



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

CARACTERIZACIÓN DEL TÚNEL “LA MORA”, ZIMAPÁN

**T E S I N A**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN GEOTECNIA**

P R E S E N T A :

**ING. MARIANA SOFÍA MÚJICA SANTILLÁN**

DIRECTOR DE TESINA: M.I. REGINALDO JOSÉ HERNANDEZ ROMERO

CDMX. Octubre 2020

---

---

## Agradecimientos

Agradezco a mis padres, Gabriela y Guadalupe, por ser mis cimientos, por enseñarme los valores que rigen mi vida y por apoyarme en cada decisión que me ha llevado a donde estoy sin dudar de mí.

A Carlos y Gabriela, porque somos uno, los “Tres Mosqueteros”, por brindarme su apoyo incondicional y ser la alegría de todos mis días.

Agradezco a mi abuela Juana, por motivarnos con el ejemplo a salir adelante y enseñarme que la educación es *Libertad*. A mi abuela Carolina, *Doña Caro*, por todo el cariño que me brindó en sus años de vida y que me acompañaran todos los días de mi vida.

A mi familia, que en los momentos difíciles siempre está conmigo, a mis tíos y primos, que en número son muchos y en igual medida ha sido el apoyo que he recibido de cada uno de ellos, pero poco el espacio para nombrarlos a cada uno.

A mis amigos, Yessica y Mario por brindarme sus experiencias, consejos y conocimiento. A Rosalinda, Jesús, Kevin y *Juancho*, por alentarme a dar lo mejor de mí y superarme cada día.

Agradezco especialmente al M. I. Reginaldo José Hernández Romero, por brindarme su tiempo y su conocimiento para dirigir este trabajo.

A mi tutor, el Ing. Roberto Sosa Garrido, por sus consejos y el interés que demostró en mi desarrollo en estos semestres.

A cada uno de los profesores de la Especialidad en Geotecnia y la Facultad de Ingeniería que me apoyaron en diferentes medidas y me brindaron la información necesaria para desarrollar este trabajo, especialmente al Dr. Moisés Dávila, al M.I. Valentín Castellanos Pedroza y al Ing. Servando Arana García.

Finalmente, agradezco profundamente, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico que recibimos los alumnos del Programa Único de Especialización de Ingeniería (PUEI).

---

---

## Índice general

Capítulo 1 Objetivo.....	1
Capítulo 2 Introducción. ....	2
Capítulo 3 Generalidades.....	4
Localización.....	5
Fisiografía.....	6
Clima.....	7
Hidrología.....	8
Capítulo 4 Marco Geológico.....	10
Geología regional.....	10
Geología local.....	11
Estratigrafía.....	12
Geología estructural.....	15
Capítulo 5 Marco teórico.....	17
Discontinuidades en el macizo rocoso.....	17
Sistemas de clasificación del macizo rocoso.....	25
Evaluación del macizo rocoso (RMR).....	26
Índice de calidad de túneles (NGI).....	31
Índice Geológico de resistencia (GSI).....	35
Estereogramas.....	38
Capítulo 6 Metodología.....	40
Tratamiento de los datos.....	40
Datos obtenidos por estudios previos.....	40
Datos estructurales.....	42
Clasificación del macizo.....	45
Caracterización.....	45
Módulo de elasticidad ( $E_m$ ).....	46
Resistencia del macizo rocoso ( $\sigma_{cm}$ ).....	46
Capítulo 7 Resultados.....	47
Clasificación.....	47
Caracterización.....	48

---

---

Modelo geotécnico.....	49
Capítulo 8 Conclusiones y recomendaciones. ....	52
Lista de referencias. ....	55
Anexo A. Sección del Túnel “La Mora”, con discontinuidades .....	58
Anexo B: Clasificación RMR .....	59
Anexo C: Clasificación Q.....	64
Anexo D: Clasificación GSI .....	69

---

---

## Índice de tablas

Tabla 1. Descripción cualitativa del espaciamiento, según la Sociedad de Mecánica de Rocas (ISRM). Tomado de González de Vallejo et al, 2002.....	19
Tabla 2. Descripción de las discontinuidades de respecto a la continuidad de acuerdo a la (ISRM). Tomado de González de Vallejo et al, 2002.....	20
Tabla 3. Clasificación de las discontinuidades según su escala (Ramírez et al, 2004).....	21
Tabla 4. Descripción cualitativa de la de la apertura de los planos de las discontinuidades según la ISRM. Tomado de Ramírez et al, 2004. ....	22
Tabla 5. Descripción de las filtraciones según la ISRM. Tomado de Ramírez et al, 2004. ....	25
Tabla 6. Parámetros del Sistema de Clasificación del macizo rocoso RMR (Bieniawski, 1989). Tomado de (SCT, 2017) .....	27
Tabla 7. Clasificación del macizo rocoso RMR de Bieniawski, 1989.....	28
Tabla 8. Valoración de la presencia de agua.....	29
Tabla 9. Valoración del estado de las discontinuidades. ....	29
Tabla 10. Criterios de evaluación de la alterabilidad del macizo rocoso.....	30
Tabla 11. Criterios para evaluar la corrección por orientación del eje del túnel. ....	30
Tabla 12. Valoración para el RQD. Tomada de Hoek et al, 1985. ....	32
Tabla 13. Número de sistemas de fisuras. Tomada de Hoek et al, 1985. ....	32
Tabla 14. Número de rugosidad de las fisuras. Tomada de Hoek et al, 1985.....	32
Tabla 15. Número de alteración de las juntas. ....	33
Tabla 16. Factor de reducción por agua en las fisuras. Tomada de Hoek et al, 1985.....	34
Tabla 17. Factor de reducción de esfuerzos. Tomada de Hoek et al, 1985. ....	35
Tabla 18. Resumen de Propiedades de la roca intacta de las formaciones El Doctor, Soyatal y Las Trancas (Hardy, 1987). ....	41
Tabla 19. Resumen de los datos estructurales por zona.....	43
Tabla 20. Comparación de las calidades del macizo rocoso por zona. ....	48
Tabla 21. Comparación del módulo de elasticidad obtenidos para el macizo rocoso por zona y el módulo de elasticidad de la roca intacta.....	48
Tabla 22. Comparación de las resistencias obtenidos para el macizo rocoso por zona y la resistencia de la roca. ....	49
Tabla 23. Zonificación geotécnica establecida para el túnel "La Mora". ....	50

---

---

## Índice de figuras

Figura 1. Interior del Túnel “La Mora”, en donde se aprecia la geometría tipo portal y las dimensiones de la excavación. ....	5
Figura 2. Mapa de localización del Túnel "La Mora".....	5
Figura 3. Mapa de las Provincias Fisiográficas, editado del Mapa Digital de México, INEGI.....	6
Figura 4.. Mapa de las Subprovincias Fisiográficas de México, editado del Mapa Digital de México, INEGI.....	7
Figura 5. Mapa de climas de las zonas aledañas al túnel.....	8
Figura 6. Cuencas y subcuencas de los límites del estado de Querétaro e Hidalgo. ....	9
Figura 7. Configuración del drenaje de la zona cercana al Túnel “La Mora” .....	9
Figura 8. Provincias geológicas de México (Ortega 1992). Recuperado de: Solana, 2008. ....	10
Figura 9. Mapa geológico de la zona circundante al Túnel “La Mora”, en los límites del estado de Hidalgo y Querétaro.....	12
Figura 10. Columna estratigráfica de la Sierra de Querétaro e Hidalgo. Tomado de Ramírez (2016). ....	14
Figura 11. Distribución de sectores del frente Tectónico SMO.....	15
Figura 12. Sección geológica que muestra la estratificación local del en la zona del Túnel “La Mora” .....	16
Figura 13. Representación de los componentes de en la orientación de las discontinuidades. El ángulo $\alpha$ corresponde al rumbo de la discontinuidad mientras que el ángulo $\beta$ corresponde a la magnitud del echado. ....	18
Figura 14. Espaciamiento de las familias de discontinuidades y formación de bloques delimitados por tres familias de discontinuidades. ....	19
Figura 15. Modelos de persistencia de discontinuidades, a) baja discontinuidad, b) alta continuidad.....	20
Figura 16. Esquema de la rugosidad de la discontinuidad. Tanto la ondulación se puede medir por el ángulo $i$ . ....	21
Figura 17. Ejemplos de discontinuidades lisa y rugosa, evaluadas a pequeña escala. La imagen a) se refiere a planos lisos se estratificación, la imagen b) representa una junta rugosa. ....	21
Figura 18. Ejemplos reales de la apertura de discontinuidades a) discontinuidad “extremadamente ancha”, que alcanza 16 cm en las paredes de una barranca compuesta por carbonatos, b) discontinuidad “muy cerrada” en rocas carbonatadas de la Formación Soyatal.....	23

Figura 19. Ejemplos de relleno de discontinuidades. a) macizo rocoso con vetas minerales con presencia de oxidación y alteración hidrotermal, el arreglo de las discontinuidades se presenta en diferentes direcciones. b) veta rellena de cuarzo, se encuentra cortada por otra discontinuidad horizontal. ....	24
Figura 20. Condición de las filtraciones en macizos rocosos. a) flujo de agua en rocas calizas de en las paredes de una barranca, b) rocas humedecidas en calizas sin presentar flujo de agua, c) discontinuidades secas en calizas. ....	25
Figura 21. Resistencia a la compresión simple de la roca intacta ( $\sigma_c$ ) MPa. Tomado de Osinergmin, 2017. ....	29
Figura 22. Número de discontinuidades por metro. Tomado de Osinergmin, 2017. ....	29
Figura 23. Grafico del Índice de Resistencia Geológico, GSI (Hoek& Marinos, 2000). . Tomado de Osinergmin, 2017. ....	37
Figura 24. Roseta de rumbos de las discontinuidades de un macizo rocoso). ....	38
Figura 25. En la figura izquierda se representa la proyección equiangular de la red de Wulff, mientras que, de lado derecho, la proyección es equidistal, presentada mediante la red de Shmitdt. ....	39
Figura 26. Análisis estadístico de la nube de polos de un macizo rocoso, en la que se distinguen dos familias de discontinuidades. ....	39
Figura 27. Esquema de la localización del pozo de oscilación al suroeste de la casa de Máquinas del P. H Zimapán, modificado de CFE, 1989. ....	40
Figura 28. Sección S49W-N49°E longitudinal del Túnel “La Mora” en ella se pueden apreciar la disposición de las zonas y cadenamientos en los que se dividió el túnel para el levantamiento los datos estructurales del túnel. ....	42
Figura 29. Orientación de las familias principales de discontinuidades por zona y descripción de la estratificación predominante. ....	44
Figura 30. Zonificación geotécnica del Túnel "La Mora" ....	51

## **Capítulo 1**

### **Objetivo.**

El objetivo general de este trabajo es realizar la clasificación del macizo rocoso del Túnel “La Mora”, empleando los sistemas de clasificación RMR de Bieniawski y Q de Barton, además del GSI de Hoek, para cada tramo del túnel. Con los datos obtenidos de cada clasificación se procederá a designar propiedades de resistencia y deformabilidad del macizo rocoso, se realizará la zonificación geotécnica de acuerdo a los resultados obtenidos de estas clasificaciones y, por último, se comparan los resultados obtenidos con cada sistema de clasificación del macizo rocoso, buscando obtener el que mejor se ajuste a las características el sitio y al comportamiento observado en el túnel en cuanto a su estabilidad.



### **Capítulo 2** **Introducción.**

Al construir obras subterráneas es necesario recabar la mayor cantidad de información posible sobre las rocas presentes en el sitio. Esta información no solo sirve para la planificación del proyecto, la elección del método y el tiempo estimado de excavación, también proporciona las herramientas necesarias para enfrentar los problemas que se presentan al momento de iniciar la excavación, el avance y al terminarse la obra para su mantenimiento y estabilidad.

La geología del sitio refleja las condiciones de formación y los esfuerzos a los que sea visto sometido del macizo rocoso, esto reflejado en la descripción y clasificación de las rocas, además de las discontinuidades presentes en el sitio.

Pero no solo se debe tomar en cuenta la calidad de la roca y su formación, es necesario establecer sus propiedades mecánicas para garantizar la estabilidad del macizo rocoso, entendiéndose como macizo rocoso al conjunto de discontinuidades y bloques de matriz de roca intacta, como medio se comporta anisótropo, heterogéneo y discontinuo. Para estudiarlo se recurre a La Mecánica de Rocas, que es la encargada del estudio de la respuesta de las rocas cuando están sometidas a esfuerzos, tanto en condiciones naturales como artificiales producto de obras civiles construidas en ellas (Sivakugan, *et al*, 2013).

Debido a las magnitudes de la obra es necesario dividir al macizo rocoso en grupos que compartan las mismas características y propiedades que hagan posible predecir su comportamiento mecánico a lo largo del sitio y en tres direcciones. Ésto es posible gracias a los sistemas de clasificación. Los sistemas de clasificación geomecánica intentan predecir con pocos datos puntuales la resistencia de todo el macizo rocoso, y al ser un material anisotrópico puede ser representado por más de un sistema de clasificación (Cabello, 2018).

Los sistemas de clasificación se han desarrollado de acuerdo a las necesidades de un proyecto específico, por lo que no precisamente un sistema va a adecuarse completamente a todos los proyectos, por ello, debe estimarse qué sistema aplica mejor a los requerimientos de diseño; también debe tenerse en cuenta que existen diversas aplicaciones para cada sistema de clasificación geomecánica.

Tomando en cuenta lo anterior, en este trabajo se realizará la comparación de dos sistemas de clasificación (RMR y Q de Barton) y los parámetros obtenidos con el GSI, discutiendo cuál aplica mejor a las condiciones del macizo rocoso del Túnel “La Mora”, el cual fue excavado teniendo como guía únicamente la historia geológica y la topografía del sitio. El túnel es una obra secundaria de la Central Hidroeléctrica, Ing. Fernando Hiriart

Balderrama, Zimapán, Hgo., la cual está localizada en los en los límites de los estados de Hidalgo y Querétaro.

Este trabajo cuenta con ocho capítulos, siendo los dos primeros el objetivo y la introducción. En el Capítulo tres establece las generalidades del sitio, definiendo la localización del túnel, las condiciones hidrológicas y climáticas. Posteriormente, en el Capítulo cuatro se asentarán las bases geológicas del sitio, haciendo énfasis en la litología, estratigrafía y la geología estructural. Por consiguiente, el Capítulo cinco presenta el marco teórico necesario para entender los sistemas de clasificación y los términos básicos empleados.

El método de trabajo empleado, el tratamiento de los datos estructurales y estudios previos, se presentará en el Capítulo seis. El capítulo siete presenta los resultados de las clasificaciones y clasificaciones obtenidas, además de la proposición del modelo geomecánica. Por último, son emitidas las conclusiones y recomendaciones derivadas de los análisis realizados.

### **Capítulo 3** **Generalidades.**

La Central Hidroeléctrica de Zimapán, “Ing. Fernando Hiriart Balderrama” comenzó operaciones a finales de septiembre de 1996, bajo la administración de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), cuenta con dos unidades turbogeneradoras de 146 MW cada una, que representan el 6.3% de la capacidad hidroeléctrica del país (Ramos-Gutiérrez, 2012). Cuenta con una cortina tipo arco- bóveda de aproximadamente 200 m de altura (Mendoza, 1991) y la Casa de Máquinas está situada en una caverna artificial de 22 m de ancho, 70 m de largo y 38 m de altura, dando un volumen de 58, 520 m<sup>3</sup> de roca excavada. Dentro de las obras secundarias de la presa se encuentra el Túnel “La Mora” de 525 m de longitud.

El túnel es una obra carrera secundaria de dos carriles que se excavó junto con otros dos túneles, con la finalidad de acceder a la Casa de Máquinas, evitando seguir el cauce del Río Moctezuma. Debido a la premura de la obra, no fue posible realizar estudios geotécnicos previos a la excavación, por lo que la excavación fue diseñada únicamente con los datos de la historia geológica y la planta topográfica del sitio.

Cuenta con 8 m de distancia entre hastiales, altura a la clave 6 m, en sección tipo portal Y 65 m de cobertura máxima. El sistema de excavación fue convencional mediante el uso de explosivos. En el interior del túnel no se presenta algún sistema de soporte mayor, salvo anclaje selectivo y concreto lanzado en los primeros 15 m a partir de cada portal (Figura 1). Por otro lado, los taludes de los portales de accesos al túnel fueron estabilizados con un sistema de anclaje de fricción y concreto lanzado reforzado con malla de acero electrosoldada, sin el colado de túneles falsos en la entrada y salida de éste

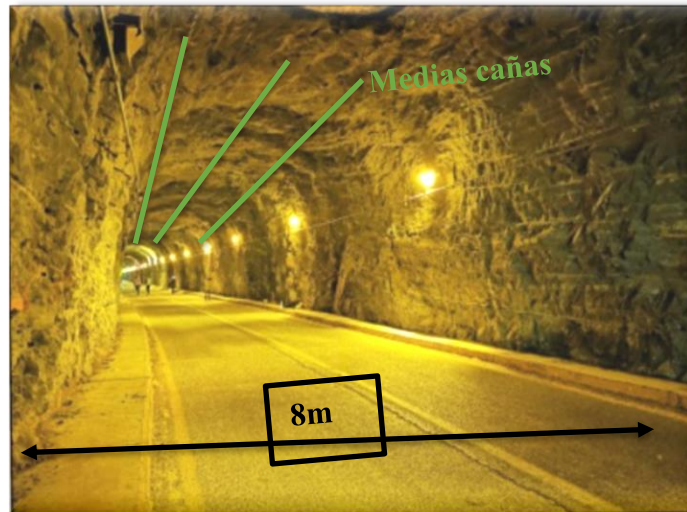


Figura 1. Interior del Túnel “La Mora”, en donde se aprecia la geometría tipo portal y las dimensiones de la excavación.

### Localización

El Túnel “La Mora”, está ubicado en el área limítrofe entre los estados de Hidalgo y Querétaro. Fue excavado en un meandro en la margen derecha del Río Moctezuma, su trazo se ubica en el municipio de Cadereyta, Querétaro (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), en las coordenadas  $20^{\circ} 51' N$ ,  $99^{\circ} 27' W$ . Para acceder al sitio debe seguirse la autopista México-Querétaro hasta San Juan del Río, tomar la Carretera Federal 120 hacia el NE hasta llegar al Municipio de Cadereyta, seguir hasta el poblado de San Joaquín y dirigirse 15 km al SW por la Carretera 120 hasta llegar al túnel. Como referencia el túnel se conecta con el puente Moctezuma en el portal SW.

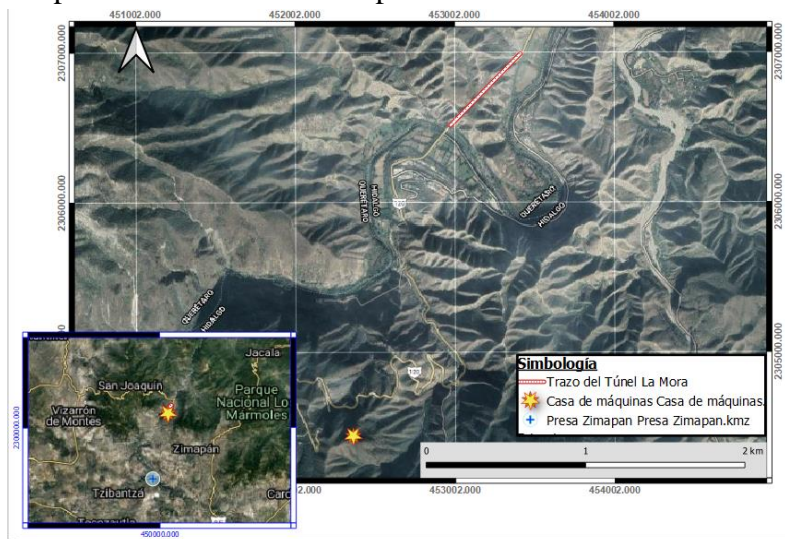


Figura 2. Mapa de localización del Túnel "La Mora"

### Fisiografía

El sitio de estudio se encuentra en la porción sur de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental (SMO), colindando con Eje Neovolcánico en los estados de Hidalgo y Querétaro, y al oriente con la Provincia Llanura Costera el Golfo (Figura 3).

