



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Instituto de Geología

CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA PARA AVERIGUAR EL GRADO DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES, MARGEN IZQUIERDA Y DERECHA DE LA CORTINA DE LA PRESA “EL REALITO” SAN LUIS DE LA PAZ, GUANAJUATO.

TESIS

Para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GEOLOGÍA APLICADA

PRESENTA:

ING. VIANNEY VANESSA SOSA DAVILA.

ASESOR

DR. LORENZO BORSELLI.

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. SEPTIEMBRE 2019.

CONACYT: Proyectos de Ciencia Básica CB-2012/184060 y CB-2016/286764.



Resumen

La Presa El Realito se construyó junto a la comunidad del mismo nombre que pertenece al Municipio de San Luis de la Paz, Guanajuato, sobre el cauce del Río Santa María, su objetivo es distribuir agua potable a seis cabeceras municipales y tiene una capacidad de almacenamiento de 181 000 000 m³, la ubicación del proyecto es el resultado de la evaluación de varios sitios, este sitio fue seleccionado por su mayor nivel de factibilidad determinado por dos aspectos, el primero que es el punto de más aguas abajo y por consecuencia con mayor capacidad de captación, y el segundo es que la roca que aflora es “Riodacita del Carmen”, la cual se caracterizó como dura, compacta, masiva y escasamente se aprecian planos de fracturas. (CEAG, 2001)

La investigación preliminar de sitio incluyó estudios geológico-geotécnicos de carácter general y de detalle, el intervalo entre la investigación preliminar y el inicio de su construcción para este proyecto fue de 11 años, iniciando en julio del año 2001 e inaugurada el 9 de octubre de 2012. Afortunadamente la información obtenida de estos estudios fue registrada de forma adecuada, se permitió acceder a ella para realizar este trabajo de tesis que tiene como objetivo conocer el estado post-construcción del sitio, donde se incluye los taludes de la cortina y un tramo de la carretera de acceso que se construyó como parte del proyecto. En la trabajo de cartografía del tramo carretero se encontró una brecha tipo avalancha la cual fue visible durante el proceso de construcción por lo que no se encontraba en trabajos anteriores, esta brecha se convirtió en uno de los principales retos de caracterización geotécnica, se adoptó una metodología de clasificación para este material denominado *Bimrock*, basándose en los artículos publicados al respecto desde 1994. Los trabajos anteriores marcan en el área de la cortina de la presa tres unidades geológicas; Riodacita Del Carmen, Ignimbrita El Órgano y Toba Álamos, estas se dividieron en unidades geotécnicas de acuerdo a los parámetros de evaluación de los macizos rocosos según los sistemas de clasificación RMR (*Rock Mass Rating*) y GSI (*Geological Strength Index*). Para realizar las clasificaciones geotécnicas se utilizaron los levantamientos de celdas geotécnicas en campo, el logeo geotécnico de los núcleos de barrenos realizados en la etapa de exploración, los cuales fueron facilitados por la CONAGUA y la información que se generó durante la construcción de la cortina, como el modelo geológico-geotécnico realizado por el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. No obstante, resulta necesario señalar que, la bibliografía

consultada, es muy basta en información geológica pero muy escasa en información geotécnica, por lo que el resultado de este trabajo muestra una condición geotécnica general de esta zona. Este trabajo forma parte de los Proyectos Ciencia Básica CB-2012/184060 y CB- 2016/ 286764 CONACYT, su objetivo general es averiguar las condiciones reales de la estabilidad de taludes de las márgenes de la cortina de la presa “El Realito”, y la caracterización geológica y geotécnica del tramo carretero cercano a la cortina para generar información que pueda ser utilizada en análisis posteriores, como una medida de protección a la presa El Realito como a la comunidad cercana que lleva el mismo nombre.

Determinar los parámetros mecánicos de resistencia y deformabilidad utilizando la información obtenida de las clasificaciones geomecánicas de los materiales litológicos presentes en el área, permitió realizar el modelo geotécnico que incluye un análisis de estabilidad mediante el cálculo de un factor de seguridad de los taludes de ambas márgenes considerando el escenario de la presa al máximo nivel como se presenta en la actualidad, así como condiciones de vaciado rápido, además los parámetros geotécnicos obtenidos pueden ser utilizados como referencia en proyectos de soporte o sostenimiento de los taludes donde estas litologías estén presentes, para futuras obras de Ingeniería dentro de CVRSM.

La metodología desarrollada para caracterizar de forma geotécnica un material tipo *BIMROCK* puede ser utilizada como guía en afloramientos de este mismo tipo, así mismo la metodología para realizar un logeo geotécnico para la obtención del valor de GSI.

Índice

Resumen.....	2
Introducción.....	6
Hipótesis	9
Objetivo	9
Objetivos particulares.....	10
CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	11
1.1 Antecedentes del proyecto.....	11
1.2 Localización y vías de acceso.....	12
1.3 Características del proyecto.....	13
1.4 Fisiografía.....	14
1.5 Geología General.....	15
1.5.1 Marco Geológico Regional	15
1.5.2 Geología del área.....	20
1.6 Hidrografía.....	32
1.7 Información sísmica del sitio	33
CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS.....	36
2.1 Caracterizaciones geotécnicas previas.....	37
2.2 Aspectos a evaluar del macizo rocoso.....	39
2.2.1 Roca intacta	41
2.2.2 Evaluación de las discontinuidades.....	43
2.3 Caracterización Geotécnica Ignimbrita El Órgano.....	46
2.3.1 Método de clasificación RMR.....	46
2.3.2 Método de Índice GSI.....	48
2.4 Caracterización Geotécnica Toba Álamos.....	50
2.4.1 Método de clasificación RMR.....	50
2.4.2 Método de Índice GSI.....	52
2.5 Caracterización Geotécnica Riodacita Del Carmen	53
2.5.2 Análisis de discontinuidades en socavones	64
2.6 Caracterización Geotécnica Brecha El Realito	66
2.6.1 Características para considerar un material como Bimrock.....	67
2.6.2 Tipos de Bimrock.....	68
2.6.3 Proporción, forma y alineación de bloques en Bimrock	69
2.6.4 Determinación de porcentaje de bloques y matriz en 2D.....	71
CAPÍTULO III. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS MECÁNICOS DE LAS UNIDADES GEOTÉCNICAS	73

3.1 Estimación de las propiedades de deformabilidad del macizo rocoso E_m y V_m	75
3.1.1 Módulo de elasticidad del macizo rocoso, E_m	75
3.1.2 Coeficiente de poisson, V_m (Macizo Rocosó).....	79
3.2 Estimación de las propiedades de resistencia del <i>Bimrock</i> cohesión c_m y el ángulo de fricción interna ϕ_m	79
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES	86
4.2 Mapa geotécnico del área de estudio	88
4.3 Modelado del comportamiento de taludes.....	91
4.3.1 Análisis de estabilidad del margen izquierdo de la presa El Realito	92
CONCLUSIONES	121
BIBLIOGRAFÍA	123
ANEXOS	129

Introducción

Actualmente para elaborar un proyecto de infraestructura es necesario conocer las características de los geomateriales del sitio, quien se encarga de generar esta información es la Ingeniería Geotécnica es una rama de la ingeniería civil y geológica que se encarga del estudio de la respuesta y las propiedades mecánicas de los geomateriales ante una modificación del estado de esfuerzos natural de un sitio.

El campo de la geomorfología y la geotecnia comenzaron a adquirir una mayor importancia en el mundo desde mediados del siglo XX teniendo un gran auge a partir de la década de los 80, debido a los grandes desastres que han sido causados por la actividad antrópica y por daños de las obras de ingeniería, teniendo consecuencias graves para poblaciones así como por actividades naturales que han generado pérdidas de vidas humanas y grandes daños en áreas urbanas que se encuentran cerca de zonas de riesgos geomorfológicos. (Puente-Castillo, 2014). La integración geotécnica de un sitio debe conjugar los resultados de estudio topográfico, geológico (sondeos de exploración) y geofísico del sitio además sumar las caracterizaciones geotécnicas realizadas en el sitio y los ensayos in situ y de laboratorio (Sánchez- Reye, 2016). El resultado de un análisis geotécnico debe ser considerado desde la etapa de anteproyecto para planificar el diseño y desarrollo de las obras y en caso de ser necesario planear el sistema de sostenimiento, estabilización y reforzamiento del terreno, con el objetivo de disminuir la probabilidad de que se generen escenarios inesperados produciendo afectaciones tanto a la economía como la seguridad de las personas y obras que forman parte de los proyectos.

Actualmente existen diferentes sistemas de caracterización geomecánica de macizos rocosos, esta se puede realizar usando los métodos de clasificación como RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1989) y GSI (*Geological Strength Index*) de Marinos and Hoek (2000), los cuales son el punto de partida en los proyectos, permiten construir una imagen de las características de la roca y así proporcionar estimaciones iniciales sobre las propiedades de resistencia y deformación del macizo rocoso. Las evaluaciones geotécnicas para estos dos métodos, se realizaron en los afloramientos disponibles dentro de las zonas de estudio.

Los dos parámetros que controlan la deformación elástica del macizo son el módulo de deformación y el coeficiente de Poisson estos se ven influenciados por el factor escala, por tanto, no pueden ser medidos directamente en laboratorio. En la actualidad se admite la hipótesis de que la relación de Poisson del macizo rocoso es equivalente al de la matriz rocosa,

mientras que el cálculo del módulo de deformación se puede estimar mediante correlaciones con las clasificaciones geomecánicas. (Sánchez-Reyes ,2016).

En la información previa disponible de esta zona, existe una clasificación geotécnica realizada por el Índice de Calidad de la Roca RQD (Rock Quality Designation) este método es descrito por Deere (1989) el cual determina la calidad de la roca de manera cuantitativa, directamente de los núcleos, donde se obtiene el porcentaje de medida de los fragmentos de núcleos sanos mayores a 10 cm con respecto a 1 metro de longitud, CONAGUA además realizó una clasificación de 3 unidades geofísicas donde se menciona la calidad de la roca, resultado del estudio geofísico de prospección geosísmica, realizado para conocer espesor de los materiales aluviales y de roca descomprimida en la zona del cauce donde se construyó la presa de almacenamiento “El Realito”. (TYSSA, 2011).

En el área de estudio de este proyecto, existe un geomaterial caracterizado geológicamente como una brecha tipo avalancha para el cual las clasificaciones geotécnicas actuales no permiten asignarle un grado de calidad ya que sus características no cumplen con las presentes en los sistemas de clasificación desarrollados para macizos rocoso o suelos, sin embargo en mecánica de rocas la clasificación de estas mezclas se inició por parte de Raymonds (1984), quien trabajó con los Melange de las zonas de subducción que son los más abundantes y complejos, el mismo año en un intento por comprender la influencia del tamaño y la distribución de los bloques de rocas en un *Bimrock* se iniciaron las investigaciones mediante modelos físicos por Lindquist & Goodman (1994), quienes realizaron un estudio de más de 100 especímenes con diferentes porcentajes y ángulos de bloques en cada uno de ellos y Edmund W. Medley (1994), crearon el termino *Bimrocks* que significa, en inglés, *block-in-matrix rocks* y su traducción al español es bloques de rocas en matrices para designar a una mezcla de bloques de rocas geotécnicamente significantivas dentro de una matriz más fina y débil. El apartado que corresponde a este material dentro de esta tesis comienza con la definición de *Bimrock*. Posteriormente se obtienen las propiedades mecánicas y finalmente se presenta una tabla propuesta para la clasificación en campo de esta mezcla de rocas.

Los sondeos de investigación se realizaron usando la herramienta de barrenación a diamante que es la técnica de exploración más puntual, se obtienen núcleos de perforación a lo largo de todas las formaciones rocosas que se atraviesan. La descripción de los núcleos de barrenación evaluando las características necesarias para el análisis geotécnico, se nombra “Logeo geotécnico”, actualmente no existe una normativa para realizarlo, generalmente se

hace por experiencia del personal encargado (geólogo o geotecnista), por lo que para este trabajo se definió una metodología que permitió obtener un valor de GSI mediante la fórmula establecida por Hoek et al. (2013).

El problema al que se enfrentó este trabajo de tesis radicó en que la información geotécnica disponible que se obtuvo durante la construcción de la presa “El Realito”, no tuvo el contenido necesario para poder realizar el análisis post-construcción no existe un modelo geotécnico que diferencie y zonifique geotécnicamente la geología de la zona, aunque si existen valores de los parámetros geomecánicos de la roca de los taludes de ambos márgenes, sin embargo muy generales y difíciles de situar.

Por lo anterior la formulación de la hipótesis parte del hecho de que si se realiza la clasificación geotécnica mediante los métodos RMR y GSI partiendo de la información geológica y geotécnica generada durante el proceso de construcción de la cortina de la presa y sumando nueva información generada en este trabajo de tesis, se puede realizar un modelo geotécnico que incluye los parámetros mecánicos que permitan una evaluación de la estabilidad de los taludes de la cortina post-construcción, además es necesaria la caracterización geotécnica del tramo carretero cercano a la cortina.

El objetivo general es averiguar las condiciones reales de la estabilidad de taludes de margen izquierda y margen derecha de la cortina de la presa” El Realito”, considerando el escenario de la presa al máximo nivel como se presenta en la actualidad, así como condiciones de vaciamiento rápido. Y la caracterización geológica y geotécnica del tramo carretero cercano a la cortina del cual no existe ninguna caracterización de este tipo que genere información para análisis posteriores, como una medida de protección para la presa El Realito como para la comunidad El Realito cercana a la misma presa.

La novedad científica de la investigación radica en el desarrollo de una metodología para realizar la caracterización geomecánica de los materiales tipo brecha conocidos como *Bimrock* basada en los artículos publicados por Edmund W. Medley y otros autores sobre este tipo de material, así como el desarrollo de la metodología para realizar un logueo geotécnico para obtener datos que permitan la clasificación de los macizos rocosos con un valor de GSI basado en el artículo *Quantification of the Geological Strength Index Chart* (Hoek et al. 2013)

Hipótesis

La realización de una clasificación geotécnica mediante los métodos RMR y GSI de los márgenes del Río Santa María partiendo de la información geológica y geotécnica generada durante el proceso de construcción de la cortina de la presa de almacenamiento de agua “El Realito”, y nueva información generada en este trabajo de tesis, permitirán realizar un modelo geotécnico basado en los parámetros mecánicos que permitieron realizar una evaluación de la estabilidad de los taludes de la cortina post-construcción, fue necesario hacer una caracterización geotécnica del tramo carretero cercano a la cortina del cual no existe ninguna caracterización de este tipo con la cual se generó información para análisis posteriores, así como también una medida de prevención de riesgos para la Presa El Realito como para la comunidad cercana que lleva el mismo nombre.

