de las rocas, donde aquellas con menor resistencia se comportan como material dúctil o como medio de propagación de las estructuras (margas de coloración amarillenta), intercalada por roca más resistente (caliza color gris). En los distintos sectores se llevó a cabo el análisis y las observaciones en detalle (Figura 21).

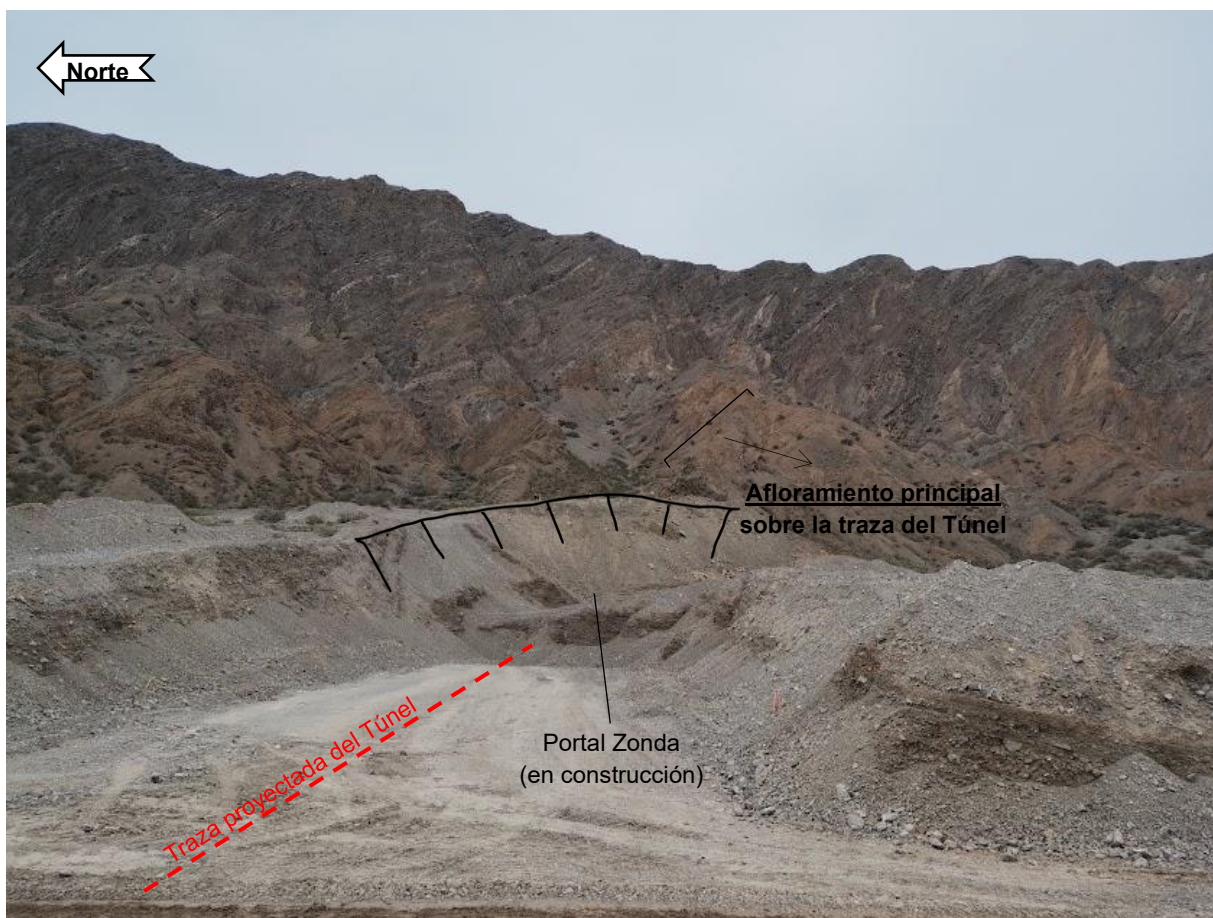


Figura 21. Imagen del sector de estudio, se muestra el portal Zonda en construcción.

Zona de falla Villicum-Zonda

Sector con afloramientos de roca intensamente fracturada. Se definieron 2 ventanas geotécnicas, cuyos resultados son expuestos más adelante. Se observa roca caliza gris a gris oscura formando bloques inmersos en material fino margoso y material triturado producto del estrés tectónico. Se observan planos de estratificación abiertos (diaclasamiento paralelo a la estratificación) y rellenos por material brechado, también planos de diaclasa abiertos generando desconfinamiento en el sector (Figura 22).

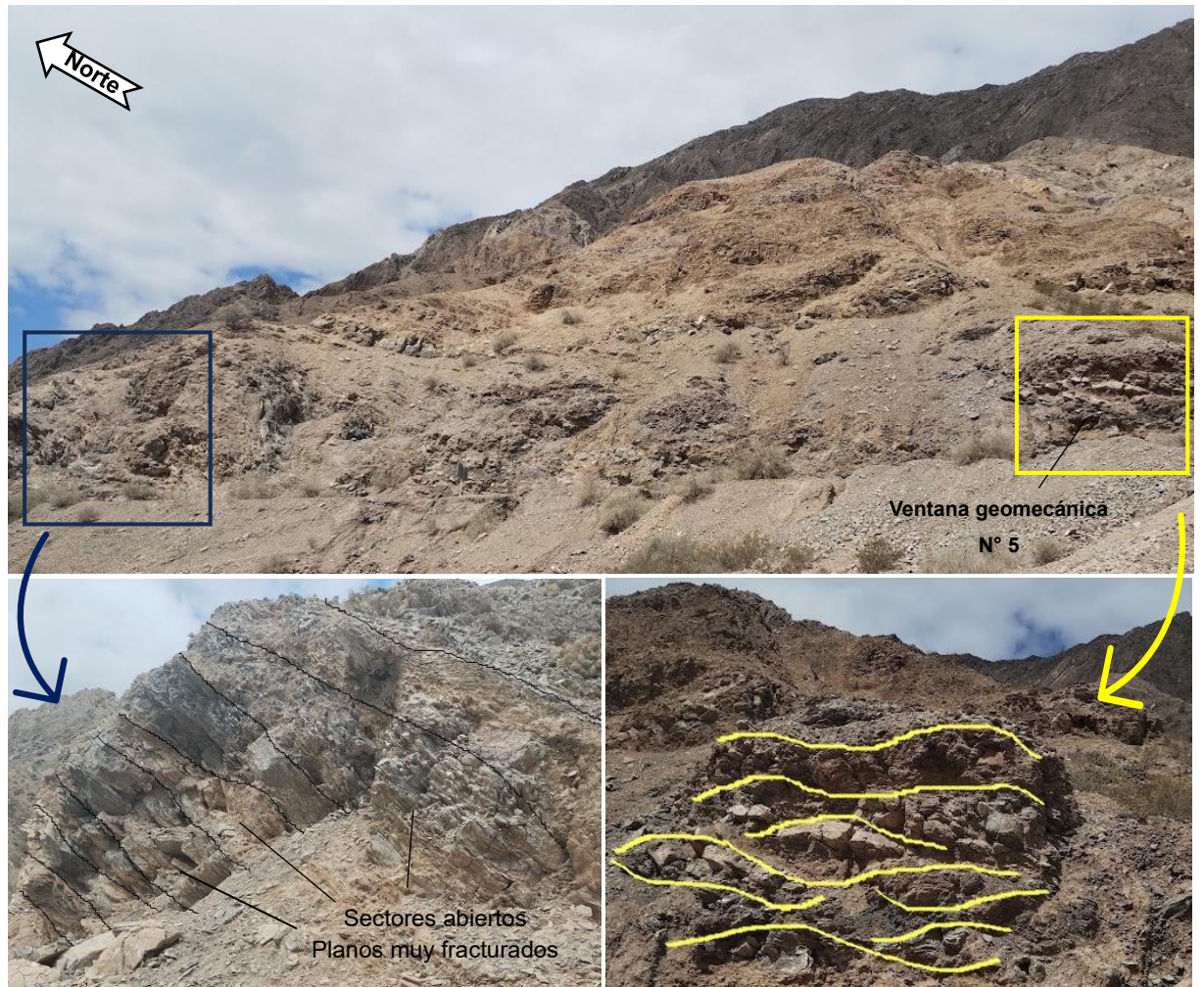


Figura 22. Afloramientos paralelos a la falla Villicum-Zonda. En imágenes de detalle se muestran sectores muy fracturados, y la estación geomecánica n°5 que evidencia la influencia del fallamiento regional.

En términos generales se trata de una intercalación de calizas con margas, las calizas forman bloques de hasta 1 m de espesor con formas predominantes de sigmoides o “bochones” rodeados por margas finamente estratificadas, de reducido espesor. Esta unidad litológica presenta intenso plegamiento y fracturación con presencia de material triturado, fallas menores que trituran los materiales circundantes, e implican inestabilidad generando vuelcos o colapsos de afloramiento. Muchos planos presentan yeso con crecimiento de cristales del orden del centímetro, observado en fracturas abiertas (Figura 23).

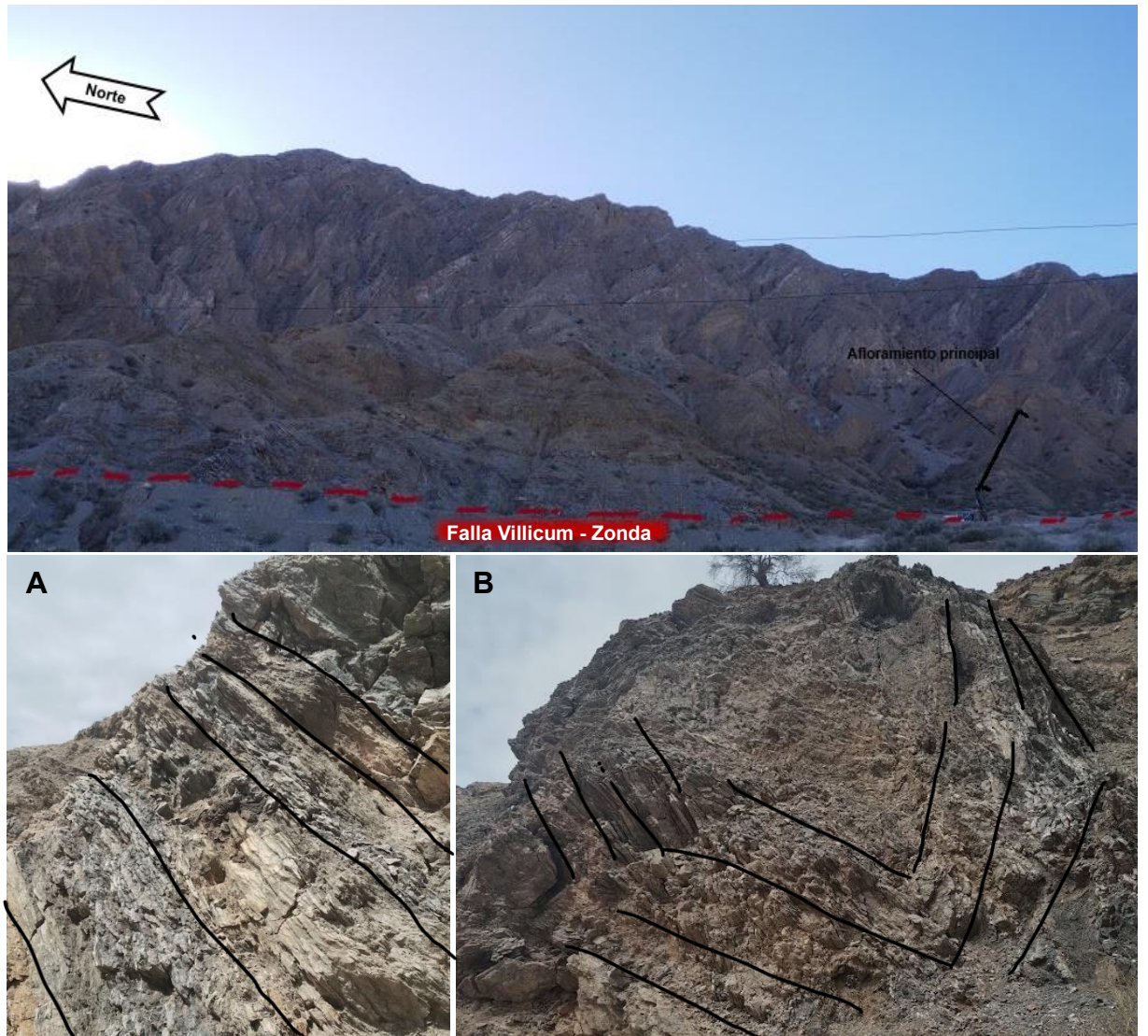


Figura 23. Vista general de los afloramientos afectados por el fallamiento. Se muestran imágenes de sectores muy fracturados y plegados (A y B), con fallas menores asociadas y un grado de meteorización alto debido al tectonismo. Se observan planos abiertos debido a la descompresión.

El fallamiento se ve reflejado en la condición estructural que presenta la zona de análisis. Niveles de margas se comportan como planos de debilidad aprovechados por el fracturamiento asociado a la falla principal, generando material muy disgregado y alterado. En sectores se observó la existencia de material carbonoso con coloración gris oscuro fuerte y textura terrosa fina, presente entre los planos de estratificación y localizado entre algunos planos de discontinuidad y zonas de mayor influencia por los planos de falla.

Los niveles margosos presentan mayor grado de plegamiento, se observan fallados y muy alterados, con una resistencia muy baja y un mayor grado de erosión (Figura 24).

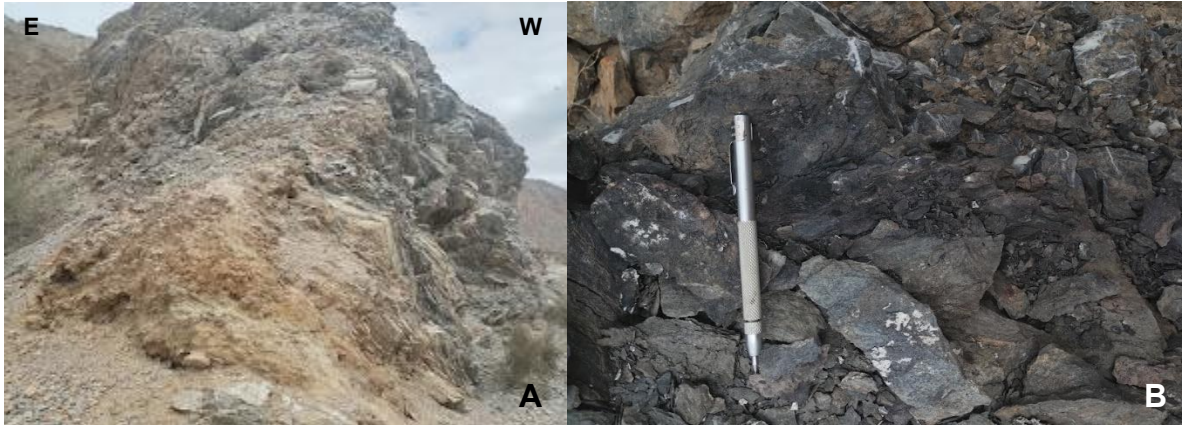


Figura 24. A) Margas muy fracturadas y meteorizadas. B) Material carbonoso fino, color gris oscuro.

Afloramiento principal sobre la traza del túnel

La litología predominante está integrada por calizas y calizas margosas, intercaladas con margas. Las calizas presentan espesores de estratificación que van de 30 a 50 cm, mientras que las margas se encuentran con una disposición casi laminar, condicionadas por planos de falla y fracturas que degradan el material generando un mayor grado de fracturamiento, alteración y meteorización (Figura 25).

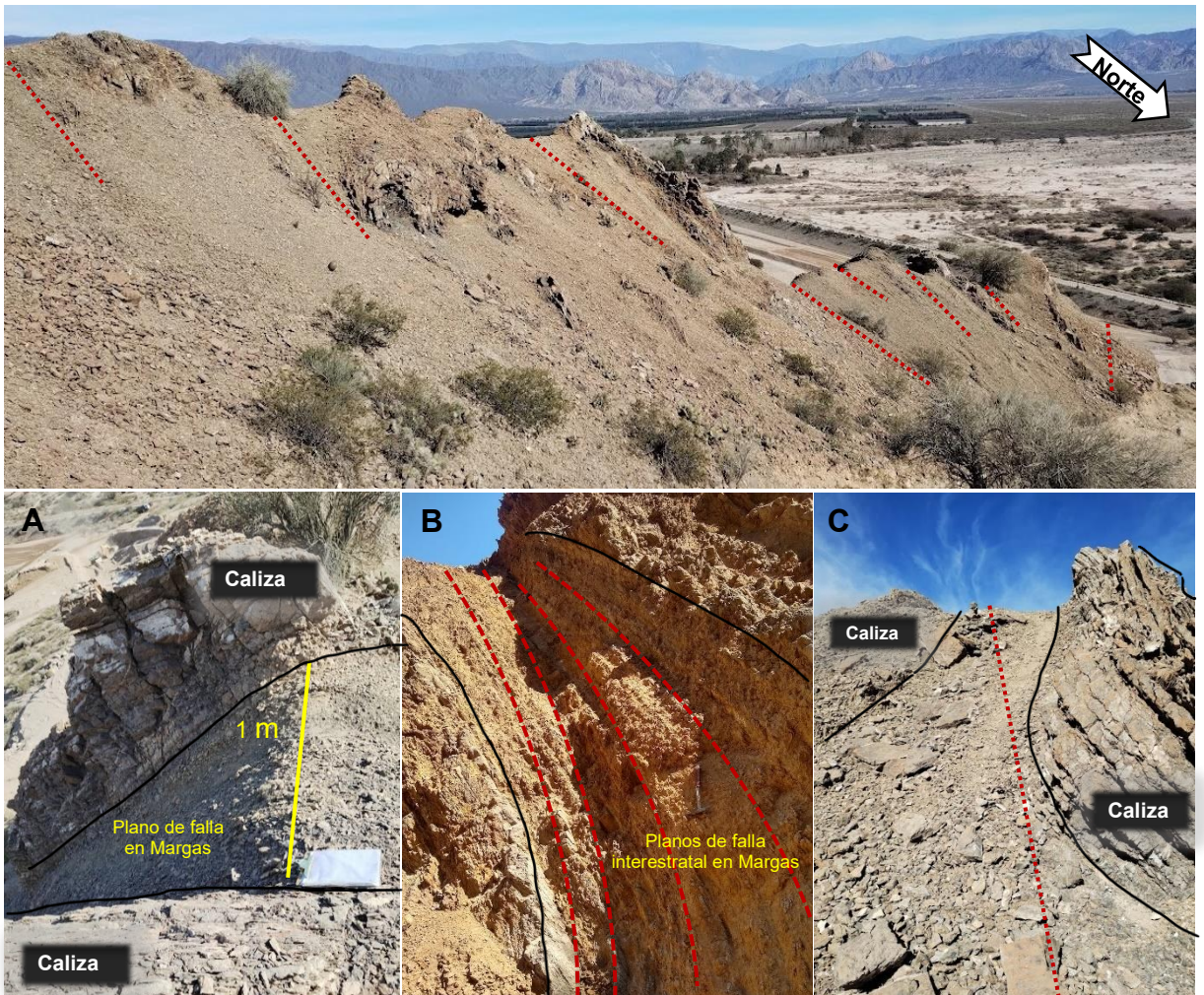


Figura 25. Afloramientos de la secuencia de pliegues descrita sobre la traza proyectada del túnel. Se muestran imágenes de detalle (A, B y C) de distintos sectores con planos de falla (líneas rojas) coincidentes con los estratos de margas.

Los planos de estratificación se encuentran abiertos en sectores. Otros planos de diaclasas presentan yeso como principal material de relleno (se observa desarrollo de cristales, yeso en costras, y niveles de yeso de 2 cm de espesor entre las margas), y otros con un material blando de colores blanco-amarillentos con características de minerales arcillosos. En algunos planos abunda la hematita, llegando en sectores a formar concreciones y acumulaciones de hierro (Figura 26).



Figura 26. Concreciones y acumulaciones de hematita en estratos de calizas margosas.

La estructura presente se describe como una secuencia de rocas plegadas, formada por pliegues anticlinales y sinclinales dispuestos de manera contigua y afectados por planos de fractura. A continuación, la Figura 27 muestra las estructuras relevadas en un perfil este – oeste en el afloramiento principal definido sobre la traza del túnel en construcción.



Figura 27. Secuencia de fotografías que muestran las estructuras de los afloramientos sobre la traza del túnel proyectado. De este a oeste se corresponden con la numeración consecutiva 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Se manifiesta una secuencia buzante hacia el oeste, dada por rocas plegadas afectados por fallas menores y fallas interestratales en planos de debilidad correspondientes a los niveles margosos. Con líneas negras se delimita la estratificación, y con línea roja discontinua las fallas en los estratos margosos.

Los datos estructurales que respaldan a las descripciones realizadas sobre las estructuras se muestran en el corte geológico - estructural (Figura 28). Se observa en los núcleos de los pliegues, la presencia de material carbonoso con coloración gris oscuro fuerte y textura terrosa fina.

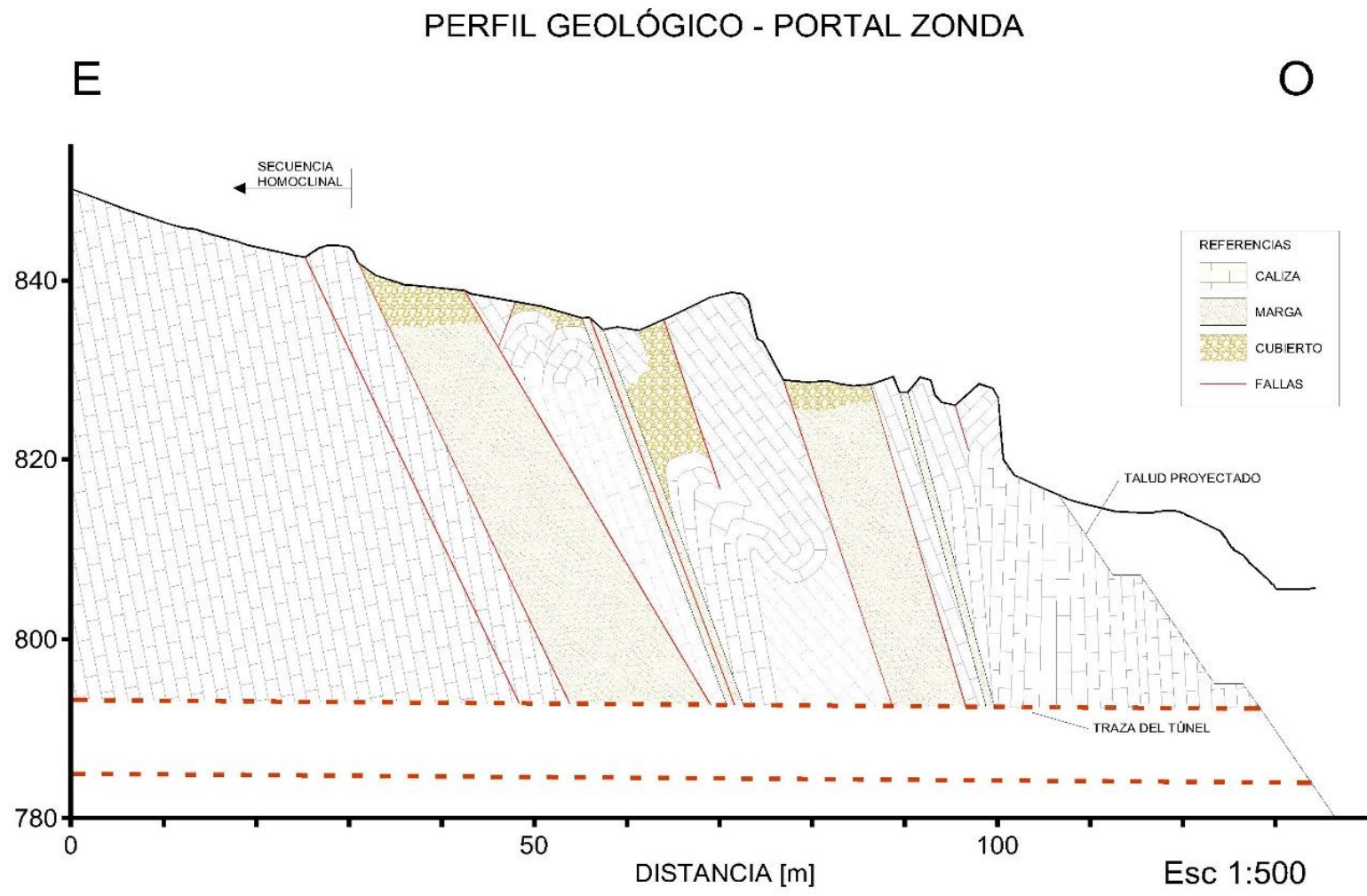


Figura 28. Corte geológico del perfil este-oeste realizado sobre los afloramientos superiores de la traza proyectada del túnel. Se observan las estructuras principales, planos de falla, estratificación y secuencia litológica. Las estructuras plegadas no se logran visualizar por cuestiones de escala.

Estudio morfométrico de las cuencas involucradas

El análisis corresponde al estudio básico de las cuencas involucradas, consideradas así por su ubicación y estrecho vínculo con los taludes analizados. Se ubican a la margen izquierda y derecha del túnel proyectado, y se consideran como cuenca norte y sur respectivamente (Figura 29).

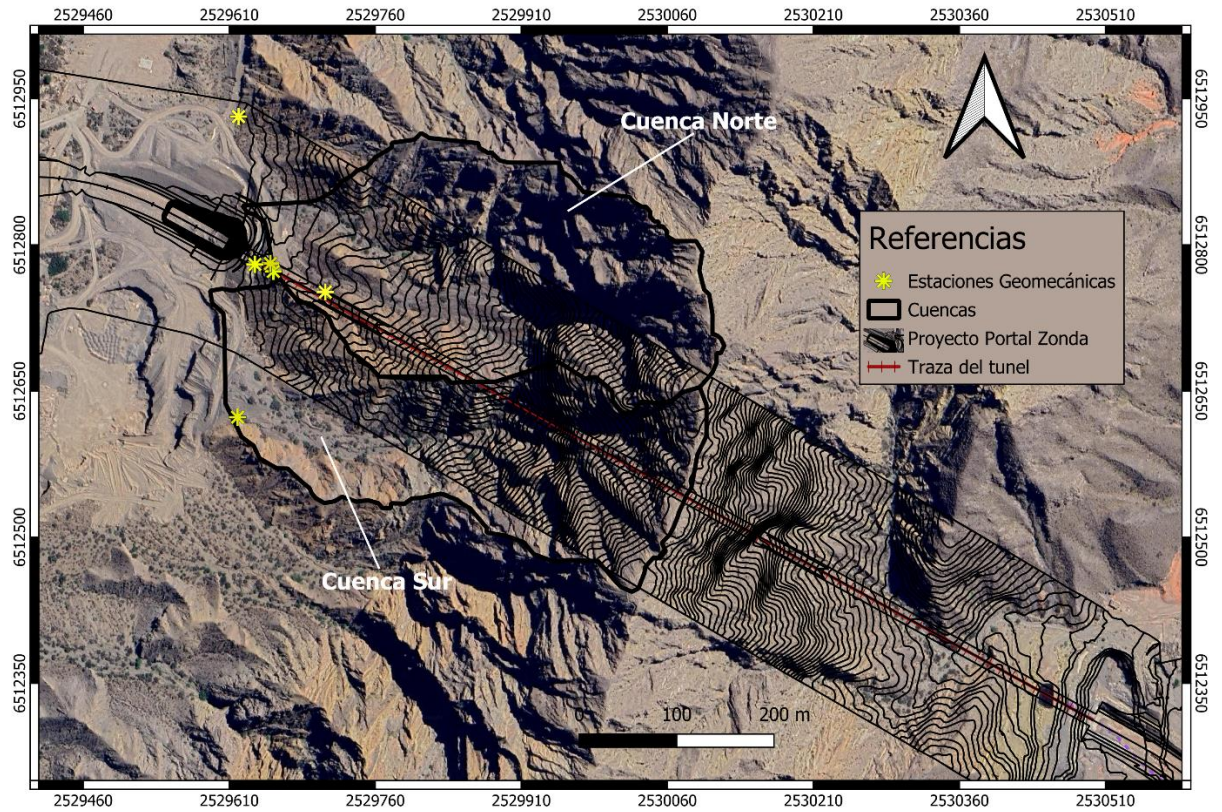


Figura 29. Imagen general de las cuencas involucradas. Sobre imagen satelital de Google Earth, se observa la Sierra de Marquesado con ambas cuencas delimitadas.