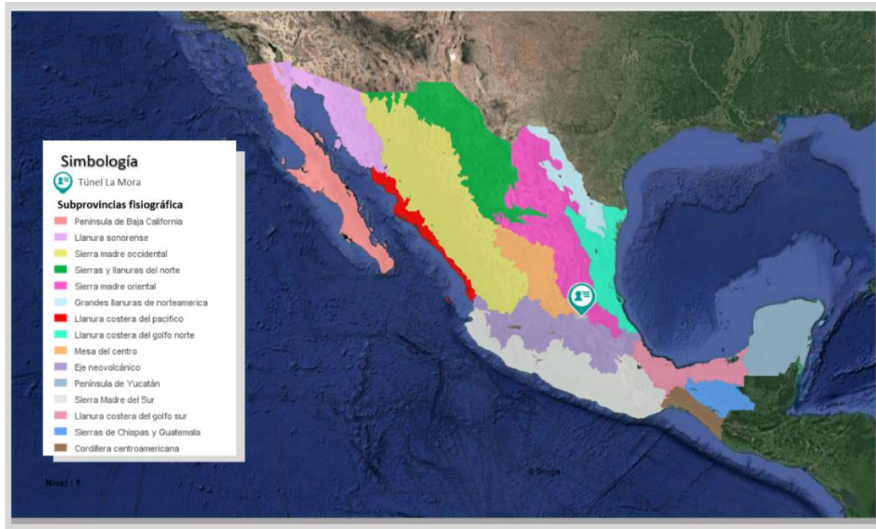


Figura 3. Mapa de las Provincias Fisiográficas, editado del Mapa Digital de México, INEGI.

La SMO es una sucesión de rocas sedimentarias marinas de edades mesozoicas, se caracteriza por un sistema de pliegues y cabalgaduras reflejado en sistema montañoso producto del acortamiento que sufrió durante la orogenia Laramide, y que abarca prácticamente toda la parte oriental de México, desde el sur de Texas hasta su colindancia con la Faja Volcánica Transmexicana (Eguiluz et al., 2000; Alaniz-Álvarez et al. 2005).

En contraste, Eje Neovolcánico es un arco volcánico con rocas de rangos de edades amplios que va desde el Jurásico Superior al Cretácico (Alaniz-Álvarez et al. 2005). Esta provincia se caracteriza por valles amplios rodeados por edificios volcánicos con elevaciones mayores a 2000 m.s.n.m, extendiéndose longitudinalmente 1200 km desde colima hasta Veracruz y 150 km de ancho.

El área del Túnel “La Mora” se extiende en la subprovincia fisiográfica Carso Huasteco, que adquiere el nombre procedente de la palabra *Karst*, al estar compuesta en su mayoría por rocas calcáreas y por disolución, dolinas y grutas subterráneas. Esta subprovincia se caracteriza por cambios muy abruptos de relieve teniendo valles con fondo en 200 m.s.n.m y cimas que sobrepasan los 1800 m. Colinda con la subprovincia de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo (Figura 4),



extendiéndose en la porción sur de esos estados abarcándola de oriente a poniente. Compuesto por rocas ígneas de origen volcánico, las cuales presentan elevaciones por debajo de los 2000m respecto al nivel del mar, dando paso a llanuras y lomeríos bajos de material ígneo (INEGI, 1992).

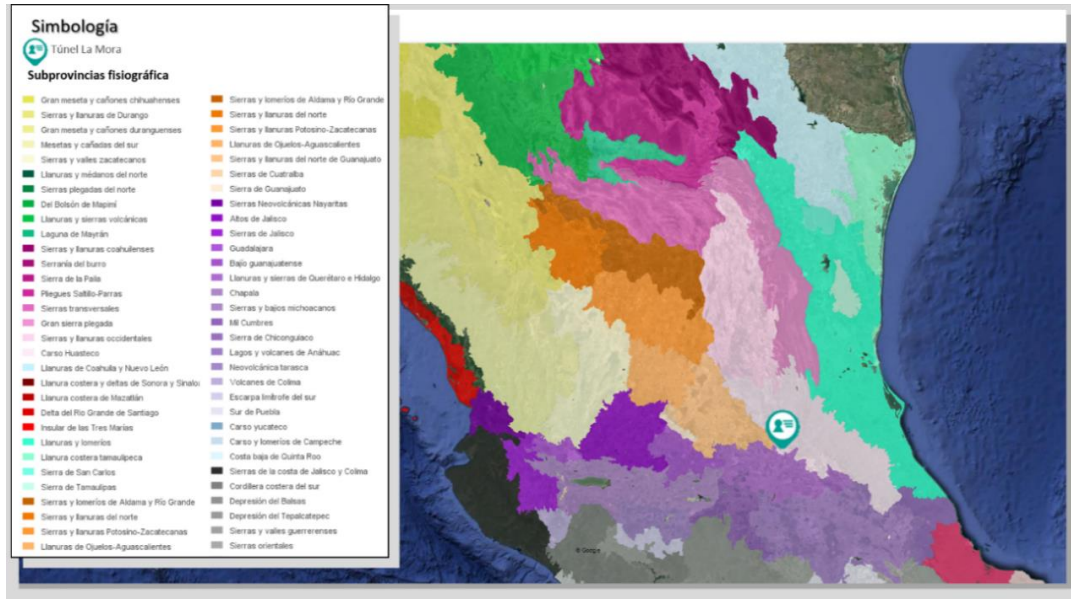


Figura 4.. Mapa de las Subprovincias Fisiográficas de México, editado del Mapa Digital de México, INEGI.

### Clima

El clima de la zona cercana al Río Moctezuma (Figura 5), según la clasificación para microclimas Köppen, es clasificado como semiárido-semicaldo (BS1hw), el cual se caracteriza por presentar temperatura media anual mayor de 18°C, mientras que en el mes, más frío la temperatura es menor de 18°C, por otro lado, la temperatura del mes más caliente supera los 22°C. La zona presenta lluvias durante el verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual (García-Amaro, 1988).

Debido al cambio de relieve de la zona, en las partes altas cercanas a la zona del túnel, el clima cambia a árido-templado (BS0kw), cuya temperatura media anual oscila entre 12°C y 18°C, y la temperatura del mes más frío oscila entre -3°C y 18°C, siendo más bajas que en la zona cercana al río. La condición de lluvias se mantiene en lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal entre 5% y 10.2% del total anual (García-Amaro, 1988).

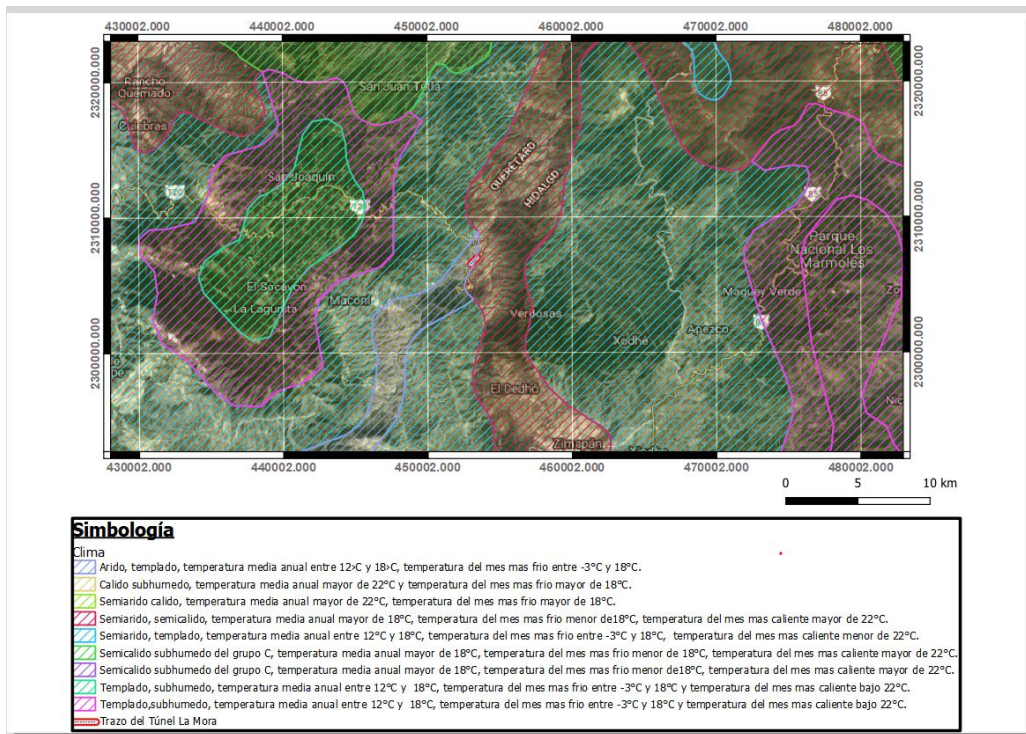


Figura 5. Mapa de climas de las zonas aledañas al túnel.

### Hidrología

El rasgo hidrológico más importante de la zona es el Río Moctezuma, el cual funge como frontera entre los estados de Querétaro e Hidalgo, este río corre de suroeste a noreste, nace en la Cortina de la C. H. Ing. Fernando Hiriart Balderrama, Zimapán, Hgo., y se une al Río Pánuco en Veracruz. La zona pertenece a la cuenca y sub cuenca del mismo nombre, R. Moctezuma (Figura 6).

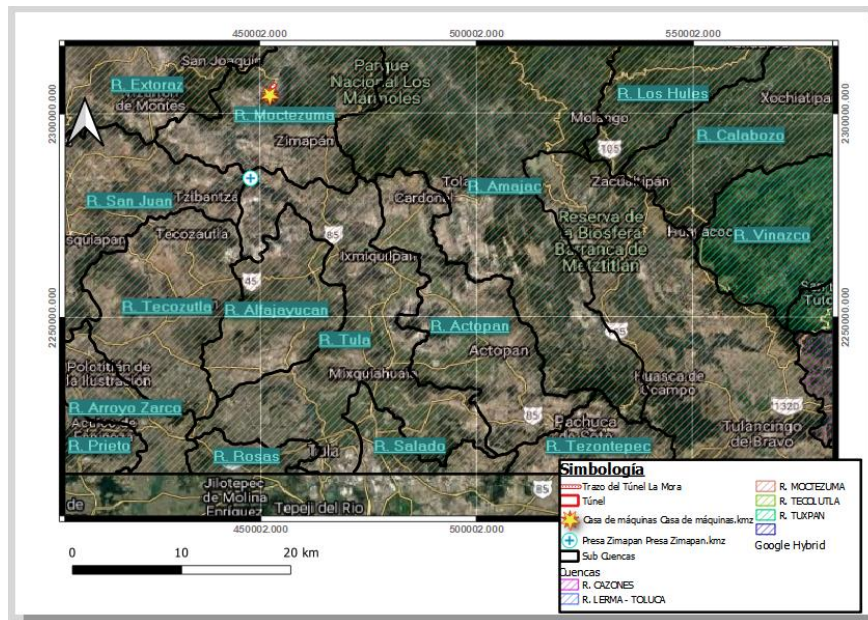


Figura 6. Cuencas y subcuencas de los límites del estado de Querétaro e Hidalgo.

El drenaje superficial de la zona se caracteriza por ríos intermitentes no mayores a segundo orden con configuración detrítica a sub paralela, el único río perenne de la zona es el Río Moctezuma, que es alimentado por esas corrientes intermitentes superficiales. En algunas zonas el drenaje se observa desintegrado, característica de las zonas kársticas (Figura 7).

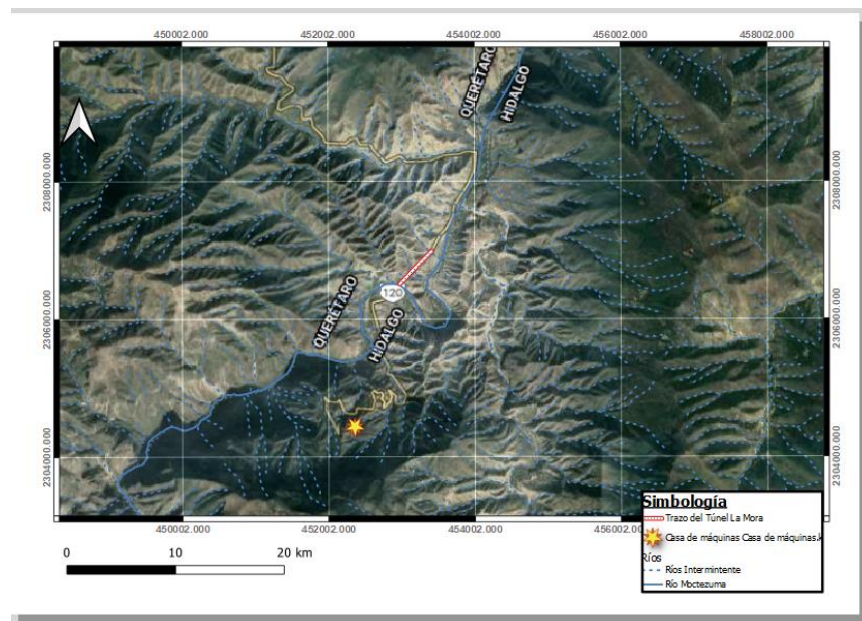


Figura 7. Configuración del drenaje de la zona cercana al Túnel “La Mora”



## Capítulo 4 Marco Geológico.

### Geología regional

En el contexto geológico regional, la zona de estudios se encuentra en la provincia geológica Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas (Figura 8), en los límites con la Faja Volcánica Transmexicana (Ortega, 1992).

La Provincia geológica Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas (CMPF) abarca una franja que corre desde el noroeste de México al sur del estado de Chihuahua hasta los estados de Hidalgo y Puebla. Se caracteriza principalmente por rocas calcáreas deformadas por esfuerzos compresivos desde el suroeste de México, resultando en pliegues, fallas inversas y cabalgaduras (Ortega, 1992). Esta deformación fue producto del evento geológico conocido como Orogenia Larámide, que afectó a las rocas marinas en el Cretácico superior.



Figura 8. Provincias geológicas de México (Ortega 1992). Recuperado de: Solana, 2008.

En la porción sur de la provincia CMPF, en el Municipio de Cadereyta se encuentran las rocas más antiguas de la zona, rocas de origen vulcanosedimentario de composición riolítica y andesítica, asociadas a arco magmático, estas rocas están intercaladas con calizas mesozoicas de facies de cuenca de la Cuenca intercratónica de Zimapán, conformando la Formación Las Trancas (Coney, 1978; Ramírez, 2016). Las facies marinas están relacionadas a las fosas producidas por la apertura del Golfo de México, variando desde secuencias evaporitas, rocas calcáreoarcillosas, calcáreas y por último clásticas debido al

levantamiento sufrido en la deformación Laramídica (Padilla y Sánchez, 1982; Chávez Cabello, 2016). Durante el Cretácico Superior se depositaron secuencias arcillo-arenosas y sedimentos tipo flysch. Con la orogenia Laramídica se emplazaron cuerpos graníticos y granodioríticos, presentes hasta el inicio del Cenozoico (Ramírez, 2016).

Existe en la porción noroccidental del estado de Hidalgo, en la región de Zimapán, conglomerados rojos fluvio-lacustres (fanglomerado El Morro, de 400 m de espesor), del Eoceno superior-Oligoceno inferior, intercalados con marga, caliza y derrames basálticos.

### **Geología local**

Las rocas presentes en la zona circundante al Túnel “La Mora” reflejan la historia geológica local, conformada por rocas sedimentarias de cuenca, rocas ígneas volcánicas y plutónicas, skarns y rocas afectadas por metamorfismo. El macizo rocoso en que se excavó el Túnel “La Mora” consta de una intercalación de calizas y lutitas, en las que existe silicificación y metamorfismo de bajo grado, confiriéndole mayor resistencia a la roca. Dentro del túnel también se observan diques delgados de composición intermedia de producto de procesos hidrotermales. Las rocas sufrieron eventos compresivos, dejando pliegues y fallas inversas en toda la zona (Figura 9), además de rasgos volcánicos, como andesitas y basaltos de arco, asociados a pulsos magmáticos producto de la deformación Laramídica, como es posible observarlos al sureste de Xondhé.

En los alrededores a Casa de Máquinas y al poblado El Dedhó puede observarse skarns, que en algunos casos como en la Mina La Negra, la cual se encuentra a menos de 7 km al NE de Casa de Máquinas, son explotados para obtener cobre, oro, plata, plomo y zinc.

Rasgos geológicos más recientes se presentan por parches de conglomerados al suroeste del túnel, entre las poblaciones El Dedhó y Maconí, además de dolinas producto de la disolución de rocas carbonatadas.

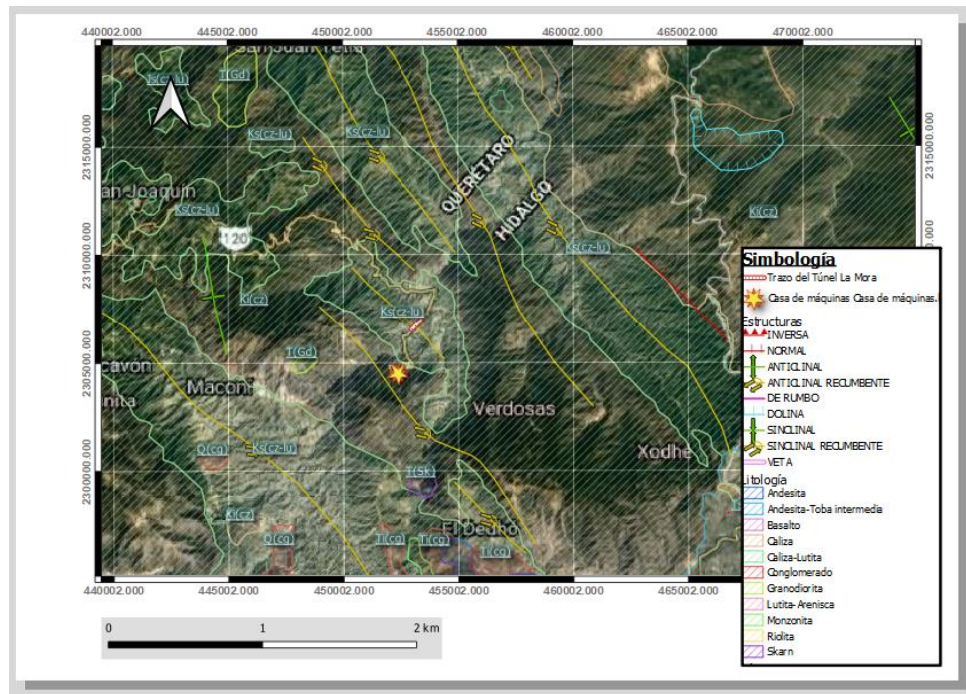


Figura 9. Mapa geológico de la zona circundante al Túnel “La Mora”, en los límites del estado de Hidalgo y Querétaro.

### Estratigrafía.

La secuencia estratigráfica de la zona comienza con la Formación Peña Azul, con las rocas más antiguas de la zona, la cual representa la base de la transgresión marina de la región, compuesta de esencialmente de conglomerados lenticulares, areniscas, margas, lutitas y calizas del Cretácico Temprano (Figura 10), que varían de espesor alrededor de 300 m (Carrillo, 1990). Le sobryace concordantemente la Formación Las Trancas, en la que fue excavado el Túnel “La Mora”

La Formación Las Trancas de edad Kimeridgiano- Barremiano, está formada por la intercalación de lutitas, limolitas calcáreas, calizas arcillosas, y en menor medida, estratos de areniscas y arenas volcánicas (Carrillo, 1990). La porción superior de la Formación Las Trancas se caracteriza por el adelgazamiento de los estratos de lutitas, como es el caso del Túnel “La Mora”, en el que aparecen de forma esporádica dentro del túnel.

Debido a la complejidad estructural de la zona, el contacto superior de la Formación Las Trancas es variable, cercano al poblado del que recibe el nombre, la caliza El Doctor le sobryace concordantemente (SGM, 2007), mientras que en otras regiones del estado de Querétaro es cubierta por las formaciones Tamaulipas, El Abra y Tamabra (Carrillo, 2009), y en ocasiones tiene contacto inferior con la Caliza El Doctor. (Pemex, 1988; SGM, 2007).