Objetivo

Averiguar las condiciones reales de la estabilidad de taludes de ambos márgenes de la cortina de la Presa El Realito, considerando el escenario de la presa al máximo nivel como se presenta en la actualidad, así como condiciones de vaciado rápido y realizar una caracterización geotécnica de los geomateriales del tramo carretero cercano a la cortina del cual no existe ninguna caracterización de este tipo que genere información y que pueda ser utilizada en futuros análisis de estabilidad.

Objetivos particulares

- Realizar la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, por los métodos RMR de Bieniawski (1989) y GSI de Marinos and Hoek (2000), mediante levantamientos geotécnicos en campo, logueo geotécnico de núcleos de barrenación y correlación de fórmulas matemáticas geotécnicas para realizar el mapa geotécnico del área de estudio.
- Realizar la caracterización geológica y geotécnica de la brecha que se encuentra en el área de la “Presa El Realito” para obtener los parámetros resistencia al esfuerzo cortante partiendo de la determinación del porcentaje de bloques y matriz del cual depende el comportamiento mecánico del *Bimrock*.
- Aplicar un modelado geotécnico con el uso del Software SSAP 4.9.9 (Borselli 1991, 2019) para averiguar el grado de estabilidad de taludes considerando diferentes escenarios posibles de potencial peligro geológico, así como las condiciones promedio actuales.

CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1 Antecedentes del proyecto

En el mes julio del año 2001 mediante un convenio entre la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se iniciaron los trabajos de exploración para el proyecto de presa sobre el Río Santa María donde se evaluó a detalle el sitio seleccionado denominado El Capulín, además se seleccionaron otras boquillas aguas abajo para comparar y elegir el sitio con mayor nivel de factibilidad, éstos estudios incluyeron dos brigadas de geología, una que analizó aspectos regionales y la otra de semidetalle, paralelamente se inician los trabajos de topografía como base para apoyo a geofísica y geología, así como los estudios de sismotectónica y finalmente se realizaron los trabajos de geofísica los cuales concluyeron el 11 de agosto del mismo año, cubriendo, un área de 100 km², el resultado del estudio fue que El Capulín no era el sitio adecuado para la construcción de una presa ya que los costos eran muy altos, debido a la detección de rasgos cársticos que aumentaban los costos de la construcción y disminuían el nivel del cauce del río, de los otros sitios estudiados se eligió el sitio El Realito, por ser el de más aguas abajo y por consecuencia con mayor capacidad de captación y la roca que aflora en la zona del cauce del Río Santa María es dura, compacta, masiva y escasamente se aprecian planos de fracturas, forma parte de una secuencia volcánica de composición ácida a la que se ha asignado el nombre de “Riodacita del Carmen”. (CFE, 2010).

1.2 Localización y vías de acceso

La Presa El Realito, se construyó en las coordenadas $21^{\circ} 36' 26.47''$ y $100^{\circ} 14' 09.04''$; UTM X: 372054 m; Y: 2389875 m, junto a la comunidad de El Realito perteneciente al Municipio de San Luis de la Paz, Guanajuato, sobre el cauce del Río Santa María, se ubica a 1060 m de altitud sobre el nivel del mar, la zona de estudio comprende las dos márgenes de la cortina de esta presa del lado izquierdo inicia en el tramo carretero 45+140, cubriendo una área total de 13. 8967781 hectáreas.

DATUM WGS 84, ZONA 14N, CARTA INEGI F14C26

Las dos vías de acceso actuales (Figuras 1 y 2) parten de dos ciudades importantes del estado de San Luis Potosí: Ciudad de Río Verde, Carretera Federal Número 69, de donde parte un camino de terracería hacia las comunidades de El Aguacate, Bagres de Abajo, Álamos de Martínez y Mineral del Realito y desde la Ciudad de San Luis Potosí siguiendo la Carretera Federal Número 57, en el tramo San Luis - Querétaro parte la carretera que conduce al poblado de Tierra Nueva para después tomar la carretera a la Comunidad del Realito.



Figura 1. CONAGUA (2016). Ilustración de Localización y vías de acceso a La Presa El Realito.



Figura 2. Localización y vías de acceso a La Presa “El Realito”. Modificada de imagen satelital Google Earth (2018).

1.3 Características del proyecto

La Presa El Realito fue diseñada para distribución de agua potable y construida a base de cortina de concreto compactado con rodillos de 84 m de altura, volumen de almacenamiento de 181, 000,000 m³, volumen de suministro de 2 m³/seg, uno de ellos se destinó al gobierno de San Luis Potosí y el otro al Gobierno de Guanajuato para otorgar un beneficio social a seis cabeceras municipales (San José de Iturbide, Doctor Mora, San Diego De La Unión, Comonfort, Allende y Celaya), incluye obra de desvío, obra de toma de agua, vertedor de demasías, obra electromecánica y acueducto de 85, 656 m, el área de inundación es de 3, 390.00 Km², longitud de la cresta 80.0 m, longitud de la presa 270 m, ancho de la corona 6 m, bordo libre 1.70 m, elevación del NAME (nivel de aguas máximo extraordinario) 1442.38 msnm, elevación del NAMO 1137.80 msnm, elevación de desplante 1052.00 msnm, elevación de la corona 1142.50 msnm. En su interior se instalaron 250 medidores de temperatura, de deformación y de nivel; 33 piezómetros y una estación hidroclimatológica. (CONAGUA, 2012).

1.4 Fisiografía

El área de estudio se localiza en la porción centro-oriental de la carta INEGI, llamada Mineral El Realito F14C26 de escala 1: 50,000. Esta zona corresponde con el límite de las provincias fisiográficas de la Meseta Central y de la Sierra Madre Oriental. (Figura 3)

El relieve es influenciado por las características litológicas y las estructuras, la sucesión volcánica del Cenozoico que sobreyace discordantemente a la Formación El Abra la cual presenta formas accidentadas con fuertes pendientes que forman cañadas con grandes paredes verticales. (CONAGUA, 2011). La morfología de ambas márgenes de la presa es asimétrica, con pequeños escarpes en cada una de ellas, se presenta un desnivel aproximado de 200 m a partir del río.

El marco tectónico está determinado por las estructuras de carácter compresivo que forman parte de la Sierra Madre Oriental, como son pliegues y fallas inversas o cabalgaduras de rumbo general norte-noroeste y vergencia generalmente hacia el este-noreste. Estas estructuras fueron originadas durante una etapa antigua que corresponde a la orogenia Laramídica o Hidalgoana. Una segunda etapa es la correspondiente a la fase distensiva con volcanismo asociado en general a la Sierra Madre Occidental, que tiene su origen al igual que la propia orogenia, en la subducción de la antigua Placa Farallón bajo la Placa de Norteamérica, aunque en este caso, durante una fase tardía de incremento del ángulo de subducción, con consecuente magmatismo en el Oligoceno y el Mioceno. Esta es por tanto una fase distensiva post-laramídica con estructuras orientadas norte-noroeste. Hacia el final en el Mioceno-Plioceno se han generado estructuras de extensión orientadas norte-noreste. Tectónicamente el área se puede situar dentro de la porción suroriental de lo que se conoce como Provincia de Cuencas y Sierras de México, la cual es producto de una tectónica extensiva que ocurrió principalmente durante el Paleógeno medio y tardío, originando una serie de fallas normales que formaron pilares y fosas tectónicas con orientación predominante NW-SE (CONAGUA, 2011).

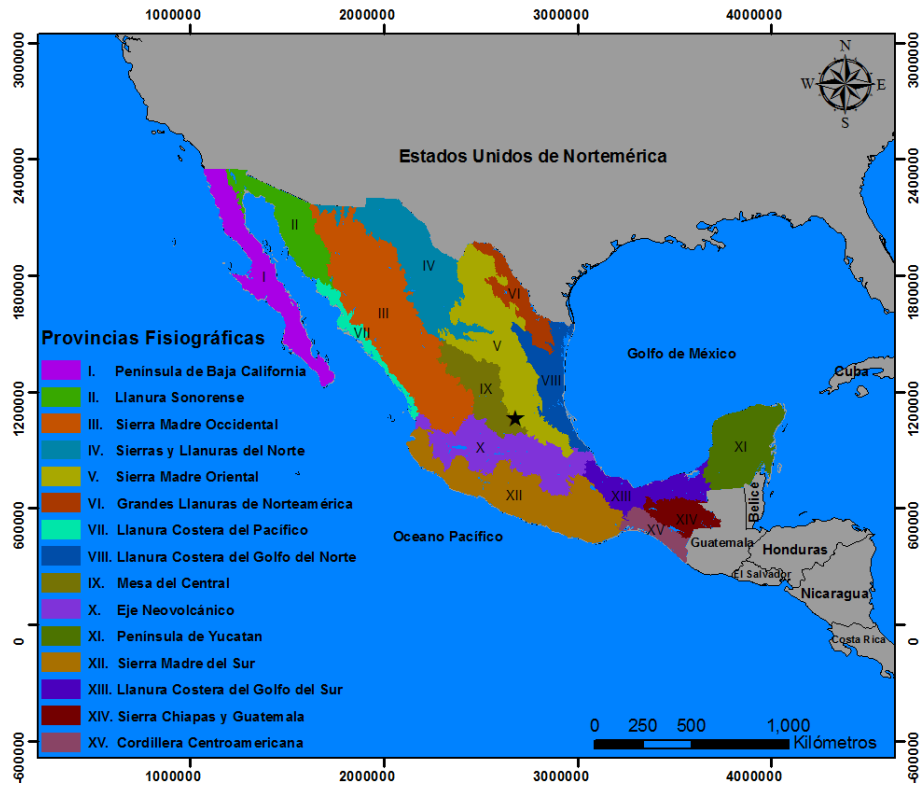


Figura 3. Provincias Fisiográficas de México y ubicación del área de estudio (estrella negra). Tomado de Ortiz-López. 2017, modificado de Raisz (1959).

1.5 Geología General

1.5.1 Marco Geológico Regional

Existe suficiente información del marco geológico regional y local generada por el Instituto de Geología UASLP, desde el año 1983 con trabajos publicados por distintos autores; Labarte-Hernández, et al. (1983,1984, 1989), Tristán-González, et al. (2009, 2010), Zanella-Carrizales (2013), Guerrero Ibarra (2012), Hernández- García (2015), Ortiz-López (2017), en los cuales sitúan a el área de estudio sobre un paquete de rocas volcánicas y sub-volcánicas efusivas y piroclásticas de composición riódacítica a riolítica con un espesor de alrededor de 1000 m, fueron emitidas principalmente durante el Oligoceno, pertenecientes al Campo Volcánico del Río Santa María (CVRSM) el cual inició su actividad a partir del Eoceno medio hasta el Mioceno, corresponden a la porción más al suroriente de la Provincia Volcánica de la Sierra Madre Occidental, que se encuentran sobre rocas Mesozoicas carbonatadas de la Plataforma Valles-San Luis Potosí. (Labarthe-Hernández et al 1984; Tristán-González, et al, 2009).

La secuencia principal del CVRSM está formada por cuerpos intrusivos sub-volcánicos conocidos como intrusivo Palo Verde que aflora en la porción central del campo, los cuales intrusionan a un paquete volcánico muy voluminoso que cubre la mayor parte de la zona y corresponde a una secuencia de lavas que formaron domos exógenos, cubriendo un área aproximada de unos 3000 km² y su espesor puede alcanzar los 1000 m en el centro del campo. A este paquete de lavas se le nombro Riodacita del Carmen (Labarthe-Hernández et al., 1983). Sobre los domos de la riodacita se emplazó un paquete voluminoso de ignimbritas conocidas como Ignimbrita El Órgano e Ignimbrita Santa María, de edad promedio 32 Ma, con espesores que pueden alcanzar los 400 m. Hernández-García (2015), en su trabajo de tesis de licenciatura presenta un Polígono resultante del análisis estructural de la posible caldera y en su porción norte, se encuentra en la zona del Río Santa María al poniente del Realito (Figura 4). Como última etapa, se desarrolló un vulcanismo que se extendió principalmente hacia el centro y nororiente del campo volcánico, con la extrusión de domos riolíticos, dacitas y basaltos.

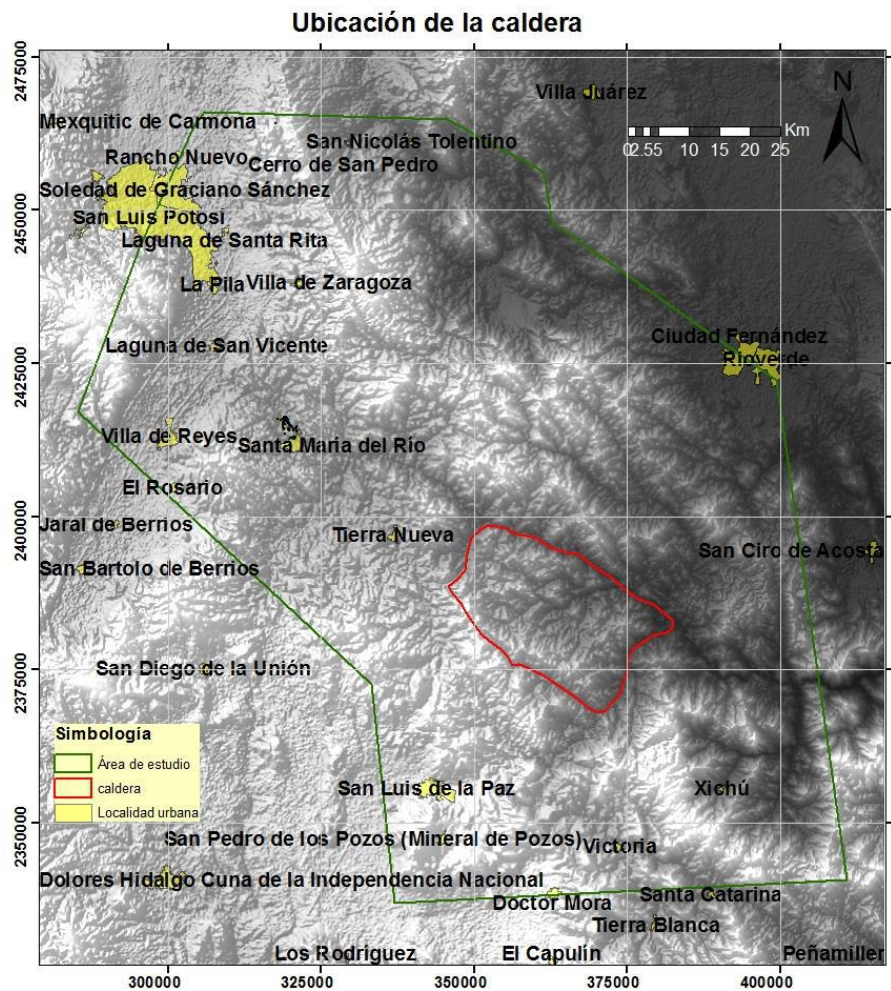


Figura 4. Polígono resultante del análisis estructural de la posible caldera que generó el material ignimbrítico. Tomado de Hernández-García. (2015).