El análisis consiste en obtener parámetros básicos de las cuencas, y calcular algunos índices morfométricos que permitan describir de forma cualitativa y cuantitativa cada una de ellas, con el fin de conocer sus características y propiedades, y lograr un análisis básico para comprender el comportamiento de la misma.

Cuenca Norte

La cuenca presenta un escurrimiento general hacia el oeste, dado por el drenaje del cauce principal y de los tributarios que lo interceptan con ángulos entre 45° y 60° . Tiene una superficie de 87.511 m^2 , 477 m de longitud y un ancho medio de 183 m . El punto de altura máxima es de 1088 m , y el de altura mínima de 816 m , con un desnivel asociado de 272 m , y pendiente media de la cuenca de $41,7 \%$ (ver Figura 30).



Figura 30. Imagen de la Cuenca Norte, nombre asignado por su ubicación en relación al portal del túnel proyectado. Sobre imagen Google Earth.

Se clasificó según Strahler (1952), como una cuenca de orden 4, con un total de 267 cauces que suman una longitud de 4.911 m y le otorgan un buen drenaje. La sinuosidad del cauce principal es baja, siendo la morfología del mismo rectilínea. El diseño de la red de drenaje es subdendrítico.

Con base en los resultados de los parámetros morfométricos, la cuenca presenta densidad media, que indica una buena dinámica de escurrimiento con la evacuación de agua por unidad de tiempo que se relaciona también con un alto grado de integración y erodabilidad.

En relación con los índices de compacidad y circularidad, la cuenta tiene forma oval a oval, ligeramente alargada con una producción sostenida de caudales moderada y un potencial a crecientes moderado a alto.

La relación de longitud indica mayor energía concentrada bruscamente. El Coeficiente de Almacenamiento Hídrico es un parámetro hidrogeomorfológico relacionado con el tiempo en el que alcanza el caudal máximo, indicador de torrencialidad de la cuenca, para un valor de $0,648$ el almacenamiento hídrico del cauce es bajo.

La caracterización cualitativa se llevó a cabo mediante el cálculo y análisis de los parámetros morfométricos de la cuenca, los cuales son divididos en básicos y derivados, cuyas ecuaciones y resultados son expresados a continuación (Figura 31 y 32).

Índice de compacidad	$Kc = 0,28(P/\sqrt{A})$	(Gravelius, 1914)
Índice de circularidad	$Rc = 4\pi A/P^2$	(Miller, 1953)
Relación de elongación	$Re = (\sqrt{4A/\pi})/L$	(Schumm, 1956)
Factor de forma	$Ff = A/L^2$	(Horton, 1932)
Sinuosidad del cauce	$S = Lcp/L$	
Ancho medio	$Wm = A/L$	
Desnivel de cuenca	$Hr = H - h$	(Hadley y Schumm, 1961)
Razón de relieve	$Rr = Hr/L$	(Schumm, 1956)
Número de rugosidad de Melton	$MRN = Hr/A^{0,5}$	(Melton, 1965)
Densidad de drenaje	$Dd = Ltc/A$	(Horton, 1932)
Frecuencia de cursos de n orden	$Fn = \sum N_n/A$	(Horton, 1932)
Textura de drenaje	$Td = \sum N_n/P$	(Horton, 1945)
Rugosidad de cuenca	$Rd = Dd/Hr$	
Relación de bifurcación	$Rb = N_{n-1}/N_n$	(Schumm, 1956)
Relación de Longitud	$R = L_n/L_{n-1}$	(Horton 1945)
$RHO = R/Rb$ (Horton 1945)		
Coeficiente de almacenamiento hídrico (RHO)		

Figura 31. Fórmulas de los parámetros básicos y derivados del análisis morfométrico. Tomado de apunte de clase teórica de la materia "Morfometría y análisis de cuencas" de la FCEfyN de la UNSJ.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS BÁSICOS		PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DERIVADOS		
A : Area (m2)	87511,63	Kc : Índice de Compacidad	1,259	
P : Perímetro (m)	1330	Rc : Índice de Circularidad	0,621	
L : Longitud de la Cuenca (m)	477,15	Re : Relación de elongación	0,700	
O : Orden de la Cuenca	4	Ff : Factor de forma	0,384	
On : Orden del curso	4	S : Sinuosidad del cauce	1,004	
H : Altura máxima (m)	1088	Wm : Ancho medio	183,4	
h : Altura mínima (m)	816	Hr : Densidad de la Cuenca	272	
Ltc : Longitud total de cauces (m)	4911,17	Rr : Razón del Relieve	0,570	
Lcp : Longitud del Cauce principal (m)	479,2	Nº de Rugosidad de Melton	0,919	
RED DE DRENAJE			Dd : Densidad de drenaje	5,612
Orden	Longitud (m)	Cauces	Fn : Frecuencia de cursos de Orden n	3068,97
1	2815,534	137	Td : Textura de Drenaje	200,75
2	932,926	60	Rd : Rugosidad de la cuenca	0,021
3	526,536	33	Rb : Relación de Bifurcación	1,66
4	636,171	37	R : Relación de Longitud	1,08
Total	4911,168	267	RHO : Coeficiente de almacenamiento Hídrico	0,648
Principal	479,2	1		

Figura 32. Tabla de resultados.

Cuenca Sur

La cuenca presenta un escurrimiento general hacia el oeste, con una leve tendencia hacia el noroeste dada por el drenaje del cauce principal. Los cauces tributarios interceptan con ángulos entre 45° y 60° . Tiene una superficie de 78.345 m^2 , 512 m de longitud y un ancho medio de 152 m . El punto de altura máxima es de 1085 m , y el de altura mínima de 810 m , con un desnivel asociado de 275 m , y pendiente media de $43,2 \%$ (ver Figura 33).



Figura 33. Imagen de la Cuenca Sur, nombre asignado por su ubicación en relación al portal del túnel proyectado. Sobre imagen Google Earth.

Se clasificó según Strahler (1952), como una cuenca de orden 5, con un total de 230 cauces que suman una longitud de 4.344 m y le otorgan un buen drenaje a la cuenca. La sinuosidad del cauce principal tiene valor cercano a la unidad, indicando un canal con tendencia rectilínea con escasa sinuosidad. El diseño de la red de drenaje es subdendrítico.

Con base en los resultados de los parámetros morfométricos, la cuenca presenta densidad media, que indica una buena dinámica de escurrimiento con la evacuación de agua por unidad de tiempo que se relaciona también con un alto grado de integración y erodabilidad.

En relación con los índices de compacidad y circularidad, la cuenca tiene forma oval redonda a oval oblonga, alargada con una producción sostenida de caudales moderada y un potencial a crecientes moderado a alto.

La relación de longitud indica mayor energía concentrada bruscamente. El Coeficiente de Almacenamiento Hídrico es un parámetro hidrogeomorfológico relacionado con el tiempo en el que alcanza el caudal máximo, indicador de torrencialidad de la cuenca, para un valor de $0,48$ el almacenamiento hídrico del cauce es bajo.

La caracterización cualitativa se llevó a cabo mediante el cálculo y análisis de los parámetros morfométricos de la cuenca, los cuales son divididos en básicos y derivados, cuyas ecuaciones y resultados son expresados a continuación (Figura 34 y 35).

Índice de compacidad	$Kc = 0,28(P/\sqrt{A})$	(Gravelius, 1914)
Índice de circularidad	$Rc = 4\pi A/P^2$	(Miller, 1953)
Relación de elongación	$Re = (\sqrt{4A/\pi})/L$	(Schumm, 1956)
Factor de forma	$Ff = A/L^2$	(Horton, 1932)
Sinuosidad del cauce	$S = Lcp/L$	
Ancho medio	$Wm = A/L$	
Desnivel de cuenca	$Hr = H - h$	(Hadley y Schumm, 1961)
Razón de relieve	$Rr = Hr/L$	(Schumm, 1956)
Número de rugosidad de Melton	$MRN = Hr/A^{0,5}$	(Melton, 1965)
Densidad de drenaje	$Dd = Ltc/A$	(Horton, 1932)
Frecuencia de cursos de n orden	$Fn = \sum N_n/A$	(Horton, 1932)
Textura de drenaje	$Td = \sum N_n/P$	(Horton, 1945)
Rugosidad de cuenca	$Rd = Dd/Hr$	
Relación de bifurcación	$Rb = N_{n-1}/N_n$	(Schumm, 1956)
Relación de Longitud	$R = L_n/L_{n-1}$	(Horton 1945)
$RHO = R/Rb$ (Horton 1945)		
Coficiente de almacenamiento hídrico (RHO)		

Figura 34. Fórmulas de los parámetros básicos y derivados del análisis morfométrico. Tomado de apunte de clase teórica de la materia "Morfometría y análisis de cuencas" de la FCFyN de la UNSJ.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS BÁSICOS		PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DERIVADOS	
A : Area (m2)	78345,70	Kc : Índice de Compacidad	1,476
P : Perímetro (m)	1475,64	Rc : Índice de Circularidad	0,452
L : Longitud de la Cuenca (m)	512,28	Re : Relación de elongación	0,617
O : Orden de la Cuenca	5	Ff : Factor de forma	0,299
On : Orden del curso	5	S : Sinuosidad del cauce	1,22
H : Altura máxima (m)	1085	Wm : Ancho medio	152,94
h : Altura mínima (m)	810	Hr : Densidad de la Cuenca (m)	275
Ltc : Longitud total de cauces (m)	4344,88	Rr : Razón del Relieve	0,537
Lcp : Longitud del Cauce principal (m)	624,12	Nº de Rugosidad de Melton	0,982
RED DE DRENAJE		Dd : Densidad de drenaje	5,58
Orden	Longitud (m)	Cauces	Fn : Frecuencia de cursos de Orden n
1	2517,29	118	2948,72
2	735,75	51	Td : Textura de Drenaje
3	607,12	38	156,46
4	119,43	9	Rd : Rugosidad de la cuenca
5	365,30	14	0,020
Total	4344,88	230	Rb : Relación de Bifurcación
Principal	624,12	1	2,13
			R : Relación de Longitud
			1,02
			RHO : Coeficiente de almacenamiento Hídrico
			0,480

Figura 35. Tabla de resultados

Para finalizar con el capítulo de “Mapeo Geológico”, con las observaciones y datos relevados durante los trabajos en campo, se logró realizar un mapa geológico (Figura 36) que manifiesta la morfología de los principales lineamientos y red de fracturas que gobiernan el comportamiento del macizo rocoso en el área.

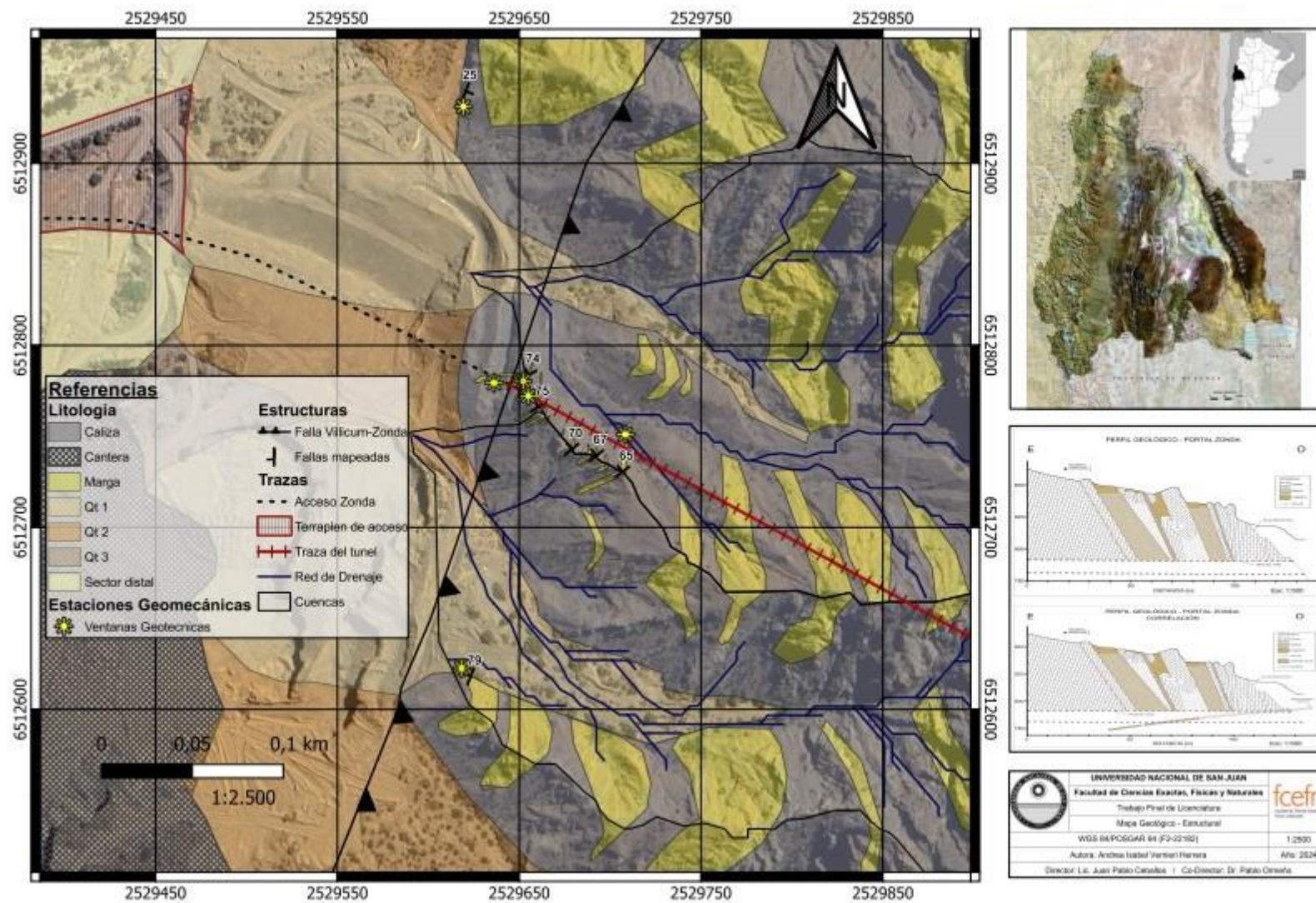


Figura 36. Mapa Geológico del sector de estudio. Incluye perfil estructural descripto.

Relevamiento Geomecánico

Se realizó una caracterización del macizo rocoso con base en la toma de datos, análisis, y observaciones realizadas en ventanas geotécnicas seleccionadas estratégicamente en diferentes sectores, con el fin de relevar el estado del macizo, y lograr un registro valioso de las características geotécnico-estructural que condicionan al macizo rocoso.

La Figura 37 muestra las ventanas geomecánicas donde se realizaron los levantamientos. Las primeras corresponden a la zona del portal del túnel en construcción, sobre el talud frontal, a distintas cotas con el fin de registrar un posible cambio de las condiciones del macizo en profundidad. Otro punto fue elegido sobre el afloramiento superficial paralelo a la traza del túnel y, por último, hacia el norte y sur del afloramiento principal, sectores que manifiestan de manera clara la influencia del fallamiento regional sobre el borde occidental de la sierra.



Figura 37. Vista general del portal Zonda. Se observan los principales taludes (en construcción) y se señalan las estaciones geomecánicas relevadas.

El siguiente cuadro resume las características de los taludes, y a continuación se adjuntan las planillas de los relevamientos correspondientes a las ventanas geomecánicas (Figura 38).

Ventana geomecánica	Talud	Rumbo	Buzamiento
1	Excavación mecánica	208°	78°
2	Excavación mecánica	208°	40°
3	Excavación mecánica	208°	40°
4	Natural	336°	60°
5	Natural	8°	89°
6	Natural	301°	80°

Figura 38. Tabla de datos generales utilizados en análisis de las ventanas geotécnicas.

Estación Geomecánica 1 – Talud Frontal nivel 1 (825 m.s.n.m)

Afloramiento más superficial correspondiente al talud frontal, en cota 825 msnm. Presenta planos de estratificación, 4 sistemas de diaclasas y un plano de falla. Los planos de estratificación (S_0) son planos ondulados, con material fino entre ellos (yeso y minerales arcillosos). Se encuentran limitados por 4 sistemas de diaclasas, donde D_1 presenta sectores con abundante hematita, D_2 y D_3 son subparalelos entre sí, con pátinas color ocre por presencia de óxidos y limonita. Por último, el sistema D_4 presenta calcita como relleno.

Se observa un macizo muy fracturado, con movimientos condicionados por niveles margosos más dúctiles, acompañados de materiales más blandos como presencia de yeso y minerales arcillosos. Las margas estratificadas se presentan más alteradas, muy fracturadas siguiendo principalmente planos de fallas interestratales, se describe ese tipo de plano F que presenta fallas asociadas observándose como “ramas” de este plano principal (Figura 39 y 40).

La detallada caracterización geotécnica que se realizó con los parámetros de calidad del macizo rocoso basada en el Índice de Clasificación Geomecánica SMR (Slope Mass Rating), dio como resultado condiciones, se estima el valor promedio del GSI. Note que la tabla no aplica a fallas controladas estructuralmente. Donde planos estructurales débiles están presentes en una dirección desfavorable con respecto a la excavación, estos dominarán el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de falla son propensas a la alteración como resultado de cambios de humedad que puede reducirse cuando el agua está presente. Cuando trabajamos en roca regular o mala calidad cambian las condiciones por el cambio de humedad. La presión del agua es tratada por análisis de esfuerzos efectivos.

La detallada caracterización geotécnica que se realizó con los parámetros de calidad del macizo rocoso basada en el Índice de Clasificación Geomecánica SMR (Slope Mass Rating), dio como resultado condiciones de roca clase Media (tipo III) para el macizo, describiéndolo como un macizo rocoso Normal, parcialmente estable. Este análisis se complementa con las observaciones cualitativas que se obtienen con el Índice de Resistencia Geológica GSI (Geological Strength Index), registrando la siguiente situación:

INDICE DE ESFUERZO GEOLOGICO PARA ROCAS UNIDAS (HOEK & MARINOS, 2000)		CONDICIONES DE SUPERFICIE	
Desde la litología, estructura y condiciones de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio del GSI. No intentar ser muy preciso. Un rango de 33 a 37 es más real que tomar un GSI de 35. Note que la tabla no aplica a fallas controladas estructuralmente. Donde planos estructurales débiles están presentes en una dirección desfavorable con respecto a la excavación, estos dominarán el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de falla son propensas a la alteración como resultado de cambios de humedad que puede reducirse cuando el agua está presente. Cuando trabajamos en roca regular o mala calidad cambian las condiciones por el cambio de humedad. La presión del agua es tratada por análisis de esfuerzos efectivos.		MUY BUENA	MUY POBRE
		Superficie muy rugosa, no meteorizadas, frescas	Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorización y rellenos compactos.
		BUENA	MUY BUENA
		Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, manchadas con hierro	Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorización y rellenos compactos.
		REGULAR	MUY BUENA
		Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas	Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorización y rellenos de arcillas suaves.
		POBRE	MUY POBRE
		Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorización y rellenos compactos.	Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorización y rellenos de arcillas suaves.
ESTRUCTURA		DECRECE LA CALIDAD DE LA SUPERFICIE	
	INTACTA O MASIVA Rocas intactas o masivas in-situ, rocas con discontinuidades amplias y espaciadas	90	N/A
	FRACTURADA Macizo rocoso con bloques enclavados, bloques cúbicos formados por las intersecciones de sistemas de discontinuidades	80	70
	MUY FRACTURADA Macizo perturbado con bloques entrabados y angulares formados por la intersección de 4 o más sistemas	70	60
	FRACTURADA/PERTURBADA/SORDIDA Macizo plegado formado por bloques angulares productos de la intersección de varios sistemas de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificación	60	50
	DISREGGADO Pobremente enclavado, macizo altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados	50	40
	LAMINADA/FOJADA Se carece de bloques debido al débil material en los planos de esquistosidad y cizalla	40	30
		30	20
		20	10
		N/A	N/A
		N/A	N/A
		N/A	N/A

Figura 39. Tabla de GSI. Se obtiene un valor de 40 para la estación geomecánica 1.



Figura 40. Imagen de la Estación Geomecánica 1. En la fotografía superior se señala su ubicación.

El índice GSI muestra un rango de valores cercanos a los 40, describiendo un macizo muy fracturado, perturbado, con superficies de las discontinuidades muy meteorizadas. Se complementó con el uso del software DIPS para el análisis estructural de datos geológicos basados en su orientación, mediante proyección estereográfica (ver Figuras 41 a 44).

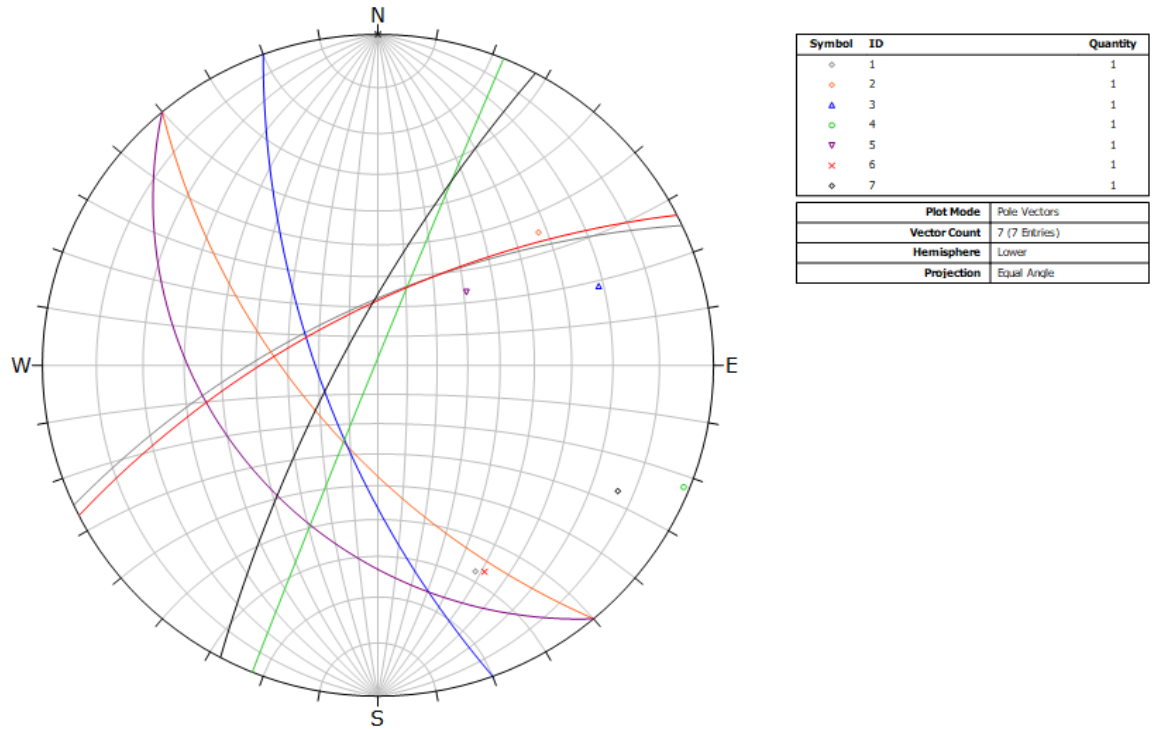


Figura 41. Ploteo de planos relevados en la estación geomecánica 1. Con negro se representa el talud.

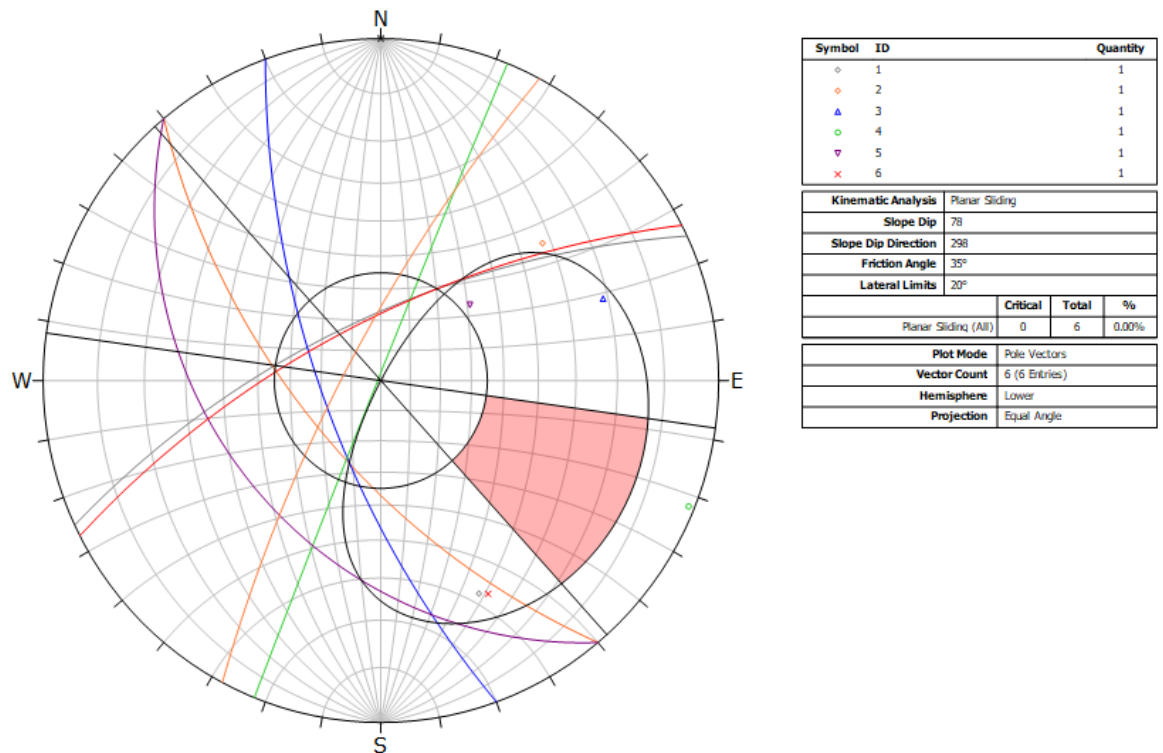


Figura 42. Gráfico del análisis cinemático para deslizamientos planares. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja la zona de planos críticos con posibilidad de rotura planar.

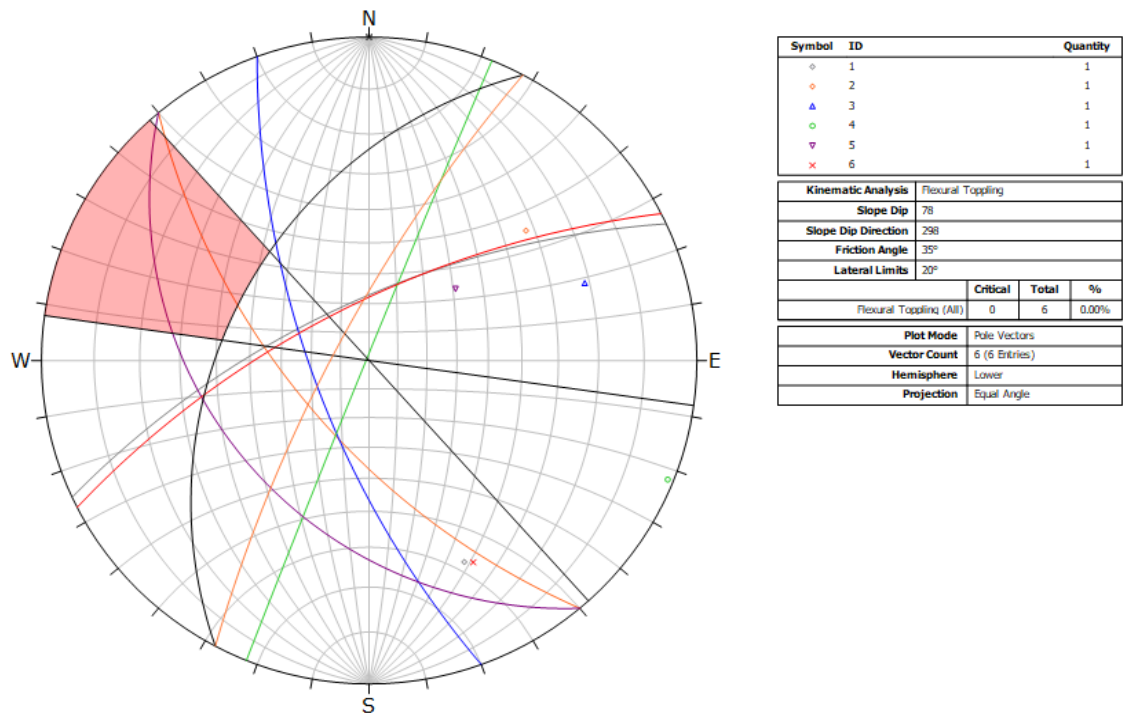


Figura 43. Gráfico del análisis cinemático para deslizamientos por flexión. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja la zona de planos críticos con posibilidad de caída por flexión.