La Formación El Doctor, de edad Albiano. Cenomaniano, consta de cuatro facies de litológicas (SGM, 2007): La Negra (zona nerítica), San Joaquín (zona nerítica de transicional), Cerro Ladrón (plataforma lagunar), Socavón (prearrecifal).

Por otro lado, Cercano a la zona de estudio, entre Maconí y San Joaquín, la Formación Tamaulipas yace sobre la Formación Las Trancas y subrayase a La Formación Soyatal. Dentro de la zona de estudio, al oriente del Túnel “La Mora”, se encuentra el anticlinal El Piñón, cuyos flancos están constituido por La Formación Tamaulipas. Está constituida de calizas micríticas, calcarenitas con cuerpos lenticulares o nódulos de pedernal.

La Formación Tamabra (facies Socavón, El Doctor), aflora en el flanco suroccidental del anticlinal El Piñón, está constituida por calizas de textura más gruesa que las de la Formación Tamaulipas (Carrillo, 2009).

En la cima de la región aflora el fanconglomerado El Morro, conglomerados rojos de origen fluviolacuste de edad Eoceno-Oligoceno inferior, intercalados con depósitos piroclásticos de composición riolítica y riodacítica (Carrillo, 2009). Finalmente, la secuencia sedimentaria está intrusionada por cuerpos de composición cuarzomonzanítica o diorítica del Oligoceno.



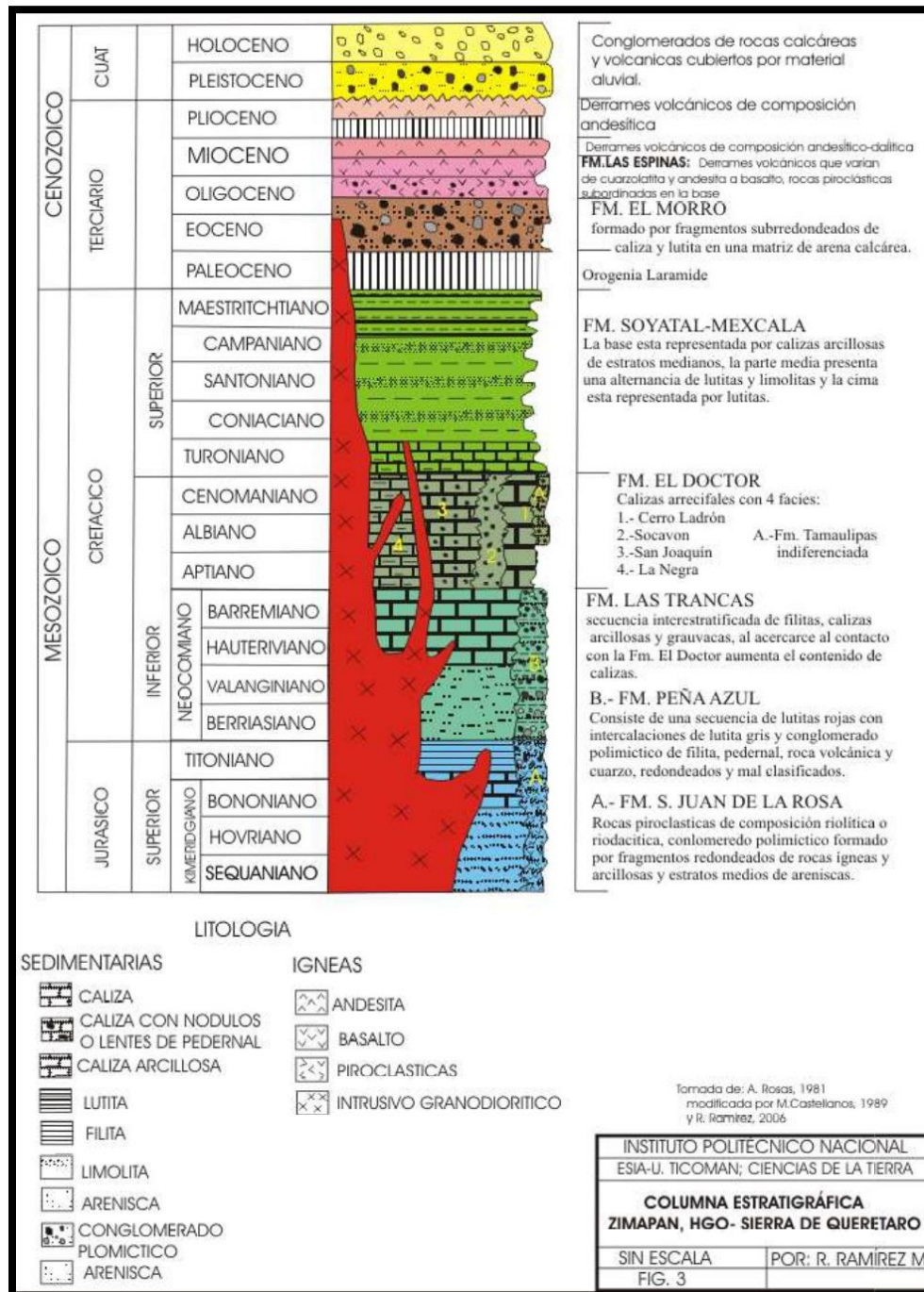


Figura 10. Columna estratigráfica de la Sierra de Querétaro e Hidalgo. Tomado de Ramírez (2016).

### Geología estructural

La Sierra Madre Oriental han sufrido grandes deformaciones a lo largo de la historia geológica, estas deformaciones han controlado la sedimentación y el emplazamiento de las rocas existentes hoy en día. Durante la apertura del Golfo de México existieron esfuerzos extensionales que dieron paso al desarrollo de *horts* y *grabens*, generando cuencas que propiciaron la sedimentación. Posteriormente, en la deformación Laramídica, trajo deformaciones importantes, extensivos generando fallas normales, compresivos, dando lugar a las fallas inversas y cabalgaduras representativas del frente de la SMO. Esta última deformación ocurrió en los paquetes de rocas mesozoicas y paleógenas, en las que se produjo el estilo de deformación *thin-skinned*, en la cual el basamento sirvió como superficie de despegue las cabalgaduras y pliegues (Eguiluz De Antuñano et al, 2000).

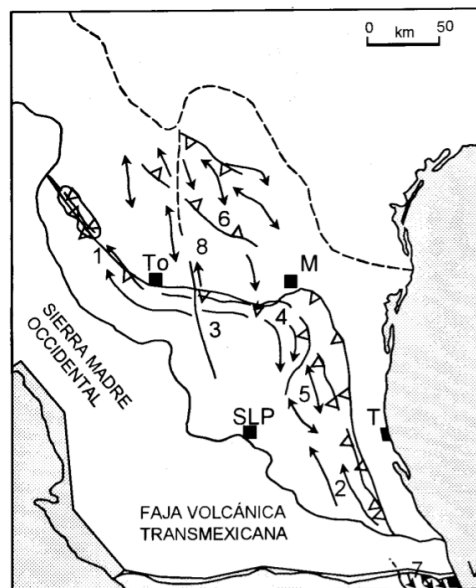


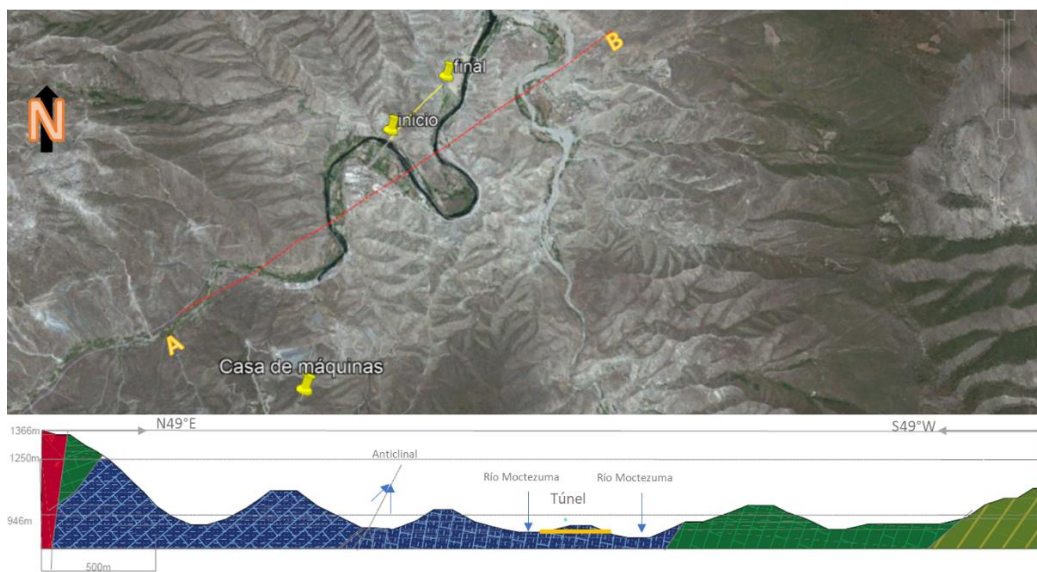
Figura 11. Distribución de sectores del frente Tectónico SMO.

A lo largo de la SMO los rasgos estructurales cambian de dirección, además de la intensidad de las deformaciones, por lo que Eguiluz De Antuñano et al, la han dividido en ocho sectores (Figura 11): San Pedro del Gallo (1), Huayacocotla (2), Transversal de Parras (3), Saliente de Monterrey (4), Valles (5), Cuenca de Sabinas (6), Región de Zongolica (7) y Bloque de Coahuila (8).

El área de estudio se encuentra en el sector Huayacocotla (Figura 11), caracterizado por anticlinorios de grandes dimensiones, amplios, orientados al NW- SE y fallamiento inverso de bajo ángulo, con vergencia al NE. Los niveles de despegue de las cabalgaduras ocurren en carbonatos y clásticos de mayor competencia a la deformación (Eguiluz De Antuñano et al, 2000).

Como en el caso del anticlinal El Piñón, las rocas más antiguas (Formación Las Trancas), afloran en los núcleos de los pliegues. La orientación de estas estructuras sugiere movimientos orientados  $N45^{\circ}E$  y acortamientos de 47 a 54%.

Como se pudo observar en la Figura 9, en el área cercana a Túnel “La Mora”, las estructuras geológicas predominantes, son pliegues anticlinales y sinclinales recumbentes, cuyo eje está orientado hacia el NW y los flancos inclinados al NE. La Figura 12 muestra la sección geológica A-B, en ella, al suroeste del túnel se observa un anticlinal recumbente, además de la disposición de los estratos.



*Figura 12. Sección geológica que muestra la estratificación local del en la zona del Túnel “La Mora”*

## Capítulo 5

### Marco teórico.

El macizo rocoso está definido por la unión de la roca intacta y las discontinuidades por la que se encuentra delimitada. La presencia de falla, diaclasas, estratificación, pliegues, entre otros rasgos geológicos, definirán la estructura del macizo rocoso y con ello su comportamiento mecánico. Cabe resaltar, que el número de discontinuidades y sus características, conforman un factor importante en las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, es decir, entre más discontinuidades presente y más alteradas o meteorizadas estén, la resistencia del macizo rocoso se verá disminuida, por el contrario, al tener pocas discontinuidades y en mejores condiciones, la resistencia del macizo rocoso, se asemejará más a la de la roca intacta, siendo éste valor el máximo posible de resistencia.

Para realizar una predicción más acertada del comportamiento del macizo rocoso al ser perturbado por proceso antropológicos o naturales, es necesario realizar la correcta descripción tanto de la roca intacta como de las discontinuidades que la delimitan. Esta información se verá aterrizada con los sistemas de clasificación que actualmente existen y partirá del mapeo geológico de la zona, tanto de discontinuidades como de la roca intacta.

#### **Discontinuidades en el macizo rocoso**

Se entiende por discontinuidad a la superficie que delimita a la roca intacta y que está separada o es susceptible a separarse. Las discontinuidades pueden ser intrínsecas de los procesos que formaron la roca o posteriores, siendo el tectonismo el factor más común.

El origen de las discontinuidades les brindará características que influyen en su comportamiento, y deberán ser descritas y medidas a profundidad, para cada una de las familias de discontinuidades presentes en el macizo rocoso, estas características son:

1. Orientación.

Para orientación de una discontinuidad representa la disposición en el espacio del plano que la contiene, es decir hacia donde se inclina y cuánto se inclina. El plano estará definido por la magnitud del rumbo y del echado.

Se entiende por echado al ángulo que forma desde la horizontal a la línea de máxima pendiente que esté contenida en el plano, este ángulo varía de 0-90°, siendo 0° un plano horizontal y 90° un plano vertical. El rumbo de la discontinuidad es el ángulo formado entre una línea horizontal perpendicular al echado, contenida en el plano de la discontinuidad y el norte geográfico. Este puede variar de 0-360° si es expresado en azimut o de 0-90° si es en cuadrantes. En ocasiones, puede solo señalar el cuadrante en el que buza el echado, pero en geotecnia es común indicar



la dirección del echado, que es el ángulo medido desde el norte hasta la proyección horizontal de la línea de máxima pendiente (Arellano G. J. et al, 2002).

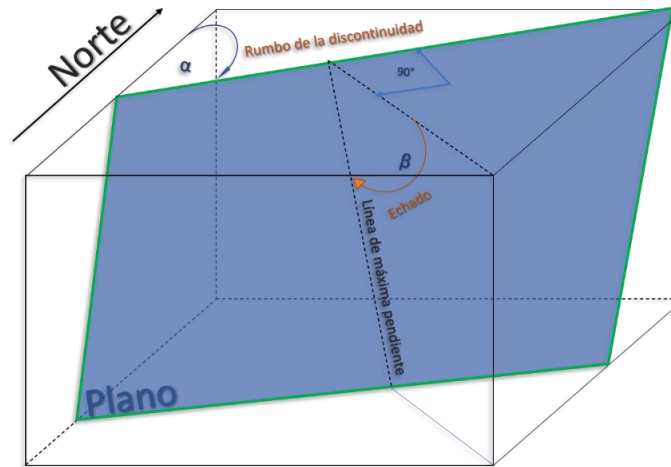


Figura 13. Representación de los componentes de en la orientación de las discontinuidades. El ángulo  $\alpha$  corresponde al rumbo de la discontinuidad mientras que el ángulo  $\beta$  corresponde a la magnitud del echado.

## 2. Espaciado

El espaciado es la distancia perpendicular media entre las dos discontinuidades paralelas. El espaciado en un macizo rocoso es medido en las tres direcciones para poder definir el tamaño de los bloques que lo componen (Figura 14). En un afloramiento, para medir el desplazamiento, se utiliza una cinta métrica perpendicular a las discontinuidades y midiendo la distancia entre cada una de ellas. La ventana medida debe contener al menos 10 discontinuidades de la misma familia (González de Vallejo et al, 2002). Cuando no es posible colocar la cinta perpendicular a las discontinuidades, ésta es posicionada horizontalmente midiendo el ángulo de la discontinuidad respecto a la vertical, para la corrección utilícese la ecuación:

$$S = dm * \text{seno } \alpha \dots (1)$$

S: Espaciado verdadero

dm: distancia media con cinta horizontal

$\alpha$ : ángulo medido de la discontinuidad.

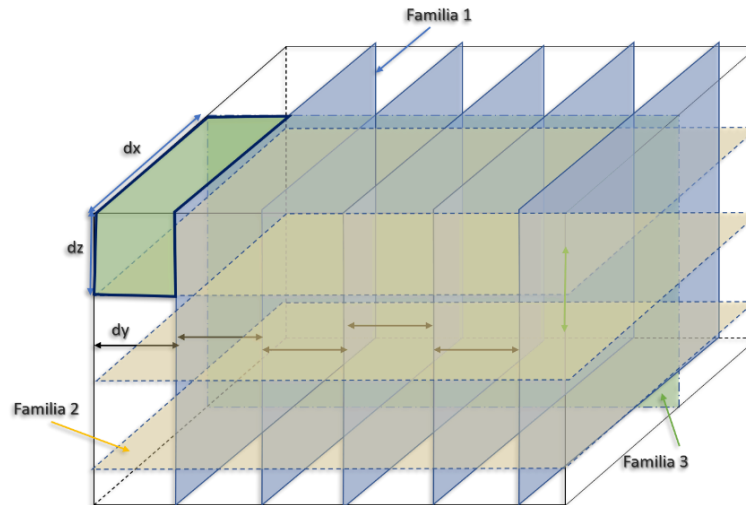


Figura 14. Espaciamiento de las familias de discontinuidades y formación de bloques delimitados por tres familias de discontinuidades.

Las discontinuidades pueden describirse cualitativamente por medio del espaciamiento medio presentado en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción cualitativa del espaciamiento, según la Sociedad de Mecánica de Rocas (ISRM). Tomado de González de Vallejo et al, 2002

Descripción	Espaciamiento (mm)
Extremadamente junto	<20
Muy junto	20-60
Junto	60-200
Moderadamente junto	200-600
Separado	600-2,000
Muy separado	2,000-6,000
Extremadamente separado	>6,000

### 3. Persistencia

La persistencia coloquialmente es representa el tamaño de la discontinuidad, se mide por la longitud de la discontinuidad en su proyección al afloramiento, y de ser posible, en las tres dimensiones. Este parámetro es esencial para evaluar la resistencia de la discontinuidad, ya que, al aumentar la continuidad, disminuye la resistencia del macizo rocoso.

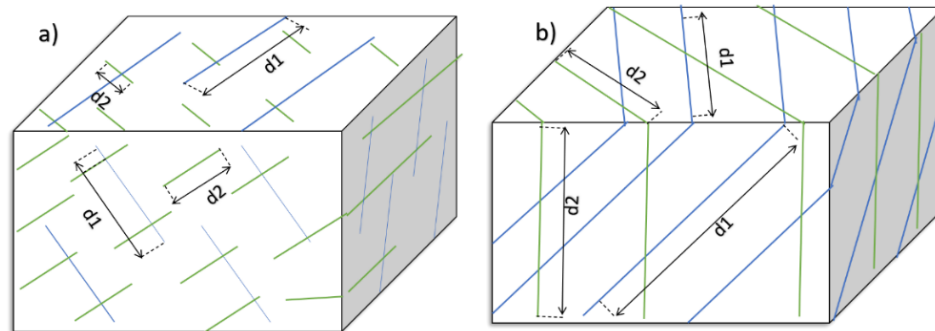


Figura 15. Modelos de persistencia de discontinuidades, a) baja discontinuidad, b) alta continuidad.

La persistencia se debe expresar las longitudes de las familias de discontinuidades y de las discontinuidades singulares como fallas y diques, además de expresar si la discontinuidad es interrumpida por otra discontinuidad. Para expresar de forma cualitativa, la continuidad de las discontinuidades es expresada de acuerdo a la ISRM (Tabla 2).

Tabla 2. Descripción de las discontinuidades de respecto a la continuidad de acuerdo a la (ISRM). Tomado de González de Vallejo et al, 2002

<b>Continuidad</b>	<b>Longitud (m)</b>
Muy baja continuidad	<1
Baja continuidad	1-3
Continuidad media	3-10
Alta continuidad	10-20
Muy baja continuidad	>20m

#### 4. Rugosidad

El término de rugosidad engloba la ondulación de las discontinuidades y la aspereza. La ondulación, se refiere a las rugosidades de las superficies de la discontinuidad a gran escala, mientras que la aspereza es la rugosidad a pequeña escala y puede no ser continua a lo largo de la discontinuidad. La ondulación se mide a partir del ángulo  $i$  mostrado en la Figura 16, la aspereza con ayuda del peine de Barton y con ayuda de la brújula.

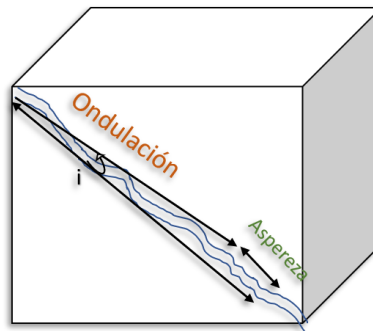


Figura 16. Esquema de la rugosidad de la discontinuidad. Tanto la ondulación se puede medir por el ángulo  $i$ .