Las columnas estratigráficas regional y del área de estudio más actualizadas las realizó Guerrero-Ibarra (2012), para su tesis de licenciatura (Figuras 5 y 15), las cuales ambas se usaron en este trabajo de tesis.

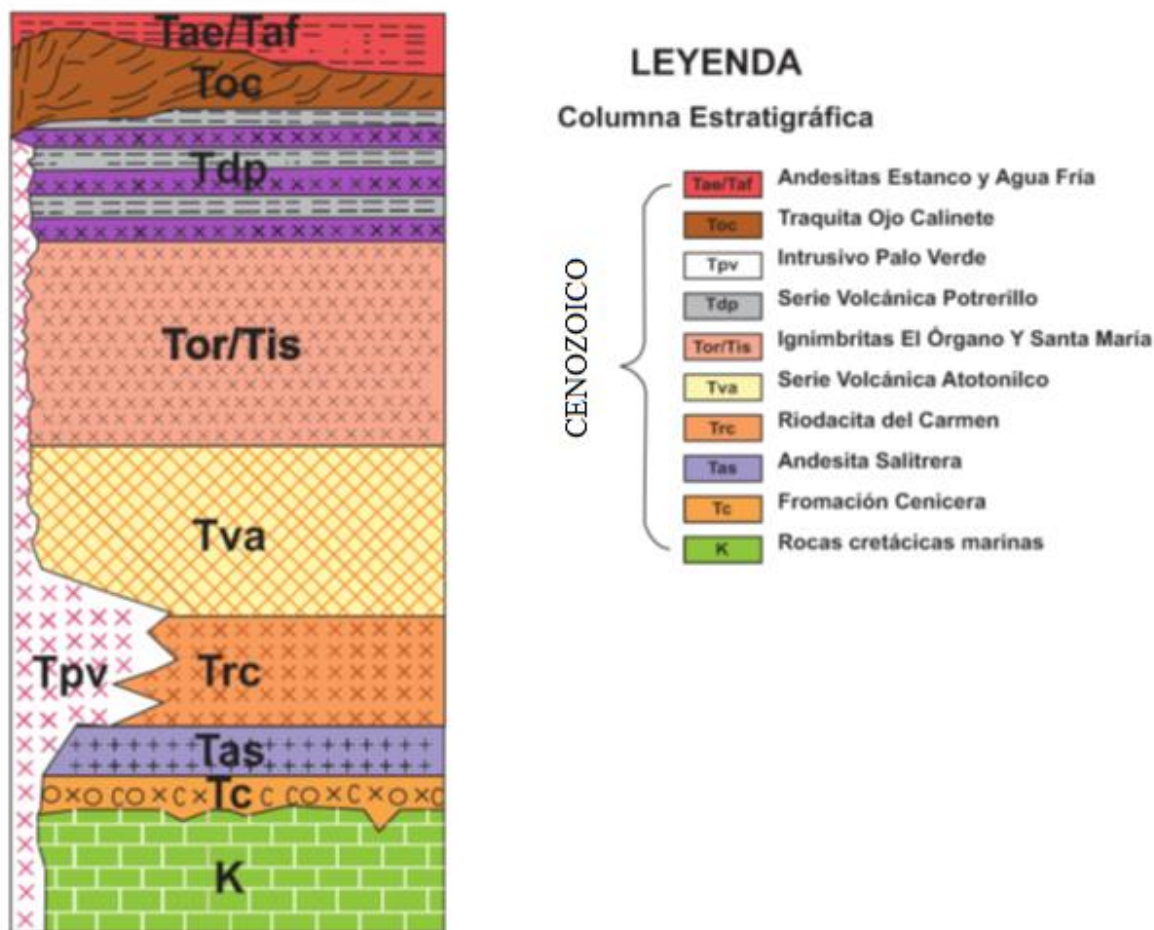


Figura 5. Columna estratigráfica regional compuesta, del Campo Volcánico del Río Santa María. Tomado de Guerrero-Ibarra (2012) modificado.

En la región se encuentran cuatro sistemas generales de estructuras con las siguientes orientaciones: NW-SE, NE-SW, E-W y N-S identificadas con imágenes de satélite y modelos digitales de elevación, observaciones de campo y medidas microestructurales sobre las unidades volcánicas que afloran alrededor del sitio de presa, las cuales indican que la región ha estado sujeta a desplazamientos de tipo lateral y de tipo normal. Las fallas de orientación NW-SE corresponden aparentemente con una reactivación tectónica de tipo lateral que se llevó a cabo a lo largo de las antiguas estructuras originadas durante los procesos tectónicos

compresivos laramílicos y tectónicos extensivos de la Sierra Madre Occidental. Sin embargo, se desconoce, por el momento, la edad de estos movimientos laterales. Dicho sistema se refleja claramente como un estricto control estructural en el patrón de drenaje de la zona y se expresa, en este caso, por el curso del Río Santa María que funciona como un colector principal. Las fallas de orientación NE-SW y las fallas y lineamientos E-W y N-S corresponden a una etapa tipo extensional, esta fase tectónica es evidente en la región debido a la presencia de depósitos de conglomerados que están coronando topografías escalonadas, de donde se infiere la presencia de fracturamiento y fallas distensivas concordantes a esas orientaciones estructurales. (CFE, 2010), en la Figura 6 se muestran las principales discontinuidades de la zona, esa imagen fue modificada de la tomada del “Estudio complementario de factibilidad geológica para la construcción de una presa sobre el Río Santa María, en el estado de Guanajuato” sobre poniendo las líneas que indican los alineamientos debido a que las líneas son muy difíciles de apreciar.

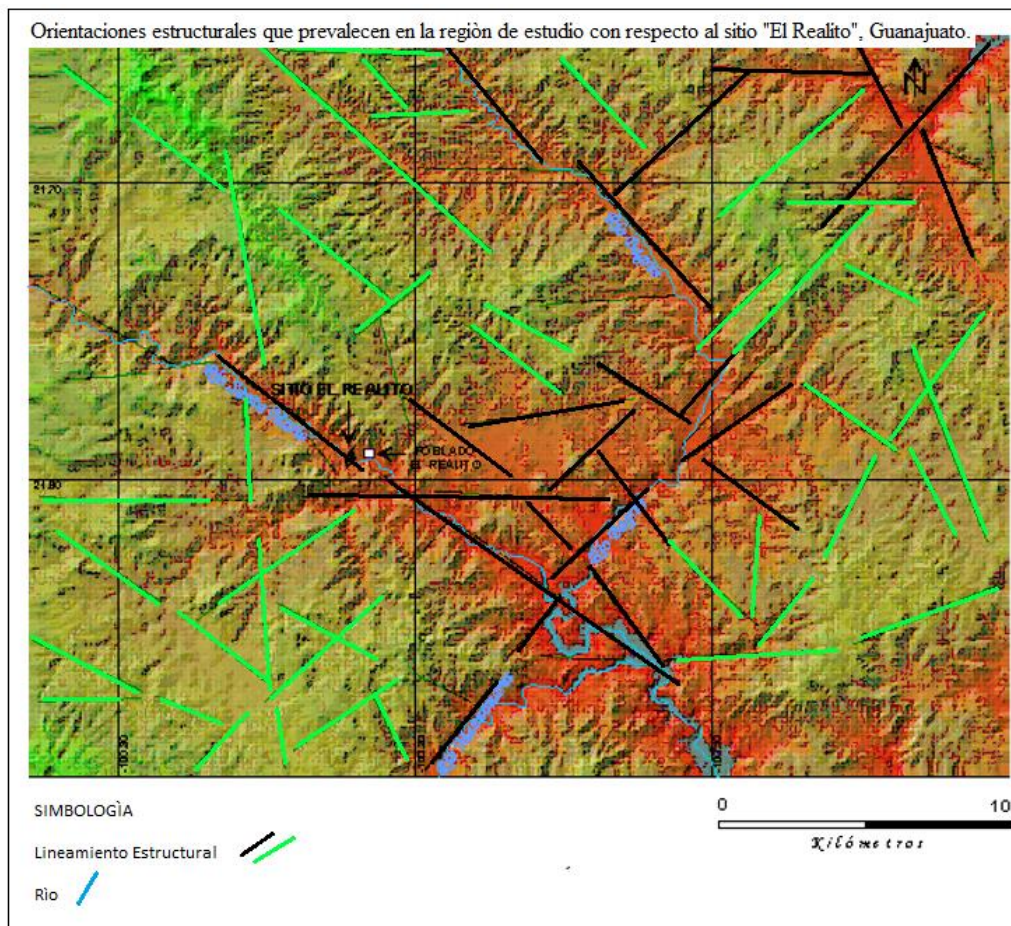


Figura 6. Orientaciones estructurales que prevalecen en la región de estudio con respecto al sitio “El Realito” Guanajuato. Modificada de CFE (2010).

1.5.2. Geología del área

La roca de ambos márgenes del vaso de la Presa El Realito, es Riodacita del Carmen dispuesta en una serie de bloques con diferente grado de brechamiento, que se presentan en un arreglo caótico como consecuencia de una zona que fue colapsada (Figura 7), además afectada por una zona de cizalla marcada por fallas laterales a lo largo del cauce. La Riodacita del Carmen no se observa descansando sobre otra unidad de roca, se encuentra cubierta de forma irregular por la Toba Álamos que es una secuencia de oleadas piroclásticas con intercalación de depósitos epiclásticos, la secuencia superior está formada por flujos de ceniza soldados, con estructura columnar de composición riolítica (Ignimbrita El Órgano) cubiertos en algunas zonas por depósitos de coluvión. Para este trabajo de tesis se realizó un ruta de puntos de verificación geológica para la cual se utilizó como referencia el plano geológico del sitio que se encuentra en el Modelo Geológico-Geotécnico y Geofísico, para determinar la Estanqueidad del Vaso Presa El Realito, que se realizó en el año 2011 por Instituto de Geología UASLP para la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), este plano se modificó debido a que durante el trabajo de cartografía se identificó una brecha que se nombró “Brecha Realito” tipo avalancha de escombros de carácter caótico con abundantes bloques. (Figura 8)



Figura 7. Zona del eje de la cortina, se aprecia la serie de bloques colapsados y deslizados, que fueron brechados durante el colapso. CFE (2010).

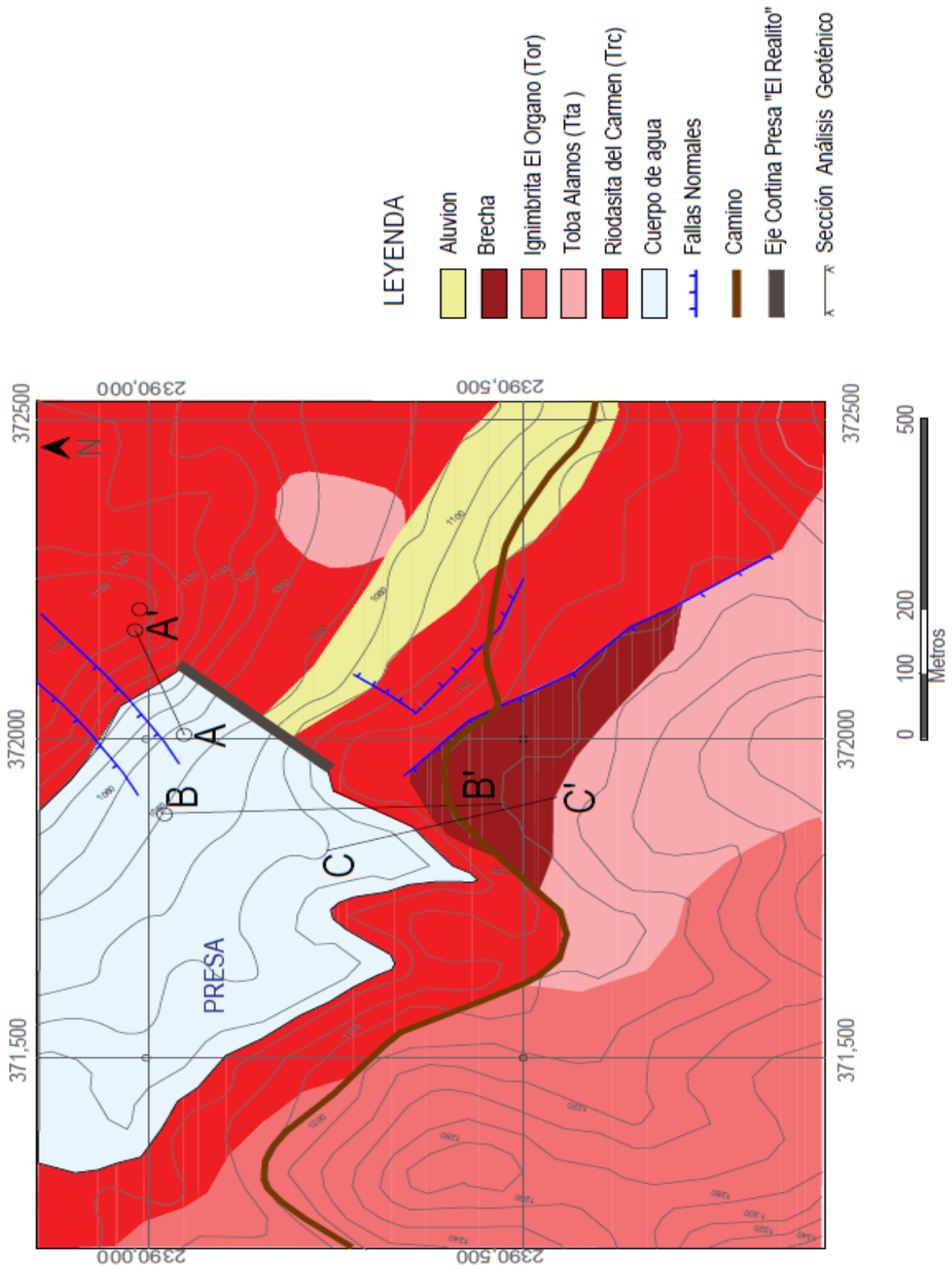


Figura 8.- Mapa geológico de la zona El Realito, modificado de CONAGUA 2011

1.5.3 Estratigrafía del área

- Formación El Abra (Kta) Cretácico inferior.