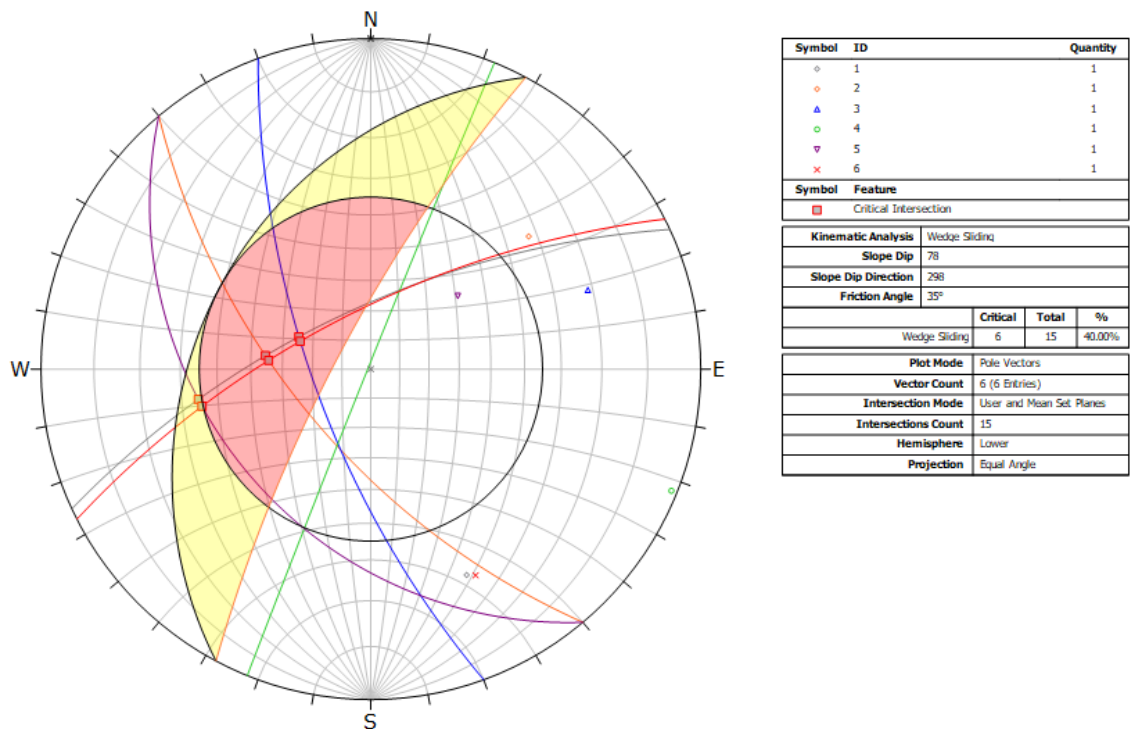


Figura 44. Gráfico del análisis cinemático para desprendimientos por cuña. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja las intersecciones de planos críticos con posibilidad de generar cuñas.

Los resultados no indican riesgo de vuelco en los planos de estratificación, sin embargo debe considerarse posible debido a la disposición de los mismos, y dicho riesgo se incrementa con la presencia de fallas interestratales y por la intercalación de material fino que empeora la condición. Las diaclasas D1 y D4 tienen rumbo paralelo, y difieren en ángulo y dirección de inclinación, formando cuñas de 62° con el plano D3. Entre D2 y D3, se forman cuñas de 41°.

Estación Geomecánica 2 – Talud Frontal nivel 2 (815 m.s.n.m)

Afloramiento situado en el talud frontal, en cota 815 msnm. Presenta planos de estratificación, 4 sistemas de diaclasas y un plano de falla. Los planos de estratificación son en general ondulados, se observa una intercalación de caliza con margas, estas últimas más meteorizadas y disgregadas, generando planos desfavorables frente a los movimientos generados por estructuras mayores, debido a la ductilidad de los materiales. Algunos planos de diaclasa contienen limonita y hematita, otros, yeso (Figura 45 y 46).

La detallada caracterización geotécnica que se realizó con los parámetros de calidad del macizo rocoso basada en el Índice de Clasificación Geomecánica SMR (Slope Mass Rating), dio como resultado condiciones de roca clase Media (tipo III) para el macizo, describiéndolo como un macizo rocoso Normal, parcialmente estable. Este análisis se complementó con las observaciones cualitativas que se obtienen con el Índice de Resistencia Geológica GSI (Geological Strength Index), registrando la siguiente situación:

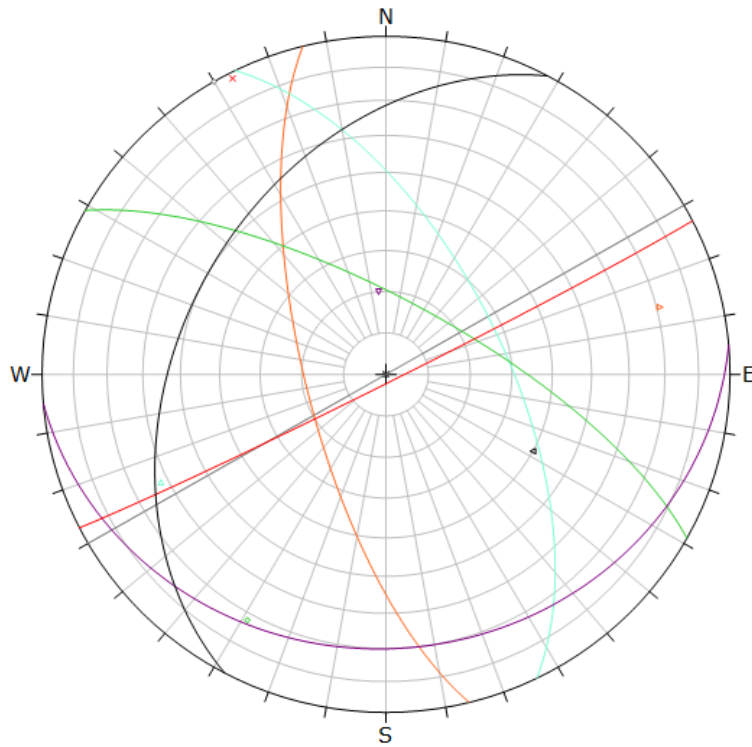
INDICE DE ESFUERZO GEOLOGICO PARA ROCAS UNIDAS (HOEK & MARINOS, 2000)		CONDICIONES DE SUPERFICIE	
Desde la litología, estructura y condiciones de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio del GSI. No intentar ser muy preciso. Un rango de 33 a 37 es mas real que tomar un GSI de 35. Note que la tabla no aplica a fallas controladas estructuralmente. Donde planos estructurales debiles estan presentes en una direccion desfavorable con respecto a la excavacion, estos dominaran el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de falla son propensas a la alteracion como resultado de cambios de humedad que puede reducirse cuando el agua esta presente. Cuando trabajamos en roca regular o mala calidad cambian las condiciones por el cambio de humedad. La presion del agua es tratada por analisis de esfuerzos efectivos.		MUY BUENA Superficie muy rugosa, no meteorizadas, frescas	MUY BUENA Superficie muy rugosa, ligeramente meteorizada, manchada con hierro
ESTRUCTURA		BUENA Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas y alteradas	REGULAR Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas
		POBRE Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorización y rellenos compactos.	MUY POBRE Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorización y rellenos de arcilla suaves.
INTACTA O MASIVA Rocas intactas o masivas in-situ, rocas con discontinuidades amplias y espaciadas	90		
FRACTURADA Macizo rocoso con bloques enclavados, bloques cubicos formados tres intersecciones de sistemas de discontinuidades	70		
MUY FRACTURADA Macizo perturbado con bloques entrelazados y angulares formados por la intersección de 4 o mas sistemas	50		
FRACTURADA/PERTURBADA/SORDIDA Macizo plegado formado por bloques angulares productos de la intersección de varios sistemas de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificación	40		
DISGREGADO Pobremente enclavado, macizo altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados	20		
LAMINADA/FOJADA Se carece de bloques debido al debil material en los planos de esquistosidad y cizalla	10		

Figura 45. Tabla de GSI. Se obtiene un valor de 40 para la estación geomecánica 2.

El índice GSI muestra un rango de valores cercanos a los 40, describiendo un macizo muy fracturado, perturbado, con superficies de las discontinuidades muy meteorizadas. Se complementó con el uso del software DIPS para el análisis estructural de datos geológicos basados en su orientación, mediante proyección estereográfica (ver Figura 47 a 50).



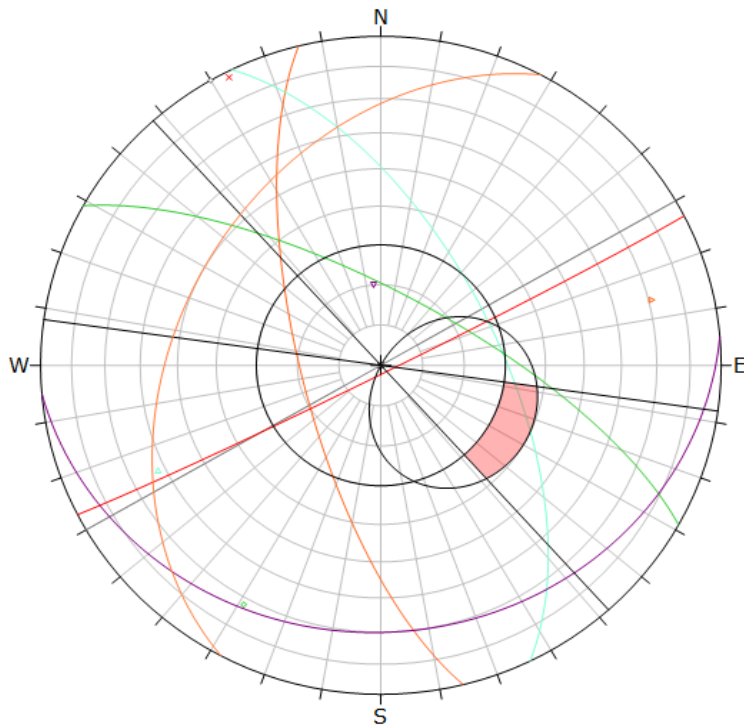
Figura 46. Imagen de la Estación Geomecánica 2. En la fotografía superior se señala su ubicación.



Symbol	ID	Quantity
◇	1	1
▷	2	1
△	3	1
◇	4	1
▽	5	1
×	6	1
◄	7	1

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	7 (7 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 47. Ploteo de planos relevados en la estación geomecánica 2. Con negro se representa el talud.



Symbol	ID	Quantity
◇	1	1
▷	2	1
△	3	1
◇	4	1
▽	5	1
×	6	1

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	40
Slope Dip Direction	298
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	0	6	0.00%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	6 (6 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 48. Gráfico del análisis cinemático para deslizamientos planares. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja la zona de planos críticos con posibilidad de rotura planar.

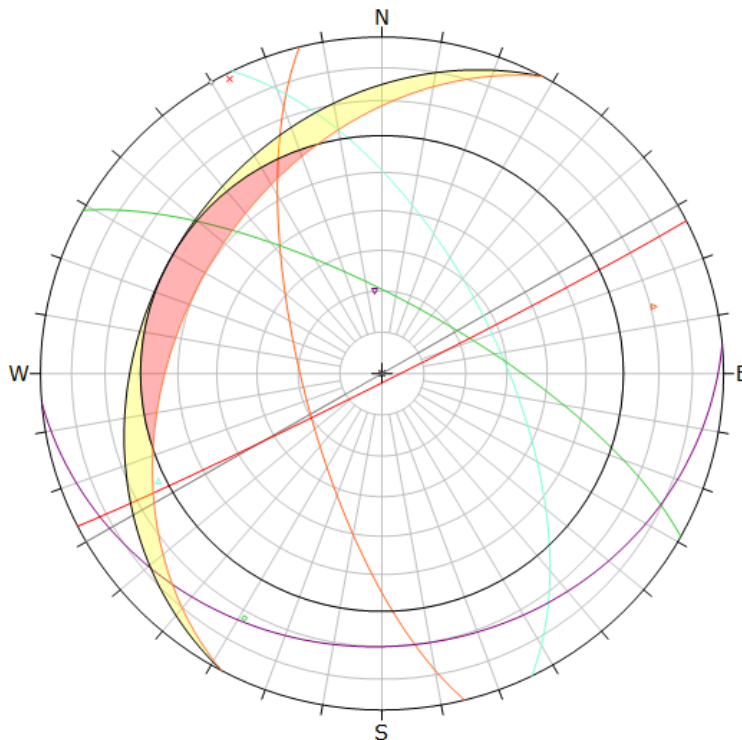


Symbol	ID	Quantity
○	1	1
▷	2	1
△	3	1
◇	4	1
▽	5	1
×	6	1

Kinematic Analysis		Flexural Toppling		
Slope Dip	40			
Slope Dip Direction	298			
Friction Angle	30°			
Lateral Limits	20°			
	Critical	Total	%	
Flexural Toppling (All)	0	6	0.00%	

Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count	6 (6 Entries)			
Hemisphere	Lower			
Projection	Equal Area			

Figura 49. Gráfico del análisis cinemático para deslizamientos por flexión. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja la zona de planos críticos con posibilidad de caída por flexión.



Symbol	ID	Quantity
○	1	1
▷	2	1
△	3	1
◇	4	1
▽	5	1
×	6	1

Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip	40			
Slope Dip Direction	298			
Friction Angle	30°			
	Critical	Total	%	
Wedge Sliding	0	15	0.00%	

Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count	6 (6 Entries)			
Intersection Mode	Grid Data Planes			
Intersections Count	15			
Hemisphere	Lower			
Projection	Equal Area			

Figura 50. Gráfico del análisis cinemático para desprendimientos por cuña. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja las intersecciones de planos críticos con posibilidad de generar cuñas.

Se indica probable vuelco de los planos de estratificación (planos desfavorecidos por la presencia de fallas interestratales, y la intercalación de calizas con margas), pero la condición mejora con la inclinación del talud (40°). No se encuentran intersecciones críticas para formación de cuñas entre planos de discontinuidad.

Estación Geomecánica 3 – Talud Frontal nivel 3 (805 m.s.n.m)

Afloramiento correspondiente al talud frontal, en cota 805 msnm. Se analizan por separado los planos de estratificación tanto de las calizas como de las margas, ya que se observa un afloramiento con predominio de intercalación de calizas dispuestas como “bochones” con espesores de 20 cm, con margas muy meteorizadas con potencias de 80 cm a 1 m. Se observa la presencia de 4 sistemas de diaclasas, D₁ y D₂ formando cuñas. D₃ se presenta en planos desfavorables al talud (generan vuelco), y D₄ con calcita y costras de yeso (Figura 51 y 52). La detallada caracterización geotécnica que se realizó con los parámetros de calidad del macizo rocoso basada en el Índice de Clasificación Geomecánica SMR (Slope Mass Rating), dio como resultado condiciones de roca clase Media (tipo III) para el macizo, describiéndolo como un macizo rocoso Normal, parcialmente estable. Este análisis se complementó con las observaciones cualitativas que se obtienen con el Índice de Resistencia Geológica GSI (Geological Strength Index), registrando la siguiente situación:

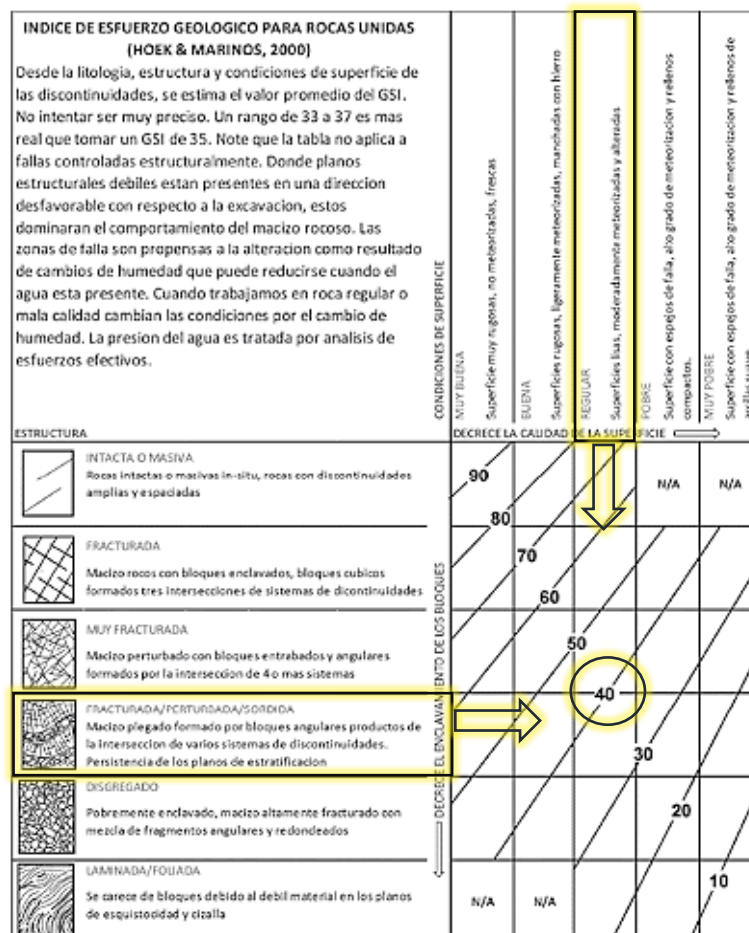


Figura 51. Tabla de GSI. Se obtiene un valor de 40 para la estación geomecánica 3.

El índice GSI muestra valores cercanos a los 40, con rangos de valores que llegan a los 50, describiendo un macizo muy fracturado con superficies regulares de discontinuidades, moderadamente meteorizadas y alteradas. Se complementó con el uso del software DIPS para el análisis estructural de datos geológicos basados en su orientación, mediante proyección estereográfica (ver Figura 53 a 56).

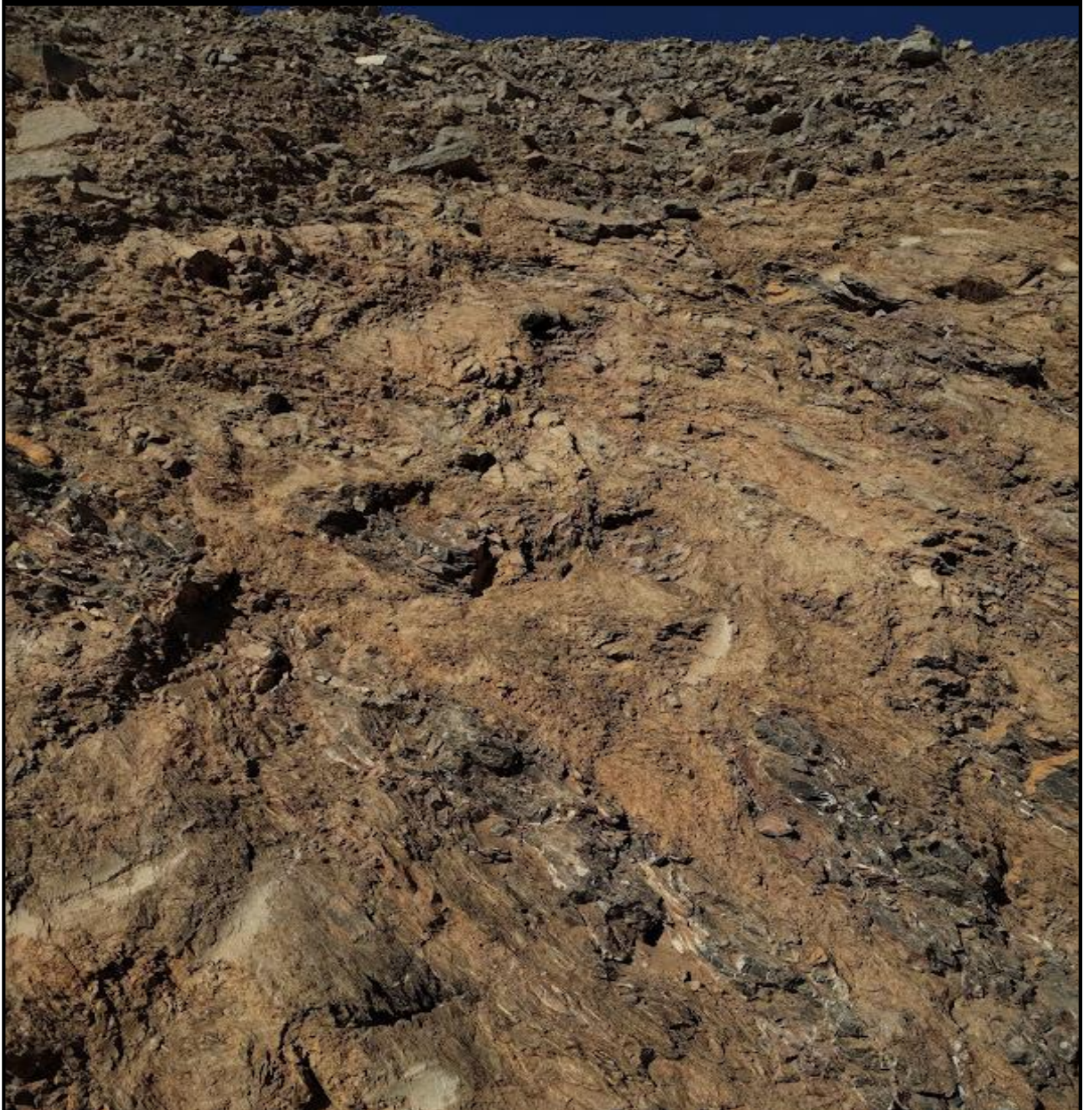
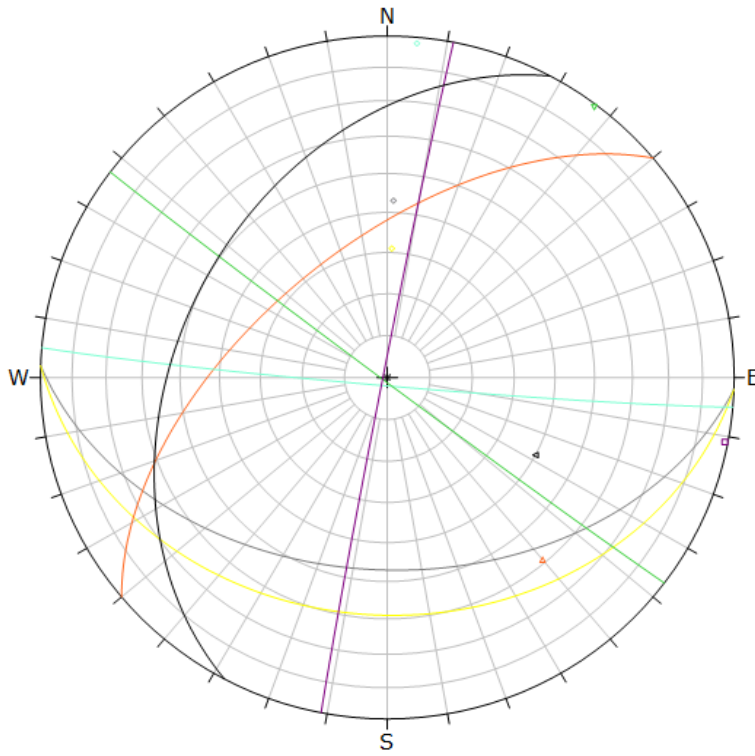


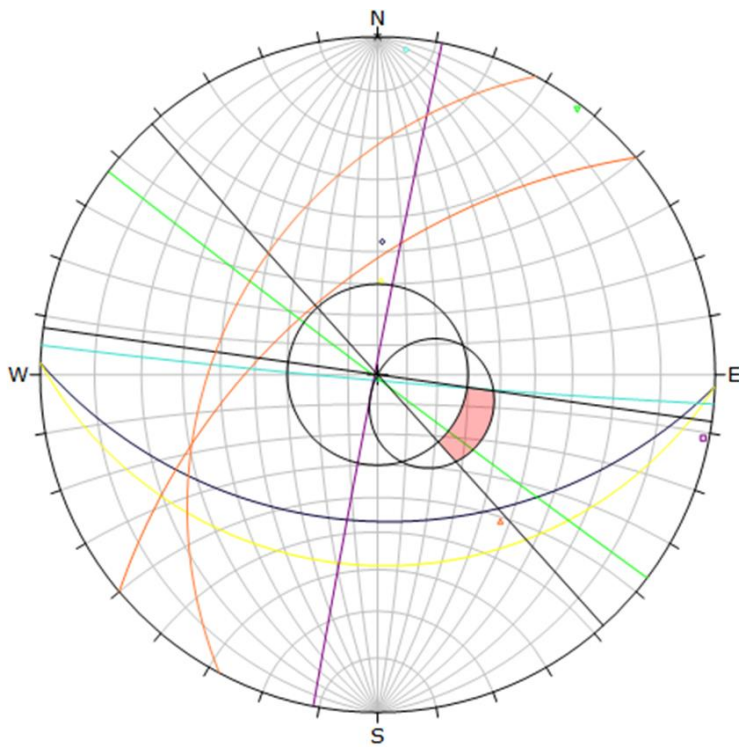
Figura 52. Imagen de la Estación Geomecánica 3. En la fotografía superior se señala su ubicación.



Symbol	ID	Quantity
◊	1	1
◊	2	1
▲	3	1
◊	4	1
▼	5	1
◻	6	1
◄	7	1

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	7 (7 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 53. Ploteo de planos relevados en la estación geomecánica 3. Con negro se representa el talud.



Symbol	ID	Quantity
◊	1	1
◊	2	1
▲	3	1
◊	4	1
▼	5	1
◻	6	1

Kinematic Analysis	Planar Sliding		
Slope Dip	10		
Slope Dip Direction	298		
Friction Angle	30°		
Lateral Limits	20°		
	Critical Total %		
Planar Sliding (All)	0	6	0.00%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	6 (6 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 54. Gráfico del análisis cinemático para deslizamientos planares. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja la zona de planos críticos con posibilidad de rotura planar.

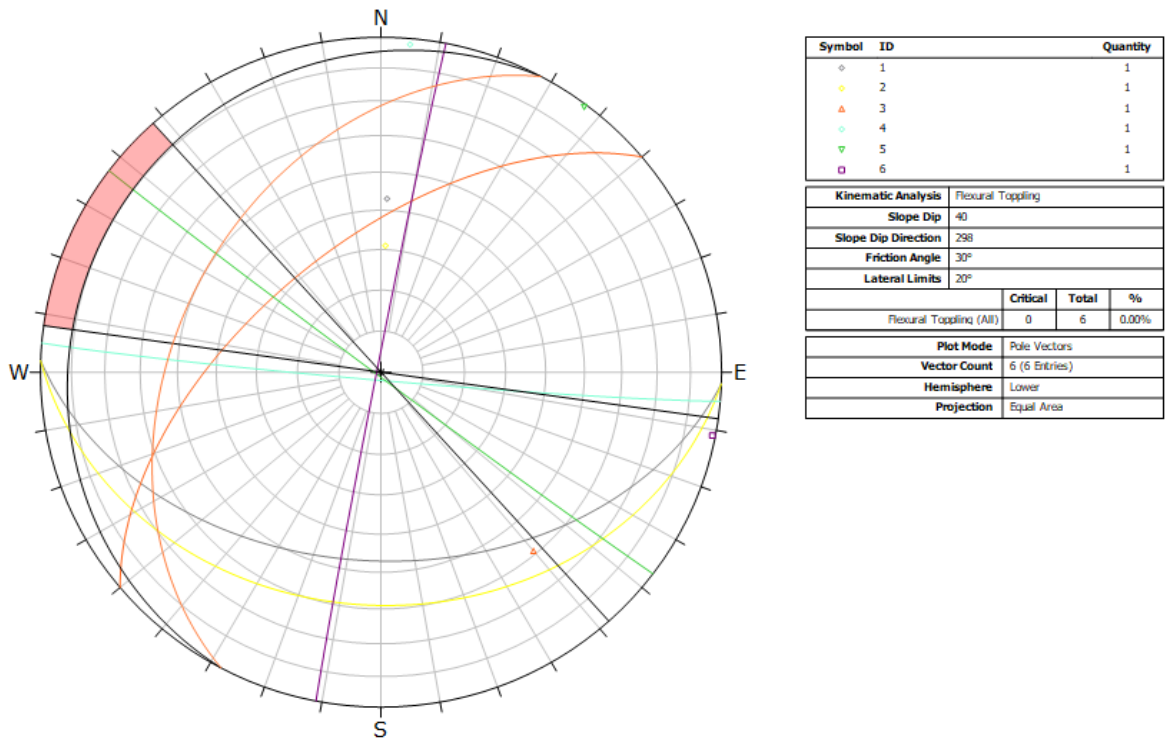


Figura 55. Gráfico del análisis cinemático para deslizamientos por flexión. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja la zona de planos críticos con posibilidad de caída por flexión.