Este parámetro es importante para la evaluar la resistencia al corte de la discontinuidad, siendo la relación directamente proporcional. Este parámetro de rugosidad puede evaluarse en laboratorio por ensayos de corte directo paralelos a la discontinuidad.

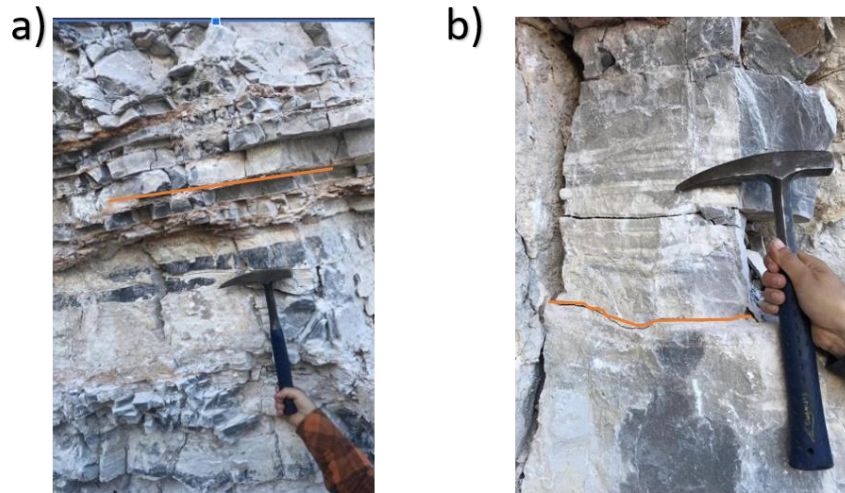


Figura 17. Ejemplos de discontinuidades lisa y rugosa, evaluadas a pequeña escala. La imagen a) se refiere a planos lisos de estratificación, la imagen b) representa una junta rugosa.

Según las escalas para determinar la rugosidad según la ISRM son:

Tabla 3. Clasificación de las discontinuidades según su escala (Ramírez et al, 2004).

Escala	Rango	Descripción
Intermedia	Metros	Escalonada Ondulada Plana
Pequeña	Centímetros	Rugosa Lisa o suave Pulida o espejo de falla

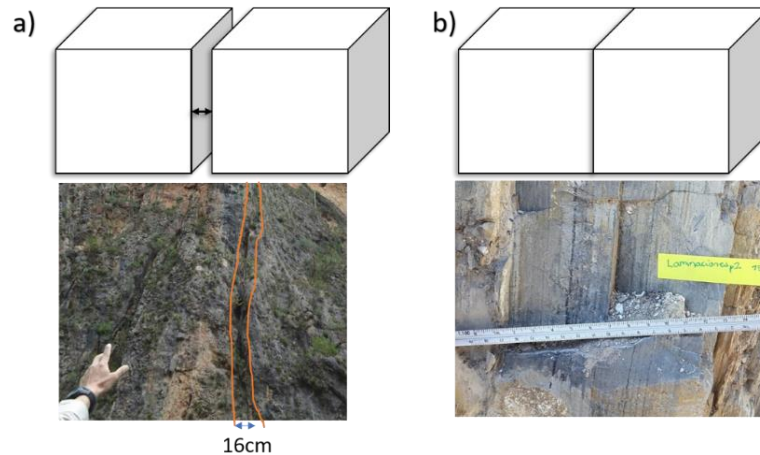
## 5. Apertura

Se define como la distancia perpendicular a la que se encuentran los planos de la discontinuidad. Este espacio puede o no estar ocupado por relleno o agua. Esta característica influirá directamente sobre la resistencia de la discontinuidad. Para realizar una descripción de la apertura de las discontinuidades se recurre a los términos propuestos por la Sociedad Internacional de Mecánica de rocas, la cual engloba por intervalos la apertura de las discontinuidades y les asigna un nombre (Tabla 4).

*Tabla 4. Descripción cualitativa de la de la apertura de los planos de las discontinuidades según la ISRM. Tomado de Ramírez et al, 2004.*

<i>Aspecto</i>	<i>Descripción</i>	<i>Apertura (mm)</i>
Cerrado	Muy cerrada	<0.1
	Cerrada	0.1-0.25
	Parcialmente abierta	0.25-0.5
De hendidura	Abierta	0.5-2.5
	Moderadamente ancha	2.5-10
	Ancha	>10
Abierto	Muy ancha	10-100
	Extremadamente ancha	100-1,000
	Cavernosa	>1000

En un macizo rocoso, las aperturas tienden a ser mayores en superficie y menores a profundidad, debido a descompresión al exhumarse las rocas por erosión o eventos tectónicos, pero esto puede no cumplirse al tratarse de cavidades por disolución. Cuando se describe la apertura de la discontinuidad debe tomarse en cuenta que pudo ser el resultado de desplazamientos divergentes, lavado de finos y o de la disolución de la roca intacta (Figura 18). Por ello es necesario reportar el origen de la apertura, ya que esto influye en el comportamiento futuro de la discontinuidad.



*Figura 18. Ejemplos reales de la apertura de discontinuidades a) discontinuidad “extremadamente ancha”, que alcanza 16 cm en las paredes de una barranca compuesta por carbonatos, b) discontinuidad “muy cerrada” en rocas carbonatadas de la Formación Soyatal.*

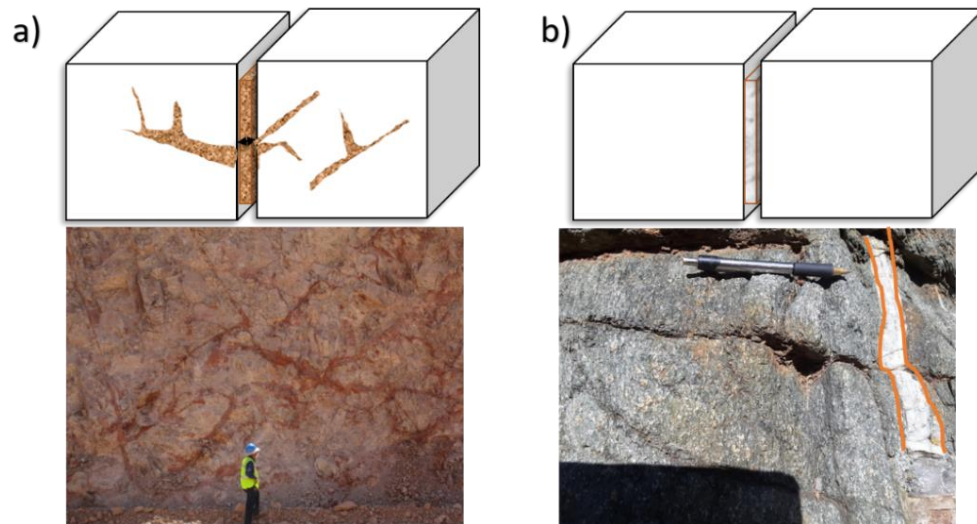
La apertura influye directamente a en la resistencia al corte de la discontinuidad, debido a que modifica la revisión efectiva que actúa sobre las paredes (González de Vallejo et al, 2002).

## 6. Relleno

Cuando el espacio entre las paredes de la discontinuidad es ocupado parcial o totalmente, por algún material diferente al de la roca intacta, se le denomina relleno. Este relleno tendrá propiedades mecánicas diferentes e influirá en el comportamiento de la discontinuidad. Estos materiales de relleno pueden ser arenas, arcillas, limos o deberse a la precipitación de fluidos ricos en carbonatos, sílice u otros compuestos.

Al describir el relleno de las discontinuidades deben realizarse observaciones respecto al espesor del material del relleno, mineralogía y granulometría, grado de alteración o meteorización, grado de humedad y presencia de agua, resistencia a la compresión simple del material de relleno y vestigios de desplazamientos previos (discontinuidades cortadas por otras discontinuidades).

Cuando los materiales presentes están alterados o son arcillosos, es necesario realizar la caracterización de la arcilla que lo compone, debido a que cabe la posibilidad de que sean de carácter expansivo al contacto con agua.



*Figura 19. Ejemplos de relleno de discontinuidades. a) macizo rocoso con vetas minerales con presencia de oxidación y alteración hidrotermal, el arreglo de las discontinuidades se presenta en diferentes direcciones. b) veta rellena de cuarzo, se encuentra cortada por otra discontinuidad horizontal.*

## 7. Filtraciones

Las discontinuidades son la vía más importante para la circulación del agua presente en el macizo rocoso. El caudal dependerá principalmente de la permeabilidad secundaria y en menor medida de la permeabilidad primaria. Para realizar la descripción de las filtraciones en las discontinuidades debe describirse si presenta o no relleno, y su consistencia, ya que como antes se ha mencionado, los rellenos blandos o arcillosos pueden moverse o expandirse con la presencia o circulación de agua.

Las discontinuidades pueden presentarse con flujo, húmedas o secas, como se ejemplifica en la imagen Figura 20.



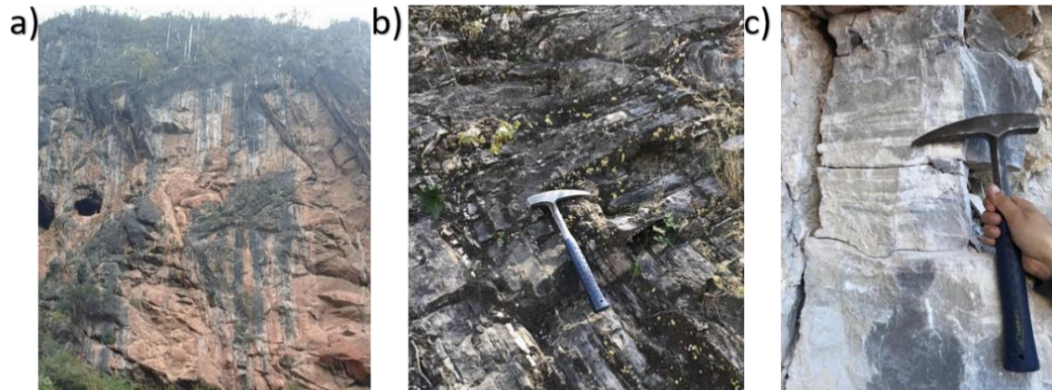


Figura 20. Condición de las filtraciones en macizos rocosos. a) flujo de agua en rocas calizas de en las paredes de una barranca, b) rocas humedecidas en calizas sin presentar flujo de agua, c) discontinuidades secas en calizas.

La Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, sugiere llevar registros temporales y meteorológicos al tomar los datos de filtraciones y clasificarlas según las clases presentadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Descripción de las filtraciones según la ISRM. Tomado de Ramírez et al, 2004.

Clase	Discontinuidad sin relleno	Discontinuidad con relleno
I	Junta muy plana y cerrada. Aparece seca y no parece posible que circule agua.	Relleno muy consolidado y seco. No es posible el flujo de agua.
II	Junta seca sin evidencia de flujo de agua.	Relleno húmedo, pero sin agua libre.
III	Junta seca, pero con evidencia de haber circulado agua.	Relleno mojado con goteo ocasional.
IV	Junta húmeda, pero sin agua libre.	Relleno que muestra señales de lavado, flujo de agua continuo (estimar el caudal en l/min.).
V	Junta con rezume, ocasionalmente goteo, pero sin flujo continuo.	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (estimar caudal y presión).
VI	Junta con flujo continuo de agua (estimar el caudal en l/min y la presión).	Rellenos completamente lavados, presiones de agua elevadas.

### Sistemas de clasificación del macizo rocoso

Las propiedades tanto de la roca intacta y de las discontinuidades, así como su descripción, ayudan a predecir su comportamiento y realizar una evaluación geomecánica del macizo rocoso. Si bien, las clasificaciones nacen de métodos empíricos aplicados a un gran número



de proyectos y se adaptan cien por ciento a todos los proyectos, si dan una aproximación muy cercana a la realidad y son en su mayoría fáciles de aplicar. Realizar la clasificación del macizo rocoso permite zonificarlo en secciones que compartan las mismas características geomecánicas, lo que optimiza el proceso de diseño y constructivo.

Los sistemas de clasificación se van alimentando cada cierto tiempo, afinando su precisión e incorporando parámetros nuevos que predican de mejor manera el comportamiento del macizo rocoso.

Gracias a estos sistemas, se pueden asignar propiedades de resistencia y deformabilidad al macizo rocosos en conjunto, partiendo de las características de la roca intacta de las discontinuidades.

### **Evaluación del macizo rocoso (RMR)**

El sistema *Rock Mass Rating* de Bieniawski fue publicado en diciembre 1973, posteriormente fue actualizado en diversas ocasiones, siendo las más relevantes, la actualización en 1984 y la más reciente en 2014. Esta clasificación permite establecer las propiedades de resistencia y deformación del macizo rocoso, además de llegar a estimar el sostenimiento de excavaciones subterráneas (Celada et al, 2014).

El sistema consta en dos etapas, en la primera es evaluado el RMR del macizo rocoso y en la segunda se realiza una serie de correcciones. Este último paso es en el que difieren la versión de 1989 y 2014. Anteriormente solamente era corregido por la dirección de las discontinuidades, respecto a la orientación del túnel, en la actualización del 2014, se añaden dos correcciones más, aparte de la ya antes mencionada. Una de ellas implica un factor por excavación con tuneladora y la segunda un factor por el efecto de plastificación del terreno en el frente del túnel (Celda et al, 2014).

Esta clasificación se obtiene de la suma de 5 parámetros y la corrección por la dirección de las discontinuidades respecto al eje del túnel. Siendo los parámetros:

- i) Resistencia de la roca intacta,
- ii) el índice de la calidad de la roca (RQD de Deere),
- iii) separación entre diaclasas,
- iv) el estado de las discontinuidades
- v) la condición de aguas freática y
- vi) la corrección por el ajuste de las discontinuidades

Cada uno de estos parámetros tiene un puntaje máximo y mínimo, expresados en la (

Tabla 6). La suma de estos parámetros define la ecuación que rige al RMR<sub>89</sub>:

$$RMR = (i + ii + iii + iv + v) + vi \dots (2)$$

Tabla 6. Parámetros del Sistema de Clasificación del macizo rocoso RMR (Bieniawski, 1989). Tomado de (SCT, 2017)

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		> 2m	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	< 1m	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	1	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

Como se observa en la Tabla 7, la puntuación del sistema RMR va desde cero a cien, siendo el rango de 81-100 la clase que representa al macizo rocoso con la mejor calidad.

Tabla 7. Clasificación del macizo rocoso RMR de Bieniawski, 1989.

<i>Clase</i>	<i>Calidad</i>	<i>Puntuación</i>
I	Muy buena	100-81
II	Buena	80-61
III	Media	60-41
IV	Mala	40-21
V	Muy mala	<20

Al realizarse la actualización del sistema en 2014, se mantuvieron solos los parámetros de resistencia de la roca intacta, el número de discontinuidades por metro, el estado de las discontinuidades y la condición de aguas subterráneas. Además, se incorporaron los efectos de la alterabilidad del macizo rocoso por la presencia de agua, también modificaron las puntuaciones asignadas para cada parámetro. La ecuación que define al  $RMR_{14}$  es la siguiente:

$$RMR_{14} = (RMR_b + F_0) * F_e * F_s \dots (3)$$

RMR<sub>b</sub>: RMR básico.

F<sub>0</sub>: Corrección por orientación del eje del túnel.

F<sub>e</sub>: Corrección por posible excavación mediante tuneladoras.

F<sub>s</sub>: Corrección por influencia de la plastificación del frente.

Para obtener el RMR<sub>b</sub>, se suman los 5 parámetros, cuyos valores se obtienen mediante los siguientes gráficos y tablas:

- 1) Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.

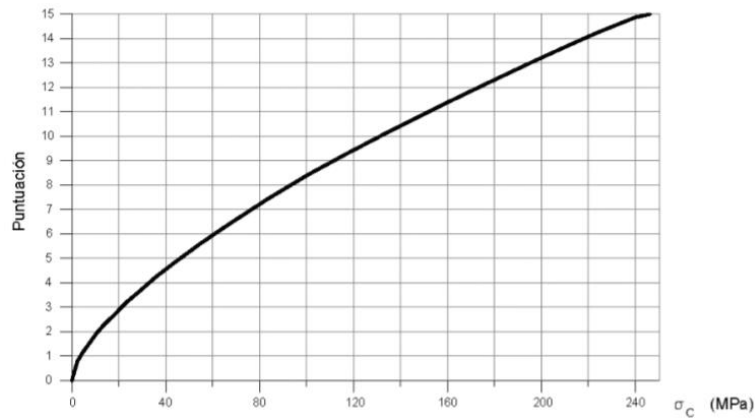


Figura 21. Resistencia a la compresión simple de la roca intacta ( $\sigma_c$ ) MPa. Tomado de Osinergmin, 2017.

2) Número de juntas por metro

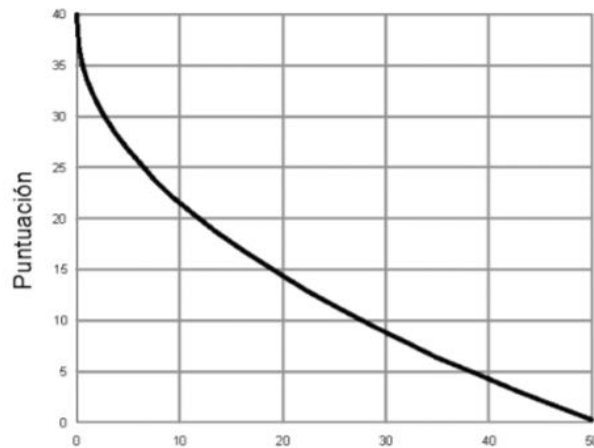


Figura 22. Número de discontinuidades por metro. Tomado de Osinergmin, 2017.

3) Efecto del agua

Tabla 8. Valoración de la presencia de agua.

Estado del macizo rocoso	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Flujo
Puntuación	15	10	7	4	0

4) Resistencia de las discontinuidades

Tabla 9. Valoración del estado de las discontinuidades.

Continuidad (m)	<1	1-3	3-10	>10
-----------------	----	-----	------	-----

<i>puntuación</i>	15	10	7	4
<b>Rugosidad</b>	<i>Muy rugosa</i>	<i>Rugosa</i>	<i>Suave</i>	<i>Superficies de deslizamiento</i>
<i>puntuación</i>	15	10	7	4
<b>Relleno</b>	<i>Duro</i>		<i>Blando</i>	
	<i>&lt;5mm</i>	<i>&gt;5mm</i>	<i>&lt;5mm</i>	<i>&gt;5mm</i>
<i>puntuación</i>	5	2	2	0
<b>Alteración</b>	<i>Sin alteración</i>	<i>Poco alterado</i>	<i>Muy alterado</i>	<i>Descompuesto</i>
<i>puntuación</i>	5	3	1	0

5) Alterabilidad del macizo rocoso

La alterabilidad de la matriz rocosa puede determinarse mediante el *Slake Durability Test*; definido en la norma ASTM D 4644-87, que permite obtener el índice  $I_{d2}$ .

Tabla 10. Criterios de evaluación de la alterabilidad del macizo rocoso.

<i>Alterabilidad <math>I_{d2}</math>(%)</i>				
	<i>&lt;85</i>	<i>60-85</i>	<i>30-60</i>	<i>&lt;30</i>
<i>Puntuación</i>	10	8	4	0

6) Corrección por orientación del eje del túnel.

Esta correlación se presenta desde las versiones pasadas y se califica de acuerdo a los siguientes parámetros (Tabla 11).

Tabla 11. Criterios para evaluar la corrección por orientación del eje del túnel.

<i>Rumbo perpendicular al eje del túnel</i>				<i>Rumbo paralelo al eje del túnel</i>		<i>Buzamiento 0-20 independiente del rumbo</i>
<i>Avance con el buzamiento</i>		<i>Avance contra del buzamiento</i>				
<i>Buz 45-90</i>	<i>Buz 20-45</i>	<i>Buz 45-90</i>	<i>Buz 20-45</i>	<i>Buz 45-90</i>	<i>Buz 20-45</i>	
<i>Muy favorable</i>	<i>Favorable</i>	<i>Regular</i>	<i>Desfavorable</i>	<i>Muy desfavorable</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
0	-2	-5	-10	-12	-5	-5

7) Corrección por posible excavación mediante tuneladoras.