Las calizas de la Formación El Abra son rocas sedimentarias marinas que se encuentran en la base, sin embargo en el área que concierne a este trabajo de tesis no se observó afloramientos de esta formación, en el trabajo de Guerrero-Ibarra (2012), menciona afloramientos localizados al oriente del sitio donde se construyó la Presa El Realito los describe como capas gruesas de caliza masiva micrítica color gris claro donde en algunas ocasiones no se le distingue estratificación la cual en algunos sitios llega a presentar laminaciones de limolita entre algunos de los estratos.

- Riodacita del Carmen (Trc). Terciario (Oligoceno)

Esta roca es parte de una secuencia volcánica de composición ácida de nombre “Riodacita del Carmen” formada por lo menos de tres flujos de lava, fue nombrada así por los afloramientos de un espesor de hasta 800 m encontrados en el poblado “Hacienda del Carmen” en el municipio de Tierra Nueva, S.L.P. ubicada en la porción oriental de la Hoja Melchor (F14-A24) realizada por Labarthe-Hernández et al. (1983), en alguno puntos dentro del CVRSM como el sitio “El Capulín” esta serie volcánica se compone en su base de aislados flujos piroclásticos, para después presentarse en forma de flujos de lava, brechas volcánicas, e inclusive como cuerpos hipabisales de diferentes dimensiones. La edad se sugiere tentativamente entre el Eoceno tardío-Oligoceno temprano por su posición estratigráfica que subyace a la ignimbrita El Órgano-Santa María, cuya edad K-Ar es de 32.5 ± 0.8 Ma. (Tristán-González et al, 2009). En el área de estudio se encuentra en ambas márgenes del vaso de la Presa El Realito, está representada en su parte inferior por depósitos de toba lítica de composición riolítica color gris claro a gris rosáceo con un 15% de fenocristales de 3-6 mm de plagioclasa>sanidino>cuarzo subordinado, se observa pómez textura piroclástica de grano fino, estructura compacta, bien soldada y dureza alta, presenta alteración de argilización y cloritización. En la parte superior presenta fragmentos líticos (diámetros varían de 0,10 a 0,80 m) y halos de alteración diferencial dando apariencia de brecha, presentar abundantes huecos de desgasamiento, también se le aprecian manchones de alteración (argilización) por actividad fumarólica. (Figuras 9 y 10)



Figura 9. Margen Izquierda de la presa “El Realito” (enero 2017).

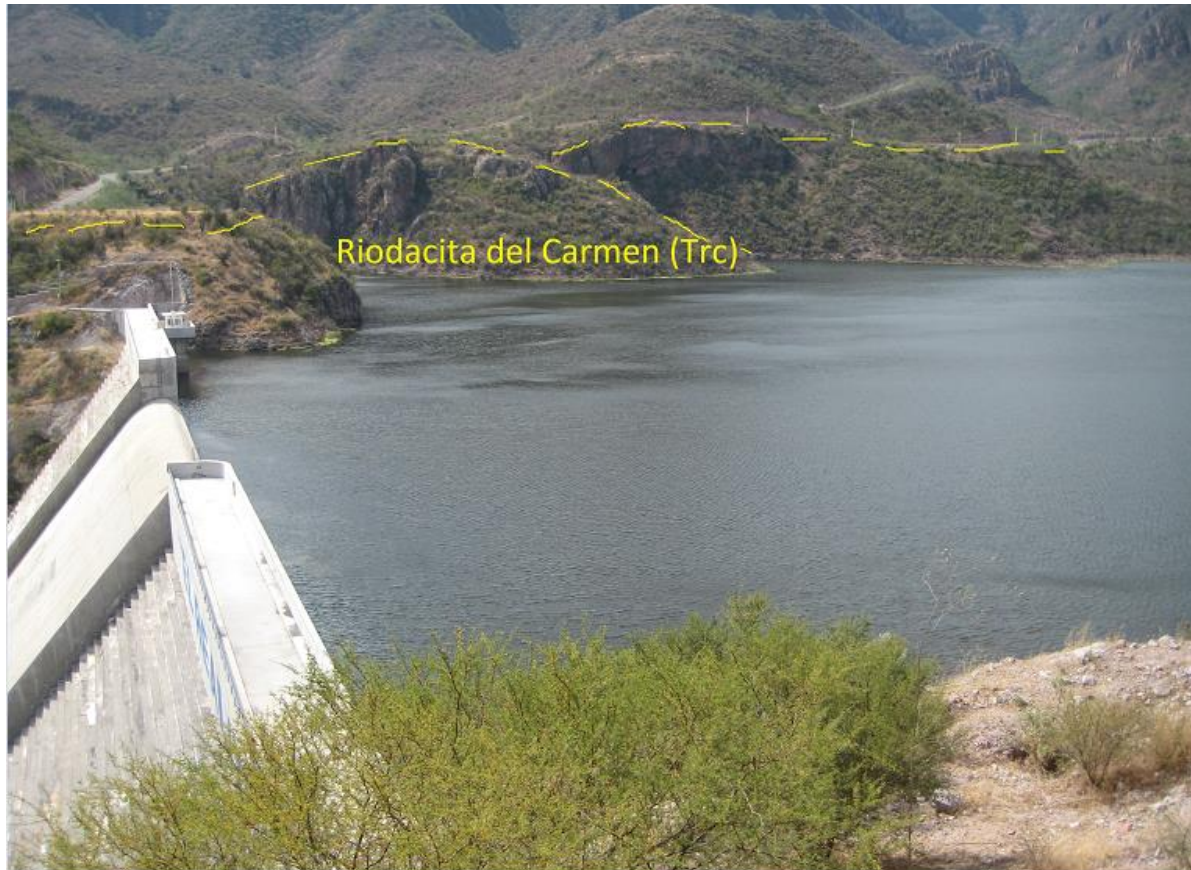


Figura 10. Margen Derecha de la presa “El Realito”, vista desde la margen izquierda (enero 2017).

- Toba Álamos (Tta)

Esta roca fue nombrada por los afloramientos encontrados cerca del poblado Álamos de Martínez que aparece en la hoja Mineral El Realito (F14C26) realizadas por Labarthe-Hernández et al. (1989), quienes la describieron como una toba depositada por aire con espesores variables, color crema, estratificada cuyas capas miden entre 10 a 40 cm, presenta líticos aislados hasta de 5 cm de diámetro, en su base tiene un vitrófido de color verdoso a negro, su porción superior es un flujo de ceniza de color rosa sin soldar con fenocristales de cuarzo y sanidino de 1-3 mm, con pómez colapsada, el afloramiento en el área de estudio cumple con esta descripción y se encuentra en la margen derecha (aguas abajo) de la presa “El Realito” cubriendo de forma irregular a la “Riodacita del Carmen”, suprayace la ignimbrita El Órgano por lo que se pudiera situar tentativamente entre el Eoceno tardío-Oligoceno temprano, se observó un espesor aproximado de 10 m. (Figura 11)



Figura 11. Toba Álamos, margen derecha de la presa El Realito (Enero 2017).

- Ignimbrita El Órgano (Tor).

Esta roca es parte de una secuencia de flujos piroclásticos de composición riolítica bien soldados, fue nombrada y descrita informalmente por Labarthe-Hernández et al. (1984) en la hoja Salitrera, localizada al occidente de la Hoja Mineral El Realito. En el área de estudio se encuentra en la margen derecha (aguas abajo) de la presa cubriendo de forma irregular a la “Toba Álamos”, sus características físicas son: color café rojizo de textura porfídica y fluidal con aproximadamente el 15 % de fenocristales de 3 a 6 mm de cuarzo>sanidino y ferromagnesianos alterados, contiene pómez muy colapsada de estructura tipo “fiame”, se pueden observar fragmentos líticos aislados todo esto se encuentra dentro de una matriz está desvitrificada, su base es un vitrófido lenticular de color negro verdoso de no más de un metro de espesor, que en muchas ocasiones está alterado formando una arcilla de color rojizo(Figura 11), tiene estructura columnar (Figuras 12 y 13) . Su edad fue determinada por el método K/Ar (Tristán-González et al., 2009) situándola en el Cenozoico Paleógeno (Oligoceno temprano).



Figura 12. Vitrificado de la base de la Ignimbrita El Órgano, margen derecha de la Presa El Realito (septiembre 2016).



Figura 13. Ignimbrita El Órgano margen derecha de la Presa El Realito (septiembre 2016).

- Brecha El Realito (Tor- br). Cenozoico Paleógeno (Oligoceno)

Siguiendo la metodología de Murcia et al. (2013), Para la descripción de brechas volcánicas definimos esta brecha como; depósito vulcaniclástico secundario, avalancha de escombros, post eruptivo, cohesivo, en el cual podemos encontrar fragmentos que por su granulometría se clasifican como bloques con diámetros de 0.1 a 1.5 m, subangulosos dentro de una matriz la cual sus granos tienen un diámetro >2 mm por lo que se clasifica como ceniza, la adherencia entre los clastos y la matriz es fuerte (Figura 14). El origen de las brechas de colapso se relaciona principalmente a estructuras volcanotectónicas, las cuales se pueden relacionar con escarpes grandes de fallas, o bien a lo que se conoce en la literatura como calderas de colapso. Estas estructuras se originan cuando una cámara magmática desaloja grandes volúmenes de rocas piroclásticas (ignimbritas), dejando un espacio sobre la cúpula de la cámara magmática y originando que el peso de la columna de rocas que se encuentran sobre ella se colapse; estas rocas incluyen las rocas preexistentes y los piroclásticos que se depositaron sobre la cúpula misma durante la erupción; esto ocasionó fallas marginales que adquieren la forma de la cámara. Es en los escarpes de estas fallas de donde se desprenden megabloques formando lo que se conoce como mega-brechas, las cuales se depositan caóticamente en la parte hundida de las márgenes de la caldera. Bloques grandes se deslizan hacia el interior de la caldera alcanzando distancias considerables (kilómetros) (Murcia et al. 2013).

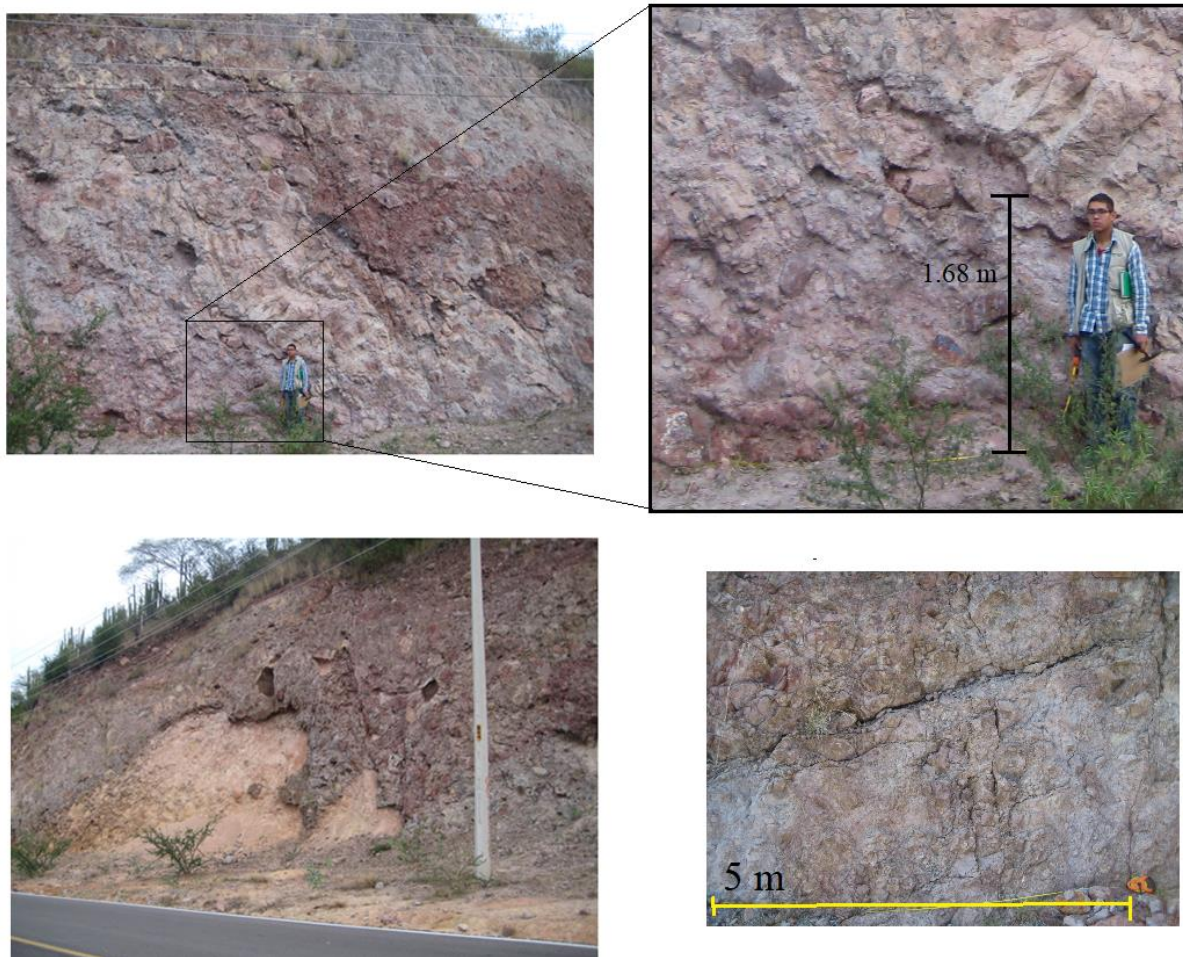


Figura 14. Brecha El Realito margen derecha de la presa El Realito (julio 2016).

- Depósitos Aluviales (Qal)

Son depósitos de ladera que se encuentran descansando sobre las pendientes son fragmentos y bloques sin consolidar y corresponden a la Riodacita del Carmen, a la Toba Álamos e Ignimbrita El Órgano algunos que pueden alcanzar hasta 20 m de diámetro se encuentran combinados con suelo.