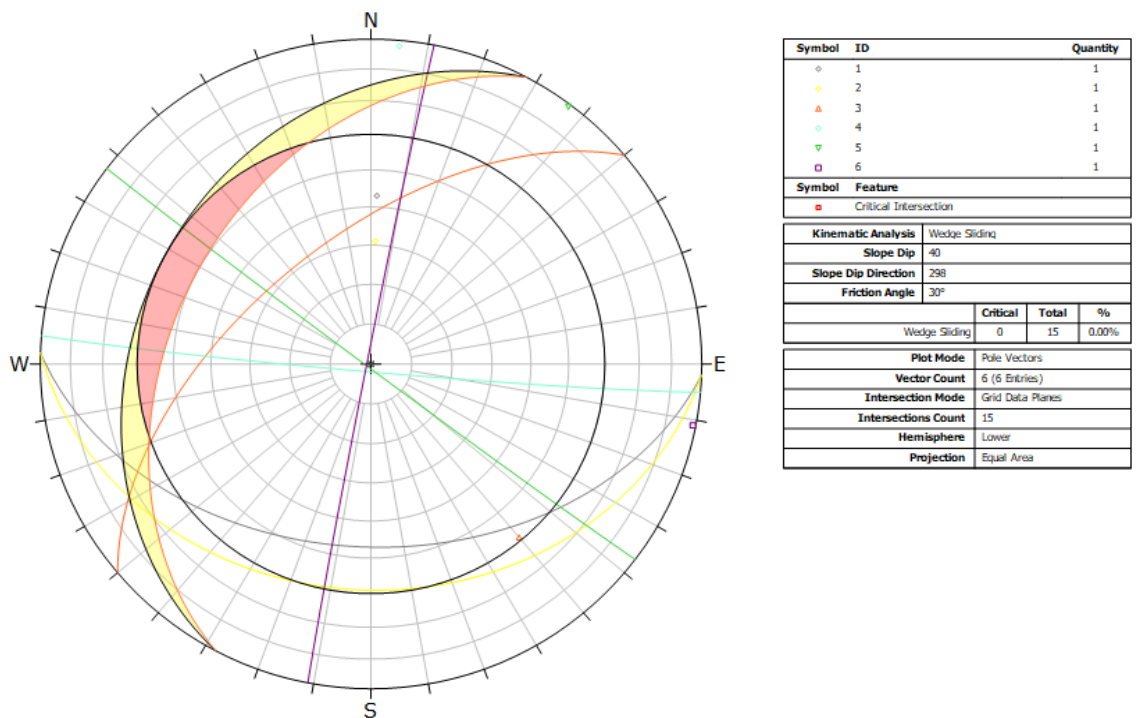


Figura 56. Gráfico del análisis cinemático para desprendimientos por cuña. Se representan los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja las intersecciones de planos críticos con posibilidad de generar cuñas.

Se indica probable vuelco de los planos de estratificación (intercalación de calizas con abundante margas), pero la condición mejora con la inclinación del talud (40°). No se encuentran intersecciones críticas para formación de cuñas entre planos de discontinuidad.

Estación Geomecánica 4 – Pliegue

Afloramiento principal, situado sobre la traza del túnel. Se realizó el análisis sobre la quebrada, en un afloramiento representativo. El conjunto de estructuras presentes a lo largo del cordón muestra una secuencia de pliegues anticlinales y sinclinales limitados por algunas fallas. Se eligió un sector con morfología homoclinal para la caracterización. Los planos de estratificación corresponden a planos abiertos y meteorizados de calizas margosas. Se observa que el macizo está condicionado por 4 planos de diaclasas. D₁ y D₂ muestran una disposición que genera tendencia a formar cuñas, y presentan crecimiento de cristales de calcita (diente de perro). El plano D₃ es casi perpendicular a los planos de estratificación, y D₄ presenta estrías de movimiento que evidencian una dinámica dextral (Figura 57 y 58).

La detallada caracterización geotécnica que se realizó con los parámetros de calidad del macizo rocoso basada en el Índice de Clasificación Geomecánica SMR (Slope Mass Rating), dio como resultado un valor de 76, que implica una condición Buena (clase tipo II) para el macizo, describiéndolo como un macizo rocoso estable. Pese a que las observaciones preliminares no llevaban a calificarlo de tal manera, se atribuye este buen resultado a la ausencia de planos de falla, y a que se trata de un talud natural. Este análisis se complementó con las observaciones cualitativas que se obtienen con el Índice de Resistencia Geológica GSI (Geological Strength Index), registrando la siguiente situación:

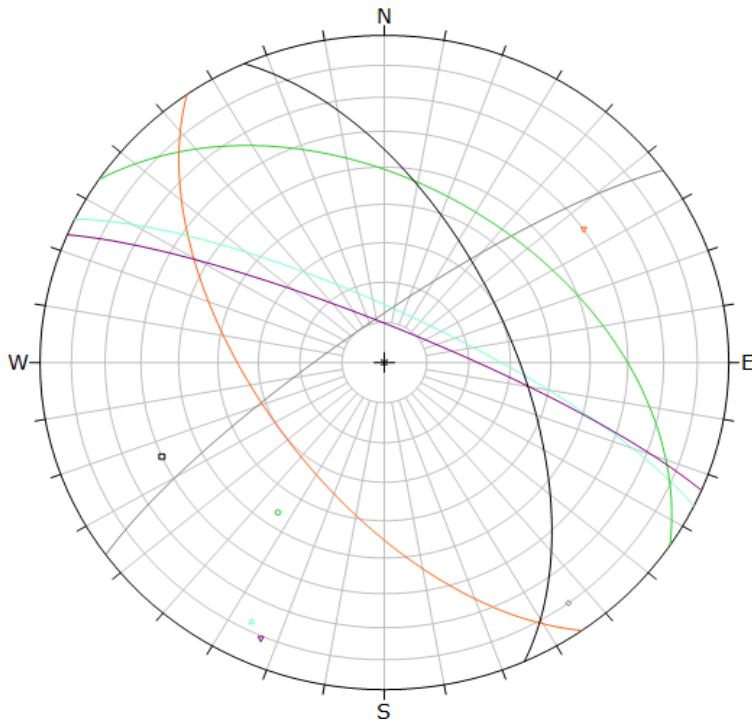
INDICE DE ESFUERZO GEOLOGICO PARA ROCAS UNIDAS (HOEK & MARINOS, 2000)		CONDICIONES DE SUPERFICIE	
Desde la litología, estructura y condiciones de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio del GSI. No intentar ser muy preciso. Un rango de 33 a 37 es mas real que tomar un GSI de 35. Note que la tabla no aplica a fallas controladas estructuralmente. Donde planos estructurales debiles estan presentes en una direccion desfavorable con respecto a la excavacion, estos dominaran el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de falla son propensas a la alteracion como resultado de cambios de humedad que puede reducirse cuando el agua esta presente. Cuando trabajamos en roca regular o mala calidad cambian las condiciones por el cambio de humedad. La presion del agua es tratada por analisis de esfuerzos efectivos.		MUY BUENA Superficies rugosas, no meteorizadas, frescas	MUY BUENA Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, manchada con barro
ESTRUCTURA	DECRECE EL INCLAVAMIENTO DE LOS BLOQUES	DECRECE EL INCLAVAMIENTO DE LA SUPERFICIE	
INTACTA O MASIVA Rocas intactas o masivas in-situ, rocas con discontinuidades amplias y espaciadas	90	N/A	N/A
FRACTURADA Macizo rocoso con bloques enclavados, bloques cubicos formados tres intersecciones de sistemas de discontinuidades	80 75	75	50
MUY FRACTURADA Macizo perturbado con bloques entrelazados y angulares formados por la intersección de 4 o mas sistemas	50	40	30
FRACTURADA/PERTURBADA/SORDIDA Macizo plegado formado por bloques angulares productos de la intersección de varios sistemas de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificación	30	20	10
DISGREGADO Pobremente enclavado, macizo altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados	N/A	N/A	N/A
LAMINADA/FOJADA Se carece de bloques debido al debil material en los planos de esquistoidad y cizalla	N/A	N/A	10

Figura 57. Tabla de GSI. Se obtiene un valor de 75 para la estación geomecánica 4.

El índice GSI muestra valores cercanos a los 75, describiendo un macizo fracturado con buenas superficies de discontinuidades, rugosas y poco meteorizadas. Se complementó con el uso del software DIPS para el análisis estructural de datos geológicos basados en su orientación, mediante proyección estereográfica (ver Figura 59 a 62).



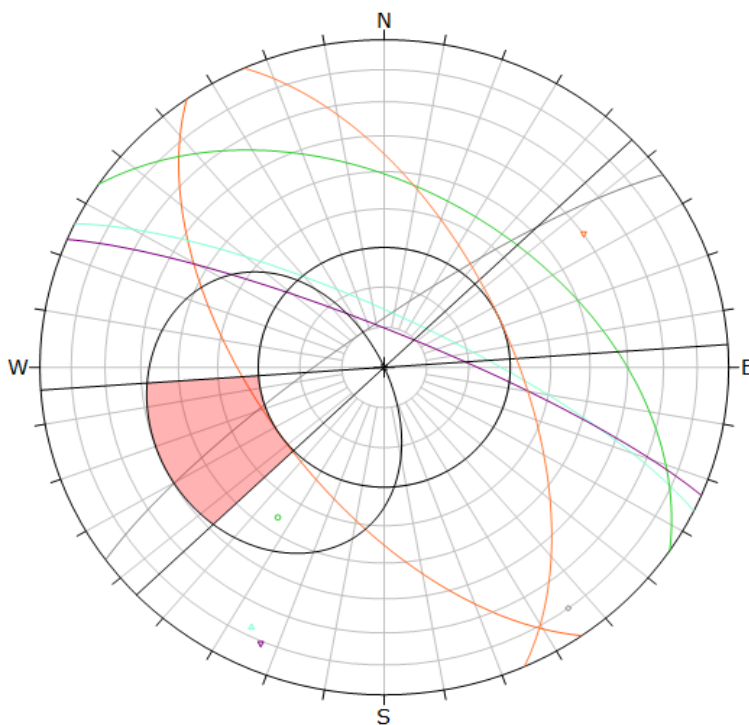
Figura 58. Imagen de la Estación Geomecánica 4. En la fotografía superior se señala su ubicación.



Symbol	ID	Quantity
○	1	1
▽	2	1
△	3	1
○	4	1
▽	5	1
□	6	1

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	6 (6 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 59. Ploteo de planos relevados en la estación geomecánica 4. Con negro se representa el talud.



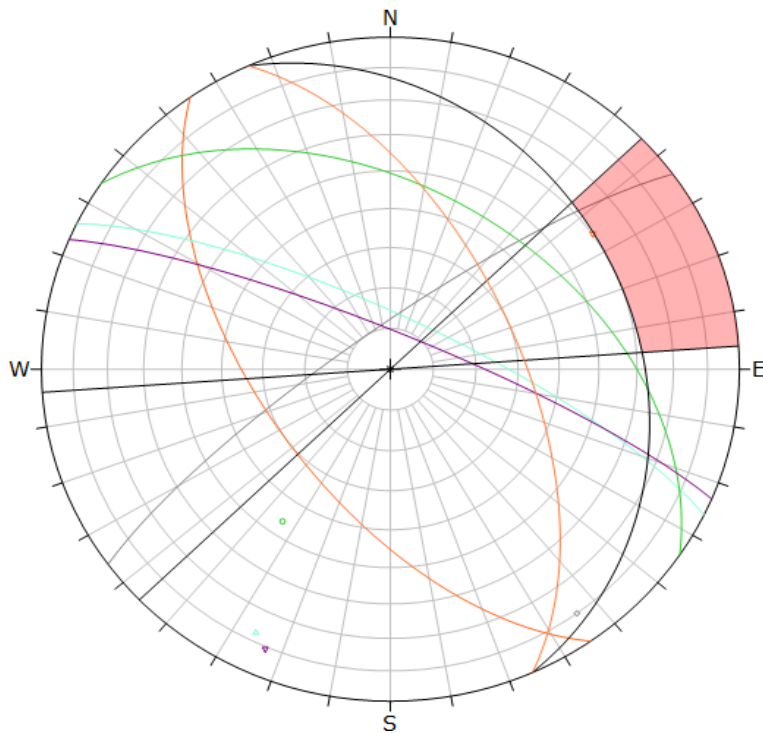
Symbol	ID	Quantity
○	1	1
▽	2	1
△	3	1
○	4	1
▽	5	1

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	60
Slope Dip Direction	65
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	0	5	0.00%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	5 (5 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

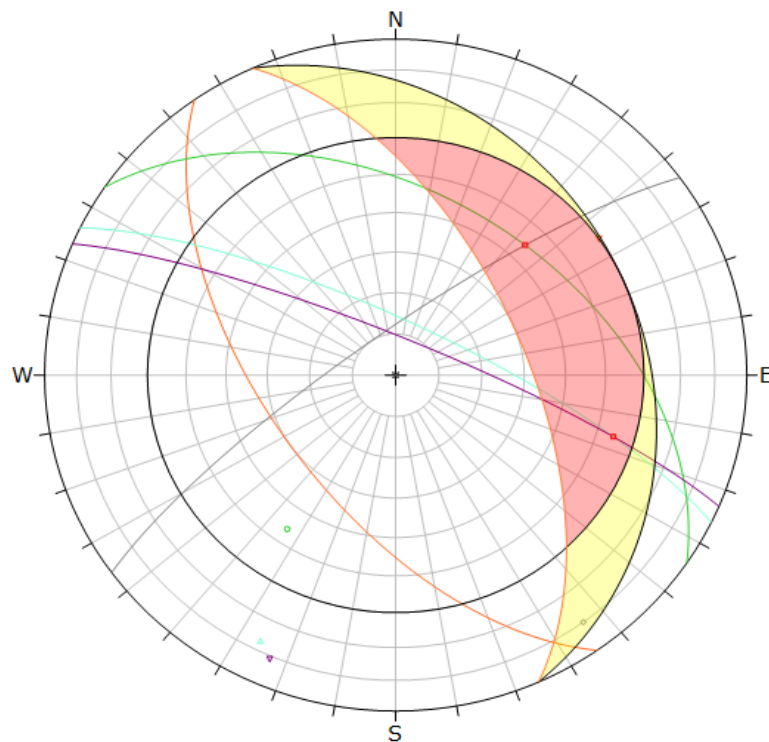
Figura 60. Gráfico del análisis cinemático para deslizamientos planares. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja la zona de planos críticos con posibilidad de rotura planar.



Symbol	ID	Quantity
◇	1	1
▽	2	1
△	3	1
○	4	1
▽	5	1

Kinematic Analysis	Flexural Toppling		
Slope Dip	60		
Slope Dip Direction	66		
Friction Angle	30°		
Lateral Limits	20°		
	Critical	Total	%
Flexural Toppling (All)	0	5	0.00%
Plot Mode	Pole Vectors		
Vector Count	5 (5 Entries)		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal Area		

Figura 61. Gráfico del análisis cinemático para deslizamientos por flexión. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja la zona de planos críticos con posibilidad de caída por flexión.



Symbol	ID	Quantity
◇	1	1
▽	2	1
△	3	1
○	4	1
▽	5	1

Symbol	Feature
●	Critical Intersection

Kinematic Analysis	Wedge Sliding		
Slope Dip	60		
Slope Dip Direction	66		
Friction Angle	30°		
	Critical	Total	%
Wedge Sliding	2	10	20.00%
Plot Mode	Pole Vectors		
Vector Count	5 (5 Entries)		
Intersection Mode	Grid Data Planes		
Intersection Count	10		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal Area		

Figura 62. Gráfico del análisis cinemático para desprendimientos por cuña. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja las intersecciones de planos críticos con posibilidad de generar cuñas.

Macizo sin planos con posibilidad de caída por vuelco. La estratificación presenta una condición favorable en cuanto a su inclinación y disposición respecto al talud. Los resultados indican dos intersecciones críticas para formación de cuñas, dadas por los planos de diaclasas D3 y D4 y los planos de estratificación de las calizas.

Estación Geomecánica 5 – Afloramiento Norte

Afloramiento hacia el norte del sector de estudio. Se observa muy fracturado, con 4 sistemas de diaclasas y algunas fallas bien marcadas. Los planos de estratificación son ondulados, abiertos y rellenos con material blando meteorizado. Algunos están rellenos con yeso. Se observa intercalación con niveles de margas muy fracturados y meteorizados, con fallas asociadas. Los sistemas de diaclasas son planos, con relleno de calcita, D_1 y D_2 tienden a formar cuñas, junto con D_3 que es subparalelo a D_1 . El plano D_4 es paralelo al talud, con tendencia a rotura por vuelco, y presenta yeso como relleno (Figura 63 y 64).

La detallada caracterización geotécnica que se realizó con los parámetros de calidad del macizo rocoso basada en el Índice de Clasificación Geomecánica SMR (Slope Mass Rating), dio como resultado un valor de 60, que implica condiciones de roca clase Media (tipo III) para el macizo, describiéndolo como un macizo rocoso Normal, parcialmente estable. Este análisis se complementó con las observaciones cualitativas que se obtienen con el Índice de Resistencia Geológica GSI (Geological Strength Index), registrando la siguiente situación:

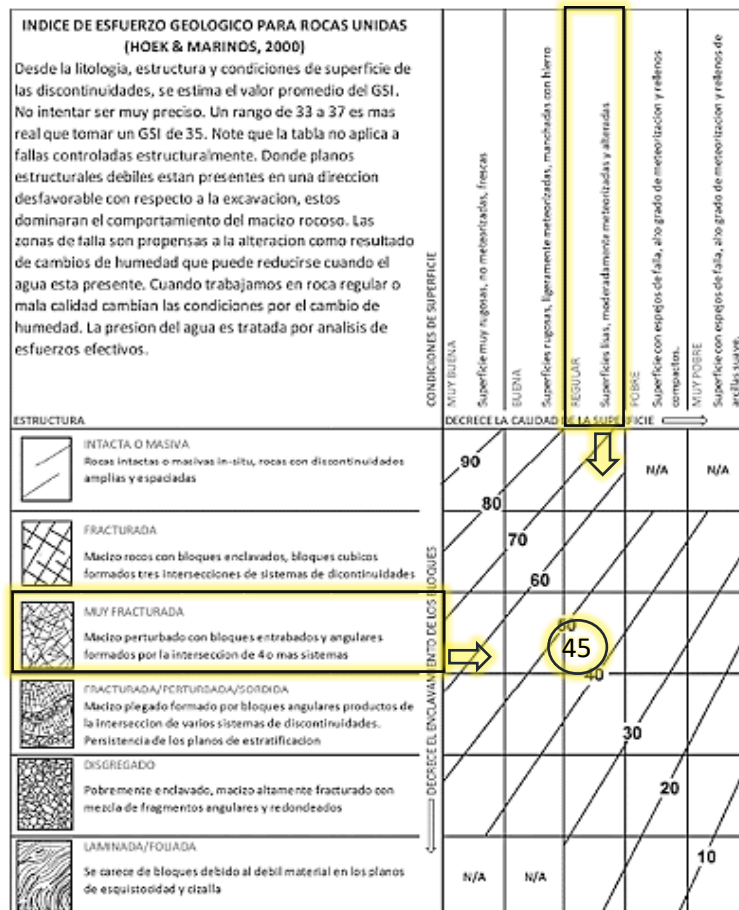


Figura 63. Tabla de GSI. Se obtiene un valor de 45 para la estación geomecánica 5.

El índice GSI muestra un rango de valores cercanos a los 50, describiendo un macizo muy fracturado, con las superficies de las discontinuidades regulares, poco meteorizadas. Se complementó con el uso del software DIPS para el análisis estructural de datos geológicos basados en su orientación, mediante proyección estereográfica (ver Figura 65 a 68).



Figura 64. Imagen de la Estación Geomecánica 5. En la fotografía superior se señala su ubicación.

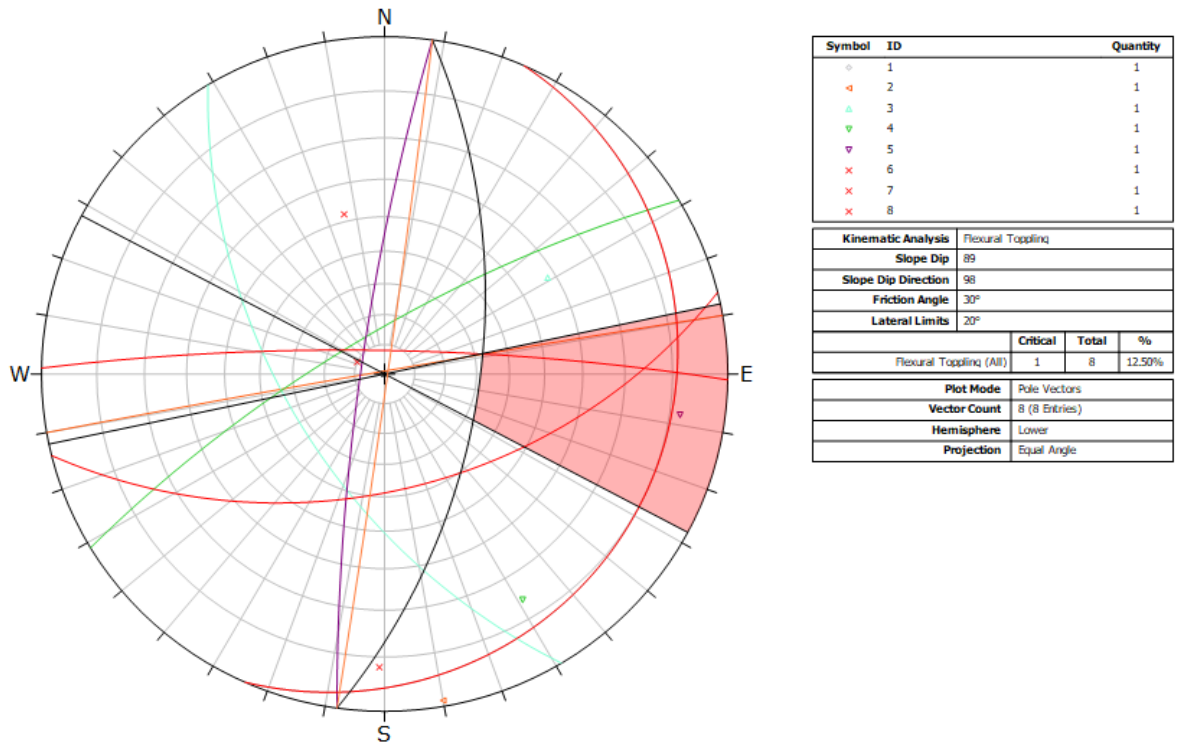


Figura 67. Gráfico del análisis cinemático para deslizamientos por flexión. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja la zona de planos críticos con posibilidad de caída por flexión.

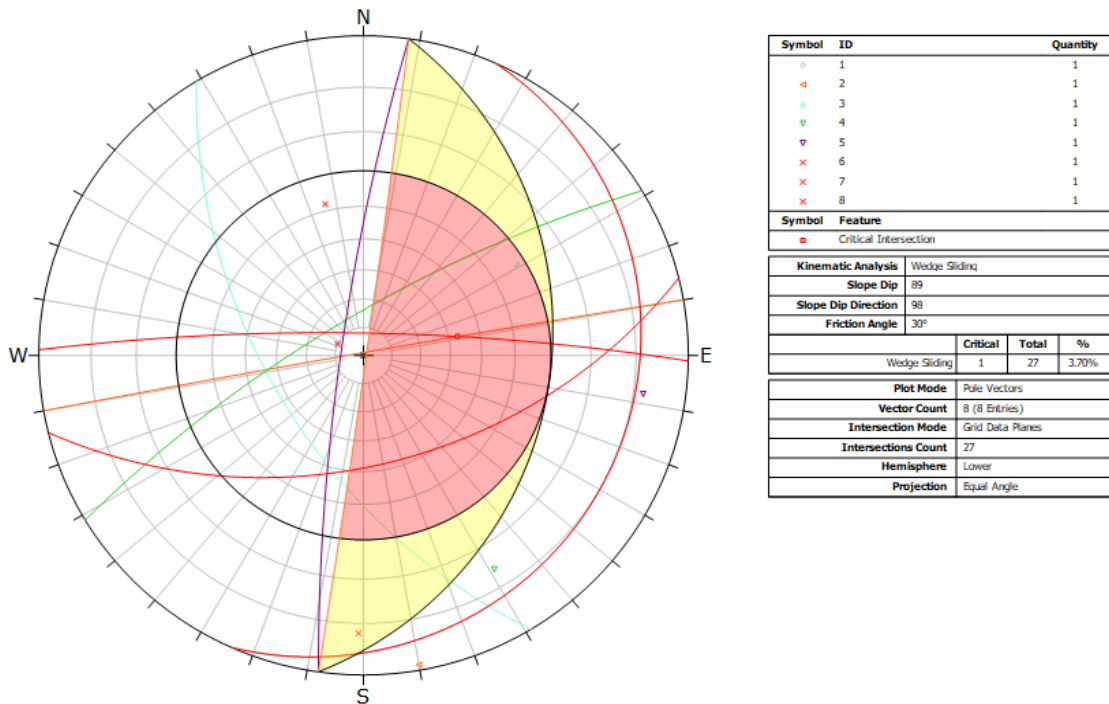


Figura 68. Gráfico del análisis cinemático para desprendimientos por cuña. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja las intersecciones de planos críticos con posibilidad de generar cuñas.

Las condiciones del macizo no son buenas considerando el estado de la roca y el fracturamiento que genera espacios abiertos en planos de discontinuidad. Los resultados del análisis cinemático indica la existencia de un plano de diaclasa con posibilidad de vuelco (D4), y la generación de cuñas por la intersección de este plano con los planos de falla relevados.

Estación Geomecánica 6 – Afloramiento Sur

Afloramiento muy fracturado, situado hacia el sur del sector de estudio. Se presenta muy fracturado, con planos de estratificación y 4 sistemas de diaclasas. Los planos presentan rugosidades variables, en general rugosos, algunos abiertos por efecto de tectonismo. En general, la roca se encuentra fracturada. Se describen 2 planos de falla que delimitan la ventana geotécnica (Figura 69 y 70).