Para obtener el factor  $F_e$ , se emplean las ecuaciones 4 y 5.

$$\text{Para } RMR < 40: \quad F_e = 1 + 2 * \left(\frac{RMR}{100}\right) \dots (4)$$

$$\text{Para } RMR > 40 \quad F_e = 1.32 - \frac{\sqrt{(RMR-40)}}{25} \dots (5)$$

8) Corrección por influencia de la plastificación del frente

Por medio del Índice de Comportamiento Elástico (ICE), es posible obtener el factor que considere la plastificación del frente. Para el cálculo de ICE, se emplean las siguientes ecuaciones:

$$\text{Para } K_0 \leq 1 \quad ICE = \frac{3704 * \sigma_{ci} * e^{\frac{RMR-100}{24}}}{(3-K_0) * H} * f \dots (6)$$

$$\text{Para } K_0 \geq 1 \quad ICE = \frac{3704 * \sigma_{ci} * e^{\frac{RMR-100}{24}}}{(3K_0-1) * H} * f \dots (7)$$

$\sigma_{ci}$ : Resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta (MPa)

$K_0$ : Coeficiente de reparto de los esfuerzos naturales

H: Profundidad a la que se encuentra el frente del túnel (m)

f: Factor de forma del túnel

**Índice de calidad de túneles (NGI).**

El índice de calidad del macizo rocoso Q, fue desarrollado por Barton, Lien y Lunde en 1974 (González de Vallejo et al, 2002; Hoek et al, 1985). Para obtener el valor del índice Q, es necesario emplear la ecuación (8), engloba seis parámetros esenciales:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \dots (8)$$

- 1) RQD: índice de calidad de la roca de Deere.
- 2)  $J_n$ : número de sistemas de fisuras
- 3)  $J_r$ : número de la rugosidad
- 4)  $J_a$ : número de la alteración de las fisuras
- 5)  $J_w$ : factor de reducción por agua en las fisuras
- 6) SRF: factor de reducción por esfuerzos.

Cada término de la ecuación (8), representa una condición en específico. El primer término que relaciona RQD/ $J_n$ , representa el tamaño de bloques presentes en el macizo rocoso y puede variar entre 200 y 0.5. El segundo término, es el cociente entre  $J_r/J_a$ , representa la resistencia al corte de los bloques y las características de fricción de la discontinuidad, tiene como valores extremos 5.3 y 0.038, y se debe tomar en cuenta la orientación de las fisuras, ya que pudiera ser favorable o desfavorable para la evaluación. El último término  $J_w/SRF$ , es un parámetro empírico que relaciona las fuerzas que actúan a lo largo de la fisura, varía

entre 0.005 y 2, aunque existen condiciones en los que puede ser disminuido al aumentar SRF. Para evaluar numéricamente cada parámetro se recurre a las siguientes tablas (Hoek et al, 1985):

- 1) Índice de calidad de la roca (RQD), de Deere.

*Tabla 12. Valoración para el RQD. Tomada de Hoek et al, 1985.*

<i>Calidad del macizo rocoso</i>	<i>RQD %</i>
Muy mala	0-25
Mala	25-50
Regular	50-75
Buena	75-90
Excelente	90-100

*Observaciones.* Para R.Q.D < 10 se puede tomar R.Q.D.= 10 en la ecuación de Q.

- 2) Número de sistemas de fisuras (Jn).

*Tabla 13. Número de sistemas de fisuras. Tomada de Hoek et al, 1985.*

<i>Descripción</i>	<i>Jn</i>
Masivo con o sin fisuras	0.5-1
Una familia de fisuras.	2
Una familia de fisuras y algunas fisuras ocasionales.	3
Dos familias de fisuras.	4
Dos familias de fisuras y algunas fisuras ocasionales	6
Tres Familias.	9
Tres familias de fisuras y algunas fisuras s ocasionales.	12
Cuatro o más familias de fisuras, roca muy fracturada.	15
Roca triturada terregal.	20

*Observaciones* En cruces en túneles utilizan 3xJn  
Para portales utilizar 2XJn

- 3) Número de la rugosidad (Jr).

*Tabla 14. Número de rugosidad de las fisuras. Tomada de Hoek et al, 1985.*

<i>Descripción</i>	<i>Jn</i>
<i>a) Contacto en las paredes</i>	
<i>b) Contacto en las paredes antes de una cizalla de 10 cm</i>	
Juntas discontinuas.	4
Juntas Rugosa o irregular ondulada.	3
Suave ondulada.	2
Espejo de falla, ondulada,	1.5
Rugosa o irregular, plana.	1.5

Suave plana.	1
Espejo de Falla, plano.	0.5
<b>c) Sin contacto de roca después de una cizalla de 10cm</b>	
Zona de contenido de minerales arcillosos, suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las paredes.	1
Zona de arenas, gravas o roca triturada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las paredes.	1
<b>Observaciones:</b> Añadir 1.0 si el espaciado de la familia de las diaclasas es mayor de 3 m hay que aumentar el Jn en una unidad. Para diaclasas con espejos de falla provisto de lineaciones, si están orientadas favorablemente, se puede usar Jr=0.5	

4) Número de la alteración de las fisuras (Ja).

*Tabla 15. Número de alteración de las juntas.*

<i>Descripción</i>	<i>Ja</i>	<i>Ø*</i>
<b>a) Contacto entre las 2 caras de las Diaclasas.</b>		
Relleno soldado claro, duro inablandable, impermeable	0.75	
Paredes de juntas inalteradas, solo con manchas de oxidación.	1	25-30
Paredes ligeramente alteradas con recubrimiento de minerales inablandables partículas arenosas, roca desintegrada no arcillosa	2	25-30
Recubrimientos limosos o arenoso-arcillosos con una pequeña fracción de arcilla(inablandable).	3	20-25
Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja fricción como caolinita, clorita, talco yeso, grafito y pequeñas cantidades de arcillas expansivas (recubrimientos son discontinuos con espesores máximos de 1 o 2 mm.	4	8-16

**b) Contacto en las paredes antes de una cizalla de 10 cm**



Partículas arenosas, roca desintegrada, sin arcilla etc.	4	25-30
*Rellenos de minerales arcillosos muy sobre consolidados e inablandables (continuos <5mm de espesor).	6	16-24
*Rellenos de minerales arcillosos de sobre consolidación media a baja (continuos <5mm de espesor).	8	12-16
*Rellenos de arcilla expansiva, o sea montmorillonita media a baja (continuos <5mm de espesor). El valor Ja depende de arcilla y del acceso al agua.	8-12	6-12

**c) Sin contacto de las paredes después del cizalleo**

Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver * para la descripción de las condiciones de las arcillas).	6,8 o 8-12	6-24
Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no inblandecibles.	5	10, 13 o
Zonas o bandas continuas de arcilla, de espesor grueso (ver * para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6-24	13-20

**bservaciones:** Los valores de ángulo de fricción residual dan una guía aproximada de las propiedades ineralógicas de los productos de la alteración si estos están presentes.

5) Factor de reducción por agua en las fisuras ( $J_w$ ).

*Tabla 16. Factor de reducción por agua en las fisuras. Tomada de Hoek et al, 1985.*

<i>Descripción</i>	<i><math>J_w</math></i>	<i>Presión del agua <math>Kg/cm^2</math></i>
Excavación seca o flujos bajos (<5 L/min. Localmente).	1	<1
Flujo o presión medios, con lavado ocasional de los rellenos.	0.66	1-2.5
Gran flujo o presión alta en roca competente con juntas sin relleno.	0.5	2.5-10
Gran flujo o presión alta, lavado considerable de los rellenos.	0.5	2.5-10
Flujo o presión excepcionalmente altos con las voladuras, disminuyen con el tiempo.	0.1-0.2	>10
Flujo o presión excepcionalmente altos en todo momento.	0.05-.01*	>10

**Observaciones:** Los 4 últimos factores son estimaciones imprecisas. Aumentar  $J_w$ , si se instala drenaje

Los problemas especiales causados por la presencia de hielo no se toman en consideración

6) Factor de reducción de esfuerzos (SRF).

Tabla 17. Factor de reducción de esfuerzos. Tomada de Hoek et al, 1985.

Descripción	$\sigma_2/\sigma_1$	$\sigma_3/\sigma_1$	SFR
<b>a) Zonas de debilidad que intersecan la excavación y pueden ser las causas de que el macizo se desestabilice cuando se construya el túnel</b>			
Múltiples zonas de debilidad con contenido de arcilla o roca químicamente desintegrada, roca circundante muy suelta (cualquier profundidad).			10
Zonas de debilidad aisladas que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de excavación <50m).			5
Zonas de debilidad aisladas que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de excavación >50m).			2.5
Múltiples zonas de corte en roca competente (sin arcilla), roca circundante suelta (cualquier profundidad).			7.5
Zonas de corte aisladas en roca competente (sin arcilla), (profundidad de excavación < 50m).			5.0
Zonas de corte aisladas en roca competente (sin arcilla), (profundidad de excavación > 50m).			2.5
Juntas abiertas sueltas, fisuración intensa (cualquier profundidad).			55.0
<b>b) Roca competente, problemas de esfuerzos</b>			
Esfuerzo bajo, cerca de la superficie	>200	>13	2.5
Esfuerzo medio	200-10	13-0.6	0.5-2
Esfuerzo grande, estructura muy cerrada, generalmente favorable para la estabilidad. Puede ser desfavorable para la estabilidad de las paredes.	10-5	0.66-0.33	0.5-10
Desprendido de rocas moderado (roca masiva).	5-2.5	0.33-0.16	5-10
Desprendido de roca intenso (roca masiva).	<2.5	<0.16	10-20
<b>c) Roca compresiva, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de presiones altas de roca.</b>			
Presión moderada de roca extrusiva.			5-10
presión alta de roca extrusiva.			10-20
<b>d) Roca expansiva, acción química expansiva dependiendo de la presencia de agua.</b>			
Presión moderada de roca expansiva			5-10
Presión alta de roca expansiva			10-20
<b>Observaciones:</b> Reducir estos valores del SRF en un 25-50%, si las zonas de corte relevantes influyen, pero no intersecan la excavación. Para un campo de tensiones muy anisotrópico (si es medido); cuando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ , reducir el $\sigma_c$ a $0.8\sigma_c$ , Cuando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ reduzca $\sigma_1$ y $\sigma_c$ a $0.6\sigma_c$ donde $\sigma_c$ es la fuerza compresiva no confinada, y $\sigma_1$ fuerza de tensión (carga puntual). y $\sigma_1$ y $\sigma_3$ =esfuerzos principales mayor y menor. Hay pocos registros de casos donde la profundidad del techo debajo de la superficie sea menor que el ancho. Se sugiere que se incremente el SRF de 2.5 a 5 par a estos casos ver (*)			

### Índice Geológico de resistencia (GSI)

El *Geological Strength Index* (GSI), nace de la necesidad para vincular el criterio de falla a las observaciones de ingeniería geológica en el campo. Fue desarrollado por Hoek (1994) y Hoek et al. (1995), para evaluar la calidad del macizo rocosos en función del grado de fracturamiento, las características de las discontinuidades, la estructura geológica, el tamaño de bloques y alteración de las discontinuidades (González de Vallejo et al, 2002).

Si bien, este no es un sistema de clasificación de macizos rocosos, resulta más sencillo de emplear, ya que se evalúa el índice por medio de un gráfico con dos ejes (Figura 23). El eje vertical describe la estructura del macizo roco, mientras que el eje horizontal, caracteriza la condición de las paredes de las discontinuidades. La valoración del sistema GSI varía entre 0 y 100, describiendo en 100 a la roca intacta. Cabe resaltar que, pese a su sencillez de aplicación, se evalúa en intervalos, ya que al dar un número “exacto”, pierde precisión.




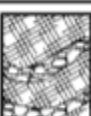


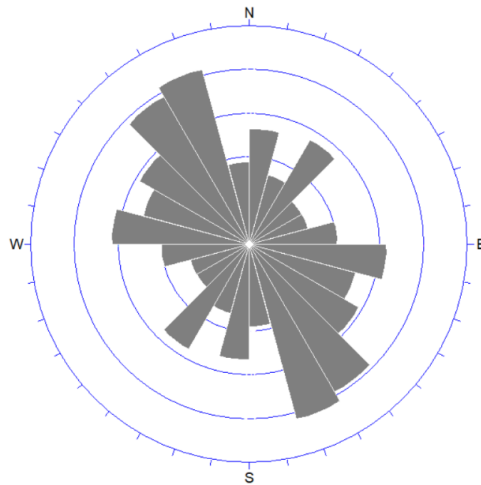
<p>INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICO GSI (Hoek &amp; Marinos, 2000). A partir de la litología, estructura y la condición de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio de GSI. No intente ser muy preciso. Escoger un rango de 33 a 37 es mas realista que fijar GSI=35. También notar que esta tabla no se aplica a mecanismos de falla controlado por estructuras. Donde se presenten planos estructuralmente débiles en una orientación desfavorable con respecto a la cara de la excavación, estos dominarán el comportamiento del macizo rocoso. La resistencia al corte de las superficies en rocas que son propensas a deteriorarse como resultado de cambios en la humedad, se reducirá cuando exista presencia de agua. Cuando se trabaje con rocas de categoría regular a muy mala, puede moverse hacia la derecha para condiciones húmedas. La presión de poros se maneja con un análisis de esfuerzos efectivos.</p>		CONDICIONES SUPERFICIALES				
		MUY BUENA Muy rugoso. Superficies frescas sin meteorización	BUENO Rugoso, ligeramente meteorizada, superficies con óxido.	REGULAR Lizas, moderadamente meteorizadas y superficies alteradas.	MALA Espejo de falla, altamente meteorizadas con recubrimiento compacto o rellenos o fragmentos	MUY MALA Espejo de falla, superficies altamente meteorizadas con recubrimiento de arcilla suave o rellenos
ESTRUCTURA		DISMINUYE CALIDAD DE SUPERFICIE →				
	Intacta o Masivo: Especímenes de roca intacta o masivo in roca in situ con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.	90	/	/	N/A	N/A
	Levemente fracturado: Macizo rocoso no disturbado, muy bien entrelazado, constituido por bloques cúbicos formados por tres familias de discontinuidades	80	/	/	/	/
	Moderadamente Fracturado: Entrelazado, macizo rocoso parcialmente disturbado con bloques angulosos de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades	/	70	/	/	/
	Muy Fracturado/Disturbado/Agrietada: Foleada con bloques angulosos formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificación o esquistocidad	/	60	/	/	/
	Desintegrado: Pobremente entrelazado, macizo altamente fracturado compuesto de una mezcla de pedazos de rocas angulosas y redondeadas	/	/	50	/	/
	Foliado/Laminado/Cizallado: Falta de formación de bloques debido al pequeño espaciamiento o esquistocidad débil o planos de corte	/	/	40	30	/
		/	/	/	20	/
		N/A	N/A	/	/	10

Figura 23. Gráfico del Índice de Resistencia Geológica, GSI (Hoek & Marinos, 2000). .  
Tomado de Osinergmin, 2017.

### Estereogramas

La estereografía es una herramienta para mostrar gráficamente la orientación de las discontinuidades, además de plasmar la variación de la disposición entre más de una discontinuidad. Aunque existen también las rosetas para mostrar las variaciones de los rumbos o echados (Figura 24), no se pueden ver estas dos condiciones en una misma roseta, por lo que resulta poco práctico emplearlas para visualizar las discontinuidades de un macizo rocoso (Lisle, 2004).



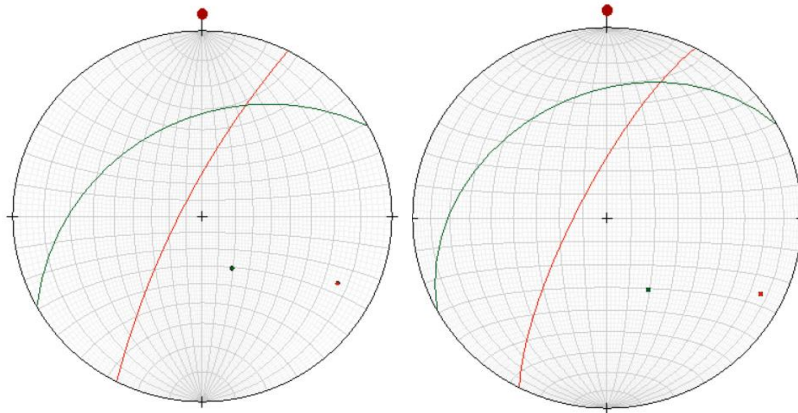
*Figura 24. Roseta de rumbos de las discontinuidades de un macizo rocoso).*

La proyección estereográfica es un tipo de proyección azimutal muy usada geología estructural para establecer la relación angular existente entre las caras de las estructuras geológicas (Tomás R. et al, 2002).

Existen diferentes tipos de representaciones estereográficas, que varían dependiendo de cómo se proyectan, esto es, desde el centro de la esfera, perpendicular al plano, del punto opuesto al punto de tangencia o con un arco desde un punto de la esfera hasta el plano. En la proyección estereográfica ecuatorial el plano de proyección pasa por el ecuador y el centro de proyección esta sobre la superficie de la esfera en una recta perpendicular a él (Tomás R. et al, 2002).

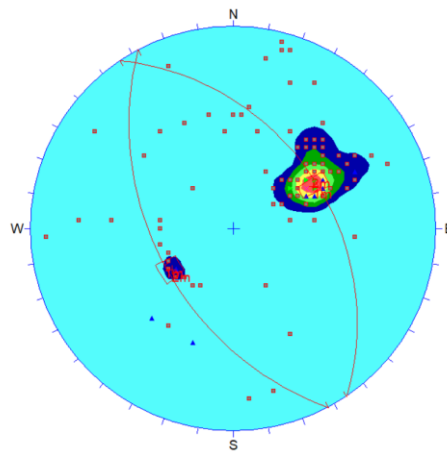
Este tipo de proyección presenta la proyección de los círculos de la esfera como círculos, y conserva la verdadera magnitud de los ángulos en la proyección, de ahí que también se denomine proyección equiangular. (Tomás R. et al, 2002). La red estereográfica de Wulff permite representar las discontinuidades cuando se desea conservar los ángulos entre dos o más datos, pero no permite realizar un análisis estadístico de un conjunto grande de discontinuidades, por lo que se recurre a las proyecciones equidistantes para conservar el

área entre las discontinuidades. Para ello, es empleada la res de Schmidt, en la que se grafican los polos de las discontinuidades para su análisis (Figura 25).



*Figura 25. En la figura izquierda se representa la proyección equiangular de la red de Wulff, mientras que, de lado derecho, la proyección es equidistal, presentada mediante la red de Shmidt.*

Cuando se maneja una cantidad importante de discontinuidades es recomendable utilizar la red de Schmidt para graficar los polos de las discontinuidades y con ellos identificar las familias de discontinuidades que predominan en el macizo rocosos (Figura 26)



*Figura 26. Análisis estadístico de la nube de polos de un macizo rocoso, en la que se distinguen dos familias de discontinuidades.*



### Capítulo 6 Metodología.

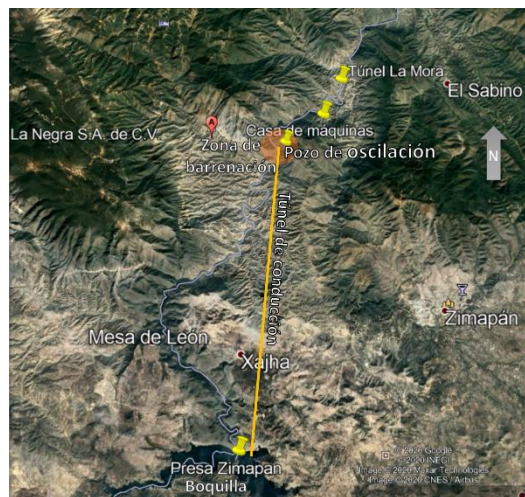
#### **Tratamiento de los datos**

Para realizar las clasificaciones del macizo rocoso, fue necesario recabar la información bibliográfica y de campo. Para las propiedades físicas y mecánicas se recurrió a la información bibliográfica existente, en la que son reportados resultados de ensayos de laboratorio de la zona cercana a Casa de Máquinas y que fue utilizada para el diseño del túnel de conducción de la C. H., Ing. Fernando Hiriart Balderrama, Zimapán, Hgo. Esto debido a la presencia de la Formación Las Trancas también en el pozo de oscilación de donde se obtuvieron los barrenos ensayados y en el Túnel “La Mora”. El análisis estadístico de los datos fue realizado por la Subgerencia de Ingeniería Experimental de CFE (1989).