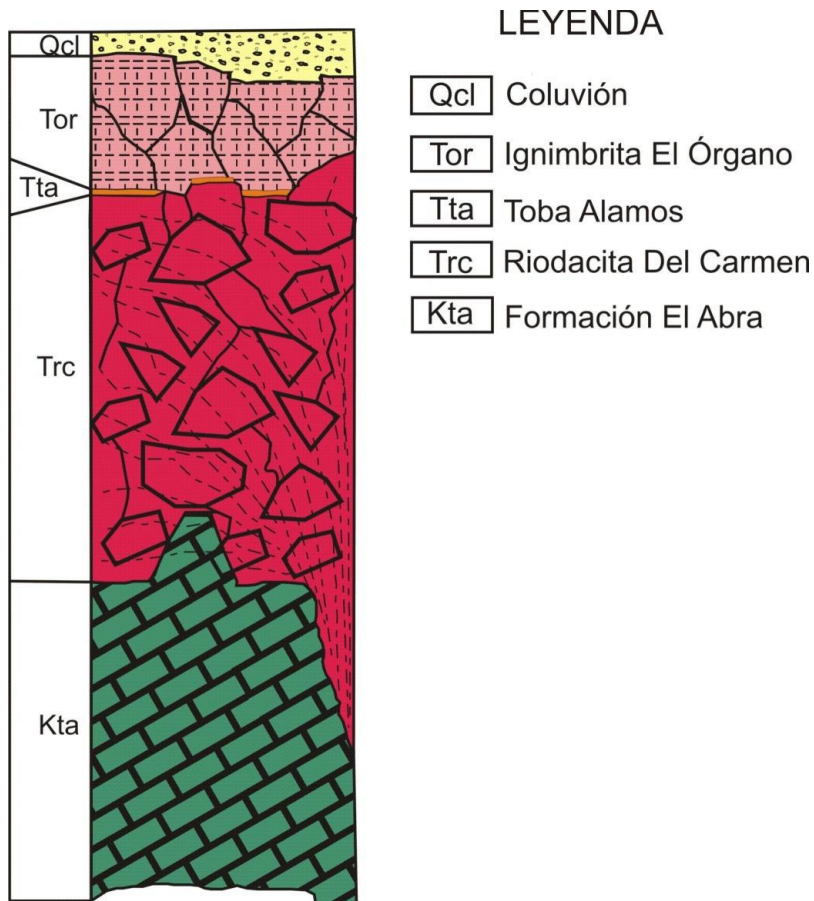


Fig. 15. Columna estratigráfica del vaso de la Presa “El Realito”. Guerrero-Ibarra (2012),

Hay en general dos sistemas principales de discontinuidades el primero se relaciona con una falla lateral izquierda (de orientación que controla el cauce del Río Santa María. El segundo a fallas extensionales (Falla normal) de orientación NE-SW que basculan hacia el SE la secuencia volcánica donde se ubica el vaso de la presa, así mismo fallas extensionales de orientación NW- SE que se asocian a zonas de transtensión (zona de sigmoide) por efecto de la falla lateral. (Zanela-Carrizales, 2013).

En el área de estudio se definieron celdas geotécnicas, donde se midieron las orientaciones de las discontinuidades en dos unidades litológicas de la Ignimbrita El Órgano y la Toba Álamos, para elaborar el estereograma de la Riodacita del Carmen se utilizaron los datos del Levantamiento Geológico a detalle de las Galerías y de la obra de desvío de la Presa “El Realito” realizado para CONAGUA en el año 2011 por la empresa TECHNoproject, S.A. DE C.V., con la información recopilada se construyeron los diagramas estereográficos de Schmidt (Figuras 16, 17 y 18) que proporcionan las condiciones medias de fisuramiento de la

masa y ponen en evidencia la orientación en el espacio de las principales familias de discontinuidades.

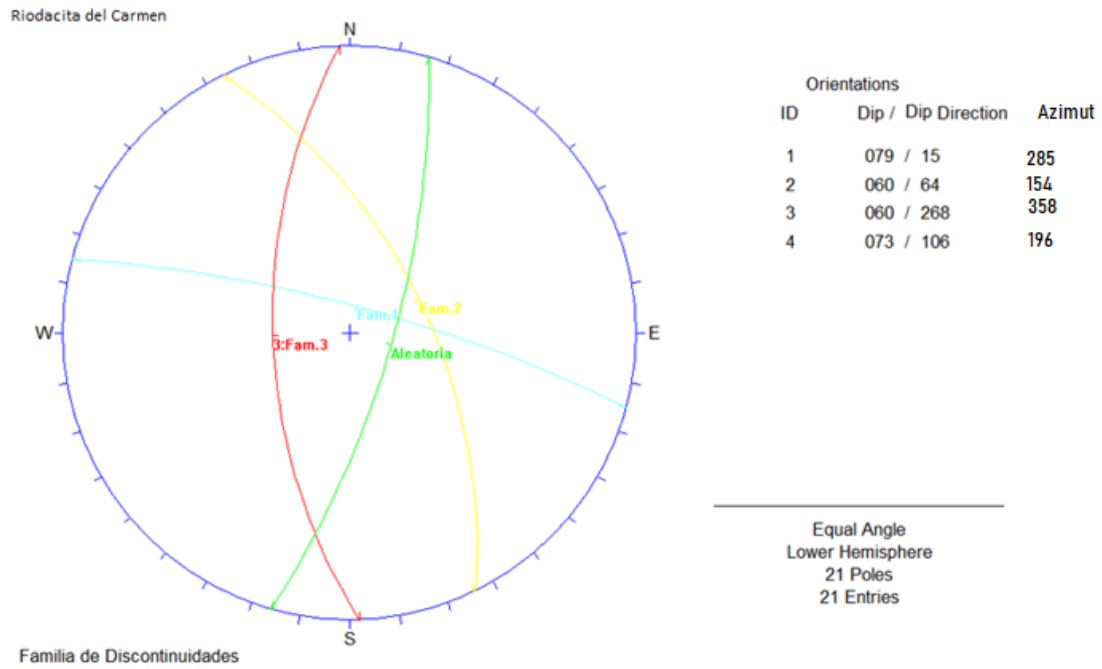


Figura 16. Estereograma (Dip and Dip Direction) de las principales familias de discontinuidades Roca Riodacita del Carmen.

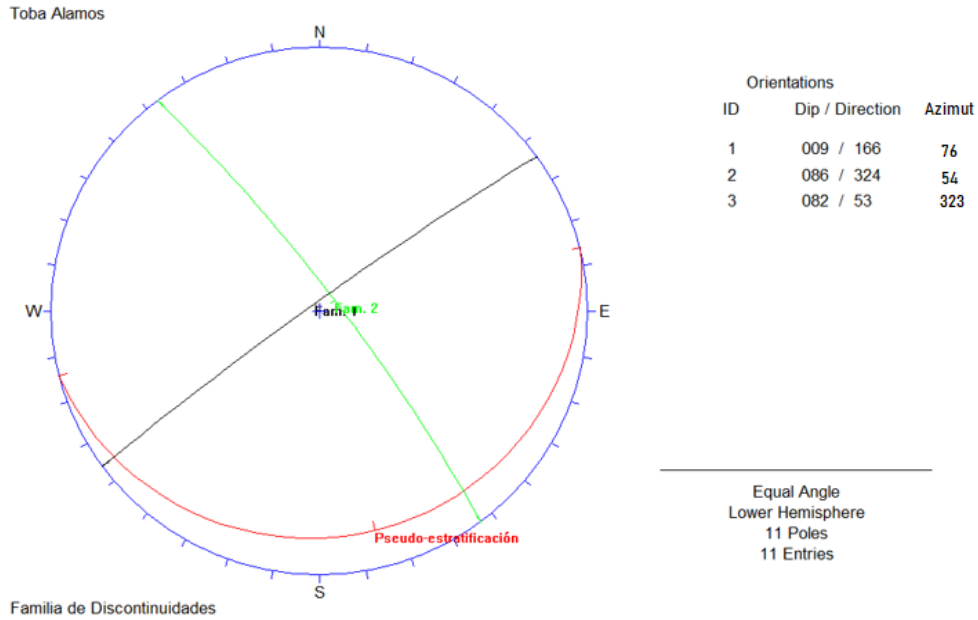


Figura 17. Estereograma (Dip and Dip Direction) de las principales familias de discontinuidades Roca Toba Álamos.

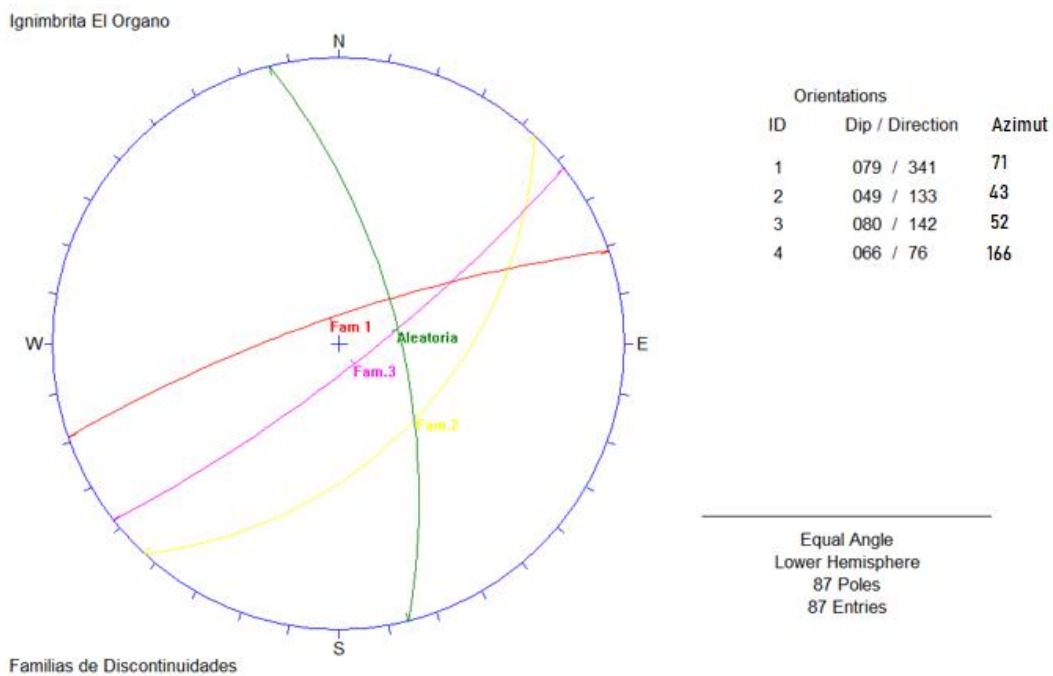


Figura 18. Estereograma (Dip and Dip Direction) de las principales familias de discontinuidades Roca Ignimbrita El Órgano.

1.6 Hidrografía

En la región de la presa la temperatura media anual es cercana a 18°C mientras que en los meses más fríos varía entre 3°C y 18°C, en los meses cálidos las variaciones fluctúan de 14°C a 30°C, estos valores son el resultado de las mediciones de 11 estaciones climatológicas ubicadas cercanas a la presa.(CONAGUA 2005)

La presa El Realito con un área de 1859.39 km², se encuentra en la cuenca del Río Santa María (Figura 19), dentro de esta cuenca se encuentran otras dos presas La Muñeca que abarca 308.94 Km² y la presa Ing. Valentín Gama con una área de 1222.33 km². (CONAGUA 2008)



Figura 19. Ubicación de la Presa “El Realito” dentro de la cuenca del Río Santa María. CONAGUA (2008).

La precipitación máxima probable es de 197 mm/año, existen lluvias extraordinarias, durante el periodo de desarrollo de este trabajo se presentó una de gran magnitud que ocasiono deslizamiento de los bloques hasta de 3 m de diámetro en la carretera “El Realito” el día 17 de junio del 2016.

1.7 Información sísmica del sitio

Para conocer la sismicidad instrumental Comisión Federal de Electricidad, consultó los catálogos del USGS (*United States Geological Survey*) y el PDE (*Preliminary Determination Earthquake*), los cuales arrojaron tres sismos de magnitudes 3.2°, 3.7° y 4.0°, a una distancia del proyecto de 58.0, 76.0 y 72.0 kilómetros respectivamente, el sismo de mayor magnitud dentro de un radio de 100 kilómetros con centro en el eje del proyecto ocurrió el 26 noviembre de 1887, en la vecindad del poblado de Pinal de Amoles, estado de Guanajuato, al cual se le estimó una magnitud de 5.4°, se utilizó un catálogo sismológico que cubre el periodo de tiempo de 1989 a 2000 generado con la información de la instrumentación colocada para la construcción de la Central Hidroeléctrica Zimapán Hgo, la cual consta de un sismógrafo analógico que se instaló en la boquilla del proyecto en 1988 y, posteriormente, en 1994, una red sismológica de tres equipos, con base en esto se definió la sismicidad de la zona con un rango de magnitud menor a 4.0 °(Figura 20). Usando este catálogo además se calculó el valor de “b” que es la constante de Gutenberg-Richter la cual relaciona la cantidad de sismos que ocurren en una región con la magnitud de los mismos, de esta relación se puede inferir la probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud grande contra los sismos de magnitud menor, además que relaciona factores tales como la calidad de roca y estado de esfuerzos, entre otros, su valor varía de 0.5 a 1.5. Una “b” menor a 1, supone una distribución uniforme de la sismicidad, y una probabilidad más alta de que ocurra un sismo grande. Con una “b” mayor a 1, se tendría una distribución de la sismicidad irregular, por lo que la probabilidad de un sismo grande disminuye, para esta zona el valor de “b” es igual a 0,80. Para conocer la sismicidad en el proyecto “El Realito”, CFE instaló cerca del eje izquierdo de la presa un acelerógrafo digital de tres componentes con sensibilidad de 0,5 g marca *Kinematics modelo K2*, por el periodo del 27 de enero al 1 de febrero del año 2010. Este equipo trabaja por umbrales de disparo, censa de forma continua la vibración del terreno, pero solo graba, cuando la mencionada vibración rebasa un nivel preestablecido y, de forma similar deja de grabar cuando el nivel de vibración decae del umbral seleccionado. El equipo instalado se programó para iniciar el modo de grabación para vibraciones mayores a 0,034 gales (el equivalente de una persona caminado de forma normal a 50 centímetros del acelerógrafo). (CFE, 2010)

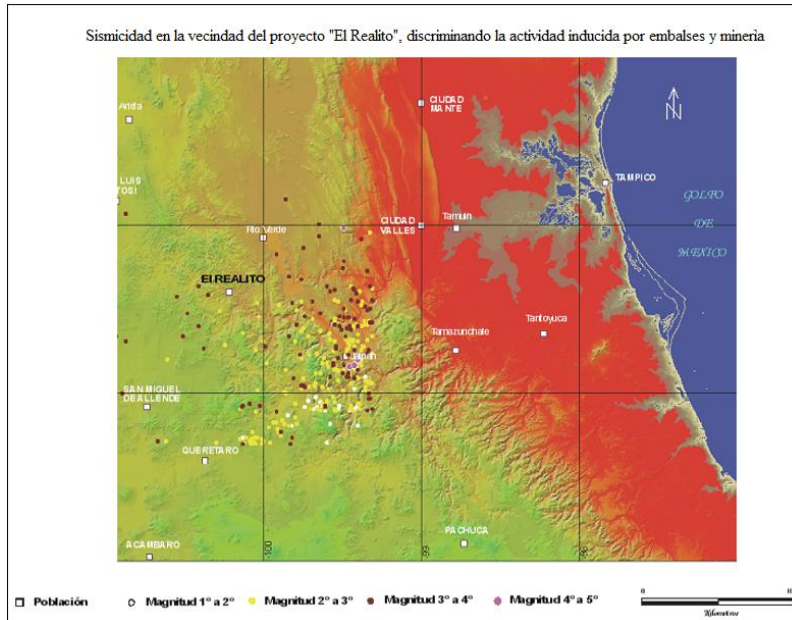


Fig. 20. CFE (2010). Ilustración. Sismicidad en la vecindad del proyecto “El Realito”, discriminando la actividad inducida provocada por embalses y minería.