La detallada caracterización geotécnica que se realizó con los parámetros de calidad del macizo rocoso basada en el Índice de Clasificación Geomecánica SMR (Slope Mass Rating), dio como resultado un valor de 58, que implica condiciones de roca clase Media (tipo III) para el macizo, describiéndolo como un macizo rocoso Normal, parcialmente estable. Este análisis se complementó con las observaciones cualitativas que se obtienen con el Índice de Resistencia Geológica GSI (Geological Strength Index), registrando la siguiente situación:

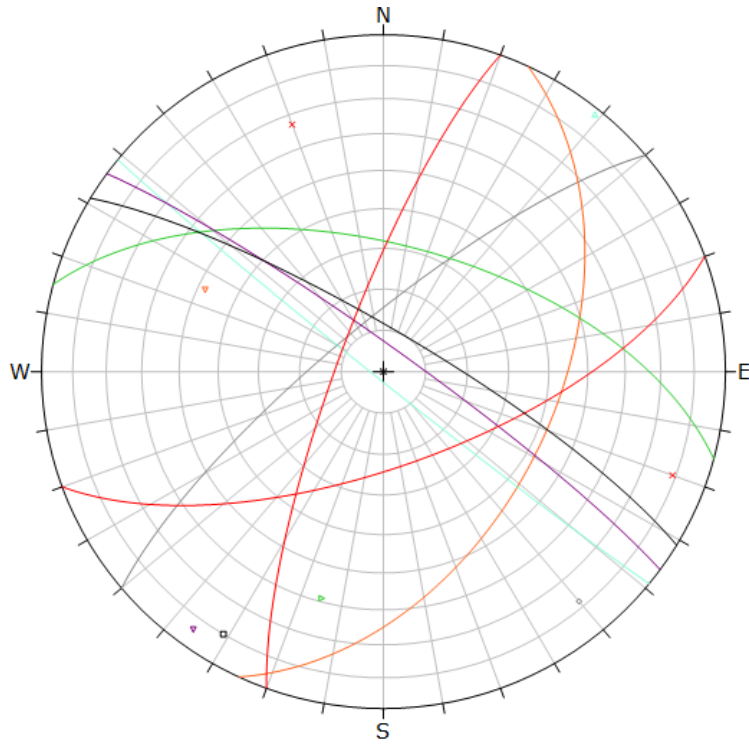
INDICE DE ESFUERZO GEOLOGICO PARA ROCAS UNIDAS (HOEK & MARINOS, 2000)		CONDICIONES DE SUPERFICIE	
Desde la litología, estructura y condiciones de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio del GSI. No intentar ser muy preciso. Un rango de 33 a 37 es mas real que tomar un GSI de 35. Note que la tabla no aplica a fallas controladas estructuralmente. Donde planos estructurales débiles estan presentes en una direccion desfavorable con respecto a la excavacion, estos dominaran el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de falla son propensas a la alteracion como resultado de cambios de humedad que puede reducirse cuando el agua esta presente. Cuando trabajamos en roca regular o mala calidad cambian las condiciones por el cambio de humedad. La presion del agua es tratada por analisis de esfuerzos efectivos.		MUY BUENA Superficie muy rugosa, no meteorizada, fresca	MUY POBRE Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorización y rellenos de arcillas suaves.
ESTRUCTURA		DECRECE LA CALIDAD DE LA SUPERFICIE →	
	INTACTA O MASIVA Rocas intactas o masivas in-situ, rocas con discontinuidades amplias y espaciadas	90	N/A
	FRACTURADA Macizo rocoso con bloques enclavados, bloques cubicos formados tres intersecciones de sistemas de discontinuidades	80	N/A
	MUY FRACTURADA Macizo perturbado con bloques entrelazados y angulares formados por la interseccion de 4 o mas sistemas	70	N/A
	FRACTURADA/PERTURBADA/SORDIDA Macizo plegado formado por bloques angulares productos de la interseccion de varios sistemas de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificacion	60	N/A
	DISGREGADO Pobremente enclavado, macizo altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados	50	N/A
	LAMINADA/FOLIADA Se carece de bloques debido al debil material en los planos de esquistoidad y cizalla	40	N/A
		30	20
		N/A	10
		N/A	N/A

Figura 69. Tabla de GSI. Se obtiene un valor de 40 para la estación geomecánica 6.

El índice GSI muestra un rango de valores rondando los 40, describiendo un macizo muy fracturado, con las superficies de las discontinuidades regulares, poco meteorizadas. Se complementó con el uso del software DIPS para el análisis estructural de datos geológicos basados en su orientación, mediante proyección estereográfica (ver Figura 71 a 74).



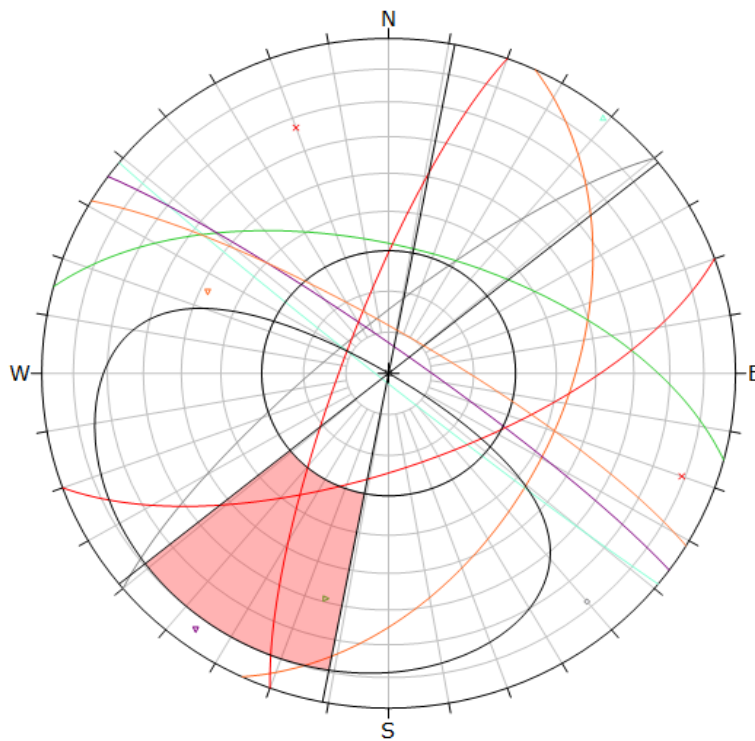
Figura 70. Imagen de la Estación Geomecánica 6. En la fotografía superior se señala su ubicación.



Symbol	ID	Quantity
◇	1	1
▽	2	1
△	3	1
◻	4	1
▽	5	1
×	6	1
×	7	1
◻	8	1

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	8 (8 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 71. Ploteo de planos relevados en la estación geomecánica 6. Con negro se representa el talud.



Symbol	ID	Quantity
◇	1	1
▽	2	1
△	3	1
◻	4	1
▽	5	1
×	6	1
×	7	1

Kinematic Analysis	Planar Sliding		
Slope Dip	80		
Slope Dip Direction	31		
Friction Angle	30°		
Lateral Limits	20°		
	Critical Total %		
Planar Sliding (All)	1	7	14.29%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	7 (7 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 72. Gráfico del análisis cinemático para deslizamientos planares. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja la zona de planos críticos con posibilidad de rotura planar.

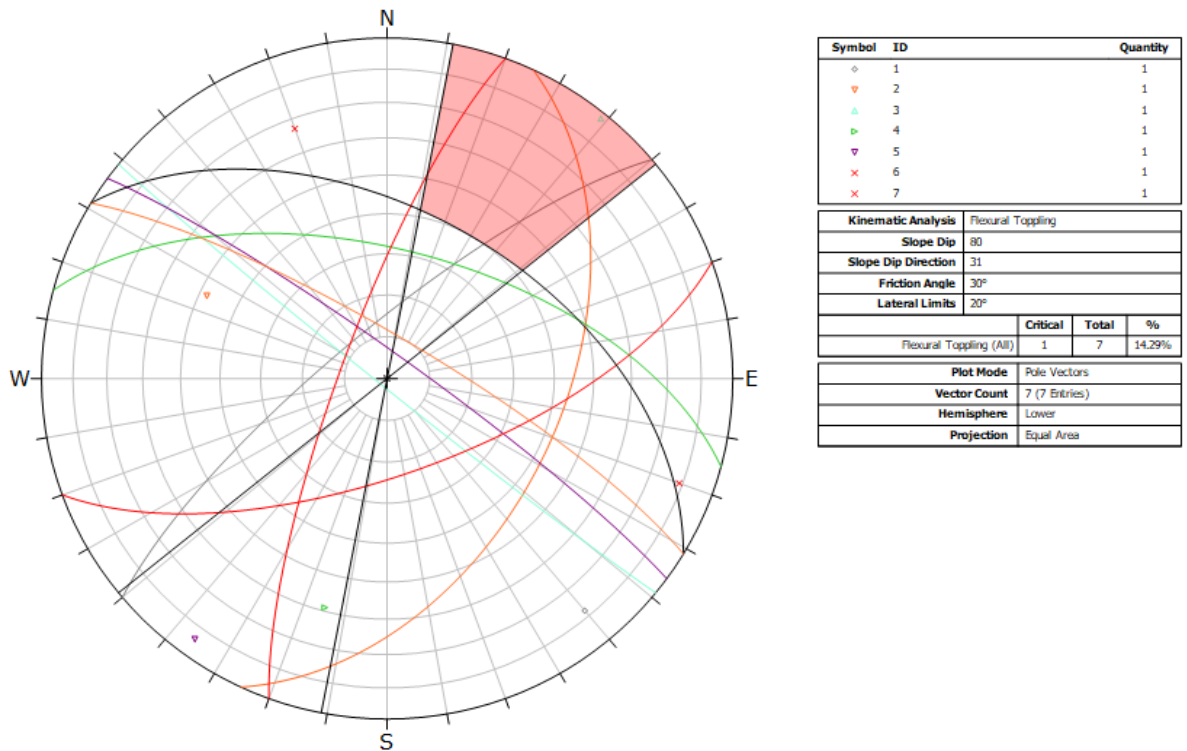


Figura 73. Gráfico del análisis cinemático para deslizamientos por flexión. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja la zona de planos críticos con posibilidad de caída por flexión.

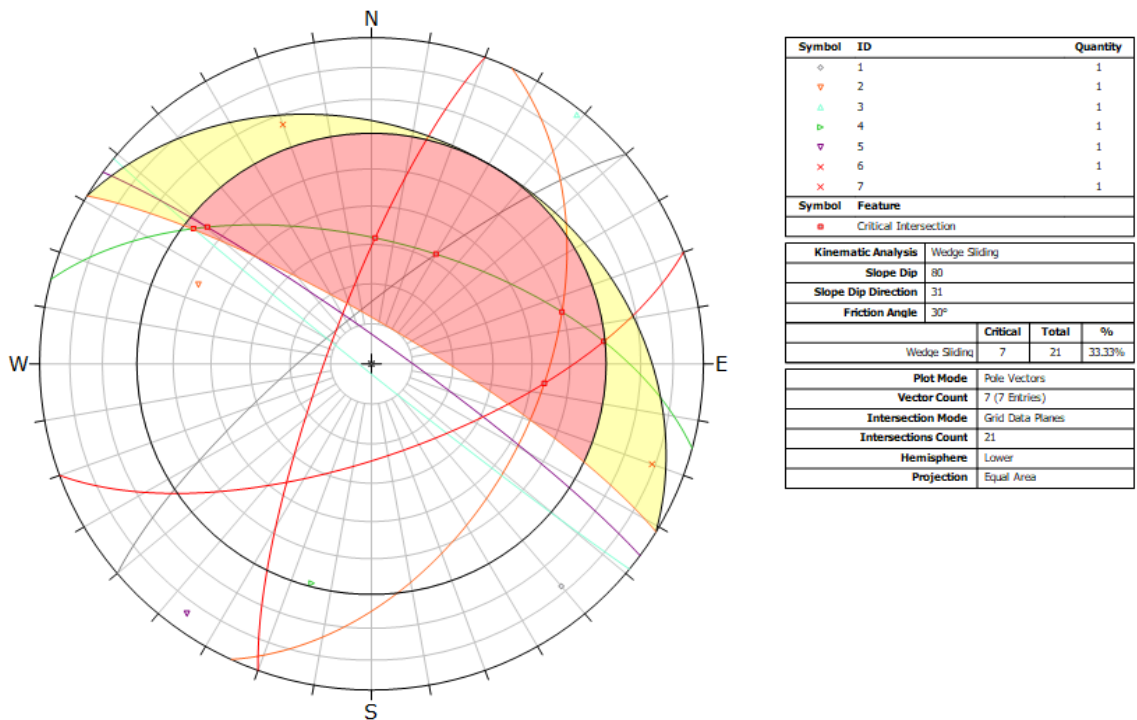


Figura 74. Gráfico del análisis cinemático para desprendimientos por cuña. Se representan los polos de los planos relevados en la estación, y la gráfica arroja las intersecciones de planos críticos con posibilidad de generar cuñas.

Las condiciones del macizo no son buenas considerando el fracturamiento de la roca. El análisis cinemático muestra probabilidad de vuelco para el plano de diaclasa D2, y posible deslizamiento planar para D4. Se encontraron intersecciones críticas para formación de cuñas, dadas principalmente por los planos de falla, fallas con D3 y D1, y entre D3 y D4

Con esto, se observa y concluye que las características geológicas son similares en toda el área, destacando la influencia del fallamiento Villicum - Zonda que le imparte al macizo un dominio tectónico condicionante desde el punto de vista geomecánico. El macizo rocoso formado por la intercalación de rocas carbonáticas se encuentra limitado por planos de discontinuidades, predominantemente el plano de estratificación y 3 juegos de diaclasas, con planos de fractura y fallas rellenos de material fino arcilloso, y yeso.

Este dominio estructural y tectónico, le confiere al macizo características que inciden directa e indirectamente en la estabilidad de las excavaciones, siendo el sistema de sostenimiento un recurso primordial y necesario para tener en cuenta considerando las condiciones del macizo y el vínculo con la obra civil. Es importante señalar que si se detecta algún tipo de inestabilidad con los parámetros cinemáticos, es necesario realizar un análisis mecánico de estabilidad para determinar el factor de seguridad del talud.

Según los resultados de los relevamientos y análisis efectuados, el macizo rocoso se clasifica con condiciones de calidad Media, con algunas excepciones que lo definen con calidad Buena. Esta clasificación le imparte características y propiedades que generan condiciones estables para el macizo en dichos taludes, pero sin descartar ciertos planos que generan condiciones desfavorables en cuando a su disposición respecto a cada talud.

Si bien los resultados son favorables, se debe tener en cuenta siempre y de manera prioritaria las estructuras geológicas resultado de los fallamientos regionales, y las estructuras presentes en el sector. Junto con la estructura, se debe prestar suma atención a la litología aflorante, que en este caso es una intercalación de calizas con calizas margosas y margas, lo que genera que estos niveles de margas representen planos viables para la fracturación, y sean rocas con mayor grado de erodabilidad.

El análisis completo de cada ventana geotécnica se presenta en el capítulo de Anexo.

CAPÍTULO 7: SONDEO GEOTÉCNICO

Se realizó una perforación de 100 m con diamantina (HQ3), inclinación de -5° y direccionada respecto de la traza del túnel proyectado (118° SE) con el fin de obtener la información litológica y las condiciones del macizo en los primeros metros del túnel. Con fines exploratorios, se obtuvo un registro completo de los testigos recuperados, tanto descriptivo como fotográfico, acompañado de toma de muestras para laboratorio.

Perforación Diamantina

Método de perforación que consiste en aplicar energía de rotación en conjunto con una fuerza de empuje, para hacer rotar una herramienta la broca de corte denominada “corona diamantada”. El sondeo exploratorio se llevó a cabo con este sistema de perforación, de diámetro HQ3 (95,6mm) y triple tubo, con el equipo LONGYEAR 44 DIAMOND CORE DRILL, montado sobre chasis Mercedes Benz Modelo 1112 con tracción 4x4 (Figura 75).



Figura 75. Fotografía de la plataforma de perforación.

Como fluido principal se utiliza lodo, cuya función principal es enfriar la corona y permitir la “limpieza” del pozo. A medida que se realiza la perforación, la corona va cortando la roca y la almacena en forma de cilindro en el tubo interior, ingresando a través de un resorte que le permite la entrada, pero no salida del mismo. Cuando el tubo interior se llena, es preciso extraer la muestra. La recuperación de testigo se realizó con el sistema “Wire line”, en el cual el testigo se extrae levantando el tubo interior, y una vez finalizada esta operación, los testigos obtenidos se colocaron en cajas especiales, plásticas de 1 metro de longitud compuestas por 3 canaletas, para continuar con su posterior análisis.

Logueo geotécnico

La perforación exploratoria tiene como principal sustento la información geológica y los parámetros geotécnicos descriptos en los testigos de roca obtenidos. Se realizó un quick log en boca de pozo, y luego un logueo detallado orientado a la descripción completa de las discontinuidades encontradas en los tramos perforados.

A continuación, en la figuras 76 y 77 se presentan las planillas utilizadas para el logueo. En anexo, la planilla completa del logueo geológico y geotécnico del pozo denominado DDH – Zonda01.

PROFUNDIDAD Y AVANCE		LITOLOGÍA		PERFIL LITOLÓGICO	RECUPERACIÓN			GEO MECÁNICA			PERFIL ESTRUCTURAL	Condición Hidrogeológica	
Desde (m)	Hasta (m)	Avance (m)	Tipo de Roca		Grado de alteración	Recuperado (m)	Recuperado (%)	Perfil	RQD (m)	RQD %			Perfil

Figura 76. Planilla de logueo general utilizada para la descripción geológica y datos estructurales. Incluye caracterización litológica, geomecánica básica y observaciones generales.

PROFUNDIDAD Y AVANCE		LITOLOGÍA		PERFIL LITOLÓGICO	CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES					FOTOGRAFÍA DE DETALLE	DESCRIPCIÓN		
Desde (m)	Hasta (m)	Avance (m)	Tipo de Roca		Estructura	Grado de alteración	Persistencia	Abertura	Rugosidad			Repleno	Alteración

Figura 77. Planilla para logueo de detalle, se utiliza para la descripción geomecánica con parámetros geotécnicos, incluyendo la descripción de discontinuidades.

Se observan 30 metros de caliza gris oscura bien consolidada, con algunos tramos fracturados, presencia de venillas y planos rellenos con un material predominante oscuro blando y muy fino. Otros planos están rellenos con limonita y mineral arcilloso en menor proporción (ver Figuras 78, 79 y 80).



Figura 78. Testigos de roca caliza gris oscura bien consolidada. En fotografías de detalle se muestran las estructuras predominantes.



Figura 79. Testigos de roca caliza gris oscura bien consolidada, litología homogénea.



Figura 80. Testigos de roca caliza gris oscura bien consolidada, litología homogénea.

A partir de los 30 metros, la roca se observa con más planos de fractura y diaclasado, algunos rellenos con limonita, otros con hematita. Los planos de diaclasa son subparalelos entre sí, rellenos con hematita y abundantes venillas de calcita. Se observan en general algunos tramos fracturados con mayor grado de trituración. Las condiciones descritas llegan hasta los 49,50 m donde comienza una zona de falla (ver figuras 81, 82 y 83), la cual presenta abundante material fino arcilloso, yeso, intercalación de caliza margosa y margas, en sectores con mayor trituración generando zonas de harina de falla, y otros con brechas de falla.



Figura 81. Roca con mas planos de fractura, diaclasas rellenas algunas con limonita, otras con hematita.



Figura 82. Caliza margosa con mayor número de planos de diaclasa subparalelos entre sí.



Figura 83. Caliza margosa con mayor número de planos de diaclasa subparalelos entre sí. En detalle, estructural de planos y venillas rellenos con material fino arcilloso.

Los 10 metros presentan roca caliza gris. Si bien se observa en partes compacta y bien consolidada, presenta planos de diaclasa y abundantes venillas con relleno de minerales blandos arcillosos. Predominan las pátinas y contenido de limonita en planos de fractura. Presenta sectores muy fracturados, rellenos de roca triturada, cementada con los mismos materiales que la componen, generando un relleno de brecha de falla (ver figura 84).



Figura 84. Caliza gris oscura con intercalación de caliza margosa. Se observan brechas.

Para los tramos siguientes, la interpretación es similar, se asignan varias zonas de falla con potencias de 1 a 3 metros. En 63,85 metros la zona de falla es de 20 metros aproximadamente, y a partir de los 82,50 metros, la zona de falla se extiende hasta el final de pozo (99,85 m).

En diferentes sectores se observa roca con planos muy persistentes de fractura, rellenos con material triturado y brecha con predominio de mineral blando arcilloso, yeso, limonita y hematita. Se identifican también, sectores con predominio de hematita en planos de fractura, y otros con predominio de limonita y minerales blancos arcillosos (ver figuras 85, 86 y 87).



Figura 85. Roca muy fracturada, con predominio de material blando arcilloso. Se observan brechas.



Figura 86. Tramos de roca muy fracturada, con material de brechas. Planos de falla.



Figura 87. Caliza gris oscura con abundantes planos rellenos de material brechado.

A partir de los 85 metros, y hasta el final del pozo, se presenta una zona de brechas de falla con abundante limonita y mineral arcilloso (Figura 88 y 89).



Figura 88. Zona de brecha de falla. Abundante material triturado y relleno de mineral blando arcilloso.



Figura 89. Zona de brecha de falla. Últimas cajas, indican el fin de pozo.

Debido a la cantidad de venillas, planos de fractura y falla que contienen las rocas, se infiere que la resistencia de las mismas está condicionada por el tipo de relleno blando y/o calcita que contienen estas estructuras. A la litología descrita, incluso en sectores donde se observa roca bien consolidada, se le asigna una caracterización geotécnica que considera como roca de Clase tipo III dentro de las cuales es posible diferenciar rocas con mejores condiciones geomecánicas. Para los sectores denominados como “Zonas de Falla”, en cambio, la Clase de roca se corresponde con una de tipo IV y V para tramos con abundancia de arcillas. Teniendo en cuenta estas denominaciones, estos 100 m evidencian una alternancia de rocas Clase tipo III y tipo IV, con algunas manifestaciones de condiciones de roca muy malas dadas por Clase tipo V.

Mediciones de Desviación

Teniendo en cuenta la horizontalidad de la perforación, la litología y el alto grado de fracturación, se realizaron medidas de desviación cada 25 m con el objetivo de realizar un control y detección de posible desviación del pozo, para lograr datos precisos y un correcto análisis de estructuras geológicas dentro de las dimensiones de la sección del túnel.

Las mediciones se realizaron con equipo MW-Gyro fabricado por Midwest Services (equipo de medición continuo con tecnología “Busca-Norte” con número de serie 22015 con fecha de calibración al 04/05/2023 con vigencia por 2 años (Figura 90).

MEDICION DE DESVIACION SONDEO DDH ZONDA - 01							
Tramo (m)	Corrida	Parámetro	Boca de Pozo	Fondo de Pozo	Valor mín	Valor máx	Desviación de Fondo
0 - 25	Bajada	Azimut	199,99	118,98	118,87	119,98	1,01
		Inclinación	4,4	5,99	4,4	5,9	1,59
	Subida	Azimut	120,06	118,99	118,91	120,6	1,07
		Inclinación	4,56	6	4,56	6	1,44
0 - 48	Bajada	Azimut	119,62	118,97	118,76	119,62	0,65
		Inclinación	4,9	7,77	4,9	7,77	2,87
	Subida	Azimut	119,88	118,96	118,88	119,88	0,92
		Inclinación	4,77	7,77	4,77	7,77	3
0 - 75	Bajada	Azimut	119,2	117,34	117,28	119,2	1,86
		Inclinación	3,85	9,77	3,85	9,77	5,92
	Subida	Azimut	119,11	117,31	117,3	119,11	1,8
		Inclinación	4,27	9,64	4,27	9,64	5,37
0 - 99,85	Bajada	Azimut	119,2	118,2	117,61	119,2	1
		Inclinación	4,28	10,98	4,28	10,98	6,7
	Subida	Azimut	119,28	118,31	117,63	119,28	0,97
		Inclinación	4,28	10,94	4,28	10,94	6,66



Figura 90. Fotografía del instrumento de medición. En la tabla se presentan los valores obtenidos en la medición.

Se registraron desviaciones del orden de 1° a 2° , atribuidas a los efectos de rotación, peso del tren de barras, presencia de material blando y zonas de falla. Pasando los 75 m se registra una desviación de $3,05^\circ$, atribuida al paso del sondeo por una zona de falla con abundante material blando, harina de falla y mineral arcilloso, los cuales son materiales que favorecen la desviación del tren de herramientas (Figura 91).

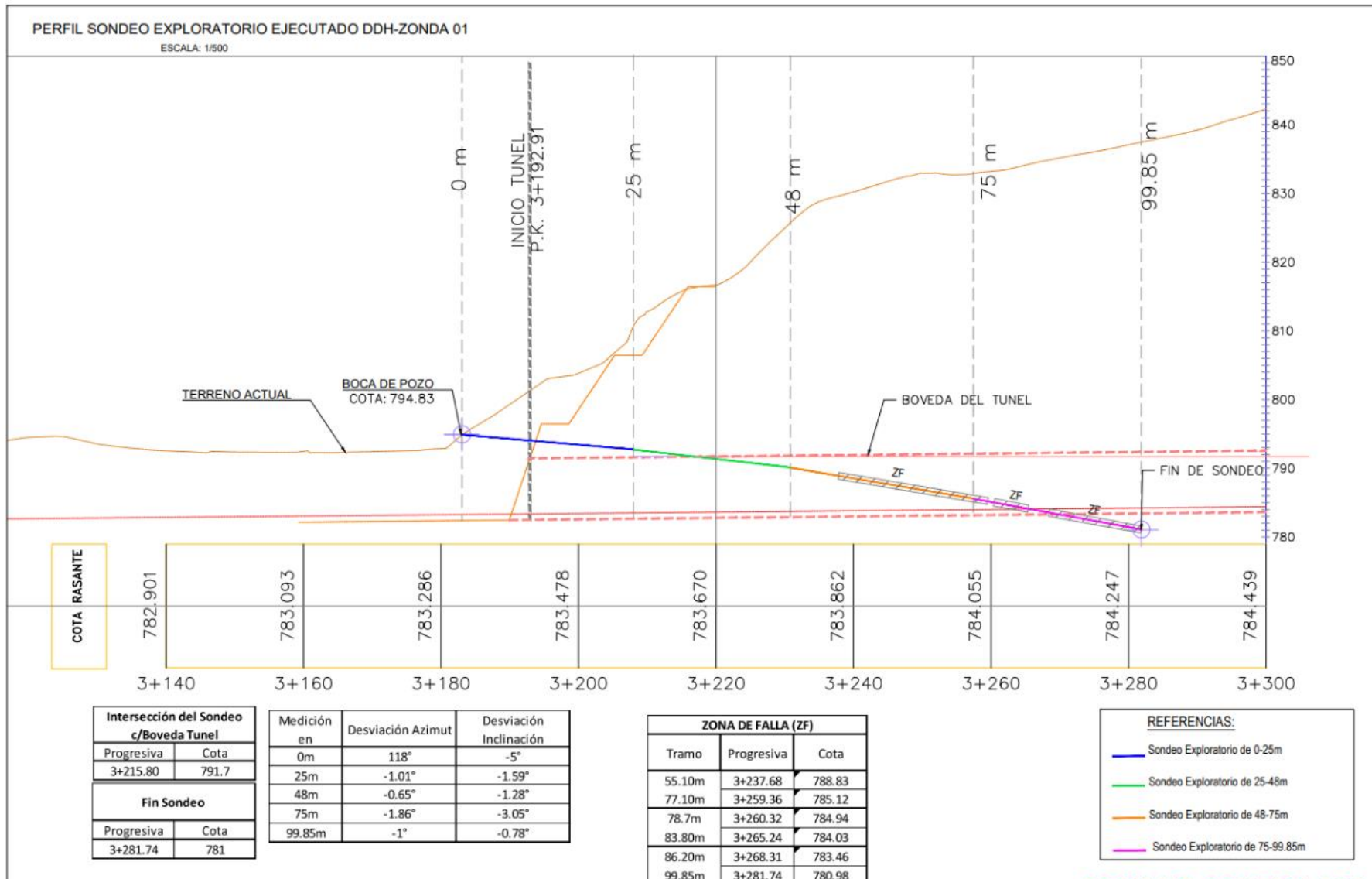


Figura 91. Perfil del sondeo con las desviaciones registradas.

Ensayos de laboratorio

Para complementar la descripción que se realizó de los testigos (logueo geológico y geotécnico) se tomaron muestras de tramos representativos para ser enviadas a laboratorio. Estos tramos se corresponden con puntos estratégicos del sondeo, como son la intersección con el talud frontal, con la bóveda proyectada para el túnel, tramos de falla, brechas e intersección del sondeo con la base de la sección proyectada del túnel (Figura 82).