Los datos estructurales dentro del Túnel “La Mora”, se obtuvieron del curso de Geología Aplicada a la ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería, cuyo titular es el Dr. Moisés Dávila. Los datos estructurales corresponden a Fracturas, juntas, fallas y estratificación, y fueron procesados estadísticamente por medio de estereografía.

#### **Datos obtenidos por estudios previos**

En 1989, la CFE, realizó los ensayos de laboratorio para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la roca intacta, con el fin de diseñar el túnel de conducción de la presa Zimapán. Estos ensayos se hicieron con barrenos de la zona central del trazo del túnel y del pozo de oscilación cercano a la casa de máquinas (Figura 27). Los barrenos ensayados corresponden a exploración directa con profundidades máximas de 56.55 y 37 m.



*Figura 27. Esquema de la localización del pozo de oscilación al suroeste de la casa de Máquinas del P. H Zimapán, modificado de CFE, 1989.*

Los barrenos del pozo de oscilación cortan el anticlinal La Plomosa, el cual corresponde a la Formación Las Trancas, cuya base está representada por una secuencia areno- calcárea, mientras que, en la cima, la litología varía a calcáreo-arcillosa.

De las muestras obtenidas se realizaron ensayos de resistencia a la compresión simple, prueba brasileña para determinar tensión indirecta, ensayos de resistencia al corte (simple y doble), además de peso volumétrico e índices de alteración y porosidad.

Los resultados de las pruebas índice y mecánicas fueron procesadas estadísticamente por la Subgerencia de Ingeniería Experimental de la CFE (Tabla 18). Para la Formación Las Trancas se presentan valores de resistencia de media a alta (mayores a 500 kg/cm<sup>2</sup>) y módulos de elasticidad altos, siendo una roca poco deformable ante altas presiones, lo que favorece la excavación de obras subterráneas (CFE, 1989).

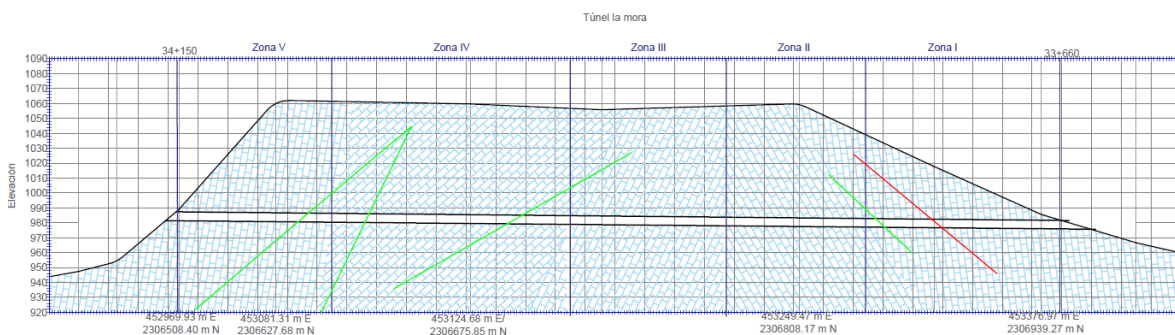
*Tabla 18. Resumen de Propiedades de la roca intacta de las formaciones El Doctor, Soyatal y Las Trancas (Hardy, 1987).*

	<i>Formación El Doctor</i>	<i>Formación Soyatal</i>	Formación Las Trancas
Litología	Calizas y Dolomías	Calizas-Lutitas-Areniscas	Calizas-Areniscas-Lutitas
Velocidad de onda:			
$\alpha$	4,000 m/s	4,200 m/s	4,500 m/s
$\beta$	2,400 m/s	2,520 m/s	2,700 m/s
Relación de Poisson:	0.25	0.25	0.25
Módulo de Elasticidad:			
$E_{din}$	37,0000 Kg/cm <sup>2</sup>	410,000 Kg/cm <sup>2</sup>	470,000 Kg/cm <sup>2</sup>
$E_{est}$	18,5000 Kg/cm <sup>2</sup>	205,000 Kg/cm <sup>2</sup>	235,000 Kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la compresión simple:			
$\sigma_{min}$	137,243 Kg/cm <sup>2</sup>	300 Kg/cm <sup>2</sup>	692 Kg/cm <sup>2</sup>
$\sigma_{máx}$	1,700 Kg/cm <sup>2</sup>	828 Kg/cm <sup>2</sup>	1,404 Kg/cm <sup>2</sup>
$\sigma_{prom}$	1,044 Kg/cm <sup>2</sup>	516 Kg/cm <sup>2</sup>	1,048 Kg/cm <sup>2</sup>
Coefficiente de variación:	44	40	17
Resistencia a la tensión:			
$\sigma_t$	42 Kg/cm <sup>2</sup>	33 Kg/cm <sup>2</sup>	92 Kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia al corte:	36 Kg/cm <sup>2</sup>	30 Kg/cm <sup>2</sup>	109 Kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la tensión bajo flexión:	114 Kg/cm <sup>2</sup>	60 Kg/cm <sup>2</sup>	200 Kg/cm <sup>2</sup>
Pesos volumétricos:	2.7 ton/m <sup>3</sup>	2.68 ton/m <sup>3</sup>	2.7 ton/m <sup>3</sup>

### Datos estructurales

Los datos estructurales fueron levantados por los alumnos de Geología aplicada a la Ingeniería Civil en el semestre 2020-1, estos datos corresponden a cinco tramos del Túnel “La Mora”. Los datos fueron graficados en la red estereográfica de Wulff utilizando el hemisferio inferior y la red Schmidt para el análisis estadístico de los polos. Los datos corresponden a juntas, fracturas, fallas y estratificación. Posteriormente, se empleó el Software Dips de Rocscience, para realizar el análisis estadístico de las frecuencias de discontinuidades, y con ello obtener las familias de principales del macizo rocoso. Como se observa en la Figura 29. Orientación de las familias principales de discontinuidades por zona y descripción de la estratificación predominante. se presentan 3 familias principales, una de bajo ángulo de buzamiento y rumbo NW, otra de alto ángulo de buzamiento con rumbo NE y, por último, la de mayor frecuencia, asociada la estratificación cuyo rumbo está orientado al NE.

Los datos estructurales fueron levantados en cinco zonas (Figura 28), y graficados por separado en la red estereográfica, datos de estratificación y de discontinuidades por zona. Esto porque al tratarse de una zona con historial de deformaciones y al ser una zona con alto grado de plegamiento, la estratificación varía en pocos metros, por otro lado, debido a la naturaleza de la roca, la estratificación representa una discontinuidad importante al igual que el fracturamiento.



*Figura 28. Sección S49W-N49°E longitudinal del Túnel “La Mora” en ella se pueden apreciar la disposición de las zonas y cadenamientos en los que se dividió el túnel para el levantamiento los datos estructurales del túnel.*

Con los datos estructurales, se procedió a realizar el análisis estadístico para obtener las familias principales de discontinuidades por zona, como anteriormente fue mencionado, se realizó un análisis para determinar la estratificación predominante y en otro análisis se determinaron con todos los datos estructurales incluyendo la estratigrafía para encontrar las familias (Figura 29). En la Tabla 19, se resume la geometría de las familias principales

de acuerdo a su frecuencia, siendo la F1 de cada zona, la más recurrente, también se incluye el análisis por zona de la disposición de los planos de estratificación.

Debido a que los diques presentes en la zona son delgados, su resistencia es similar al de la roca, y presentan la misma orientación que el resto de las discontinuidades, se ha decidido no separarlos individualmente para las clasificaciones geotécnicas., se tomarán en cuenta sus propiedades como parte de las discontinuidades de cada zona.

*Tabla 19. Resumen de los datos estructurales por zona.*

Zona	Familias			Estratificación			Cadenamiento	
	Dip	Dip	Direction	Dip	Dip	Direction		
1	F1	77	108	E1	40	330	33+650	33+750
	F2	88	358	E2	4	354		
	F3	4	334					
2	F1	30	40	E1	30	40	33+750	33+850
	F2	81	215					
	F3	86	155					
3	F1	26	288	E1	26	288	33+850	33+950
	F2	88	140					
	F3	73	92					
4	F1	48	241	E1	48	241	33+950	34+060
	F2	37	51					
	F3	81	16					
5	F1	7	286	E1	7	286	34+060	34+150
	F2	75	259					
	F3	52	18					

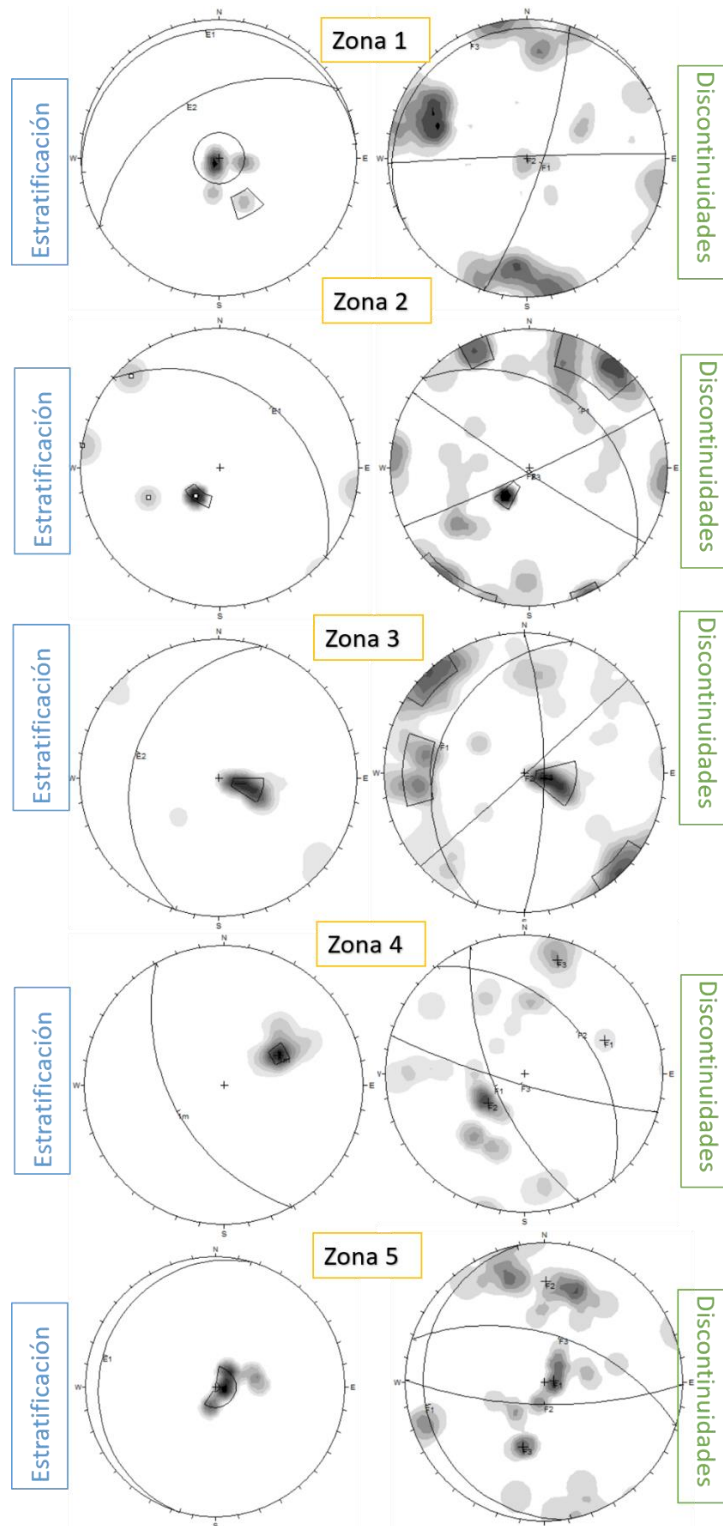


Figura 29. Orientación de las familias principales de discontinuidades por zona y descripción de la estratificación predominante.

### **Clasificación del macizo**

Con base en las familias de discontinuidades que fueron determinadas con ayuda del análisis estereográfico, se procedieron a realizar las clasificaciones del macizo rocoso para cada zona. Los sistemas empleados para la clasificación fueron RMR<sub>89</sub> de Bieniawski, Q de Barton y GSI de Hoek & Marinos.

No pudo emplearse el sistema más reciente del sistema RMR (2014), ya que no se tenían por completo los parámetros necesarios para evaluarlos correctamente en cada zona, específicamente, los datos de alterabilidad de la roca. Por lo tanto, el sistema utilizado fue RMR<sub>89</sub>, que resultó más amigable y con mejor ajuste a los datos del macizo rocoso. Para esta clasificación se evaluaron las condiciones de resistencia de la roca intacta, RQD de Deere, separación entre diaclasas, el estado de las discontinuidades, la condición de aguas freáticas y la corrección por el ajuste de las discontinuidades.

Para obtener la clasificación NGI, se evaluaron, por zona, el índice RQD, el número de sistemas de fisuras, de rugosidad, el: número de alteración de las fisuras, el factor de reducción por agua en las fisuras y el: factor de reducción por esfuerzos., Para esto se emplearon las tablas de evaluación presentadas en el subcapítulo Índice de calidad de túneles (NGI).

Por último, para evaluar la calidad del macizo rocoso por el sistema GSI, se trasladaron las condiciones de cada zona en el gráfico de Hoek & Marinos (2000) expuesto en la Figura 23. Aunque este sistema depende del criterio del observador, decidió utilizarse un rango de 5 unidades para cada zona.

### **Caracterización**

Los parámetros de resistencia y deformabilidad del macizo rocoso son de vital importancia si desea predecir analíticamente o por modelado numérico, el comportamiento del macizo rocoso. Para realizar la caracterización del macizo rocoso, se estimaron sus propiedades de resistencia y deformabilidad, empleando ecuaciones recientes que involucraran las evaluaciones con los sistemas de clasificación manejadas en este trabajo. Para las propiedades de deformación se buscaron los módulos de elasticidad del macizo rocoso ( $E_m$ ), por otro lado, el módulo de Poisson del macizo rocoso se tomó como el mismo de la roca intacta para la Formación Las Trancas,  $\nu=0.25$ , reportada en la Tabla 18.

De igual forma, para las características de resistencia, se emplearon ecuaciones que modelaran la resistencia del macizo rocoso por zona, empleando los criterios de rotura de Hoek-Brown y Mohr-Coulomb.



### **Módulo de elasticidad ( $E_m$ )**

Para el sistema RMR, se empleó la ecuación de Gokceoglu (2003), para  $RMR > 50$

$$E_m = 0.073 * e^{0.075RMR} [GPa] \dots(9)$$

Ocupando el criterio del sistema Q, se recurrió a la ecuación de Barton (2002), este sistema involucra la resistencia de la roca intacta descrito en la Tabla 18:

$$E_m = 10(Q \frac{\sigma_{ci}}{100})^{\frac{1}{3}} [GPa] \dots(10)$$

Por último, se para ocupó la ecuación de Hoek & Diederichs (2006), junto con la clasificación GSI:

$$E_m = E_i(0.02 + \frac{(1-0.5D)}{1+e^{\frac{(60+15D-GSI)}{11}}}) [GPa] \dots(11)$$

### **Resistencia del macizo rocoso ( $\sigma_{cm}$ )**

Para el sistema RMR, se empleó la ecuación de Kalamaras & Bieniawski (1995)

$$\sigma_{cm} = 0.005 \frac{(RMR-15)}{85} RMR^{2.3} \dots(12)$$

Con el sistema Q, se obtuvo la resistencia por medio de la ecuación de Barton (2002).

$$\sigma_{cm} = 5\gamma(Q \frac{\sigma_{ci}}{100})^{1/3} \dots(13)$$

Por último, se recurrió al método de Hoek et al (1995), para obtener la resistencia del macizo rocoso, por medio de las ecuaciones:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \dots(14)$$

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \dots(15)$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}}) \dots(16)$$

Cabe aclarar que se obtuvieron los parámetros de resistencia y deformabilidad para cada una de las zonas, empleando las valoraciones de cada clasificación. Por último, se realizó la zonificación geotécnica comparando los resultados de deformación y resistencia de cada zona estudiada y englobando las que presentan parámetros similares.

## Capítulo 7 Resultados.

### Clasificación

El Anexo B: Clasificación RMR presenta los parámetros evaluados para el sistema RMR<sub>89</sub> por zona, y la Tabla 20 resume los tres sistemas empleados. En general, los resultados obtenidos de todas las zonas del macizo rocoso en este sistema se califican como clase II, calidad buena. La zona con mayor puntuación es la zona 2, con 79 puntos, mientras que la zona 5, es la que presenta condiciones menos favorables obteniendo 69. Los parámetros que marcaron la diferencia entre cada zona son la rugosidad y el RQD y la separación. Por otro lado, las condiciones de la roca intacta en las 5 zonas son muy buenas ya que al presentar silicificación le confiere mayor resistencia a las calizas que componen el macizo rocoso, al igual que el estado de las discontinuidades, no existe humedad en ellas ni alteraciones.

El ajuste por la orientación de las discontinuidades castigó los resultados al presentarse echados de bajo ángulos, principalmente relacionados a estratificación, que siendo en algunos casos desfavorables para la estabilidad de la excavación. De acuerdo con Bieniawski, 1989, para la clase II del RMR, se recomiendan avances de 1-5m a sección completa y anclaje local de 3 m en la clave y espaciados 2.5 m con malla de alambre ocasional.

La clasificación del sistema Q, para las cinco zonas del túnel también fue calidad buena, en este caso la puntuación mayor fue obtenida en la zona 2, mientras que la zona 3 fue la más desfavorable. Al igual que en el sistema RMR, la diferencia en puntuación recae en la valoración del parámetro de rugosidad y RQD. Las recomendaciones en soporte según Grimstad, & Barton (1993), para el sistema Q para las zonas del túnel varían anclaje esporádico de 3m para la zona 2, a no necesitar soporte en el resto de las zonas. El desglose por zona de las variaciones de los parámetros por zona, se encuentran en el Anexo C: Clasificación Q.

Por último, en el sistema GSI, las cinco zonas fueron evaluadas con buena calidad, pero se les asignaron rangos de valores diferentes, tomado en cuenta las características de las discontinuidades, ya que en los datos obtenidos en campo hay algunas características que variaban para cada zona, por ejemplo: la rugosidad y la separación entre discontinuidades, por lo que se calificó de mejor forma al macizo rocoso de la zona 2, en comparación con las otras zonas. Para esta clasificación no hay recomendaciones para el sistema del soporte del túnel y los parámetros evaluados están definidos en el Anexo D: Clasificación GSI.

Tabla 20. Comparación de las calidades del macizo rocoso por zona.

Zona	RMR	Q	GSI
1	72 Buena	18.89 Buena	67-70 Buena
2	79 Buena	28.33 Buena	70-75 Buena
3	72 Buena	17.78 Buena	60-65 Buena
4	72 Buena	18.89 Buena	60-65 Buena
5	69 Buena	18.89 Buena	65-70 Buena

### Caracterización

Como se mencionó, para determinar las características de deformabilidad del macizo rocoso se emplearon las ecuaciones 9, 10 y 11 que involucran las evaluaciones obtenidas de los sistemas de clasificación RMR, Q y GSI, respectivamente. En el caso de la ecuación de Barton (2002), involucra la resistencia de la roca intacta. Por otro lado, la ecuación de Hoek et al (1995), calcula el módulo de elasticidad por medio factor D, que describe las alteraciones por el método de excavación y el módulo de elasticidad de la roca intacta obtenido en ensayos de laboratorio (ver Tabla 18).

En general, los módulos de elasticidad obtenidos mediante la clasificación RMR, son los más bajos en comparación con los obtenidos de los otros dos sistemas. el valor más alto se obtuvo de la zona 2, que alcanzó 27.32 GPa, mientras que la zona 5, presenta una disminución del módulo de elasticidad muy importante en comparación con el módulo de la roca intacta, alcanzando solamente 12.91 GPa. En contraste, los módulos E, obtenidos por el sistema Q, son los más altos, mientras la zona 2 obtuvo 28.33 GPa, la zona 3 obtuvo el valor más bajo con 18.01 GPa. Por último, los valores obtenidos a partir del sistema GSI varían entre 13.81 y 18.45 GPa.