Se calculó la aceleración sísmica máxima del terreno utilizando el sistema PRODISIS (PROgrama de Diseño SÍsmico) fue desarrollado como una herramienta de ayuda para la aplicación de las nuevas recomendaciones de diseño sísmico contenidas en el Capítulo de Diseño por Sismo del Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE (CDS-MDOC 2015). Originalmente, fue diseñado para obtener el valor de la aceleración a nivel del terreno rocoso, considerando que este varía a lo largo de todo el país, y para la construcción de espectros de diseño. Sin embargo, se incluyen módulos para facilitar la aplicación de algunos criterios contenidos en el Manual de Diseño de Obras Civiles, capítulo Diseño por Sismo. (Figura 21)

El valor obtenido es $a_0=0.051$, utilizado la Ecuación 1.

$$a_0 = (F_{nl}) * (F_s) (a_0^r) / \text{Gravedad} \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$$F_{nl}; F_s \geq 1$$

a_0 . Aceleración Máxima del Terreno

F_{nl} . Factor de no linealidad; Para terreno rocoso = 1

F_s . Factor del sitio; Para terreno rocoso = 1

a_0^r Aceleración máxima para terreno rocoso

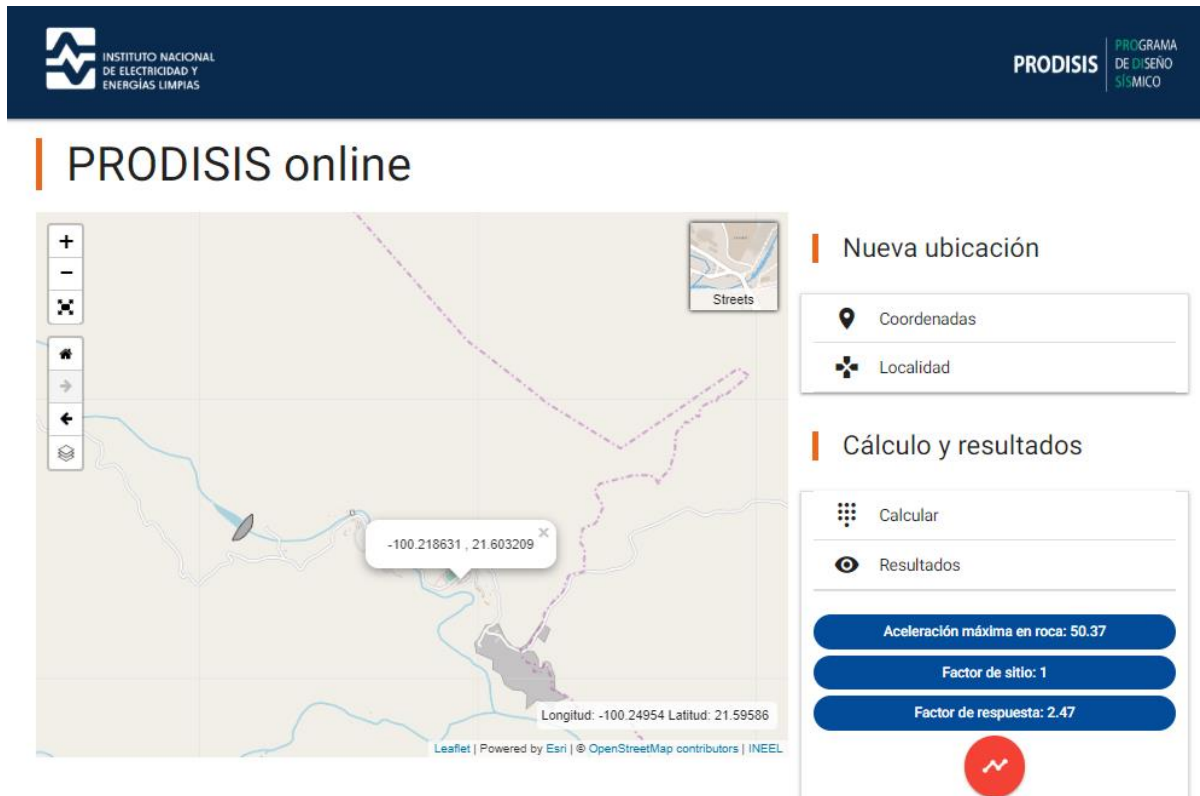


Figura 21. Resultado del análisis de los valores sísmicos Programa PRODISIS, en el área de la Presa El Realito, INEEL (2018).

CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS

Lo más importante de un estudio geotécnico es correlacionar toda la información topográfica, geológica y geofísica disponible del sitio con la información generada al evaluar el sitio de manera geotécnica utilizando todas las herramientas disponibles concluyendo con una interpretación adecuada y útil del comportamiento mecánico para el diseño en cada una de sus etapas de la obra civil a realizar.

Para las estimaciones iniciales de los parámetros de resistencia y deformabilidad del macizo rocoso se hace uso de las clasificaciones geomecánicas, que se realizan desde la etapa de exploración y son continuas durante el avance de la construcción de la obra, son criterios muy útiles para poder realizar una representación del comportamiento geomecánico de los macizos rocosos cuando existe una alteración del estado de esfuerzos por la construcción de la obra civil, tener una evaluación constante del macizo rocoso durante cada una de las etapas de la obra, permiten realizar un prediseño del proyecto, si es necesario sistemas de soporte, estabilización y reforzamiento adecuando para el macizo rocoso, es importante señalar que sus resultados no deben considerarse como definitivos, sino que, por lo contrario, deben enriquecerse con las mediciones y observaciones del personal conforme avanza las obras, debido a que tienen un carácter altamente empírico y se basan en lecturas de campo muy puntuales mediante la evaluación de afloramiento presentes en la zona y con datos de barrenos, por lo que extrapolar los resultados a la totalidad del macizo rocoso es algo muy difícil, pero los ensayos in situ y de laboratorio ayudan a obtener este resultado.

El macizo rocoso debe de dividirse en zonas donde sus características son comunes, puede iniciarse con una clasificación preliminar que se base en sus características geológicas como: litología, grado de alteración, grado de fracturamiento, entre otras características que sean muy evidentes y que zonifiquen el macizo de manera inicial, al desarrollarse la evaluación geotécnica se modificarán y en cada zona se evaluarán los aspectos geotécnicos con más detalle necesarios para poder clasificarla.

Realizar una clasificación geotécnica para describir la calidad de un macizo rocoso, tiene por objetivo utilizar un lenguaje establecido para que esta descripción al ser leída por las personas involucradas conciban al macizo de la misma forma que la persona que realizó el levantamiento geotécnico, los datos que se obtengan mediante medidas simples de las

características de la roca intacta y las discontinuidades presentes en ella deben ser suficientes estadísticamente para representar el comportamiento general del macizo rocoso y poder usar estos datos para programar una solución a la situación presente. Actualmente las clasificaciones más utilizadas para macizos rocosos son; Índice Geológico de Resistencia (GSI) de Marinos and Hoek (2000), Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989) y enfocado hacia la construcción de túneles se desarrolló un sistema de clasificación en el Instituto Geotécnico Noruego llamado índice Q desarrollado por Barton, los dos últimos utilizan el dato de clasificación geotécnica basada en la recuperación de núcleos desarrollado por Deere (1989).

Dentro del área de estudio existe un materiales tipo brecha que no cumple con las características para considerarse de manera geotécnica como un macizo rocoso por lo cual las clasificaciones antes mencionadas no puede ser utilizadas para su clasificación por lo que fue necesario el desarrollo de una metodología para realizar la caracterización geomecánica del material tipo brecha conocidos como *Bimrock* basada en la información disponible los artículos Medley, and Goodman, (1994), Medley, (1994, 1997, 2002) que se encuentran disponibles en la página web oficial bimrocks.com , así como el desarrollo de la metodología para realizar un logeo geotécnico para obtener datos que permitan la clasificación de los macizos rocosos con un valor de GSI basada en artículo *Quantification of the Geological Strength Index Chart* (Hoek et al. 2013).

2.1 Caracterizaciones geotécnicas previas

En el año 2001, CFE (Comisión Federal de Electricidad) realizó el “Estudio complementario de factibilidad geológica para la construcción de una presa sobre el Río Santa María, en el Estado de Guanajuato” con la finalidad de conocer a detalle las características del macizo rocoso en el área de la boquilla, se realizaron 5 barrenos de exploración en diámetro NQ con recuperación de muestras de núcleo con un total de 460,00 m. Tales barrenos están distribuidos de la siguiente manera: uno en el cauce, dos a la altura de la corona en ambas márgenes y otros dos a media ladera también en ambas márgenes; todos los barrenos se localizan a lo largo del eje propuesto para la cortina, utilizando los núcleos se clasificó la calidad de la roca según el criterio establecido por D. Deere, siendo esta la primera

clasificación geotécnica para la Riodacita del Carmen dando como resultado una calidad de regular a buena. (Tabla 1)

Barreno	Profundidad (m)	Recuperación (%)	RQD (%)	Calidad de ROCA
PSMR-1	90,00	98,88	88,67	Buena
PSMR-2(Margen Der.)	75,50	97,19	86,75	Buena
PSMR-3(Margen Izq.)	75,50	94,72	56,01	Regular
PSMR-4(Margen Der.)	109,00	98,47	89,65	Buena
PSMR-5(Margen Izq.)	110,00	96,90	73,66	Regular

Tabla 1. Promedio general de la recuperación y RQD obtenidos en cada barreno. CFE 2010.

Como parte de los trabajos realizados para la construcción de la presa se desarrolló por TYSSA (2008) un estudio de geofísica sísmica de refracción en el cauce del Río Santa María para apoyar en la evaluación geológico-geotécnica y determinar el espesor de la capa superficial que forman diversos materiales no consolidados y las rocas intemperizadas, localizando estructuras geológicas que puedan representar un riesgo para la obra y estimando las condiciones geomecánicas generales del macizo rocoso en forma cualitativa, para esto se colocaron 11 tendidos transversales al cauce de 61 metros de longitud, con un arreglo de 12 puntos de detección sísmica, con separaciones entre geófonos de 5 m sobre la horizontal, cada tendido se realizó con tres puntos de tiro, uno al centro del tendido y dos en sus extremos dando como resultado tres unidades geofísicas que describen la calidad del macizo rocoso. (Anexo 1)

- 1) Depósitos Aluviales (E1). Este estrato corresponde al más superficial, con velocidades de onda de 264 a 446 m/s con espesores máximos de 4.00 m.
- 2) Roca Sana Poco Fracturada (E2). Esta unidad geosísmica corresponde a una roca de buena calidad con velocidades de onda que van de 2,404 a 4,423 m/s, y tiene un espesor promedio de unos 11.00 m en margen derecha.
- 3) Roca Sana Fracturada Masiva (E3). Esta unidad corresponde a una roca sana cuyas velocidades que varían entre 3,794 a 5,315 m/s y se detecta a una profundidad promedio de 15.00 m en cauce.

En el año 2009 la compañía GEOTECNIA S.C., realizó una campaña de barrenación para la compañía CONSTRUCCIONES ZUGUSA S.A. DE C.V., el estudio lleva el nombre de

“Perforación con diámetro NQ en el eje de la cortina y canal de desvío en la presa de almacenamiento “El Realito”, ubicada sobre el Río Santa María, Municipio de San Luis de la Paz, Estado de Guanajuato”, el resumen de los resultados de calidad de la roca obtenidos por GEOTECNIA S.C. , se presenta la Tabla 2.

REGISTRO DE RECUPERACIÓN Y RQD							
SONDEO	PROFUNDIDAD	X	Y	Z	DE – HASTA	RECUPERACIÓN	RQD
						PROMEDIO %	PROMEDIO %
1B	53.45	372 064.643	2 389 859.342	1 058.143	0.0 - 53.45	92%	81%
3	53.25	372 069.059	2 389 864.773	1 057.872	0.0 - 53.25	83%	63%
4	53.35	372 071.583	2 389 867.877	1 058.210	0.0 - 53.35	90%	60%

Tabla 2. Registro de recuperación y RQD. Datos Geotecnia S.C. para ZUGUSA S.A. DE C.V. 2009.

En el año 2011, CONAGUA (Comisión Nacional de Agua) con el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí realizaron el Modelo Geológico - Geotécnico y Geofísico en este trabajo se realizaron tres barrenos y se clasificó según el criterio establecido por D. Deere, definiendo la calidad de la calidad de la Riodacita del Carmen como Regular. (Tabla 3)

Barreno	Recuperación (%)	RQD (%)	Calidad de ROCA
Barreno 4.	86.27%	56.29%	Regular
Barreno 5.	97.57%	69.52%	Regular
Barreno 6	85.67%	53.20%	Regular

Tabla 3. Promedio general de la recuperación y RQD obtenidos en cada barreno. CONAGUA 2011.