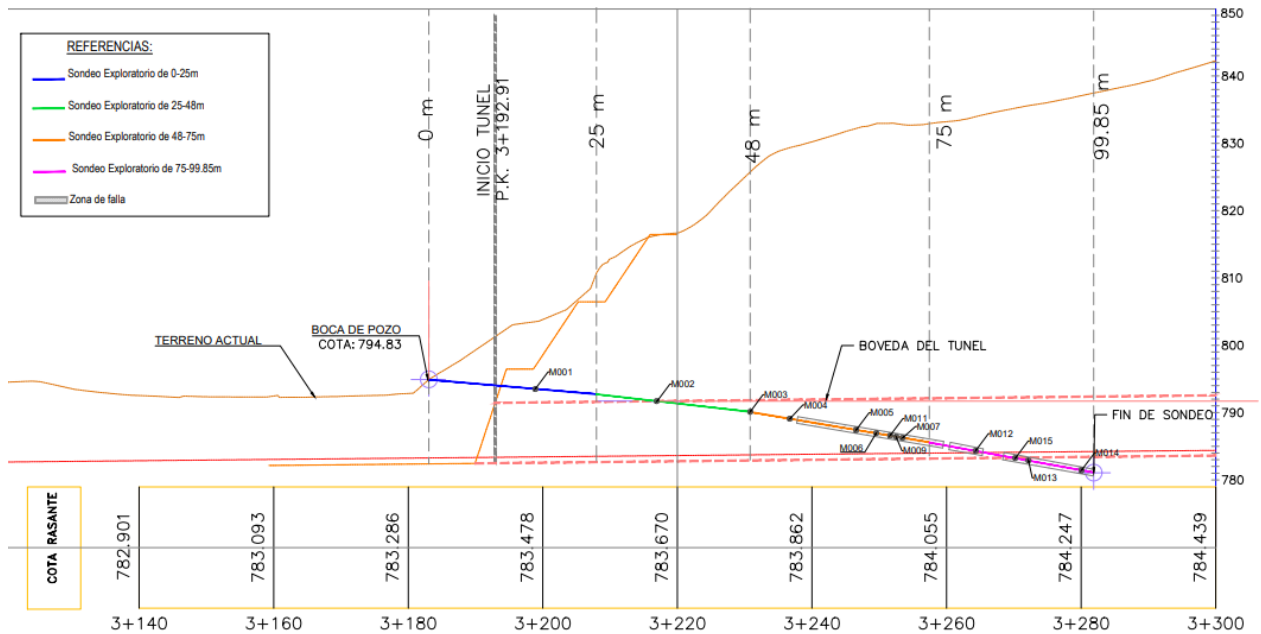


Figura 92. Perfil del sondeo. Se muestra la ubicación de las muestras enviadas a laboratorio.

Las muestras recolectadas fueron enviadas al laboratorio del Instituto de Investigaciones Mineras (IIM), de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan. Allí, fueron distribuidas a los diferentes laboratorios donde se ejecutaron los ensayos correspondientes: Laboratorio de Mecánica de Rocas, Laboratorio de Mineralogía, y Laboratorio Químico (Figura 93).

MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE LABORATORIO					
N°	Tramo (m)	Litología	Ensayos de Laboratorio de Mecánica de Rocas	Ensayo de Laboratorio de Mineralogía (en Arcillas)	Ensayos de Laboratorio Químico
M 001	15,70 a 16,20	Caliza gris oscura	Compresión Simple	-	-
M 002.1	32,70 a 32,9	Caliza Margosa	Triaxial (0,5; 1 ; 2 Mpa)	-	-
M 002.2	33,75 a 34	Caliza Margosa		-	-
M002.3	35,55 a 35,75	Caliza Margosa		-	-
M 003	47,90 a 48,50	Caliza gris oscura	.Triaxial (0,5; 1 ; 2 Mpa) .Durabilidad (2 ciclos)	-	Sulfatos y Anhidrita
M 004.1	53,85 a 54,15	Caliza gris oscura	Carga Puntual	-	Sulfatos y Anhidrita
M 004.2	54,25 a 54,40	Caliza gris oscura	Compresión Simple	-	
M 005.1	63,20 a 63,50	Caliza Margosa	Compresión Simple	-	Sulfatos y Anhidrita
M 005.2	64,35 a 64,50	Caliza Margosa	Carga Puntual	-	
M 006.1	66,45 a 66,65	Brecha	.UCS con banda de Deformación .Ultrasonido	-	Sulfatos y Anhidrita
M 006.2	66,65 a 66,75	Brecha	.Carga Puntual .Durabilidad (2 ciclos)	-	
M 006.3	66,94 a 67,15	Brecha	.Compresión Simple .Durabilidad (2 ciclos)	-	
M 007	68,60 a 69	Marga (falla)	-	.Rayos X .Límites de Atterberg .Azul de Metileno	-
M 009	70,85 a 71,20	Marga (falla)	-	.Rayos X .Límites de Atterberg .Azul de Metileno	-
M 011	67,50 a 67,75	Marga	-	.Rayos X .Límites de Atterberg .Azul de Metileno	-
M 012.1	82 a 82,40	Caliza Margosa	. Ultrasonido .UCS con banda de Deformación	-	-
M 012.2	82,65 a 82,85	Caliza Margosa	Tracción	-	-
M 013	89,60 a 90,10	Brecha	.UCS con banda de Deformación .Ultrasonido	-	-
M 014.1	98,30 a 98,70	Brecha	Triaxial (0,5; 1 ; 2 Mpa)	-	Sulfatos y Anhidrita
M 014.2	98,70 a 98,90	Brecha		-	
M 015	88,30 a 88,50	Brecha	-	.Rayos X .Límites de Atterberg .Azul de Metileno	-

Figura 93. Tabla de Muestras para análisis enviadas a laboratorio.

Resultados de Laboratorio

En la figura 94 se detallan las tablas correspondientes a los resultados de los ensayos realizados sobre las muestras de testigo enviadas al laboratorio con fines exploratorios y de investigación frente a materiales considerados desfavorables en cuanto a los parámetros de calidad para el macizo.

COMPRESIÓN SIMPLE											
Muestra	Diám. [cm]	Alt.[cm]	Área [cm ²]	Vol. [cm ³]	Peso [gr]	P.U. gr/cm ³	Carga [kN]	Carga [kgf]	Esbeltez [Altura/Diámetro]	σ_{rot} kg/cm ²	σ_{rot} [MPa]
M 001 B	6,10	16,06	29,18	468,58	1255,0	2,68	66,40	6770,87	2,63	232,06	22,75
M 004.2	6,09	15,32	29,13	446,26	1160,0	2,60	57,40	5853,14	2,52	200,94	19,70
M 005.1	6,10	16,15	29,24	472,29	1270,0	2,69	120,00	12236,52	2,65	418,43	41,02
M 001 A	6,11	16,02	29,29	469,37	1220,0	2,60	Rompió por precarga				
M 006.3	6,33	13,53	31,47	425,79	930,00	2,18	Rompió por precarga				
COMPRESIÓN SIMPLE CON BANDAS DE DEFORMACIÓN											
Muestra	Diám. [cm]	Alt.[cm]	Área[cm ²]	Peso[gr]	Carga [kN]	Carga [kgf]	Esbeltez [Altura/Diámetro]	σ_{rot} [kg/cm ²]	σ_{rot} [MPa]		
M 006.1	6,15	15,28	29,71	1055	0,80	81,58	2,48	2,75	0,27		
M 012.1	6,12	15,23	29,42	1135	6,00	611,83	2,49	20,80	2,04		
M 013	6,12	15,23	29,42	1170	31,00	3161,10	2,49	107,46	10,54		
TRIAxIAL											
Muestra	Diám. [cm]	Alt. [cm]	Carga [kN]	Carga[kgf]	σ_1 máx [kPa]	σ_3 [kPa]	p [kPa]	q [kPa]			
M 002	6,09	13,15	47,50	4843,62	166,23	5,00	85,61	80,61			
	6,10	13,11	138,00	14072,00	482,30	10,00	246,15	236,15			
	6,09	13,13	243,90	24870,73	852,69	20,00	436,35	416,35			
M 003	6,10	13,11	131,80	13439,78	459,88	5,00	232,44	227,44			
	6,09	13,16	187,70	19139,96	657,08	10,00	333,54	323,54			
	6,09	13,10	178,50	18201,82	625,08	20,00	322,54	302,54			
M 014	6,11	12,97	10,00	1019,71	34,77	5,00	19,88	14,88			
	6,11	13,10	10,00	1019,71	34,82	10,00	22,41	12,41			
	6,10	12,94	10,00	1019,71	34,90	20,00	27,45	7,45			
CARGA PUNTUAL DIAMETRAL											
Muestra	D muestra [cm]	D' [cm]	Área del Embolo [cm ²]	D _e [cm]	D _e [cm ²]	Presión [Kg/cm ²]	Fuerza [Kg/cm ²]	Is [Kg/cm ²]	σ_{rot} [Kg/cm ²]	σ_{rot} [MPa]	
M 004.1	6,11	5,74	14,43	5,92	35,07	40,00	577,04	16,45	247,41	24,26	
M 005.2	6,10	5,73	14,43	5,91	34,94	25,00	360,65	10,32	155,17	15,21	
M 006.2	6,20	5,83	14,43	6,01	36,12	15,00	216,39	5,99	90,17	8,84	
TRACCIÓN INDIRECTA											
Muestra	Diám. [cm]	Alt. [cm]	Área [cm ²]	Peso[kg]	Carga[kN]	Carga [kgf]	σ_{rot} [kg/cm ²]	σ_{rot} [MPa]			
M 012.2	6,11	5,78	55,44	320,20	440,70	1,38	40,20	4099,23			
M 012.2	6,12	5,44	52,27	284,06	404,40	1,42	37,30	3803,52			
DURABILIDAD											
Muestra	Fluido	Peso A Inicial (g)	Peso B 1° Ciclo (g)	Peso C 2° Ciclo (g)	Peso Tambor (g)	ID1 %	ID2 %	ID %	Clasificación		
M 003	Agua Destilada	521,40	517,70	516,10	1755,00	0,99	0,99	98,98	Durabilidad Muy Alta		
M 006.2		506,00	394,20	357,90	1770,00	0,78	0,71	70,73	Durabilidad Media		
M 006.3		510,00	351,70	300,70	1760,00	0,69	0,59	58,96	Durabilidad Baja		
ULTRASONIDO											
Muestra	L (m)	D (m)	Peso(Kg)	V (m ³)	Densidad (kg/m ³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Modulo Elástico Kg/cm ²	Coeficiente de Poisson		
M 006.1	0,154	0,062	1,065	0,0004647	2291,8	2816	1285	105579,58	0,37		
M 012.1	0,152	0,061	1,14	0,00044399	2567,6	4553	2005	290433,35	0,38		

Figura 94. Tablas con los valores de los resultados correspondientes a los ensayos realizados.

A continuación, se presenta el registro de las pruebas realizadas, complementado con detalles fotográficos correspondiente a las muestras previo y posterior a los ensayos (ver Figura 95 a 104).

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE		
UCS M 001 A		
Fotografías Antes del Ensayo	Resultado	
<p>M 001 – 15,70m a 16,20m - UCS</p> <p>M 001 – 15,70m a 16,20m - UCS</p>	<p>M 001 – 15,70m a 16,20m - UCS</p> <p>Roca: Caliza gris oscura. Color: gris oscuro. Dureza: compacta Alteración: moderada. Discontinuidades: oblicuas al eje. Observaciones: Stockwork de calcita. Presencia de material carbonoso (grafito) en la discontinuidad de mayor espesor. Rompió: Por diaclasa en la precarga (acercamiento de la platina).</p>	
UCS M 001.B		
<p>M 001 – 15,70m a 16,20m - UCS</p> <p>M 001 – 15,70m a 16,20m - UCS</p>	<p>M 001 – 15,70m a 16,20m - UCS</p> <p>Roca: Caliza gris oscura. Color: gris oscuro. Dureza: compacta Alteración: moderada. Discontinuidades: Irregulares en toda la muestra. Observaciones: Stockwork de calcita. Rompió: Por esfuerzo.</p>	
UCS M 004.2		
<p>M 004.2 – 54,25m a 54,40m - UCS</p> <p>M 004.2 – 54,25m a 54,40m - UCS</p>	<p>M 004.2 – 54,25m a 54,40m - UCS</p> <p>Roca: Caliza gris oscura. Color: gris oscuro. Dureza: compacta Alteración: moderada. Discontinuidades: Oblicuas al eje. Observaciones: Stockwork de calcita. Rompió: Por esfuerzo.</p>	
UCS M 005.1		
<p>M 005.1 – 63,20m a 63,50m - UCS</p> <p>M 005.1 – 63,20m a 63,50m - UCS</p>	<p>M 005.1 – 63,20m a 63,50m - UCS</p> <p>Roca: Caliza margosa. Color: gris medio. Dureza: compacta Alteración: moderada. Discontinuidades: oblicuas al eje. Observaciones: Delgadas venillas rellenas de calcita. Rompió: Por esfuerzo</p>	
UCS M 006.3		
<p>M 006.3 – 66,94m a 67,13m - UCS</p> <p>M 006.3 – 66,94m a 67,13m - UCS</p>	<p>M 006.3 – 66,94m a 67,13m - UCS</p> <p>Roca: Brecha Color: gris claro. Dureza: poco compacta Alteración: Avanzada. Presencia de material arcilloso. Discontinuidades: oblicua al eje. Observaciones: Venilla rellena con calcita. Rompió: Por precarga en el acercamiento de la platina.</p>	

Figura 95. Ensayo de compresión simple. Se presentan características generales del ensayo, las fotografías de las muestras previo a ser ensayadas (izquierda x 2), y posterior al ensayo (derecha).










ENSAYO DE COMPRESIÓN CON BANDAS DE DEFORMACIÓN		
M 006.1		
Fotografías Antes del Ensayo		Resultado
 M 006.1 – 66,45m a 66,65m – UCS con bandas	 M 006.1 – 66,45m a 66,65m – UCS con bandas	 M 006.1 – 66,45m a 66,65m – UCS con bandas
<p>Roca: Brecha. Color: Gris claro. Dureza: Poco compacta Alteración: avanzada. Discontinuidades: Oblicuas al eje. Observaciones: Discontinuidades con sílice o sin relleno. Rompió: Por esfuerzo.</p>		
M 0012.1		
 M 012.1 – 82m a 82,40m – UCS con bandas	 M 012.1 – 82m a 82,40m – UCS con bandas	 M 012.1 – 82m a 82,40m – UCS con bandas
<p>Roca: Caliza margosa. Color: Gris claro con pátinas de óxidos. Dureza: poco compacta Alteración: elevada. Discontinuidades: oblicuas y paralelas al eje. Observaciones: Discontinuidades rellenas con sílice. Presencia de material arcilloso. Rompió: Por esfuerzo.</p>		
M 013		
 M 013 – 89,60m a 90,10m – UCS con bandas	 M 013 – 89,60m a 90,10m – UCS con bandas	 M 013 – 89,60m a 90,10m – UCS con bandas
<p>Roca: Brecha. Color: Gris claro. Dureza: poco compacta Alteración: media. Discontinuidades: oblicuas al eje. Observaciones: Discontinuidades rellenas con calcita. Rompió: Por esfuerzo.</p>		

Figura 96. Ensayo de compresión con bandas de deformación. Se presentan características generales del ensayo, las fotografías de las muestras previo a ser ensayadas (izquierda x 2), y posterior al ensayo (derecha).

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA		
M 012.2 A		
Fotografías Antes del Ensayo	Resultado	
 <p>M 012.2 – 82,65m a 82,85m - TRACCIÓN</p>	 <p>M 012.2 – 82,65m a 82,85m - TRACCIÓN</p> <p>Roca: Caliza margosa. Color: gris claro. Dureza: compacta. Alteración: media. Discontinuidades: Oblicuas al eje. Observaciones: Discontinuidad rellenas con calcita. Presencia de pátinas de óxidos. Rompió: por esfuerzo.</p>	
UCS M 012.2 B		
 <p>M 012.2 – 82,65m a 82,85m - TRACCIÓN</p>	 <p>M 012.2 – 82,65m a 82,85m - TRACCIÓN</p> <p>Roca: Caliza margosa. Color: gris claro. Dureza: compacta. Alteración: media. Discontinuidades: Oblicuas al eje. Observaciones: Discontinuidad rellenas con calcita. Presencia de pátinas de óxidos. Rompió: por esfuerzo.</p>	

Figura 97. Ensayo de tracción indirecta. Se presentan características generales del ensayo, las fotografías de las muestras previo a ser ensayadas (izquierda x 2), y posterior al ensayo (derecha).

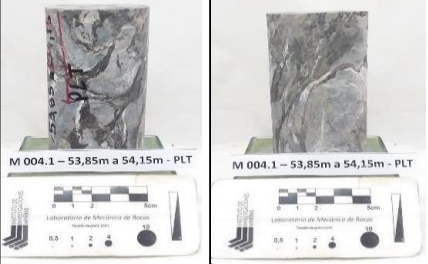



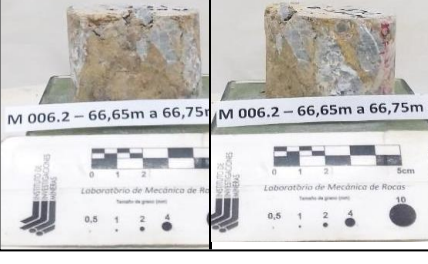

ENSAYO DE CARGA PUNTUAL DIAMETRAL		
M 004.1		
Fotografías Antes del Ensayo	Resultado	
 <p>M 004.1 – 53,85m a 54,15m - PLT</p>	 <p>M 004.1 – 53,85m a 54,15m - PLT</p> <p>Roca: Caliza gris oscura. Color: gris claro con pátinas de óxidos. Dureza: compacta Alteración: media Discontinuidades: Oblicuas al eje. Observaciones: Intenso venilleo con relleno de calcita. Rompió: por esfuerzo.</p>	
M 005.2		
 <p>M 005.2 – 64,35m a 64,50m - PLT</p>	 <p>M 005.2 – 64,35m a 64,50m - PLT</p> <p>Roca: Caliza margosa. Color: gris claro. Dureza: compacta Alteración: media Discontinuidades: Oblicuas al eje. Observaciones: Discontinuidades rellenas con calcita y sílice. Presencia de pátinas de óxidos. Rompió: por esfuerzo.</p>	
M 006.2		
 <p>M 006.2 – 66,65m a 66,75m</p>	 <p>M 006.2 – 66,65m a 66,75m - PLT</p> <p>Roca: Brecha. Color: gris claro con pátinas de óxidos. Dureza: compacta Alteración: elevada. Discontinuidades: Entrecruzadas. Observaciones: Intenso venilleo con relleno de calcita. Rompió: por esfuerzo.</p>	

Figura 98. Ensayo de carga puntual. Se presentan características generales del ensayo, las fotografías de las muestras previo a ser ensayadas (izquierda x 2), y posterior al ensayo (derecha).










SALKE DURABILITY TEST (SDT)		
M 003		
Fotografía antes del Ensayo	Fotografía después del Ensayo	
	Primer Ciclo	Segundo Ciclo
		
Descripción		
<p>Roca: Caliza gris oscura. Color: gris medio Dureza: compacta Alteración: baja Observaciones: pátinas de oxidación en parte de la muestra. Clasificación: Durabilidad Muy Alta</p>		
M 006.2		
Fotografía antes del Ensayo	Fotografía después del Ensayo	
	Primer Ciclo	Segundo Ciclo
		
Descripción		
<p>Roca: Brecha. Color: gris claro. Dureza: poco compacta Alteración: elevada Observaciones: Muestra con pátinas de óxidos y presencia de arcillas. Clasificación: Durabilidad Media.</p>		
M 006.3		
Fotografía antes del Ensayo	Fotografía después del Ensayo	
	Primer Ciclo	Segundo Ciclo
		
Descripción		
<p>Roca: Brecha. Color: gris claro. Dureza: poco compacta Alteración: elevada Observaciones: Muestra con pátinas de óxidos y presencia de arcillas. Clasificación: Durabilidad baja.</p>		

Figura 99. Ensayo de durabilidad/2 Ciclos. Se presentan características generales del ensayo, y las fotografías de la muestra preparada antes de ser ensayada (izquierda), y de ambos ciclos (derecha).

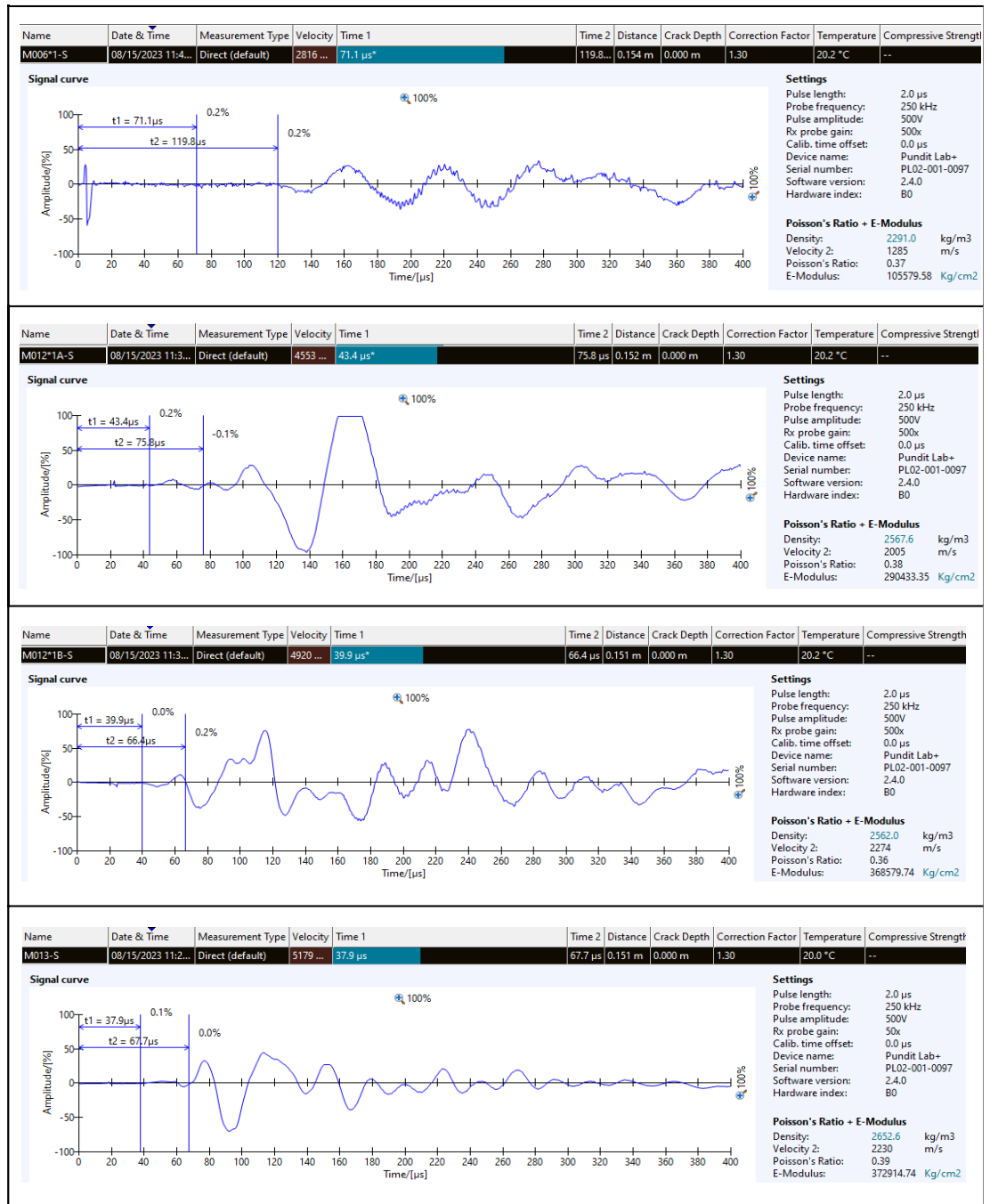


Figura 100. Ensayo de ultrasonido. Se muestran las gráficas Amplitud/tiempo de las muestras ensayadas.

ÍNDICE DE PLASTICIDAD			
Muestra	Detalles	Índice de Plasticidad	Valor CIC (meq/100g)
M007	Material arcilloso de baja plasticidad y sin cohesión	LL=3,08; LP=1,11; IP=1,97%	10
M009	Material arcilloso de baja plasticidad y sin cohesión	LL=3,27; LP=0,93; IP=2,34%	10
M011	Material arcilloso de baja plasticidad y sin cohesión	LL=4,08; LP=1,01; IP=3,07%	10
M015	Material con alto contenido de arena	IP=0	7

Figura 101. Ensayo de plasticidad. Se muestran los índices obtenidos, y la capacidad de intercambio catiónico.










ENSAYO TRIAXIAL		
M 002.1		
Fotografías Antes del Ensayo		Resultado
 <p>M 002.1 – 32,70m a 32,90m – Triaxial 0,5MPa</p>	 <p>M 002.1 – 32,70m a 32,90m – Triaxial 0,5MPa</p>	 <p>M 002.1 – 32,70m a 32,90m – Triaxial 0,5MPa</p> <p>Roca: Caliza Margosa Color: gris claro. Dureza: compacta Alteración: media. Discontinuidades: Oblicuas al eje. Observaciones: Discontinuidad rellena con calcita. Rompió: por diaclasa.</p>
M 002.2		
 <p>M 002.2 – 33,75m a 34m – Triaxial 1MPa</p>	 <p>M 002.2 – 33,75m a 34m – Triaxial 1MPa</p>	 <p>M 002.2 – 33,75m a 34m – Triaxial 1MPa</p> <p>Roca: Caliza margosa Color: gris claro. Dureza: compacta Alteración: media. Discontinuidades: Oblicua y paralelas al eje de la muestra. Observaciones: Delgadas discontinuidades rellenas con calcita. Rompió: por esfuerzo.</p>
M 002.3		
 <p>M 002.3 – 35,55m a 35,75m – Triaxial 2MPa</p>	 <p>M 002.3 – 35,55m a 35,75m – Triaxial 2MPa</p>	 <p>M 002.3 – 35,55m a 35,75m – Triaxial 2MPa</p> <p>Roca: Caliza margosa. Color: gris claro. Dureza: compacta Alteración: media. Discontinuidades: Oblicuas al eje. Observaciones: Discontinuidades rellenas con calcita. Rompió: por diaclasa.</p>

Figura 102. Ensayo triaxial. Se presentan características generales del ensayo, las fotografías de las muestras previo a ser ensayadas (izquierda x 2), y posterior al ensayo (derecha).

ENSAYO TRIAXIAL		
M 003		
Fotografías Antes del Ensayo		Resultado
		<p>Roca: Caliza gris oscura. Color: gris medio. Dureza: compacta. Alteración: media. Discontinuidades: Oblicuas al eje. Observaciones: Discontinuidades rellenas con calcita. Rompió: por esfuerzo.</p>
M 003		
		<p>Roca: Caliza gris oscura. Color: gris medio. Dureza: compacta. Alteración: media. Discontinuidades: Oblicuas al eje. Observaciones: Discontinuidades rellenas con calcita y sílice. Rompió: por esfuerzo.</p>
M 003		
		<p>Roca: Caliza gris oscura. Color: gris medio. Dureza: compacta. Alteración: media. Discontinuidades: Oblicuas y paralela al eje. Observaciones: Discontinuidades rellenas con calcita. Rompió: por esfuerzo.</p>

Figura 103. Ensayo triaxial. Se presentan características generales del ensayo, las fotografías de las muestras previo a ser ensayadas (izquierda x 2), y posterior al ensayo (derecha).










ENSAYO TRIAXIAL		
M 014.1		
Fotografías Antes del Ensayo		Resultado
		 <p>Roca: Brecha. Color: gris claro. Dureza: poco compacta Alteración: elevada. Discontinuidades: Oblicuas y paralelas al eje. Observaciones: Discontinuidades con relleno de calcita y otras sin relleno visible. Rompió: por esfuerzo.</p>
M 014.1		
		 <p>Roca: Brecha. Color: gris claro. Dureza: poco compacta Alteración: Muy alta. Discontinuidades: Oblicuas y paralelas al eje. Observaciones: Discontinuidades con relleno de calcita y otras sin relleno visible. Rompió: por esfuerzo de precarga.</p>
M 014.2		
		 <p>Roca: Brecha. Color: gris claro. Dureza: poco compacta Alteración: elevada. Discontinuidades: Oblicuas y paralelas al eje. Observaciones: Discontinuidades con relleno de calcita y otras sin relleno visible. Rompió: por esfuerzo.</p>

Figura 104. Ensayo triaxial. Se presentan características generales del ensayo, las fotografías de las muestras previo a ser ensayadas (izquierda x 2), y posterior al ensayo (derecha).

Los ensayos de laboratorio fueron usados como una herramienta complemento para el análisis de este trabajo. Se observa que los resultados muestran una resistencia de la matriz rocosa más alta para calizas y valores menores para muestras con mayor contenido de margas o material fino relleno estructuras. Considerando la clasificación en base a la resistencia de la roca propuesta por González (2002), las calizas se clasifican como rocas medianamente duras, y las rocas con mayor contenido de arcillas, pasando a margas, como rocas blandas a muy blandas. Debido a la complejidad que presentan los materiales arcillosos para la estabilidad de taludes, se observó que las arcillas tienen baja resistencia, baja plasticidad y no tienen cohesión.

CAPÍTULO 8: CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO

Los cortes o perfiles geológicos son una herramienta esencial para comprender la estructura del subsuelo y sus características, ya que son una representación gráfica de las estructuras y litología de un determinado lugar.