Tabla 21. Comparación del módulo de elasticidad obtenidos para el macizo rocoso por zona y el módulo de elasticidad de la roca intacta.

Zona	RMR	$E_m$ (GPa)	Q	$E_m$ (GPa)	GSI	$E_m$ (GPa)	$E_i$ (GPa)
1	72	16.16	18.89	19.14	69	16.78	
2	79	27.32	28.33	28.70	73	18.45	
3	72	16.16	17.78	18.01	63	13.81	23.5
4	72	16.16	18.89	19.14	63	13.81	
5	69	12.91	18.89	19.14	67	15.84	

La resistencia del macizo rocoso presentadas en la Tabla 22, se obtuvieron por medio de las ecuaciones 12, 13 y 14. Las resistencias obtenidas por la clasificación RMR, varían entre 39.1 y 33.04 MPa, siendo la zona 2 la de mayor resistencia. Por otro lado, las resistencias obtenidas mediante la ecuación de Barton (2002) y el peso específico de la roca intacta, presenta mayor variación, la zona 2 alcanzó 28.33 MPa y la zona 24.32 MPa, que representa una cuarta parte de la resistencia de la roca intacta. Por otro lado, con el método de Hoek et al (1995), se calcularon los valores considerando  $D=0$ , aun así, las resistencias del macizo rocoso disminuyeron hasta 13.19 MPa en las zonas 3 y 4.

Tabla 22. Comparación de las resistencias obtenidos para el macizo rocoso por zona y la resistencia de la roca.

Zona	RMR	$\sigma_{cm}$ (MPa)	Q	$\sigma_{cm}$ (MPa)	GSI	$\sigma_{cm}$ (MPa)	$\sigma_{ci}$ (MPa)
1	72	34.87	18.89	25.84	69	18.49	
2	79	39.15	28.33	38.75	73	23.13	
3	72	34.87	17.78	24.32	63	13.19	104
4	72	34.87	18.89	25.84	63	13.19	
5	69	33.04	18.89	25.84	67	16.52	

### Modelo geotécnico

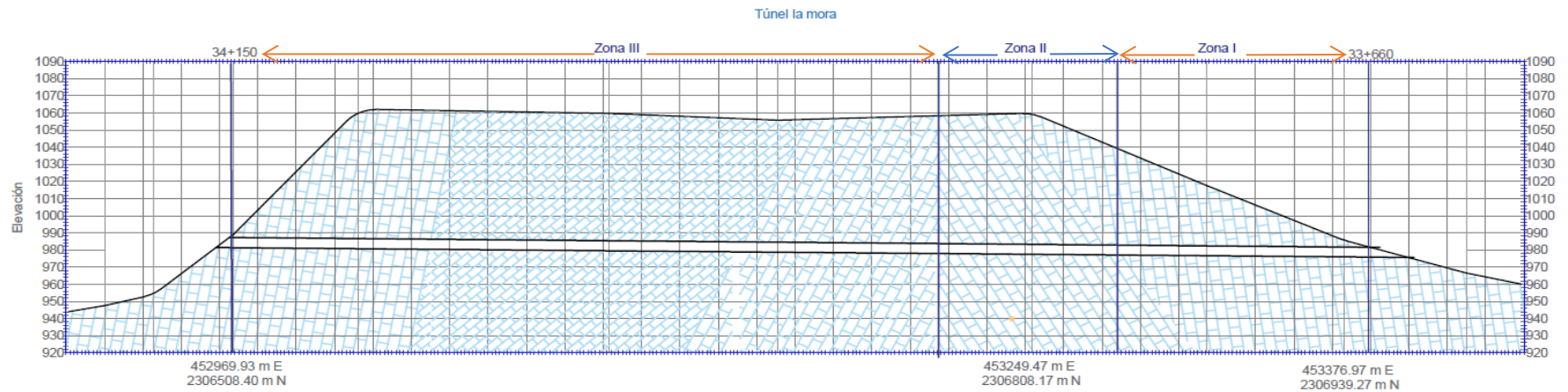
Con base en los resultados obtenidos en las clasificaciones del macizo rocoso, RMR, Q y GSI, además de propiedades de deformabilidad y resistencia, se diferenciaron tres zonas geotécnicas dentro del Túnel “La Mora” (Figura 30).

1. Zona geotécnica I (ZGI): Corresponde a los primeros 100m del túnel, del cadenamiento 33+65-33+750, la calidad del macizo rocoso se calificó como buena, presenta 3 familias de discontinuidades sin presencia de agua. Existe la presencia de diques de composición media y silicificaciones. Se recomienda anclaje selectivo de 3 m.
2. Zona geotécnica II (ZGII): Se encuentra entre los cadenamientos 33+750 y 33+850, la calidad del macizo rocoso es buena, con 3 familias de discontinuidades sin presencia de agua. Sus parámetros de resistencia. Existe la presencia de diques de composición media y silicificaciones. No se requiere soporte
3. Zona geotécnica III (ZGIII): Corresponde a los últimos 300 m, en la salida al Puente “Moctezuma”, entre los cadenamientos 33+850-34+150. Presentan tres familias de discontinuidades sin presencia de agua, con separaciones de 0.5-0.6 m, diques delgados y silicificaciones. Se recomienda anclaje selectivo de 3m.

Tabla 23. Zonificación geotécnica establecida para el túnel "La Mora".

Zona Geotécnica	Cadenamiento		Familias			Clasificaciones			Deformabilidad		Resistencia
			Dip	Dip Direction		RMR	Q	GSI	Poisson	Em (Gpa)	$\sigma_{ci}$ (Mpa)
<b>ZGI</b>	33+650	33+750	F1	77	108	72	18.89	67-70	0.25	17.36	26.40
			F2	88	358						
			F3	4	334						
<b>ZGII</b>	33+750	33+850	F1	30	40	79	28.33	70-75	0.25	24.83	33.68
			F2	81	215						
			F3	86	155						
<b>ZGIII</b>	33+850	34+150	F1	51	238	72	18.89	62-67	0.25	16.11	24.63
			F2	70	192						
			F3	86	138						

Figura 30. Zonificación geotécnica del Túnel "La Mora"



Zona geotécnica	ZGIII	ZGII	ZGI
<b>Litología</b>	Caliza de cuenca	Calizas de cuenca	Calizas de cuenca
<b>RQD</b>	80%	85%	85%
<b>RMR</b>	72	79	72
<b>Q</b>	18.89	28.33	18.89
<b>GSI</b>	62-67	70-75	67-70
<b>Calidad del MR</b>	Buena	Buena	Buena
<b>Fracturamiento</b>	3 Familias, e=0.5-0.6, sin relleno	3F , e=-0.6, sin relleno	3F , e=0.5-0.6, sin relleno
<b>Em (Gpa)</b>	16.11	24.83	17.36
<b>Sci (Mpa)</b>	24.63	33.68	26.40
<b>v</b>	0.25	0.25	0.25
<b>γm (ton/m<sup>3</sup>)</b>	2.7	2.7	2.7
F=Familias; e=separación(m)			



### Capítulo 8

#### Conclusiones y recomendaciones.

El Túnel “La Mora” fue excavado en una zona con altas deformaciones tectónicas, además de sufrir procesos de metamorfismo, magmatismo y alteraciones hidrotermales, que han modificado las propiedades geológicas y geomecánicas del macizo rocoso. Si bien, los procesos tectónicos se reflejan en estratos de caliza altamente deformados, plegados y fracturados, los procesos geológicos antes mencionados han conferido mayor resistencia a las rocas y disminuido la solubilidad de las rocas.

El túnel fue excavado tomando en cuenta su historia geológica, por lo que no se realizaron estudios geotécnicos en la zona, pese a esto el túnel, desde su excavación en los años noventa, no necesitó soporte, salvo concreto lanzado en los primeros 15 metros a partir de cada portal y anclaje ocasional. Esto se debe a la alta resistencia de las rocas en el sitio y el estado de las discontinuidades que se evaluaron con ayuda de cada sistema de clasificación.

Si bien, en los cinco tramos en los que se dividió el túnel fue clasificado el macizo rocoso como “bueno”, esto para los tres sistemas empleados, RMR, Q y GSI, las zonas presentan algunas variaciones en las características de cada tramo, esto debido a la disposición de los estratos, presencia de intrusivos de espesores menores alteraciones locales y el tamaño de los bloques formados entre discontinuidades. En el sistema de Bieniawski, lo que marcó la diferencia entre cada tramo fue el estado de las discontinuidades, específicamente la rugosidad, por otro lado, también influyó el RQD del macizo rocoso. Estas condiciones también fueron las que marcaron la diferencia en el sistema Q de Barton, donde la rugosidad influye en la resistencia al corte y en el recaen las mayores diferencias. De igual forma, el RQD evaluado para cada tramo varía en menor medida, pero influye en la evaluación que se obtiene para el tamaño de bloques. Por otro lado, el tamaño de bloque no influye de forma significativa en el sistema GSI, si bien es una clasificación donde el criterio del usuario juega un papel importante, la diferencia en la evaluación se presenta por la condición de las superficies de las discontinuidades.

Con ayuda de estas clasificaciones se obtuvieron recomendaciones para el soporte, en los que coincidentemente se recomienda en el sistema Q, soporte selectivo sin revestimiento, por otro lado, el sistema RMR es más conservador al proponer anclaje sistemático de 3 m y separación de 2.5 m. Debido a que GSI no brinda recomendaciones para el soporte, y al comparar con las condiciones presentes en el túnel, el sistema Q, evalúa de manera más apropiada las condiciones del sitio.

Como se ha mencionado, la clasificación se realizó empleando datos previos obtenidos para el túnel de desvío de la Presa Zimapán, por lo que la resistencia de la roca intacta y el módulo de elasticidad fueron idénticos para los cinco tramos del túnel. Para obtener las propiedades de resistencia y elasticidad se emplearon ecuaciones que involucraran las clasificaciones obtenidas con cada sistema, por lo que varían para cada zona.

Se observó los módulos de elasticidad obtenidos con el sistema RMR (ecuación 9), son más bajos, mientras que los obtenidos mediante la ecuación 10, que involucra al sistema Q, presenta los valores más altos para cada zona. Si bien los sistemas Q y RMR no presentan los mismos rangos, la diferencia substancial de estas ecuaciones recae en la utilización de la resistencia de la roca intacta de la ecuación 10, mientras que la ecuación 9 solo emplea la calificación del sistema involucrado.

En el caso de la resistencia del macizo rocoso, los valores para obtenidos con RMR (ecuación 12), son notablemente mayores que los obtenidos con las otras dos ecuaciones (13 y 14), llegando a ser el doble que el sistema Q y 50% mayores respecto al sistema GSI. Como puede observarse los valores de resistencia con RMR están sobrevalorados, ya que involucran solamente al puntaje obtenido de la clasificación, mientras que en la ecuación 13 de Barton (2002), se involucra el sistema de clasificación y la resistencia de la roca intacta, agregando mayor confiabilidad. Por último, la resistencia del macizo rocoso obtenida con el sistema GSI resulta más confiable, ya que no solo involucra el sistema de clasificación y la resistencia de la roca intacta, involucra factores que representan las condiciones de la roca y las alteraciones que ha sufrido el sitio, por lo que resulta más certero este método.

Con los resultados obtenidos de cada tramo se decidió dividir en tres zonas geotécnicas al túnel, que englobaran los tramos que comparten las mismas propiedades y características geotécnicas, si bien, las tres zonas comparten características similares, la zona geotécnica II, presenta condiciones ligeramente mejores para el macizo rocoso, debido a la condición de las discontinuidades y RQD mayor, resultando en mayores resistencias y módulos de elasticidad del macizo rocoso.

Respecto a los sistemas de clasificación, es necesario realizar más de una clasificación del macizo rocoso, como fue el caso de este trabajo, ya que da pauta a comparar los datos obtenidos y poder realizar una toma de decisiones informada. En general, los tres sistemas presentaron ventajas respecto a los otros en diferentes etapas de la caracterización. El sistema RMR, permite la evaluación de las características del macizo rocoso de forma clara y es un sistema bastante simple de emplear, mientras que el sistema Q es más completo con sus descripciones y permite incorporar características más específicas del macizo rocoso, que al final marcan la diferencia y la hacen más apegada a la realidad. Por último,

el sistema GSI, es el más rápido de evaluar, pero el resultado final depende de la experiencia del usuario y no es tan preciso en comparación con los sistemas anteriores.

Cuando se asignan los parámetros de resistencia y deformabilidad, existen diferencias sustanciales entre las ecuaciones empleadas, siendo las ecuaciones que involucraban el GSI las que incorporan de mejor forma las condiciones del macizo rocoso y de la roca intacta, por lo que los resultados adquieren mayor confiabilidad, aunque se necesitan pruebas *in situ* para comprobar estos resultados, pero en ausencia de estos, las ecuaciones presentadas brindan un panorama acertado de las condiciones reales del túnel.

Al finalizar la caracterización del macizo rocoso del Túnel “La Mora”, es posible observar que el macizo rocoso está dotado de condiciones que favorecen la estabilidad de la excavación pese al historial de deformaciones, el grado de fracturamiento y la estratificación. Si bien, las condiciones presentes en el túnel permitieron que la obra se mantuviera sin revestimiento en la hasta el día de hoy es necesario monitorear periódicamente su estabilidad, instalando la instrumentación adecuada para medir las deformaciones al interior del túnel, ya que es necesario tomar en cuenta el factor tiempo en la estabilidad de la obra, esto sin olvidar que la zona se ha visto sujeta a deformaciones y eventos tectónicos compresivos..

Respecto a la instrumentación al interior del túnel, se sugiere colocar referencias topográficas (dianas reflejantes), para medir la convergencia de los hastiales y la clave, esto al menos cada año o después de eventos sísmicos importantes en magnitud o cerca del área periférica del túnel. También se recomienda reducir el periodo de toma de lecturas en caso de que la variación con las tres lecturas previas sea significativa. Otro factor importante a observar durante estas revisiones al interior del túnel, es la presencia de filtraciones, esto debida a la naturaleza de la roca y su fácil disolución con aguas de bajo ph.

Por último, en el caso de la instrumentación al exterior del túnel, se recomienda colocar extensómetros e inclinómetros cerca de los portales, esto debido a que es el área con rocas de peor calidad y la más susceptible a desplazamientos de material, también recordando que están sujetas a meteorización además de posible disolución, lo que modificaría la resistencia de estas rocas.

**Lista de referencias.**

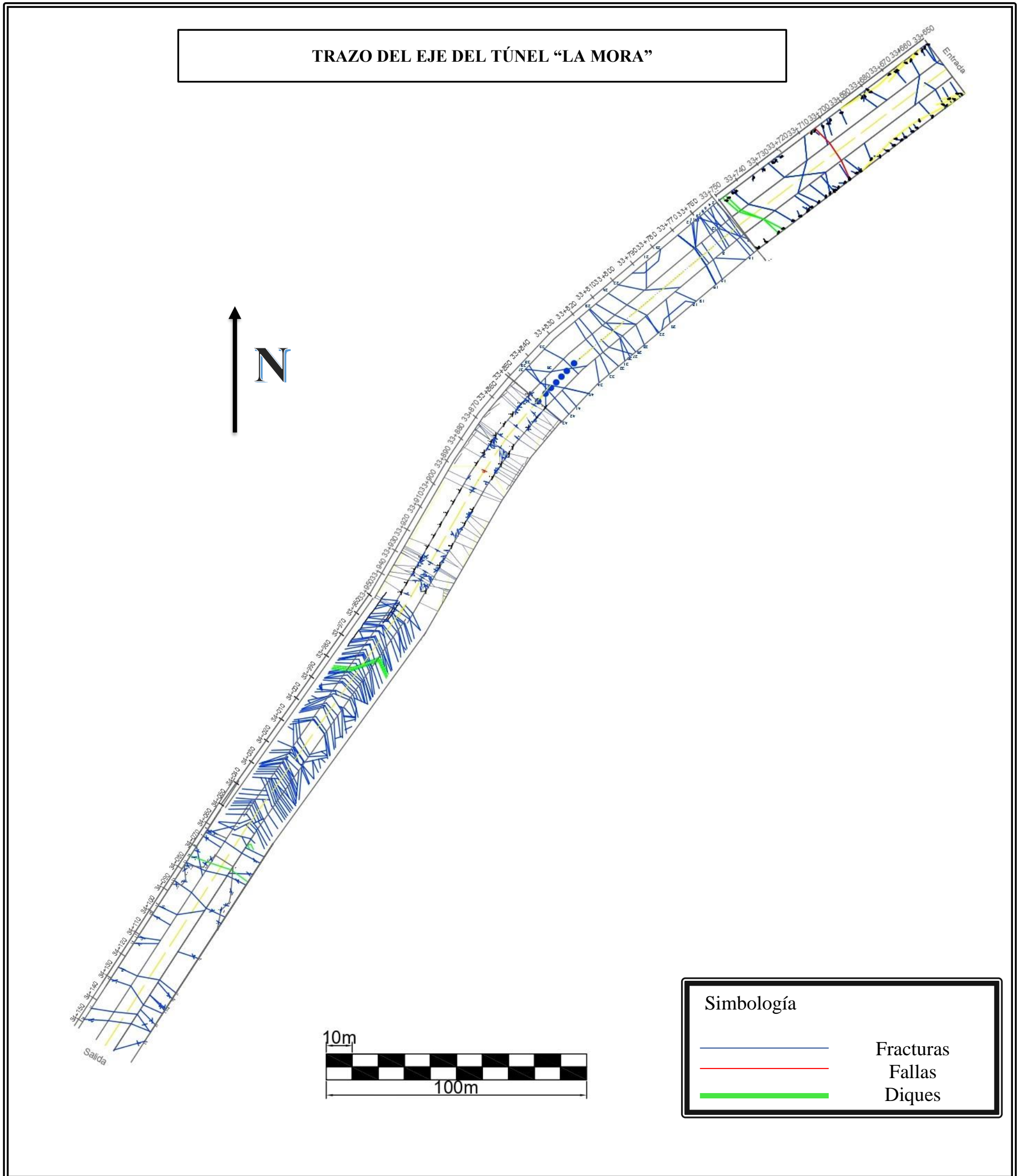
1. Abbas, S. M., & Konietzky, H. (2017). Rock mass classification systems. *Introduction to Geomechanics*, 9(2017), 1-48.
2. Alaniz-Álvarez, S. A., & Nieto-Samaniego, Á. F. (2005). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 65-82.
3. Arellano, G. J., De la Llata, R., Carreón, M. A., Villareal, J. C., & Morales, W. V. (2002). *Ejercicios de Geología Estructural*. México. Ediciones: Facultad de Ingeniería. UNAM.
4. Aydan, Ö., Ulusay, R., & Kawamoto, T. (1997). Assessment of rock mass strength for underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4), 18-e1.
5. Babín Vich, R. B., & Gómez Ortiz, D. (2010). Problemas de Geología Estructural 2. Orientación y proyección de planos en el espacio. *Reduca. Geología*, 2(1), 11-23.
6. Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(2), 185-216.
7. Cabello Robles, O. L. (2018). Guía de criterios geomecánicos en minería subterránea como herramienta para la prevención de accidentes fatales por caída de roca.
8. Celada, B., Tardáguila, I., Rodríguez, A., & Varona, P. (2014). Actualización y mejora del RMR. *IGP–InGeoPress*, 234, 18-22.
9. Chávez-Cabello, G. (2016). La Sierra Madre Oriental de México, un cinturón orogénico de pliegues y cabalgaduras de la Cordillera de Norteamérica. *Ciencia UANL/AÑO*, 19.
10. Comisión Federal de Electricidad (1989). P.H Zimapán, Hgo. Resultados de los ensayos de laboratorio realizados en núcleos de los barrenos TC-11, TR-1 y TR-2. Subgerencia de Ingeniería Experimental. México, DF.
11. Eguiluz De Antuñano, S., Aranda-García, M., & Marrett, R. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental. México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 1-26.
12. García-Amaro, E. (1988). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). ‘Climas’ (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1: 1000 000 México. Shapefile.
13. González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson. Madrid

14. Grimstad, E., and Barton, N. (1993), "Updating of the Q-System for NMT." In Kompen, Opsahl and Berg (eds.), Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete—Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Fagernes. Norway, Norwegian Concrete Association, Oslo, Norway.
15. Hardy V. (1987). Túneles y excavaciones Subterráneas. Editorial AMITOS. México, D.F.
16. Hoek, E., & Brown, E. T. (1985). Excavaciones subterráneas en roca. McGraw-Hill.
17. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2004). Guía para la interpretación de cartografía climatológica. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
18. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (México). (1992). Síntesis geográfica del estado de Hidalgo. INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
19. Kalamaras, G. S., & Bieniawski, Z. T. (1995, January). A rock mass strength concept for coal seams incorporating the effect of time. In 8th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
20. Lisle, R., & Lesion, P. (2004). Técnicas de proyección estereográfica para geólogos e ingenieros civiles. Nature, 2, 112.
21. Martínez, M. C. (1990). Geometría estructural de la Sierra Madre Oriental, entre Peñamiller y Jalpan, Estado de Querétaro. Revista mexicana de ciencias geológicas, 9(1), 62-70.
22. Mendoza, V. A. (1991). Excavación de Galerías de Inyección, Drenaje e Inspección del Proyecto 3 Hidroeléctrico Zimapán. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 51(1), 3-9.
23. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (2017). Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas. Osinergmin. Lima, Perú.
24. Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., & Roldan-Quintana, J. (1992). Carta geológica de la República Mexicana. Consejo de Recursos Minerales y en el Instituto de Geología de la UNAM.
25. Padilla y Sánchez, R.J. (1982). Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, México. Austin, Texas, University of Texas [Ph D. Thesis], 217 p.
26. Petróleos Mexicanos (1988), Estratigrafía de la República Mexicana, Mesozoico: México, D.F., Subdirección de Producción Primaria, Coordinación Ejecutiva de Exploración, Informe inédito, 216 p.