2.2 Aspectos a evaluar del macizo rocoso

Se define el término de macizo rocoso como el conjunto de discontinuidades y roca intacta por lo que es un medio tipo DIANE (Discontinuo, Inhomogéneo, Anisótropo, No- Elástico) cuyas propiedades resistentes y deformaciones no pueden ser medidas directamente en un laboratorio, por lo que los resultados de los ensayos en laboratorio y los ensayos in situ son de gran diferencia. Ésta diferencia es un reto que se plantea en toda investigación geotécnica de un macizo rocoso y por ello se ha creado la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas

(ISRM) un grupo encargado de valorar este efecto escala en la resistencia, deformabilidad y tensiones naturales en un macizo rocoso, los factores que influyen en estas propiedades son:

a) Factores relacionables con la calidad geotécnica del macizo rocoso.

La resistencia del macizo depende del número de discontinuidades (fracturamiento, planos de estratificación) y las características de las mismas así como la presencia de agua, estos factores se evalúan con los métodos RMR y GSI, la abundancia de discontinuidades en un macizo rocoso con rellenos débiles y superficies lisas y además la presencia de agua en forma estancada, en forma de humedad generando presión, lo harán un macizo menos resistente.

b) Factores relacionados con las características litológicas del macizo rocoso.

Los factores que determinan la resistencia de la roca matriz pueden ser; la composición mineralógica, el tamaño de los cristales o granos, su homogeneidad o heterogeneidad, la porosidad.

c) Factores relacionados con esfuerzos y procesos constructivos.

La modificación del estado de esfuerzos al realizar una obra de ingeniería puede ocasionar inestabilidad por pérdida de resistencia del macizo rocoso, la reacción es diferente cuando se realizan excavaciones o cuando se aplican cargas sobre él.

2.2.1 Roca intacta

El valor de resistencia a la compresión simple de la roca intacta puede evaluarse en el laboratorio de forma directa con un ensayo de carga puntual o de forma indirecta con una prueba indirecta (prueba brasileña) las muestras de roca intacta ofrecen un resultado más representativo del valor de la roca matriz y en muestras anisótropas la resistencia dependerá de la orientación de los planos así como la orientación de la carga con respecto a estos planos, la resistencia de las muestras anisótropas es menor. Por otro lado existen actualmente tablas desarrolladas por Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) y por investigadores en esta misma área con las cuales puedes hacer estimaciones aproximadas para clasificar o determinar valores de las propiedades de la roca intacta, para este trabajo se utilizó la tabla “Estimación de la resistencia a compresión simple de suelos y rocas a partir de índices de campo, (ISRM) 1981”, (Tabla 4), además de los resultados de los ensayos realizados a 9 muestras de los núcleos de 3 barrenos realizados en el eje de la cortina por TYSSA (Anexo 2) durante el periodo de exploración, resultado de valor promedio de peso específico para la Riodacita del Carmen fue 2.5 T/m^3 .

CLASE	DESCRIPCIÓN	IDENTIFICACIÓN EN EL CAMPO	APROXIMACIÓN AL RANGO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (Mpa)
S1	Arcilla muy blanda	Un puño penetra fácilmente varios cm	< 0.025
S2	Arcilla débil	Un dedo penetra fácilmente varios cm	1.025 - 0.05
S3	Arcilla firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo.	0.05 - 0.1
S4	Arcilla rígida	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo.	0.1 - 0.25
S5	Arcilla muy rígida	Con cierta presión puede marcarse con la uña	0.25 - 0.5
S6	Arcilla dura	Se marca con dificultad al presionar con la uña	> 0.5
R0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña	0.25 - 1.0
R1	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo. Con una navaja se talla fácilmente	1.0 - 5.0
R2	Roca blanda	Se talla con dificultad con una navaja. Al golpear con la punta del martillo se producen pequeñas marcas	5.0 - 25
R3	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo	25 - 50
R4	Roca dura	Se requiere más de un golpe con el martillo para fracturarla	50 - 100
R5	Roca muy dura	Se requiere muchos golpes con el martillo para fracturarla	100 - 250
R6	Roca extremadamente dura	Al golpearlo con el martillo solo saltan esquirlas.	> 250

Tabla 4. Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) 1981. Estimación aproximada y clasificación de la resistencia a compresión simple de suelos y rocas a partir de índices de campo.

También se utilizó el esclerómetro o martillo de Schmidt, este ensayo permite estimar de forma aproximada la resistencia a la compresión simple mediante una sencilla correlación, siendo aplicable fundamentalmente a matriz rocosa, pero también a discontinuidades. Su uso está muy extendido dada la facilidad y rapidéz de utilización. El esclerómetro consiste en un pequeño aparato metálico de geometría cilíndrica que dispone de un muelle en su interior y de una punta retráctil, la cual al ser presionada contra la roca hace que el muelle se dispare, la superficie a ensayar se limpia eliminando la pátina de roca meteorizada y se busca que esté libre de discontinuidades, posteriormente se coloca en martillo de forma perpendicular al plano de ensayo y se presiona hasta que salta el muelle, a partir de los datos del rebote (de cada 10 valores se eliminan los cinco menores y se obtiene un promedio de los 5 restantes) en función de la inclinación del martillo se entra con el valor del rebote y la densidad en el grafico para cálculo de la resistencia a la compresión simple con el esclerómetros (Figura 22), es necesario conocer el valor de la densidad de la roca (González de Vallejo, 2001).

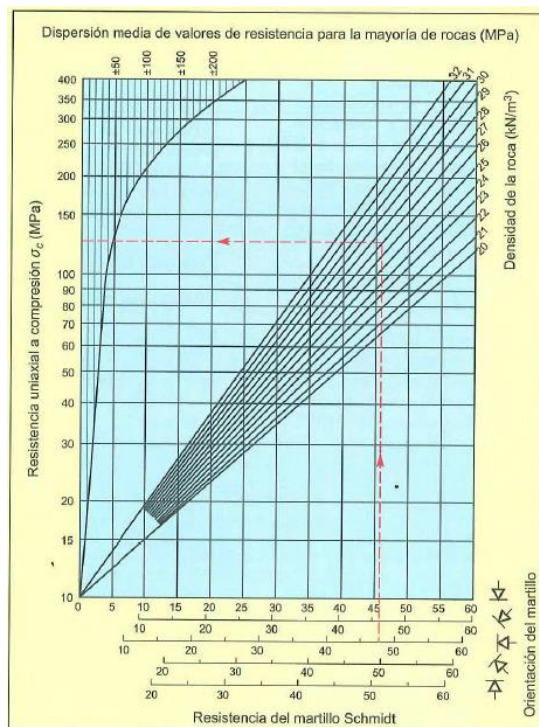


Figura 22. (González de Vallejo, 2001) Gráfico para cálculo de la resistencia a la compresión simple con el esclerómetro.

García-Sánchez (2013), publica la propuesta de valores de resistencia a la compresión simple de las rocas según el valor de calidad de la roca por el sistema de clasificación geotécnica RMR. (Tabla 5)

CALIDAD RMR	RESISTENCIA σ_c Mpa (intacta)
< 20	0 a 5
20 - 30	2
30 - 40	2 a 4
40 - 50	4 a 7
50 - 60	7
60 - 70	7 a 12
70 - 80	12
80 -100	12 a 15

Tabla 5. Propuesta de una escala de valores de resistencia a la compresión simple de la roca intacta. Tomado de García-Sánchez (2013).

2.2.2 Evaluación de las discontinuidades

Las discontinuidades se definen como cualquiera de los planos de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de matriz rocosa de un macizo. Generalmente, la resistencia a la tracción de estos planos es muy baja o nula. Su comportamiento mecánico queda caracterizado por la resistencia al corte que posee su material de relleno (Barton,1978). Estas se agrupan en familias de juntas, planos de estratificación, superficies de foliación y fallas. Durante el reconocimiento geológico resulta fundamental considerar los aspectos que son necesarios para cumplir con una descripción completa de cuantos y tipos de familias de discontinuidades presentes y si éstas se ven interrumpidas en su longitud por otro grupo de discontinuidad.

En este trabajo la evaluación de todas las discontinuidades se realizó utilizando la tabla GUIA PARA EVALUAR LAS CONDICIONES DE LAS JUNTAS A Jc 89 (Join Condition) (Tabla 6), definida por Bieniawski (1989) dentro del sistema de clasificación RMR (*Rock Mass Rating*), la cual incluye los siguientes aspectos:

- a) Orientación: es la geometría de la discontinuidad en el espacio y comúnmente es descrito por su buzamiento (dip) y la dirección de buzamiento (dip direction).
- b) Espaciamiento: corresponde a la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes.

- c) Persistencia: es la extensión en área o tamaño de una discontinuidad observada en una exposición.
- d) Rugosidad: es la aspereza o irregularidad de la superficie de la discontinuidad.
- e) Apertura: corresponde a la separación entre las paredes rocosas de una discontinuidad, en la que el espacio intermedio está lleno de aire o agua o algún relleno.
- f) Relleno: son los materiales que se encuentran dentro de la discontinuidad y que suelen ser más débiles que la roca madre.
- g) Intemperización.

En este trabajo se incluyeron los datos del Levantamiento Geológico a detalle de las Galerías y de la obra de desvío de la Presa “El Realito” realizado en el año 2011 por la empresa TECHNoproject, S.A. DE C.V. Para CONAGUA, Delegación San Luis Potosí, además de los núcleos de 5 barrenos (460 m) de exploración geotécnica realizados sobre el eje de la cortina para realizar un logueo geotécnico.

GUÍAS PARA UNA EVALUACIÓN DETALLADA DEL PUNTAJE ASOCIADO A *Jc*

Parámetro de la Estructura	Condición o Características & Puntaje o Rating				
Persistencia o Extensión (m)	< 1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	> 20
	6	4	2	1	0
Apertura o Espesor (mm)	0	< 0.1	0.1 a 1	1 a 5	> 5
	6	5	4	1	0
Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Algo Rugosa	Lisa	Pulida
	6	5	3	1	0
Material de Relleno	Ninguno	Duro < 5 mm	Duro ≥ 5 mm	Blando < 5 mm	Blando ≥ 5 mm
	6	4	2	2	0
Intemperización o Alteración	Fresca	Algo Alterada	Alteración Moderada	Muy Alterada	Descompuesta
	6	5	3	1	0

Tabla 6. Descripción de las características de las discontinuidades *Jc*. Sistemas de Clasificación RMR.

Definiendo ambos parámetros a evaluar en un macizo rocoso se hizo una caracterización geotécnica de cada una de las litologías presentes en el área designada, donde las dos unidades superiores estratigráficamente Ignimbrita El Órgano y Toba Álamos se evaluaron mediante ventanas geotécnicas en los afloramientos presentes en la zona y a lo largo de la carretera al Realito (margen derecha), que después de su construcción se obtuvieron grandes cortes de talud que permitieron una evaluación más completa, mientras que la unidad inferior a estas se evaluó en los afloramientos de la margen derecha y realizando un logueo geotécnico en los núcleos disponibles para lo cual se desarrolló un procedimiento de para obtener un valor de

GSI mediante la fórmula establecida por Hoek et al. (2013) que se desarrolló con el objetivo de obtener datos cuantificables. Además, se utilizó las descripciones geológicas de las discontinuidades realizadas por personal de TECHNOPROJET, S.A DE C.V, (2011) en el proyecto “Levantamiento Geológico a detalle de las Galerías, Presa El Realito”.

Por otro lado en el área de estudio se encuentra la “Brecha El Realito” la cual no se clasifica utilizando los métodos para evaluar a un macizo rocoso ni tampoco los métodos utilizados para evaluar un suelo, sin embargo debido al tamaño de los bloques y las características necesarias para clasificar este material como un *Bimrock* las cuales posteriormente serán presentadas en el apartado de clasificación geotecnia de este material; se desarrolló en mecánica de rocas la clasificación de estas mezclas la cual inició por parte de Raymonds quien trabajó con los Melange que se definen como “Cuerpo de roca que se compone de bloques de rocas de diferentes tamaños embebidos en matriz granular” Raymonds,(1984) de las zonas de subducción que son los más abundantes y complejos, y en ese mismo año en un intento por comprender la influencia del tamaño y la distribución de los bloques de rocas en un *Bimrock* se iniciaron las investigaciones mediante modelos físicos por Lindquist & Goodman quienes realizaron un estudio de más de 100 especímenes con diferentes porcentajes y ángulos de bloques en cada uno de ellos. El termino *Bimrock* fue creado por Edmund W. Medley (1994), el cual significa, en inglés, *block-in-matrix rocks* y su traducción al español es bloques de rocas en matrices para designar a una mezcla de bloques de rocas geotécnicamente significantes dentro de una matriz más fina y débil, incluir el concepto geotécnicamente significantes en esta definición significa que estos bloques tienen un comportamiento significativo y diferente a la matriz dentro de esa masa rocosa, es por esto que definir su volumen dentro de la misma es de total importancia ya que de esto depende su comportamiento ante el cambio del estado de esfuerzos al que encuentra de forma natural, Mendley también expone que cuando el porcentaje de bloques es mayor a un 25% en un *Bimrock* influye de gran forma en el ángulo de fricción y la cohesión del material matriz, el contacto bloque con bloque se puede presentar cuando el porcentaje es mayor al 60% por lo que los parámetros de resistencia del *Bimrock* dependen directamente de las características físicas de los mismos, por esto la clasificación geotécnica de esta unidad nos arroja como resultado parámetros de resistencia de un suelo como son ángulo de fricción y cohesión así como resistencia a la compresión simple.

2.3 Caracterización Geotécnica Ignimbrita El Órgano

2.3.1 Método de clasificación RMR

El método de clasificación de Bieniawski (1989) se desarrolló para estimar la fortificación de túneles en función del índice RMR de calidad geotécnica definido como:

$$\text{RMR} = P(\text{UCS}) + P(\text{RQD}) + P(s) + P(\text{JC}) + P(\text{WC}) \dots \dots \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

P (x): Puntaje asociado al parámetro x.

P (UCS): Resistencia en compresión uniaxial de la roca “íntacta”, y el puntaje asociado a la misma puede variar de 0 (si $\text{UCS} < 1 \text{ MPa}$) a 15 (si $\text{UCS} > 250 \text{ MPa}$).

P (RQD): Designación de la calidad de la roca definida por Deere et al. (1989) y el puntaje asociado a la misma puede variar de 3 (si $\text{RQD} < 25\%$) a 20 (si $90 < \text{RQD} < 100$).