A efectos de lograr una correcta y sólida caracterización geomecánica del macizo rocoso, se llevó a cabo una correlación entre las observaciones y los datos relevados en el mapeo de superficie, con los resultados de las investigaciones geotécnicas sobre el sondeo geotécnico. Las observaciones y análisis realizados en superficie arrojan resultados geomecánicos que clasifican y caracterizan al macizo como clase III condicionada e influenciada por el claro predominio tectónico en la zona de trabajo.

Los registros del sondeo muestran una alternancia en la caracterización del macizo, que intercala roca tipo III y roca tipo IV existiendo tramos de roca separados por planos y zonas de falla con roca tipo V, donde esos planos cuentan con diferentes condiciones de fracturamiento, características de las discontinuidades, grados de alteración, entre otros factores. Con esto, se puede considerar una calidad del macizo mala, condicionado por zonas de falla. Para tratar estos sectores con peores condiciones del macizo, se adopta una subclasificación para el macizo, según algunos autores quedaría definida con una clase IV a, que hace referencia a un macizo rocoso con características más próximas a una calidad media, con mejores condiciones que las definidas por una clase IV mala. Asignando estas medidas de clasificación, y caracterizando al macizo con un comportamiento geomecánico más favorable, es posible correlacionar de forma más precisa y coincidente con las condiciones expuestas en superficie.

Las observaciones y el análisis que resulta de los trabajos realizados quedan demostrados en la Figura 105 que representa la correlación entre los relevamientos en superficie y los datos del sondeo. El perfil muestra la superposición de ambos trabajos, con la distinción de sectores del macizo en mejores condiciones separadas por zonas de falla que significan un peor estado geomecánico para el macizo.

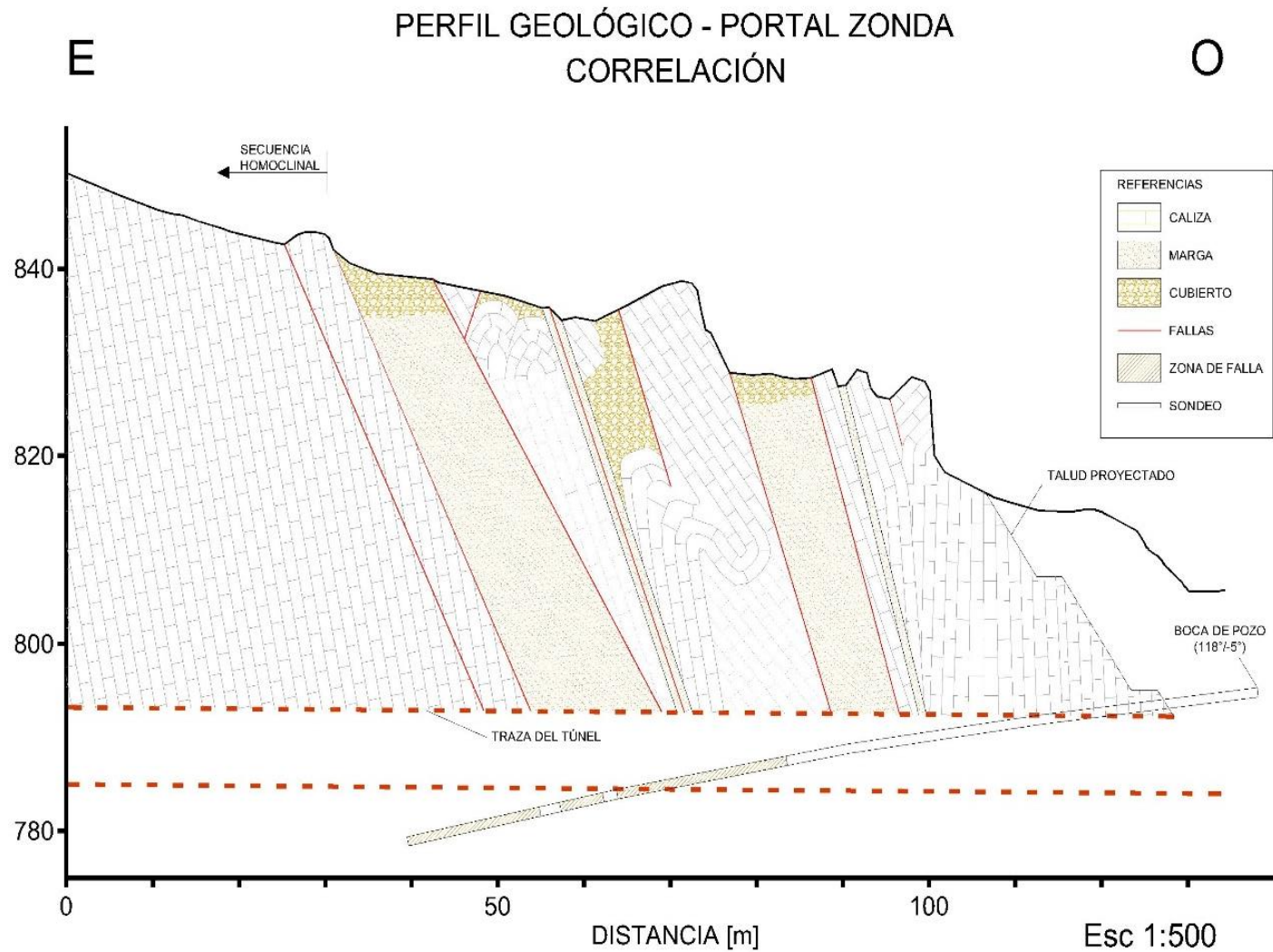


Figura 105. Perfil completo con la información mapeada en superficie y los resultados del sondeo exploratorio. Se observa una correlación en las zonas de falla y la litología atravesada (las estructuras de los primeros metros del sondeo no fueron representadas por una cuestión de escalas, debido a la cercanía de las mismas).

A partir de esta correlación, es posible reconocer zonas de falla que se corresponden tanto en superficie como en profundidad, lo cual da sustento a los escenarios planteados y genera una mayor confianza en los resultados obtenidos (ver Figura 106 A). Las observaciones pueden vincularse con aquellas realizadas sobre los planos de diaclasa y fracturas en el sondeo, los cuales presentaban estrías y escalones de arrancamiento que evidencian lo observado en superficie (ver Figura 106 B).



Figura 106. A) Vista hacia el norte, se observa afloramiento de calizas plegadas, intercaladas con niveles margosos triturados por fallas (línea amarilla discontinua). B). Fotografía de detalle de testigo de roca del sondeo exploratorio, se corresponde en profundidad con los afloramientos descritos en A. Se señalan las estrías de movimiento con líneas negras.

CAPÍTULO 9: SOSTENIMIENTO

Con el objetivo de contribuir al equilibrio entorno a la obra, los elementos estructurales que forman parte del sostenimiento mejoran las condiciones para que el terreno no pierda o modifique significativamente sus propiedades por efecto de la ejecución de trabajos, y en su operación posterior.

Durante la etapa de prediseño, se debe tener en cuenta fundamentalmente cuáles son los tipos de procesos deformacionales y de redistribución de esfuerzos que van a generarse durante la excavación, así como cuáles son los fenómenos y mecanismos que determinarán la estabilidad. Estos últimos estarán íntimamente relacionados con la naturaleza litológica de los materiales y en el caso de túneles en roca, con el tipo de discontinuidades que rigen el comportamiento del macizo y con el grado de fracturamiento, con la deformabilidad y resistencia del medio. Tomar en cuenta todo lo anterior es determinante al momento de elegir los sistemas de soporte, estabilización y reforzamiento, y también los tipos de carga adecuados a cada uno de los distintos sistemas.

Al diseñar la excavación, se debe tener en claro cuáles son los tipos de procesos deformacionales y de redistribución de esfuerzos que van a generarse durante la ejecución, así como cuáles son los fenómenos y mecanismos que determinarán la estabilidad de la misma. Lo anterior estará íntimamente ligado a la naturaleza litológica de los materiales, a las condiciones naturales de esfuerzos en el terreno, al tipo de discontinuidades que condicionan el comportamiento del macizo, así como al grado de fracturamiento, la deformabilidad y la resistencia de la roca y/o el suelo. Tomar en cuenta todo lo anterior es determinante para elegir los sistemas de soporte, estabilización y reforzamiento, así como las sollicitaciones (tipos de carga) para las cuales deberán ser diseñados los distintos sistemas.

El Nuevo Método Austríaco (NATM) de construcción de túneles, tiene como objetivo lograr que el terreno que rodea a la excavación actúe como un anillo portante, llegando a constituir un elemento fundamental del sostenimiento activo. Se basa en el comportamiento reológico de los macizos rocosos y las relaciones entre las deformaciones radiales y los sostenimientos. Consiste en la inmediata aplicación de un sostenimiento provisional semi rígido de hormigón proyectado, pernos y excepcionalmente cerchas, y las medidas de auscultación.

En roca, los elementos que más se utilizan para el sostenimiento son aquellos que no modifican las propiedades ni el estado de esfuerzos del terreno, solamente actúan cuando el medio que circunda la excavación tiende a deformarse o cuando bloques o masas de roca inestables tienden a separarse y caer. Estos son, hormigón proyectado, pernos de anclaje y mallas electrosoldadas, cuyas características y propiedades principales se describen a continuación. En ciertas circunstancias, principalmente al atravesar zonas de mala calidad de roca se utilizan, además, cerchas metálicas, paraguas o enfilajes, inyecciones, drenajes, etc.

Características Generales

Al mencionar los elementos de los sistemas de sostenimiento, es imprescindible tener en claro sus parámetros físicos. A continuación, la tabla de la Figura 107 sintetiza esos valores en cuestión, según las clases de macizo que son identificadas con la clasificación geomecánica.

Tipo de terreno	CLASE IV	CLASE III-B	CLASE III-A	CLASE II
Shotcrete - Hormigón	H-30	H-30	H-30	H-30
Espesor	0.25 m	0.25 m	0.20 m	0.15 m
Módulo de Young	20000 MPa	20000 MPa	20000 MPa	20000 MPa
Relación de Poisson	0.20	0.20	0.20	0.20
Tensión de compresión	30 MPa	30 MPa	30 MPa	30 MPa
Tensión de tracción	10 MPa	10 MPa	10 MPa	10 MPa
Fibra de acero	40kg/m ³	40kg/m ³	40kg/m ³	40kg/m ³
Pernos - Bulones	tipo GEWI	tipo GEWI	tipo GEWI	tipo GEWI
Diámetro perno	32 mm	32 mm	32 mm	32 mm
Separación pernos	1,5m x 1,5m	1,5m x 1,5m	1,5m x 1,5m	2m x 2m
Longitud perno	6.00 m	6.00 m	6.00 m	6.00 m
Módulo de elasticidad	200000 MPa	200000 MPa	200000 MPa	200000 MPa
Capacidad tracción	0.402 MN	0.402 MN	0.402 MN	0.402 MN
Diámetro perno	32	32	32	32
Separación pernos	2m x 1,5m	2m x 1,5m	2m x 1,5m	2m x 2m
Longitud perno	5.00 m	5.00 m	5.00 m	5.00 m
Módulo de elasticidad	200000 MPa	200000 MPa	200000 MPa	200000 MPa
Capacidad tracción	0.402 MPa	0.402 MPa	0.402 MPa	0.402 MPa
Cercha				
Espaciado	2.00 m	-	-	-
Área	1119 mm ²	-	-	-

Figura 107. Tabla de parámetros y valores de coeficientes de los principales elementos de sostenimiento.

Pernos de anclaje por fricción

Los anclajes, barras corrugadas, pernos o bulones, junto con los componentes químicos encargados de solidarizarlos con el terreno (resinas o lechadas de cemento), y las placas de distribución de esfuerzos atornilladas en el extremo expuesto de cada anclaje, son elementos que conforman este sistema de sostenimiento (Figura 108). Se adhieren al terreno por medios mecánicos y tienen un funcionamiento pasivo, es decir, no modifican el campo de esfuerzos en la excavación y solo al activarse se manifiestan como refuerzo mejorando el comportamiento del macizo.

Los anclajes pasivos más comunes son varillas corrugadas de acero (grado 40), con diámetros comprendidos entre 19 mm y 32 mm. El producto químico utilizado con frecuencia es la lechada de cemento, que suele tener una relación agua/cemento (a/c) entre 0,4 y 0,5.



Figura 108. Perno de anclaje instalado. Se señala con recuadro y se amplía con un ejemplo.

Malla Electrosoldada

Consiste en un “enrejado” formado por una parrilla de barras de acero corrugado, unidas mediante electrosoldadura (Figura 109). Se utiliza como refuerzo del hormigón proyectado por su facilidad de adaptación a la forma de los taludes y túnel. Generalmente se usa un mallado de diámetros de 4, 5 o 6 mm con separaciones comprendidas entre 10 y 20 centímetros.



Figura 109. Mallas electrosoldadas instaladas en el talud, previo a la colocación del hormigón proyectado.

Hormigón proyectado

Es hormigón que se proyecta sobre una superficie, neumáticamente, a alta velocidad y a través de una manguera (Figura 110). La mezcla del hormigón proyectado contiene una dosis mayor de cemento, mayor contenido de arena, menor tamaño de los agregados gruesos y mayor cantidad de aditivos que los hormigones convencionales.

Como características principales se mencionan las siguientes:

- Peso volumétrico en estado fresco comprendido entre los $21,6 \text{ kN/m}^3$ ($2,2 \text{ t/m}^3$) y los $23,5 \text{ kN/m}^3$ ($2,4 \text{ t/m}^3$), con una resistencia a la compresión, $f'c$, de por lo menos $25,5 \text{ N/mm}^2$ (250 kg/cm^2).
- El hormigón será reforzado con fibra metálica en una dosis de 40 kg/m^3 . Las fibras de acero deben proporcionar características y propiedades de resistencia, rigidez y adherencia con el hormigón, que están en función de su relación de esbeltez, donde el valor de esta relación deberá estar comprendida entre 20 y 100.
- Los aditivos son necesarios para el óptimo desempeño del hormigón proyectado durante su ejecución, y a lo largo de su vida útil. Los más comunes son superfluidificantes, acelerantes, microsílica, etc.



Figura 110. Máquina proyectando el hormigón sobre el talud, cubriendo las mallas.

Cerchas

Los marcos metálicos, cimbras o cerchas reticuladas, están compuestas por armaduras tridimensionales, constituidas por tres o cuatro barras principales conectadas por elementos rigidizadores, son fabricadas mediante el acoplamiento de tramos rectos de perfiles estructurales comerciales. Se fijan al contorno de la sección excavada y se recubren con hormigón lanzado para una función de recepción de cargas y a la vez pueden acompañar las deformaciones del túnel constituyendo una especie de armadura de refuerzo a lo largo del túnel que le provee a la excavación un equilibrio entre soporte y consumo de concreto (Figura 111).



Figura 111. Máquina elevadora posicionando la cercha en el frente de excavación (imagen del portal Rivadavia).

El tipo de sostenimiento que se aplica en secciones de un túnel depende de las características del macizo que se esté excavando, el cual es clasificado geomecánicamente como se mencionó anteriormente, usándose secciones típicas de acuerdo a la clase determinada para cada tramo. A continuación, a modo de ejemplificar el sostenimiento para el interior del túnel, se muestran algunas secciones típicas extraídas del capítulo de “Definición de fases de excavación y sostenimiento” del trabajo final correspondiente a la Especialización en Túneles y Obras Subterráneas, realizado con el propósito de generar el proyecto completo de un túnel, particularmente el Túnel de Zonda (Sardiña 2021). Se incluyen esquemas típicos, con el detalle de los elementos de sostenimiento que se presentan particularmente (ver Figura 112 y 113).

Sostenimiento Clase II (RMR > 60)

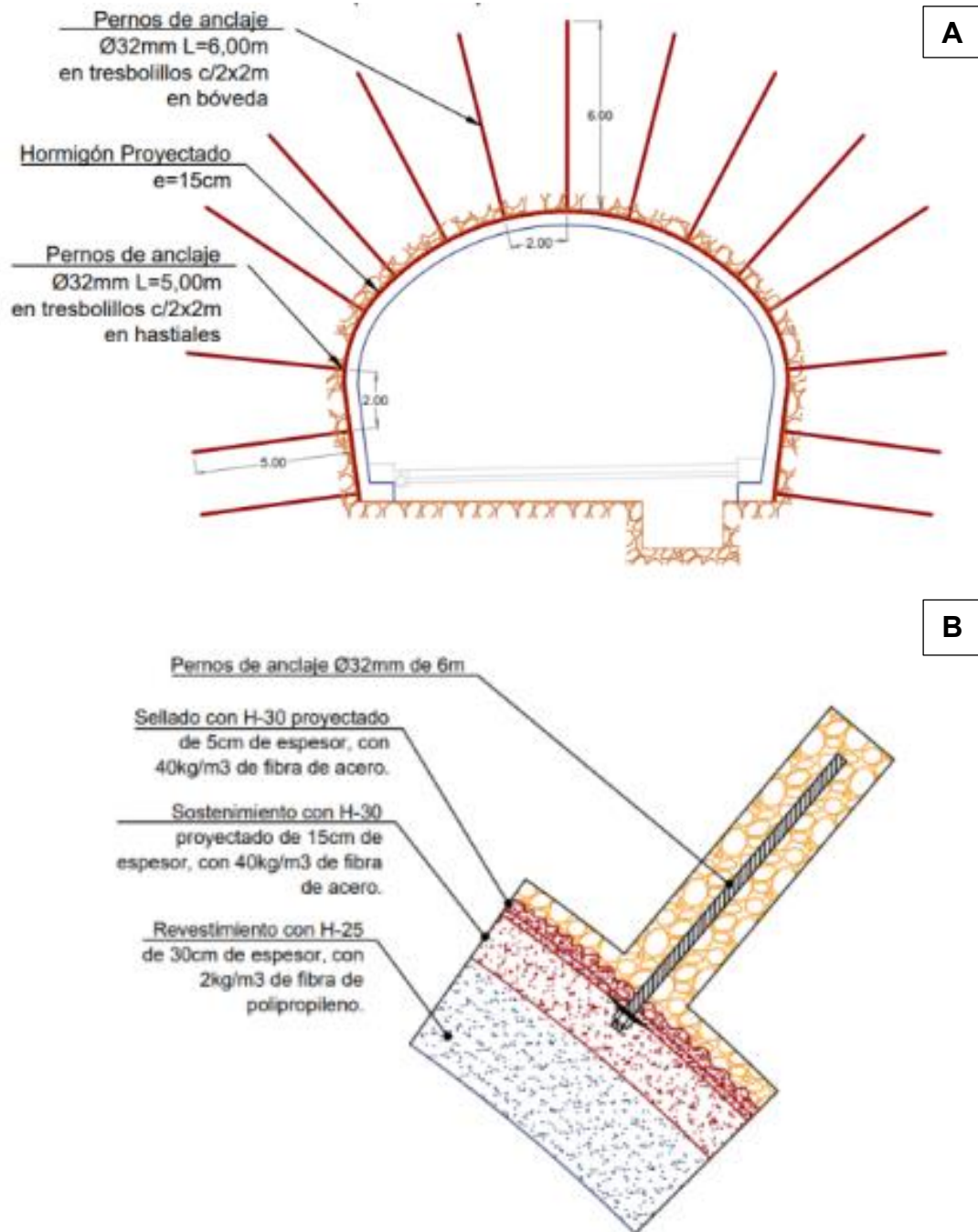


Figura 112. Figura esquemática tomada de Sardiña (2021). A) Sección típica de sostenimiento para RMR>60. B) Detalles de sostenimiento para macizo Clase II.

Sostenimiento clase IV ($30 < RMR < 40$)

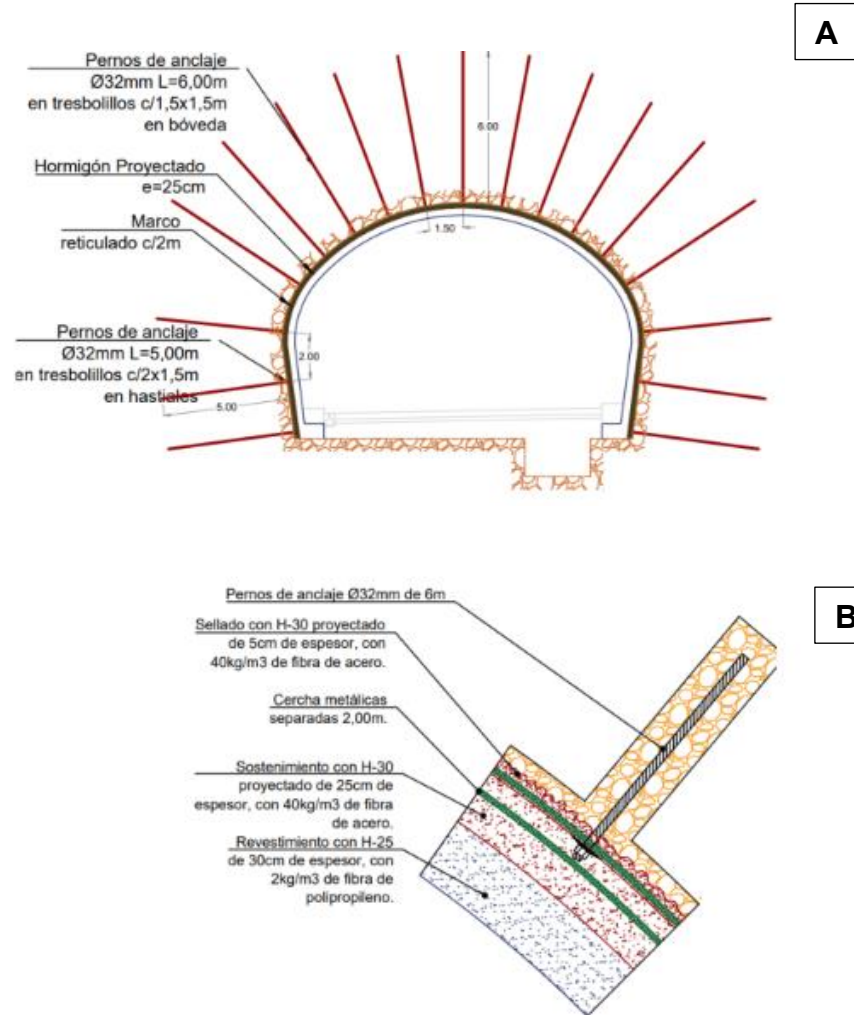


Figura 113. Figura esquemática tomada de Sardiña (2021). A) Sección típica de sostenimiento para $30 < RMR < 40$. B) Detalles de sostenimiento para macizo Clase IV.

Los elementos de sostenimiento recomendados para los taludes que forman parte del portal (ventanas geotécnicas 1, 2 y 3), son pernos de anclaje, mallas electrosoldadas y hormigón proyectado. Todos estos elementos estructurales le imparten condiciones de estabilidad para estos taludes. El talud natural que forma parte de la ventana geotécnica 4 no requiere sostenimiento debido a que se corresponde con un talud natural, con disposición de planos sin condición crítica. Los taludes naturales correspondientes a las ventanas geotécnicas 5 y 6, muestran una buena disposición de planos respecto a orientación del talud, pero muestran una condición desfavorable de fracturación y presencia de material fino, con lo cual es recomendable para este tipo de situaciones, instalas pernos de anclaje y mallas electrosoldadas, pudiendo éstas últimas ser de menor espesor.

CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES

La respuesta del macizo rocoso ante las acciones naturales e inducidas determina las condiciones de estabilidad del túnel, taludes y excavaciones, y como consecuencia, las medidas de sostenimiento a aplicar.

Con este trabajo se concluye que el sistema de fallas y estructuras asociadas presentes en la sierra de Marquesado genera un dominio estructural y condiciona el estado de la roca. El plegamiento se debe a la ductilidad del material, condicionado por los esfuerzos tectónicos compresivos. La litología presenta un importante grado de fracturación, que en sectores es más intenso. El grupo litológico con menor resistencia, en este caso correspondiente a margas de la Formación Zonda, se comportó como medio de propagación de las estructuras debido a que funcionó como planos de debilidad. Por esto, la topografía indica “valles” limitados por “crestas”, donde esas depresiones se corresponden con litologías más blandas (margas o calizas margosas) y los afloramientos sobresalientes con roca más resistente (caliza). A su vez, tanto en superficie como en el subsuelo, a partir del sondeo, se observó que las litologías menos resistentes controlaron las zonas o planos de falla.

Con un minucioso análisis del estado de las rocas y condiciones del macizo, se pueden evaluar en detalle los aspectos fundamentales y las técnicas de construcción eficaces para asegurar la estabilidad e integridad de las excavaciones.

Las zonas de emboque deben ser estudiadas de forma particular. En términos generales, el bajo espesor y cobertura de la columna de roca que se encuentra recubriendo, y la exposición a los agentes meteóricos, da lugar a malas condiciones, mayor grado de alteración, mayor permeabilidad y flujo de agua, que son factores que predeterminan una mayor deformabilidad y menor resistencia que el resto del trazado, sin considerar estructuras de falla o ciertas condiciones que representen un escenario desfavorable para el macizo en ese punto. Bajo ese criterio, para el análisis geotécnico del portal se relevaron 3 ventanas geotécnicas cubriendo los distintos niveles de taludes. La caracterización geomecánica SMR indica clase III para todas las estaciones, estableciendo una condición media de estabilidad para el macizo. El análisis cinemático realizado con el software Dips estableció un buen panorama para los planos de discontinuidad respecto al talud, mostrando como situación crítica la formación de cuñas por la intersección de algunos juegos de diaclasas, pero sin riesgo mayor. Para completar la caracterización del macizo en los afloramientos superiores, ubicados sobre la traza del túnel en construcción, se realizó el análisis de una ventana cuyo valor alto de SMR (clase II calidad Buena), indica mejores condiciones para el macizo debido a la disposición del talud elegido el cual muestra que existe una mejor condición geométrica para los planos de discontinuidad relevados, respecto de la dirección e inclinación del mismo. El análisis cinemático con el software Dips mostró la generación de cuñas formadas por la intersección de los planos de estratificación con una familia de diaclasa, y la intersección dada por dos

familias de diaclasas. Debido a que éstas no tienen continuidad ni dimensiones considerables, la condición no representa un riesgo geológico.

Como complemento para estas observaciones, se definieron ventanas geotécnicas hacia el norte y sur del portal del túnel. En estos sectores, la roca se presenta intensamente fracturada, con planos secundarios de falla, y predominio de caliza intercalada con material más fino. Los resultados de la caracterización geomecánica SMR indica clase III para ambas estaciones, estableciendo una calidad media para el macizo. El análisis cinemático por parte del software Dips indica una posible falla planar para una familia de diaclasa en la estación 6, una familia de diaclasa con posibilidad de vuelco, y la generación de cuñas en intersección de diaclasas con planos de falla menores. Para la estación 5, el resultado indica generación de cuña en intersección de diaclasas con plano de falla, y la probabilidad de vuelco para una familia de diaclasa.

En general se esperaba obtener valores de SMR bajos que indiquen malas condiciones del macizo en cuanto a su estado y estabilidad, esto debido a las observaciones preliminares de litología y estructuras. Sin embargo, el análisis geotécnico determinado por la caracterización SMR, y el soporte gráfico del software dips para el análisis cinemático de los planos relevados en cada talud, determinó que las condiciones del macizo son regulares a buenas. Cabe destacar que en la correlación con los resultados del sondaje hay diferencias ya que la roca se describió como regular a mala para sectores descritos como “zona de falla”.

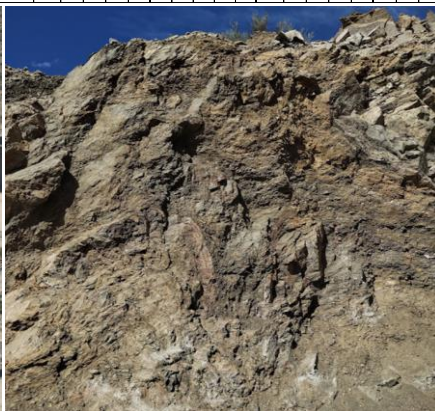
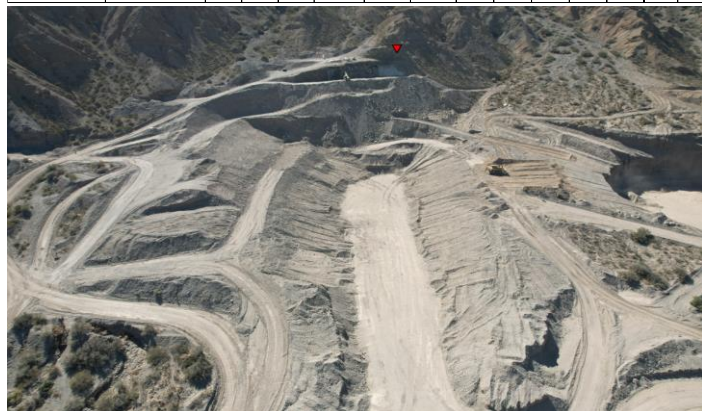
Las investigaciones in situ para taludes o la excavación subterránea, sirven para reconocer geológica y geotécnicamente el terreno afectado por la excavación, poder obtener los parámetros necesarios para determinar la estabilidad, diseño de taludes, métodos de excavación y tipo de sostenimiento a aplicar.