27. Ramírez Medina, R. (2016). Geología y evaluación del yacimiento de mármol blanco Los Trejo delegación El Doctor, Municipio de Cadereyta, Querétaro. Tesis de licenciatura. IPN.
28. Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. R. (2004). Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes.
29. Ramos-Gutiérrez, L. D. J., & Montenegro-Fragoso, M. (2012). Las centrales hidroeléctricas en México: pasado, presente y futuro. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(2), 103-121.
30. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). Manual de Diseño y Construcción de Túneles. México.
31. Servicio Geológico Mexicano (2007). Caliza El Doctor. Léxico Estratigráfico de México. México.
32. Servicio Geológico Mexicano (2007). Formación Las Trancas. Léxico Estratigráfico de México. México.
33. Sivakugan, N., Shukla, S. K., & Das, B. M. (2013). *Rock mechanics: an introduction*. Crc Press.
34. Solana López, J. (2008). Inventario físico de los recursos minerales del municipio de Zimapán, estado de Hidalgo. SGM, FIFOMI.
35. Tomás, R., Ferreiro Prieto, J. I., Sentana Gadea, I., & Díaz Ivorra, M. D. C. (2002). Aplicaciones de la proyección estereográfica en ingeniería geológica..



Anexo A. Sección del Túnel “La Mora”, con discontinuidades



**Anexo B: Clasificación RMR**

**Clasificación del Macizo Rocoso**

**Z1**

RMR (Rock Mass Rating) Bieniawski 1989

A) Parámetros de clasificación

**1. Resistencia de la matriz rocosa**

	Descripción	Puntuación
Ensayo de Carga puntual		12
Compresión simple (Ma)	100-250	

**2. Calidad de la Roca**

RQD(%)	85%	17
--------	-----	----

**3. Separación entre discontinuidades**

Separación (m)	0.6	15
----------------	-----	----

**4. Estado de las discontinuidades**

Longitud (m)	3-10	2
Apertura (mm)	0	6
Rugosidad	Ligeramente rugosa	3
Relleno	Ninguno	6
Alteración	inalterada	6
		<b>23</b>

**5. Aguas freáticas**

Estado General	Seco	15
----------------	------	----

B) Clasificación del Macizo Rocoso

Clase	Calidad	Puntuación (RMR)
I	Muy buena	82

C) Ajuste por la orientación de las discontinuidades

Túneles	Desfavorable	10
---------	--------------	----

<b>RMR</b>	<b>72</b>
Clase	II
Calidad	Buena

Características geomecánicas del macizo rocoso

Clase	Tiempo sin soporte	Coesión (kpa)	Ángulo de Fricción
II	1 año por 10m de vano	300-400	35-45

### Clasificación del Macizo Rocoso

**Z2**

RMR (Rock Mass Rating) Bieniawski 1989

A) Parámetros de clasificación

#### 1. Resistencia de la matriz rocosa

	Descripción	Puntuación
Ensayo de Carga puntual		
Compresión simple (Ma)	100-250	12

#### 2. Calidad de la Roca

RQD(%)	85%	17
--------	-----	----

#### 3. Separación entre discontinuidades

Separación (m)	0.6	15
----------------	-----	----

#### 4. Estado de las discontinuidades

Longitud (m)	3-10	2
Apertura (mm)	0	6
Rugosidad	Rugoso	5
Relleno	Sin relleno	6
Alteración	inalterada	6
		25

#### 5. Aguas freáticas

Estado General	Seco	15
----------------	------	----

#### B) Clasificación del Macizo Rocoso

Clase	Calidad	Puntuación (RMR)
I	Muy buena	84

#### C) Ajuste por la orientación de las discontinuidades

Túneles	Rregular	5
---------	----------	---

<b>RMR</b>	79
Clase	II
Calidad	Buena

#### Características geomecánicas del macizo rocoso

Clase	Tiempo sin soporte	Coesión (kpa)	Ángulo de Fricción
II	1 año por 10m de vano	300-400	35-45

### Clasificación del Macizo Rocoso

**Z3**

RMR (Rock Mass Rating) Bieniawski 1989

A) Parámetros de clasificación

#### 1. Resistencia de la matriz rocosa

	Descripción	Puntuación
Ensayo de Carga puntual		
Compresión simple (Ma)	100-250	12

#### 2. Calidad de la Roca

RQD(%)	80%	17
--------	-----	----

#### 3. Separación entre discontinuidades

Separación (m)	0.6	15
----------------	-----	----

#### 4. Estado de las discontinuidades

Longitud (m)	3-10	2
Apertura (mm)	0	6
Rugosidad	Ligeramente rugosa	3
Relleno	Sin relleno	6
Alteración	inalterada	6
		23

#### 5. Aguas freáticas

Estado General	Seco	15
----------------	------	----

#### B) Clasificación del Macizo Rocoso

Clase	Calidad	Puntuación (RMR)
I	Muy buena	82

#### C) Ajuste por la orientación de las discontinuidades

Túneles	Desfavorable	10
---------	--------------	----

<b>RMR</b>	72
Clase	II
Calidad	Buena

#### Características geomecánicas del macizo rocoso

Clase	Tiempo sin soporte	Coesión (kpa)	Ángulo de Fricción
II	1 año por 10m de vano	300-400	35-45

### Clasificación del Macizo Rocoso

**Z4**

RMR (Rock Mass Rating) Bieniawski 1989

A) Parámetros de clasificación

#### 1. Resistencia de la matriz rocosa

	Descripción	Puntuación
Ensayo de Carga puntual		
Compresión simple (Ma)	100-250	12

#### 2. Calidad de la Roca

RQD(%)	80%	17
--------	-----	----

#### 3. Separación entre discontinuidades

Separación (m)	0.5	10
----------------	-----	----

#### 4. Estado de las discontinuidades

Longitud (m)	3-10	2
Apertura (mm)	0	6
Rugosidad	Ligeramente rugosa	3
Relleno	Sin relleno	6
Alteración	inalterada	6
		23

#### 5. Aguas freáticas

Estado General	Seco	15
----------------	------	----

#### B) Clasificación del Macizo Rocoso

Clase	Calidad	Puntuación (RMR)
II	Buena	77

#### C) Ajuste por la orientación de las discontinuidades

Túneles	Regular	5
---------	---------	---

<b>RMR</b>	72
Clase	II
Calidad	Buena

#### Características geomecánicas del macizo rocoso

Clase	Tiempo sin soporte	Coesión (kpa)	Ángulo de Fricción
II	1 año por 10m de vano	300-400	35-45

### Clasificación del Macizo Rocoso

**Z5**

RMR (Rock Mass Rating) Bieniawski 1989

A) Parámetros de clasificación

#### 1. Resistencia de la matriz rocosa

	Descripción	Puntuación
Ensayo de Carga puntual		
Compresión simple (Ma)	100-250	12

#### 2. Calidad de la Roca

RQD(%)	85%	17
--------	-----	----

#### 3. Separación entre discontinuidades

Separación (m)	0.6	15
----------------	-----	----

#### 4. Estado de las discontinuidades

Longitud (m)	3-10	2
Apertura (mm)	0	5
Rugosidad	Ondulada	1
Relleno	Sin relleno	6
Alteración	inalterada	6
		20

#### 5. Aguas freáticas

Estado General	Seco	15
----------------	------	----

#### B) Clasificación del Macizo Rocoso

Clase	Calidad	Puntuación (RMR)
II	Buena	79

#### C) Ajuste por la orientación de las discontinuidades

Túneles	Desfavorable	10
---------	--------------	----

<b>RMR</b>	69
Clase	II
Calidad	Buena

#### Características geomecánicas del macizo rocoso

Clase	Tiempo sin soporte	Coesión (kpa)	Ángulo de Fricción
II	1 año por 10m de vano	300-400	35-45

**Anexo C: Clasificación Q**

Clasificación del Macizo Rocoso	
Z1	Q Barton
A) Parámetros de clasificación	

**1. Tamaño de bloques**

	Descripción	Puntuación
RQD	Buena	85
Jn	Tres sistemas de fisuras	9
RQD/Jn		<b>9.44</b>

**2. Resistencia al corte**

Jr	Suaves, corrugación suave	2
Ja	Paredes inalteradas, sólo con manchas en la superficie	1
Jr/Ja		<b>2</b>

**3. Resistencia al corte**

Jw	Excavación seca	1
SRF	Esfuerzo mediano	1
Jw/SRF		<b>1</b>

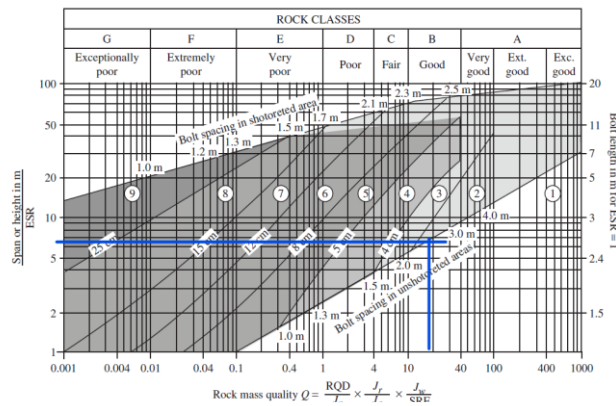
**B) Clasificación del Macizo Rocoso**

Calidad	Puntuación (Q)
Roca Buena	18.89

**C) Sostenimiento**

Luz	8
ESR	1.2
De	6.67

Clase	1
Especificaciones	No requiere soporte





Clasificación del Macizo Rocoso	
Z2	Q Barton
A) Parámetros de clasificación	

1. Tamaño de bloques		
	Descripción	Puntuación
RQD	Buena	85
Jn	Tres sistemas de fisuras	9
RQD/Jn		<b>9.44</b>

2. Resistencia al corte		
	Descripción	Puntuación
Jr	Rugosas o irregulares, corrugadas	3
Ja	Paredes inalteradas, sólo con manchas en la superficie	1
Jr/Ja		<b>3</b>

3. Resistencia al corte		
	Descripción	Puntuación
Jw	Excavación seca	1
SRF	Esfuerzo mediano	1
Jw/SRF		<b>1</b>

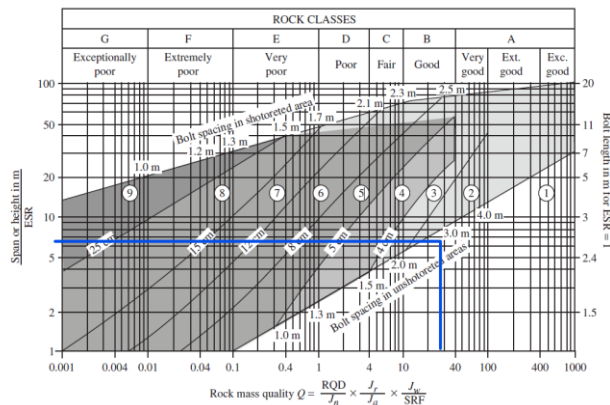
B) Clasificación del Macizo Rocoso

Calidad	Puntuación (Q)
Roca Buena	28.33

C) Sostenimiento

Luz	8
ESR	1.2
De	6.67

Clase	1
Especificaciones	No requiere soporte



**Clasificación del Macizo Rocoso**

**Z3** Q Barton

A) Parámetros de clasificación

**1. Tamaño de bloques**

	Descripción	Puntuación
RQD	Buena	80
Jn	Tres sistemas de fisuras	9
RQD/Jn		<b>8.89</b>

**2. Resistencia al corte**

Jr	Suaves, corrugación suave	2
Ja	Paredes inalteradas, sólo con manchas en la superficie	1
Jr/Ja		<b>2</b>

**3. Resistencia al corte**

Jw	Excavación seca	1
SRF	Esfuerzo mediano	1
Jw/SRF		<b>1</b>

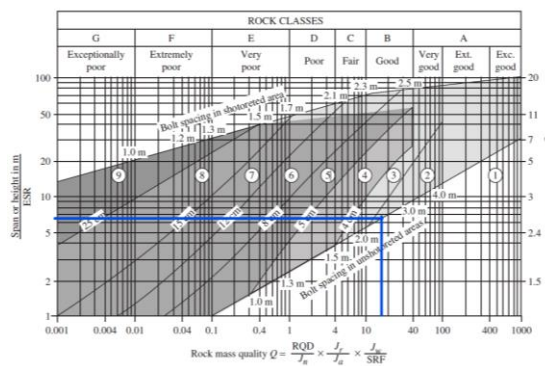
B) Clasificación del Macizo Rocoso

Calidad	Puntuación (Q)
Roca Buena	17.78

C) Sostenimiento

Luz	8
ESR	1.2
De	<b>6.67</b>

Clase	2
Especificaciones	Pernos esporádicos



<b>Clasificación del Macizo Rocoso</b>	
<b>Z4</b>	<b>Q Barton</b>
A) Parámetros de clasificación	

1. Tamaño de bloques		
	Descripción	Puntuación
RQD	Buena	85
Jn	Tres sistemas de fisuras	9
RQD/Jn		<b>9.44</b>

2. Resistencia al corte		
Jr	Suaves, corrugación suave	2
Ja	Paredes inalteradas, sólo con manchas en la superficie	1
Jr/Ja		<b>2</b>

3. Resistencia al corte		
Jw	Excavación seca	1
SRF	Esfuerzo mediano	1
Jw/SRF		<b>1</b>

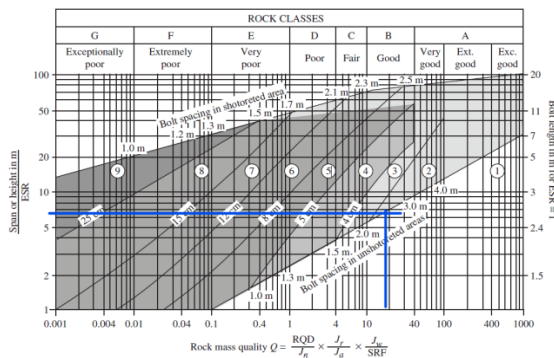
B) Clasificación del Macizo Rocoso

Calidad	Puntuación (Q)
Roca Buena	18.89

C) Sostenimiento

Luz	8
ESR	1.2
De	<b>6.67</b>

Clase	1
Especificaciones	No requiere soporte



**Clasificación del Macizo Rocoso**

**Z5** Q Barton

A) Parámetros de clasificación

1. Tamaño de bloques		
	Descripción	Puntuación
RQD	Buena	85
Jn	Tres sistemas de fisuras	9
RQD/Jn		<b>9.44</b>

2. Resistencia al corte		
	Descripción	Puntuación
Jr	Suaves, corrugación suave	2
Ja	Paredes inalteradas, sólo con manchas en la superficie	1
Jr/Ja		<b>2</b>

3. Resistencia al corte		
	Descripción	Puntuación
Jw	Excavación seca	1
SRF	Esfuerzo mediano	1
Jw/SRF		<b>1</b>

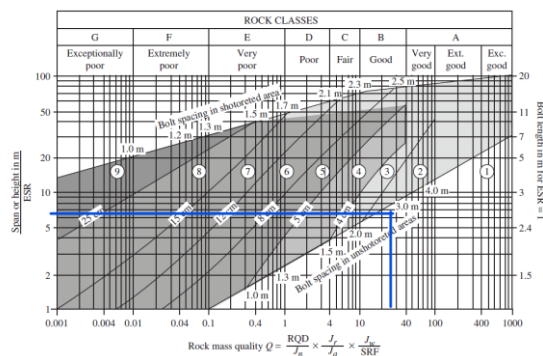
B) Clasificación del Macizo Rocoso

Calidad	Puntuación (Q)
Roca Buena	18.89

C) Sostenimiento

Luz	8
ESR	1.2
De	<b>6.67</b>

Clase	1
Especificaciones	No requiere soporte



Anexo D: Clasificación GSI

Clasificación del Macizo Rocoso		
Z5	Índice Geológico de Resistencia (GSI) (Hoek & Marinos, 2000)	

Símbolo	Zona	GSI
	Zona 1	65-70
	Zona 2	70-75
	Zona 3	60-65
	Zona 4	60-65
	Zona 5	65-70

<p>INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICO GSI (Hoek &amp; Marinos, 2000). A partir de la litología, estructura y la condición de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio de GSI. No intente ser muy preciso. Escoger un rango de 33 a 37 es mas realista que fijar GSI=35. También notar que esta tabla no se aplica a mecanismos de falla controlado por estructuras. Donde se presenten planos estructuralmente débiles en una orientación desfavorable con respecto a la cara de la excavación, estos dominarán el comportamiento del macizo rocoso. La resistencia al corte de las superficies en rocas que son propensas a deteriorarse como resultado de cambios en la humedad, se reducirá cuando exista presencia de agua. Cuando se trabaje con rocas de categoría regular a muy mala, puede moverse hacia la derecha para condiciones húmedas. La presión de poros se maneja con un análisis de esfuerzos efectivos.</p>	CONDICIONES SUPERFICIALES	MUY BUENA Muy rugoso, Superficies frescas sin meteorización	BUENO Rugoso, ligeramente meteorizada, superficies con óxido.	REGULAR Lizas, moderadamente meteorizadas y superficies alteradas.	MALA Espejo de falla, altamente meteorizadas con recubrimiento compacto o rellenos o fragmentos	MUY MALA Espejo de falla, superficies altamente meteorizadas con recubrimiento de arcilla suave o rellenos
	ESTRUCTURA	DISMINUYE CALIDAD DE SUPERFICIE →				
Intacta o Masivo: Especímenes de roca intacta o masivo in situ con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.	DISMINUYE EL ENTRELAZADO DE PEDAZOS DE ROCA ↓	90			N/A	N/A
Levemente fracturado: Macizo rocoso no disturbado, muy bien entrelazado, constituido por bloques cúbicos formados por tres familias de discontinuidades		80				
Moderadamente Fracturado: Entrelazado, macizo rocoso parcialmente disturbado con bloques angulosos de varias caras formado por 4 o mas familias de discontinuidades		70				
Muy Fracturado/Disturbado/Agrietada: Foleada con bloques angulosos formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificación o esquistocidad		60				
Desintegrado: Pobremente entrelazado, macizo altamente fracturado compuesto de una mezcla de pedazos de rocas angulosas y redondeadas		50				
Foliado/Laminado/Cizallado: Falta de formación de bloques debido al pequeño espaciamiento o esquistocidad débil o planos de corte		40				
					30	
					20	
					10	
		N/A	N/A			