Como complemento, el proceso constructivo depende de la excavabilidad de las rocas, en función de la resistencia, dureza y abrasividad, entre otros factores. Por otro lado, con esta vasta cantidad de recursos aprovechables y detectables, se podrán reducir los riesgos de encontrar condiciones desconocidas y también las formas de afrontarlas en caso de ocurrencia.

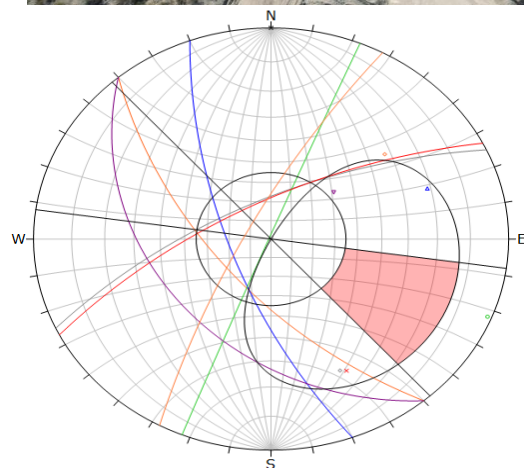
ANEXO

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RELEVAMIENTO GEOTÉCNICO EN CAMPO

Datos del Talud				Resistencia a la Compresión Simple						RQD %					Estado de las Discontinuidades										Presencia de Agua																						
Tipo	Excavación Mecánica			Ensayo de Carga Puntual Compresión Simple						N° de Juntas por metro cuadrado	RQD = 115 - 3.3 · (P · J) > 4.5	RQD = 100 · (P · J) < 4.5	Longitud			Separación		Abertura		Rugosidad		Relleno		Alteración			Caudal / Estado l/min																				
	Rumbo	208°		Carga Puntual	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2							< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave	Ninguno	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Blando < 5 mm	Blando > 5 mm	Inalterada	Ligeramente Alterada	Moderadamente Alterada	Muy Alterada	Descompuesta	Nulo	< 10 l/m	10 - 25 l/m	25 - 125 l/m
Buzamiento	78°			Compr. Simple	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1	20	17	13	8	3	6	4	2	1	0	20	15	10	8	5	3	6	5	3	1	0	6	4	2	2	0	6	5	3	1	0	15	10	7	4	0
VENTANA GEOTECNICA				Tipo de Plano	SISTEMA	RUMBO	BUZAMIENTO																																								
Nivel 1 (825)	Estratificación	So	245	69																																											
	Diaclasa	D1	140	64																																											
		D2	161	70																																											
		D3	202	89																																											
		D4	140	38																																											
Falla	F	243	70																																												



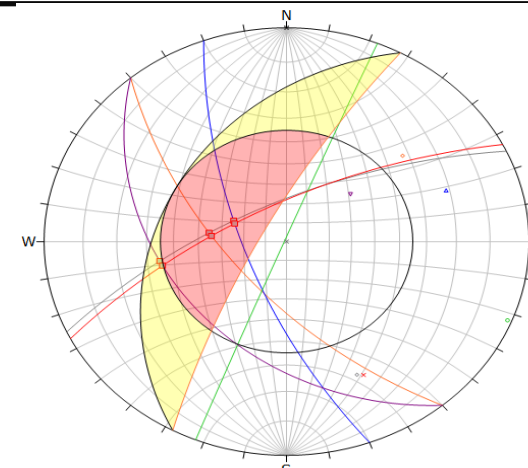
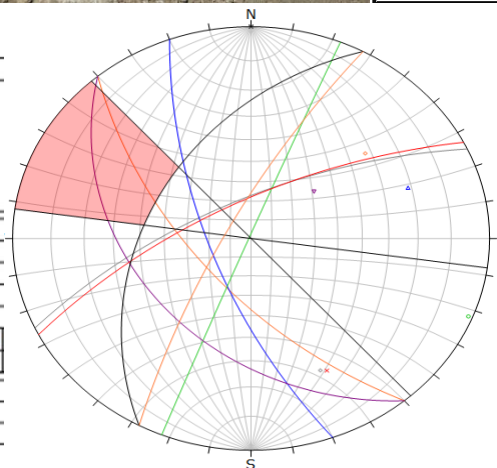
Clasificación Geomecánica					
RMR		SMR			
RMR básico	Factores de ajuste				valor SMR
puntaje	F1	F2	F3	F4	(RMR+(F1xF2xF3)+F4)
49	0,15	1	0	0	49
67	0,15	1	0	0	67
62	0,15	1	0	0	62
64	0,8	1	0	0	64
60	0,15	0,9	-50	0	53,6
54	0,18	1	0	0	54
VALORACIÓN TOTAL SMR (SLOPE MASS RATING)					
58 / Calidad MEDIA (Clase III)					



Symbol	ID
○	1
○	2
△	3
○	4
▽	5
×	6

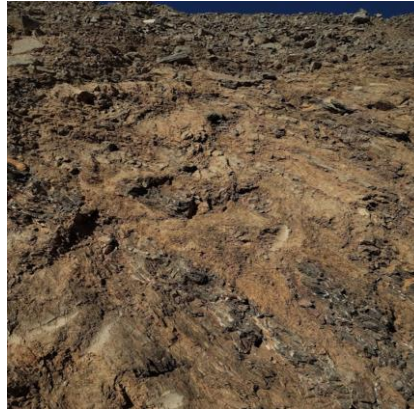
Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	78°
Slope Dip Direction	298°
Friction Angle	35°
Lateral Limits	20°
	Critical
Planar Sliding (All)	0

Kinematic Analysis	Flexural Toppling
Slope Dip	78°
Slope Dip Direction	298°
Friction Angle	35°

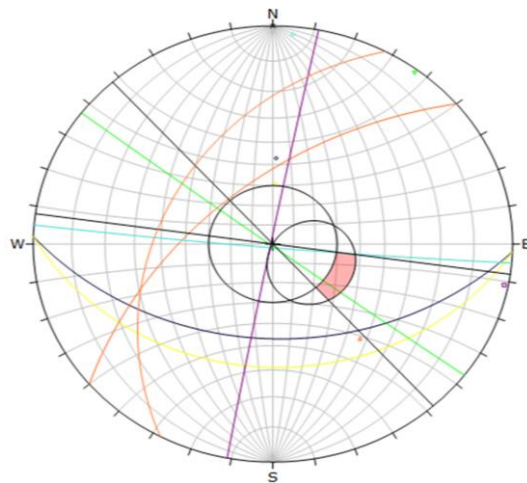


CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA
RELEVAMIENTO GEOTÉCNICO EN CAMPO

Datos del Talud				Resistencia a la Compresión Simple							RQD %			Estado de las Discontinuidades										Presencia de Agua															
Tipo	Excavación Mecánica			Ensayo de Carga Puntual Compresión Simple							N° de Juntas por metro cuadrado	RQD = 115 - 3.3 (P ₁ x 4.5)	RQD = 100 (P ₁ x 4.5)	Longitud		Separación		Abertura		Rugosidad		Relleno		Alteración		Caudal / Estado l/min													
Rumbo	208°									< 1 m				1 - 3 m	< 0.2 m	0.2 - 0.6 m	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	Muy Rugosa	Rugosa	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Blando < 5 mm	Blando > 5 mm	Inalterada	Ligeramente Alterada	Moderadamente Alterada	Muy Alterada	Descompuesta	Nulo	< 10 l/m	10 - 25 l/m	25 - 125 l/m	> 125 l/m					
Buzamiento	40°			Carga Puntual	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2																															
VENTANA GEOTECNICA				SISTEMA	RUMBO	BUZAMIENTO		Valor							20		15		10		5		3		1		0												
Tipo de Plano				SoM	92	43										23		39,1																					
Nivel 3 (805)	Estratificación	SoM	92	43																																			
		SoC	92	31																																			
		D1	230	59																																			
		D2	95	88																																			
		D3	127	89																																			
Diaclasa	D4	191	89																																				

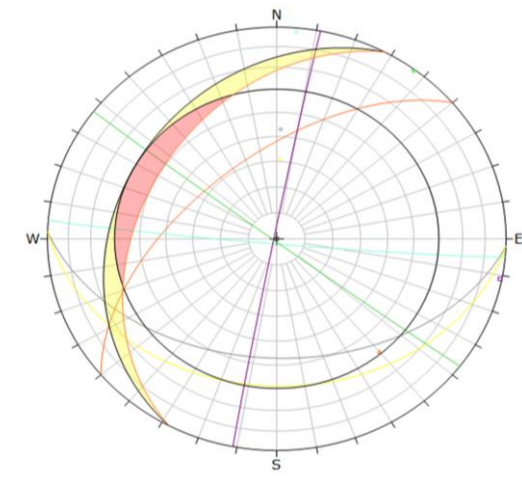
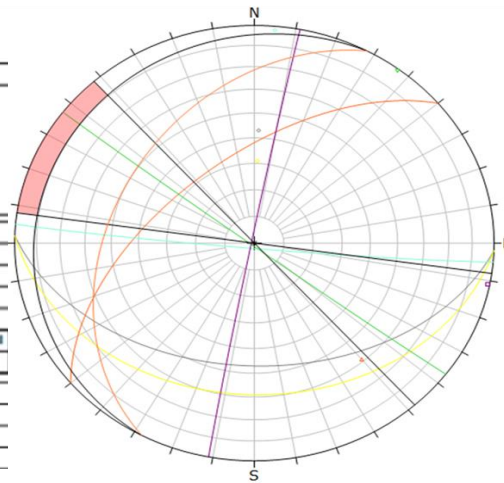


Clasificación Geomecánica					
RMR		SMR			
RMR básico	Factores de ajuste				valor
puntaje	F1	F2	F3	F4	(RMR+(F1xF2xF3)+F4)
51	0,15	0,85	-6	0	50,23
54	0,15	0,7	-50	0	48,75
67	0,4	1	0	0	67
64	0,15	1	0	0	64
59	0,15	1	0	0	59
59	0,15	1	0	0	59
VALORACIÓN TOTAL SMR (SLOPE MASS RATING)					
57 / Calidad MEDIA (Clase III)					



Symbol	ID
○	1
●	2
▲	3
◆	4
◇	5
□	6

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	40
Slope Dip Direction	298
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°
	Critical
Planar Sliding (All)	0
Kinematic Analysis	Flexural Toppling
Slope Dip	40
Slope Dip Direction	298
Friction Angle	30°

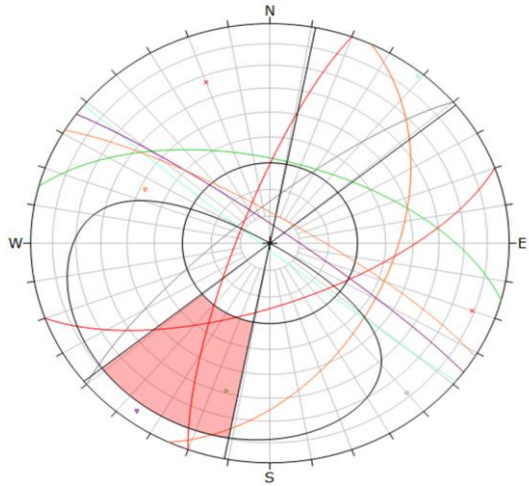


CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA
RELEVAMIENTO GEOTÉCNICO EN CAMPO

Datos del Talud				Resistencia a la Compresión Simple					RQD %		Estado de las Discontinuidades										Presencia de Agua																											
Tipo	Talud Natural			Ensayo de Carga Puntual Compresión Simple					N° de juntas por metro cuadrado	RQD = 100 - (P x 4.5)	RQD = 100 - (P x 4.5)	Longitud			Separación		Abertura		Rugosidad		Relleno		Alteración			Caudal / Estado l/m																						
	Rumbo	301°		Carga Puntual > 250	4 - 100	2 - 50	1 - 25	1 - 5				1 - 1	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave	Ninguno	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Blando < 5 mm	Blando > 5 mm	Inalterada	Ligeramente Alterada	Moderadamente Alterada	Muy Alterada	Descompuesta	Nulo	< 10 l/m	10 - 25 l/m	25 - 125 l/m	> 125 l/m		
Buzamiento	80°			Valor	15	12	7	4	2	1	0	20	17	13	8	3	6	4	2	1	0	20	15	10	8	5	3	1	0	6	5	3	1	0	6	5	3	1	0	15	10	7	4	0				
VENTANA GEOTECNICA	Tipo de Plano	SISTEMA	RUMBO	BUZAMIENTO																																												
	Estratificación	So	230	78																																												
	Diaclasa	D1	25	48																																												
		D2	129	88																																												
		D3	285	59																																												
		D4	306	84																																												
	Falla	F1	200	79																																												
F2		70	67																																													

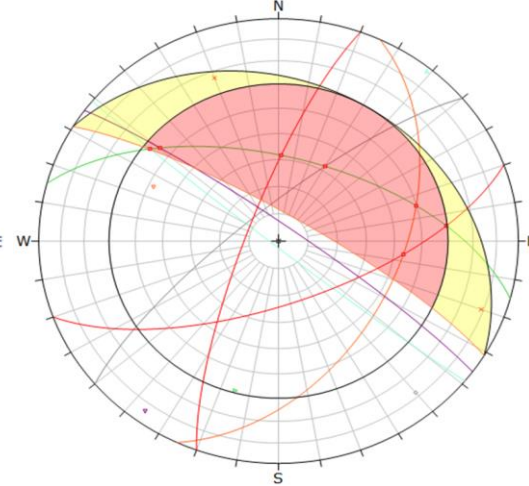
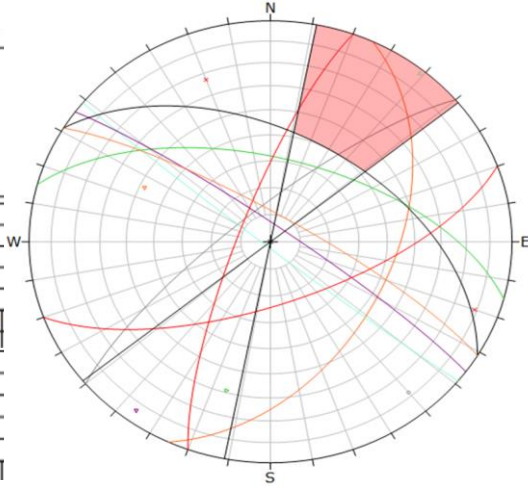


Clasificación Geomecánica					
RMR		SMR			
RMR básico	Factores de ajuste				valor
puntaje	F1	F2	F3	F4	(RMR+(F1xF2xF3)+F4)
50	0,15	1	-50	15	57,5
56	0,15	1	-60	15	62
60	0,15	1	-6	15	74,1
64	0,7	1	-60	15	37
64	0,85	1	-6	15	73,9
45	0,15	1	-50	15	52,5
49	0,15	1	-60	15	55
VALORACIÓN TOTAL SMR (SLOPE MASS RATING)					
58 / Calidad MEDIA (Clase III)					



Symbol	ID
◇	1
▽	2
◇	3
◇	4
▽	5
◇	6
×	7

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	80
Slope Dip Direction	31
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°
	Critical
	Planar Sliding (All)
	1
Kinematic Analysis	Flexural Toppling
Slope Dip	80
Slope Dip Direction	31
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°
	Critical



BIBLIOGRAFÍA

- (INTA), I. N. (1990). *Atlas de Suelos de la República Argentina*. Buenos Aires: INTA-Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Vol. 1 y 2.
- Ahumada, E., & Costa, C. (2009). Antithetic linkage between oblique Quaternary thrusts at the Andean front, Argentine Precordillera.
- Alvarado, P., & Beck, S. (2006). Source Characterization of the San Juan (Argentina) crustal earthquakes of 15 January 1944 (Mw 7.0) and 11 June 1952 (Mw 6.8). *Earth and Planetary Science Letters*, 243, 615-631.
- Anderson, M., Alvarado, P., Zandt, G., & Beck, S. (2007). Geometry and brittle deformation of the subducting Nazca plate, Central Chile and Argentina. *Geophysical Journal International*, 171, 419–34.
- Armella, C. (1990). Guía práctica para la clasificación de los trombolitos. *11° Congreso Geológico Argentino*, Actas 2: 195-198.
- Baldis, B. A., & Bordonaro, O. (1981). Evolución de facies carbonáticas en la cuenca cámbrica de la Precordillera de San Juan. *VIII Congreso Geológico Argentino*. San Luis, Argentina, Actas Vol. 2, pp. 385-397.
- Baldis, B. A.; Uliarte, E.; Vaca, A. (1979). Análisis estructural de la comarca sísmica de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*.
- Bastías, H. (1985). Fallamiento Cuaternario en la región sismotectónica de Precordillera. *Tesis Doctoral (inédita)*, Universidad Nacional de San Juan.
- Bastías, H. (1986). *Fallamiento Cuaternario en la región sismotectónica de Precordillera: San Juan, Argentina*. San Juan: Universidad Nacional de San Juan, tesis doctoral.
- Bastías, H. W. (1984). Dos zonas de fallamiento Plio-Cuaternario en la Precordillera de San Juan. *9° Congreso Geológico Argentino: Bariloche, Río Negro, Asociación Geológica Argentina*.
- Bellahsen, N., Sebrier, M., & Siame, L. (2016). Crustal shortening at the Sierra Pie de Palo (Sierras Pampeanas, Argentina): near-surface basement folding and thrusting. *Geological Magazine*.
- Berkowski, F., Keller, M., & Bordonaro, O. (1990). Litofacies de la Formación La Laja (Cámbrico) en la sierra Chica de Zonda, Precordillera Sanjuanina, Argentina. *Actas 3° Reunión Argentina de Sedimentología*, 1: 31-36.
- Blanc, P. (2019). *Análisis geomorfológico y paleoambiental de la depresión tectónica de Ullum-Zonda, Provincia de San Juan*. San Juan - Argentina.
- Blanc, P. A., & Perucca, L. P. (2017). Tectonic and climatic controls on the late Pleistocene to Holocene evolution of Paleolake Ullum-Zonda in the Precordillera of the Central Andes, Argentina. *Quaternary Research*, 88, 248–264.

- Blanc, P., Santi Malnis, P., & Pantano Zuñiga, A. (2020). Paleoambientes de la Formación Valentín (Cuaternario Tardío) en el Valle de Ullum-Zonda, Precordillera de San Juan, Argentina. *Latin American journal of sedimentology and basin analysis*.
- Bordonaro, O. (1986). Bioestratigrafía del Cámbrico inferior de San Juan. *2° Congreso Latinoamericano de Paleontología*, Actas 1: 19-27.
- Bordonaro, O. (2003). Evolución paleoambiental y paleogeográfica de la cuenca cámbrica de la Precordillera Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58, 329 - 346.
- Bordonaro, O. L. (1980). El Cámbrico en la quebrada de Zonda, Provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 35(1): 203-261.
- Borello, A. (1962). Caliza La Laja (Cámbrico medio de San Juan). *Notas Comisión Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires*, 2: 3-8.
- Cabrera, A. (1957). Catálogo de los mamíferos de América del Sur. *Revista Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia"*. Zoología, 4:1 – 307.
- Cabrera, A. L. (1994). Regiones fitogeográficas argentinas. *Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería*, Tomo II, fascículo 1 (57 p.).
- Castano, J. C. (1993). *La verdadera dimensión del problema sísmico en la provincia de San Juan*,. San Juan: INPRES. Publicación Técnica.
- Colombo, F., Busquets, P., Ramos, E., Vergés, J., & Ragona, D. (2000). Quaternary alluvial terraces in an active tectonic region: the San Juan River Valley, Andean Ranges, San Juan Province, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 13, 611-626.
- Costa, C., Machette, M., Dart, R., Bastías, H., Paredes, J., & Perucca, L. P. (2000). Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Argentina. *U.S. Geological Survey Open-File Report*.
- Cuerda, A. J., Cingolani, C. A., & Schauer, O. (1983). *Descripción geológica de la Hoja 21c-San Juan*. Buenos Aires: entregado y aprobado por la Secret. Estado de Minería-Convenio Universidad Nacional de La Plata-Secretaría de Estado de Minería.
- Flores, D., & Suvires, G. (2012). Distribución y diversidad de hábitats en el humedal de la Reserva Natural Presidente Sarmiento, San Juan, Argentina. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83,194 –200.
- Flores, D., Suvires, G., & Dalmaso, A. (2015). Distribución de la vegetación nativa en ambientes geomorfológicos cuaternarios del Monte Árido Central de Argentina. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86, 72-79.
- Gardini, M. (1993). Estructura superficial y profunda del valle de Zonda, Precordillera de San Juan. *12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos*.

- Gardini, M. (1993). Estructura superficial y profunda del Valle de Zonda: Precordillera de San Juan. *Actas del XII Congreso Geológico Argentino*, tomo 3, 93-99.
- Geología de los Valles de Tulum y Ullum-Zonda. Provincia de San Juan. (1969).
- Gonzales de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educacion.
- Kay, S. M., Mpodozis, C., Ramos, V., & Munizaga, F. (1991). Magma source variación for mid to late Tertiary volcanic rocks erupted over shallowing subduction zone through a thickening crust in the Main Andean Cordillera (28-33oS). *Geological Society of America*, Special Paper 265: 113-137, Boulder.
- Köppen, W. (1923). *Die Klimate der Erde: Grundriss der Klimakunde*. Berlin: Walter de Gruyter & CO.
- Liotta, M. (2011). *Recuperación de suelos salinos*. San Juan: Artículo de divulgación.
- Lloret, G., & G., S. (2006). Groundwater Basin of the Tulum Valley, San Juan, Argentina: A Morphohydrogeologic Analysis of its Central Sector. *Journal of South American Earth Sciences*, 21 (3): 267-275. doi: 10.1016.
- Meigs, A., & Nabelek, J. (2010). Crustal-scale pure shear foreland deformation of western Argentina. *Geophysical research letters*.
- Meigs, A., Krugh, W., Schiffman, C., Vergas, J., & Ramos, V. (2006). Refolding of thin-skinned thrust sheets by active basement-involved thrust faults in the Eastern Precordillera of western Argentina.
- Milana, J. P. (1991). Sedimentología y Magnetoestratigrafía de las formaciones cenozoicas en el área de Mogna y su inserción en el marco tectosedimentario de la Precordillera Oriental. *Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de San Juan*.
- Ortiz, A., & J., Z. (1981). *La provincia geológica precordillera Oriental*. San Luis: VIII Congreso Geológico Argentino.
- Pandolfo, L. (1975). Geología del valle Ullum-Zonda, Provincia de San Juan. *Trabajo Final de Licenciatura (inédito), Universidad Nacional de Buenos Aires*.
- Perucca, L. P. (1990). Sistema de fallamiento La Dehesa-Maradona-Acequión, San Juan, Argentina. *11° Congreso Geológico Argentino*.
- Perucca, L. P., & Moreiras, S. (2008). Indicative Structures of Paleoseismicity in the Acequion River Valley, San Juan Province, Central-Western Argentina. *Geodinamica Acta*, 21 (3), 93-105.
- Perucca, L. P., Audemard, F. A., Pantano, A., Avila, C. R., Onorato, M. R., & Vargas, H. N. (2011). Fallas cuaternarias con vergencias opuestas entre Precordillera Central y Oriental, Provincia de San Juan. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 70, 291-302.

- Perucca, L. P., Audemard, F. A., Pantano, A., Avila, C. R., Onorato, M. R., & Vargas, H. N. (2013). Fallas cuaternarias con vergencias opuestas entre Precordillera Central y Oriental, Provincia de San Juan. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 70, 291-302.
- Perucca, L., & Vargas, H. (2014). Neotectónica de la provincia de San Juan, centro-oeste de Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66.
- Perucca, Laura Patricia; Lara, Gabriela; Vargas, Nicolás. (2012). Nueva evidencia de actividad tectónica cuaternaria en la depresión Zonda-Maradona. Provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*.
- Pilger, R. H. (1981). Plate reconstructions, aseismic ridges, and low angle subduction beneath the Andes. *Geological Society of America* , Boletín 92, 448–456.
- Poblete, A. G., & Minetti, J. (1989). *Los mesoclimas de San Juan. Primera y segunda parte*. San Juan: Informe Técnico Núm. 11 del Centro de Investigación de San Juan (CISA). UNSJ. Boletín, 4,1– 89.
- Ramos, V. A., Cegarra, M. I., Lo Forte, G., & Comíngues, A. (1997). El frente orogénico de la sierra de Pedernal (San Juan, Argentina): su migración a través de los depósitos sinorogénicos. *8° Congreso Geológico Chileno*.
- Ramos, V. A., Jordan, T. E., Allmendiger, R. W., Mpodozis, C., Kay, S., Cortés, J. M., & Palma, M. A. (1986). Paleozoic terranes of the Central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics*, 5, pp. 855-880.
- Ramos, V. A.; Cristallini, E.; Pérez, D. J. (2002). The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*.
- Regnier, M., Chatelain, J. L., Smalley, R., Chiu, J., Isacks, B. L., & Araujo, M. (1992). Seismotectonics of Sierra Pie de Palo, a basement block uplift in the Andean foreland of Argentina. *Bulletin of the Seismological Society of America* , 82 (6): 2549–2571.
- Rocca, J. A. (1969). *Geología de los Valles de Tulum y Ullum-Zonda. Provincia de San Juan*. San Juan: C.R.A.S. Publicación P-147.
- Salinas, N. G. (1979). Estudio geológico sedimentológico de la cuenca lacustre de Ullum-Zonda. *Final degree work, Universidad Nacional de San Juan (inédito)*, 86 pp.
- Sardiña, N. (2021). *Proyecto Completo de un túnel*. San Juan: Especialización en Túneles y Obras Civiles Subterráneas. UNSJ.
- Siame, L., Bellier, O., Sébrier, M., Boulès, D., Leturmy, P., Perez, M., & Araujo, M. (2002). Seismic hazard reappraisal from combined structural geology, geomorphology and cosmic ray exposure dating analyses: the Eastern Precordillera thrust system (NW-Argentina). *Geophysical Journal International*.

- Smalley, R. J. (1988). TWO EARTHQUAKE STUDIES: (1) SEISMICITY OF THE ARGENTINE ANDEAN FORELAND, AND (2) A RENORMALIZATION GROUP APPROACH TO EARTHQUAKE MECHANICS. *Cornell University*.
- Suriano, J., & Limarino, C. O. (2009). Sedimentación pedemontana en las nacientes del río Jáchal y pampa de Gualilán, Precordillera de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65 (3): 516 - 532.
- Suvires, G. (2013). Geomorfología tectónica y evolución del relieve en un sector del piedemonte occidental de la sierra Chica de Zonda, Precordillera Oriental, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.
- Uliarte, E., Bastías, H., & Ruzycki, L. (1987). Morfología y Neotectónica en el cerro La Chilca, Pedernal. San Juan. *10° Congreso Geológico Argentino*.
- Vergés, J., Ramos, V., Meigs, A., Cristallini, E., Bettini, B., & Cortés, J. (2007). Crustal wedging triggering recent deformation in the Andean thrust front between 31° S and 33° S: Sierras Pampeanas-Precordillera interaction. *Journal of Geophysical Research*.
- von Gosen, W. (1992). Structural evolution of the Argentine Precordillera: the Rio San Juan section. *Journal of Structural Geology*.
- Zambrano, J. J. (1985). *Actualización geológica del valle de Zonda*. San Juan: Centro Regional de Aguas Subterráneas-Instituto Nacional de Aguas (CRAS-INA).
- Zambrano, J., & Torres, E. (1994). Hidrogeología de la Provincia de San Juan. *Catálogo de Recursos Humanos e información relacionada con la temática ambiental en la Región Andina Argentina*.
- Zapata, T. R., & Allmendinger, R. (1996). Thrust-Front Zone of the Precordillera, Argentina: A Thick-Skinned Triangle Zone. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 80: 359-381., Boletín 80: 359-381.