P (s): Espaciamiento entre las estructuras, y el puntaje asociado al mismo puede variar de 5 (si $s < 60 \text{ mm}$) a 20 (si $s > 2 \text{ m}$).

P (JC): Condición de las estructuras, y el puntaje asociado a la misma puede variar de 0 (en el caso de estructuras continuas y abiertas más de 5 mm, o con rellenos arcillosos blandos de potencia mayor a 5 mm) a 30 (en el caso de estructuras discontinuas, muy rugosas, cerradas y sin alteración en su roca de caja). (Figura 23)

P (WC): Condición de aguas, y el puntaje asociado a la misma puede variar de 0 (en el caso de estructuras con flujo de aguas que se traduce en un gasto de más de 125 l/min en un tramo de túnel de 10 m de longitud, o donde la presión del agua excede el 50% del esfuerzo principal mayor) a 15 (en el caso de estructuras completamente secas). Las tablas de evaluación del método han cambiado desde su introducción en este trabajo se utilizó la versión de 1989.

Siguiendo la descripción geotécnica la Ignimbrita El Órgano se describe como un macizo rocoso que presenta tres sistemas de discontinuidades con paredes algo alteradas su apertura no supera 1 cm, superficies algo rugosas, se puede observar en dos familias relleno de arcillas en las partes superficiales de los taludes por arrastre de las aguas pluviales, la separación entre las discontinuidades es de 6-20 cm y persisten a lo largo de los taludes donde se evaluaron los

cuales superan la altura de 10 m, no se observó presencia de agua en ninguno de los afloramientos, el promedio de RQD es de 60%, la resistencia a la compresión simple de la roca intacta calculada con el martillo de Schmidt es de 50 MPa, con estas características el resultado de la clasificación RMR la sitúa como una roca de calidad REGULAR. En la Tabla 7 se resumen los datos anteriormente mencionados.

ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA, MÉTODO RMR (ROCK MASS RATING)
 Bieniawski, 1989
 Ignimbrita El Órgano

CELDAS GEOTÉCNICAS	ANCHO(m)	WGS 84			RQD %
		X	Y	Z	
PCR-1	50	371248.849	2389773.616	1180.75	60
PCR-2	50	371324.525	2389829.782	1193.55	65
PCR-3	50	371434.683	2389752.283	1179.88	25
PCR-4	30	371475.86	2389731.954	1186.66	20
PCR-5	50	371534	2389678.6	1201.3	50
PCR-6	50	371556.2	2384631.36	1198.89	50
Valores del Martillo de Schmidt					
DENSIDAD DE LA ROCA (Kg/cm ²)	MARTILLO	ORIENTACIÓN	UCS(Mpa)	PUNTAJE RMR	
2.7	30	90° (Perpendicular)	50	7	
JC: CONDICIONES DE LAS JUNTAS					
Descripción de la discontinuidad	S1	S2	S3		
ESPACIAMIENTO (cm)	60 a 20	< 6	60 a 20		
PERSISTENCIA (m)	3 a 10 m	10 a 20 m	10 a 20 m		
APERTURA (mm)	1 a 5	> 5	1 a 5		
Tipo de relleno/ condición	Blando	Ninguno	Blando		
ALTERACIÓN	Algo Alterada	Fresca	Algo Alterada		
RUGOSIDAD	Algo Rugosa	Plana	Algo Rugosa		
CELDAS GEOTÉCNICAS	RMR	CALIDAD			
PCR-1	55	REGULAR			
PCR-2	53	REGULAR			
PCR-3	39	MALA			
PCR-4	39	MALA			
PCR-5	53	REGULAR			
PCR-6	53	REGULAR			

CALIDAD
REGULAR

Tabla 7. Clasificación de acuerdo con Bieniawski (1989), ROCK MASS RATING (RMR)

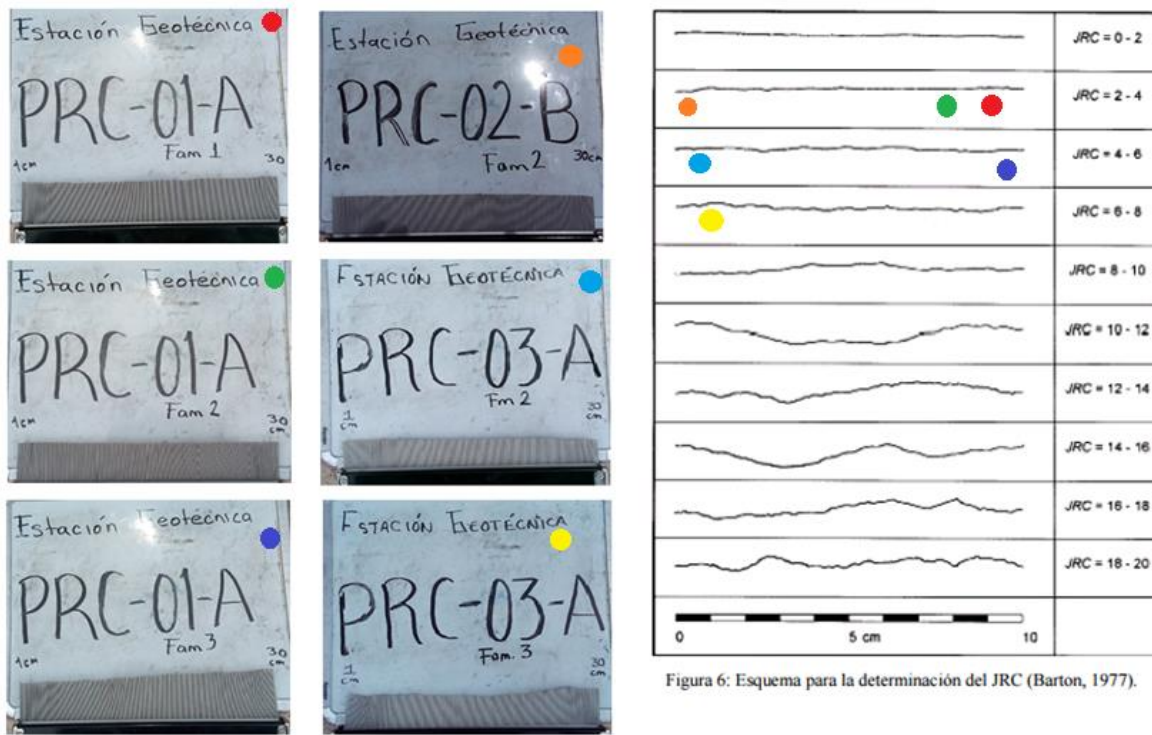


Figura 6: Esquema para la determinación del JRC (Barton, 1977).

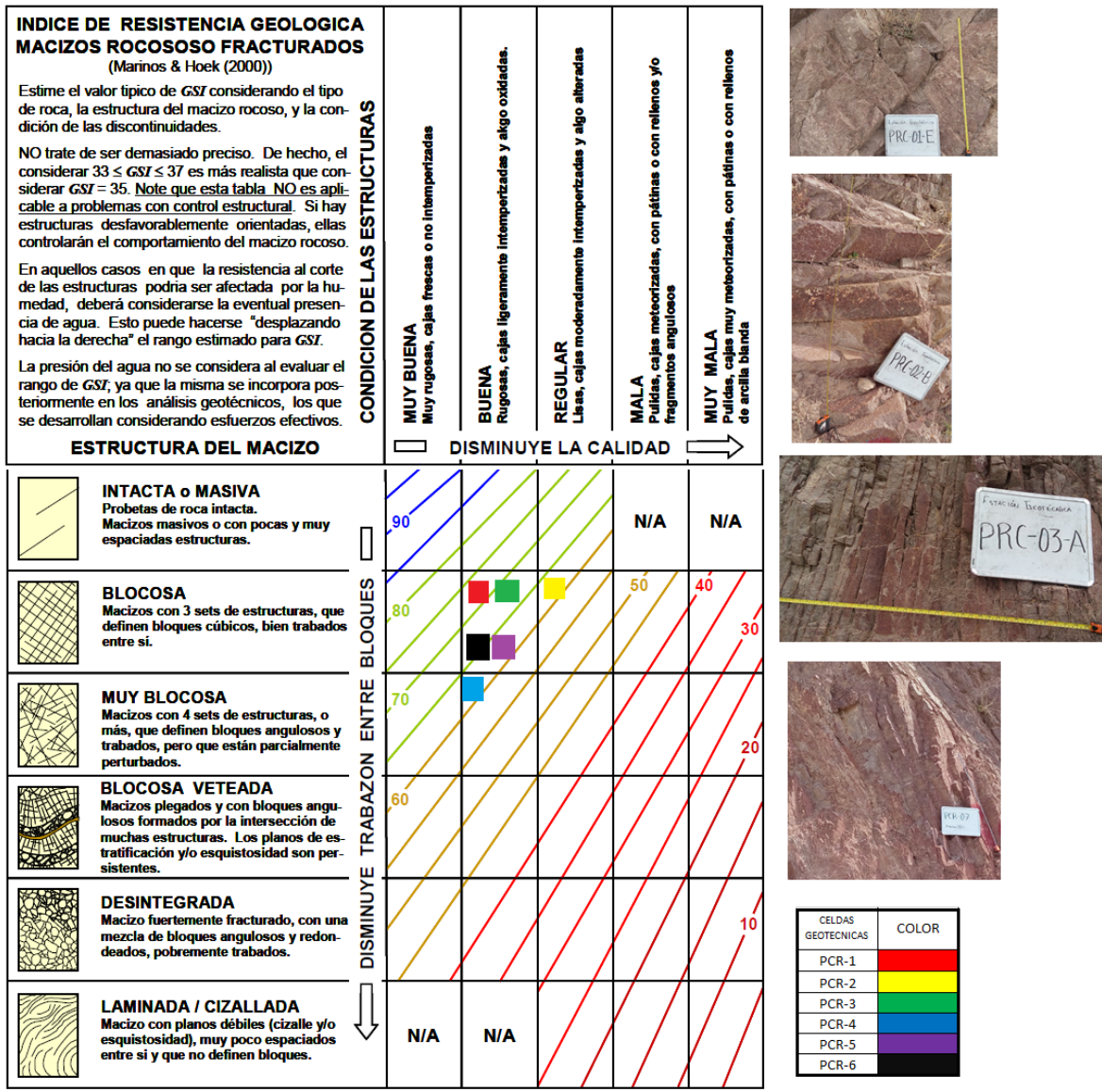
Figura 23 . Rugosidad de las superficies de las discontinuidades medidas con el peine de Schmidt, Ignimbrita El Órgano.

2.3.2 Método de Índice GSI

El índice de resistencia geológica (GSI), fue desarrollado por Marinos and Hoek (2000) para subsanar los problemas detectados con el uso del índice RMR al evaluar la resistencia de macizos rocosos según el criterio generalizado de Hoek- Brown. Este índice de calidad geotécnica se determina en base a dos parámetros que definen la resistencia y la deformabilidad de los macizos rocosos. (Figura 24)

RMS : “Estructura del macizo rocoso” definida en términos de blocosidad y grado de sujeción”.

JC: Condición de las estructuras (discontinuidades) presentes en el macizo rocoso.



Calidad Muy Buena:	$80 \leq GSI < 100$	$\rightarrow \Delta GSI \approx \pm 5$
Calidad Buena:	$60 \leq GSI < 80$	$\rightarrow \Delta GSI \approx \pm 5$
Calidad Regular:	$40 \leq GSI < 60$	$\rightarrow \Delta GSI \approx \pm 5$
Calidad Mala:	$20 \leq GSI < 40$	$\rightarrow \Delta GSI \approx \pm 6$
Calidad Muy Mala:	$0 \leq GSI < 20$	$\rightarrow \Delta GSI \approx \pm 8$

Figura 24. Carta para evaluar el índice de resistencia geológica en macizos rocosos fracturados (tomada de Marinos and Hoek 2000).

2.4 Caracterización Geotécnica Toba Álamos

2.4.1 Método de clasificación RMR

Siguiendo la descripción geotécnica la Toba Álamos se describe como; macizo rocoso que presenta tres sistemas de discontinuidades (dos sistemas de fracturamiento principales y la pseudoestratificación, las paredes se encuentran sanas pero en la pseudoestratificación algo alterada, podemos encontrar una capa de relleno blando (arcilla) que puede llegar hasta 10 cm, en los otros dos sistemas la apertura no supera 1 cm y no tiene relleno, son superficies algo rugosas, la separación entre las discontinuidades es de 6-20 cm y persisten a lo largo de los taludes donde superan la altura de 10 m no se observó presencia de agua en ninguno de los afloramientos, el promedio de RQD es de 60%, la resistencia a la compresión simple de la roca intacta calculada con el martillo de Schmidt es de 45 MPa, con estas características el resultado de la clasificación RMR la sitúa como una roca de calidad REGULAR, En la Tabla 8 se resumen los datos anteriormente mencionados.

ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA, MÉTODO RMR (ROCK MASS RATING)
 Bieniawski, 1989
 Toba Álamos

CELDAS GEOTÉCNICAS	ANCHO(m)	WGS 84			RQD %
		X	Y	Z	
PCR-11	30	371725	2389439	1121	75
PCR-12	30	371740	2389330	1197	65
PCR-13	50	371676	2389436	1127	80

Valores del Martillo de Schmidt				
DENSIDAD DE LA ROCA (Kg/cm ²)	MARTILLO	ORIENTACIÓN	UCS (Mpa)	PUNTAJE RMR
2.4	30	90° (Perpendicular)	45	4

JC: CONDICIONES DE LAS JUNTAS			
Descripción de la discontinuidad	S1	S2	Pseudo
ESPACIAMIENTO (cm)	60 a 20	60 a 200	60 - 100
PERSISTENCIA (m)	10 a 20 m	10 a 20 m	20 m
APERTURA (cm)	0	< 0.5	10
Tipo de relleno/ condición	0	Blando (Arcilla)	Blando (Arcilla)
ALTERACIÓN	Fresca	Fresca	Algo Alterada
RUGOSIDAD	Algo Rugosa	Muy rugosa	Rugosa

SIN PRESENCIA DE AGUA	
Valor RMR	15

CELDAS GEOTÉCNICAS	RMR	CALIDAD
PCR-11	52	REGULAR
PCR-12	50	REGULAR
PCR-13	39	MALA

CALIDAD
REGULAR

Tabla 8. Clasificación de acuerdo con Bieniawski (1989), ROCK MASS RATING (RMR)

2.4.2 Método de Índice GSI

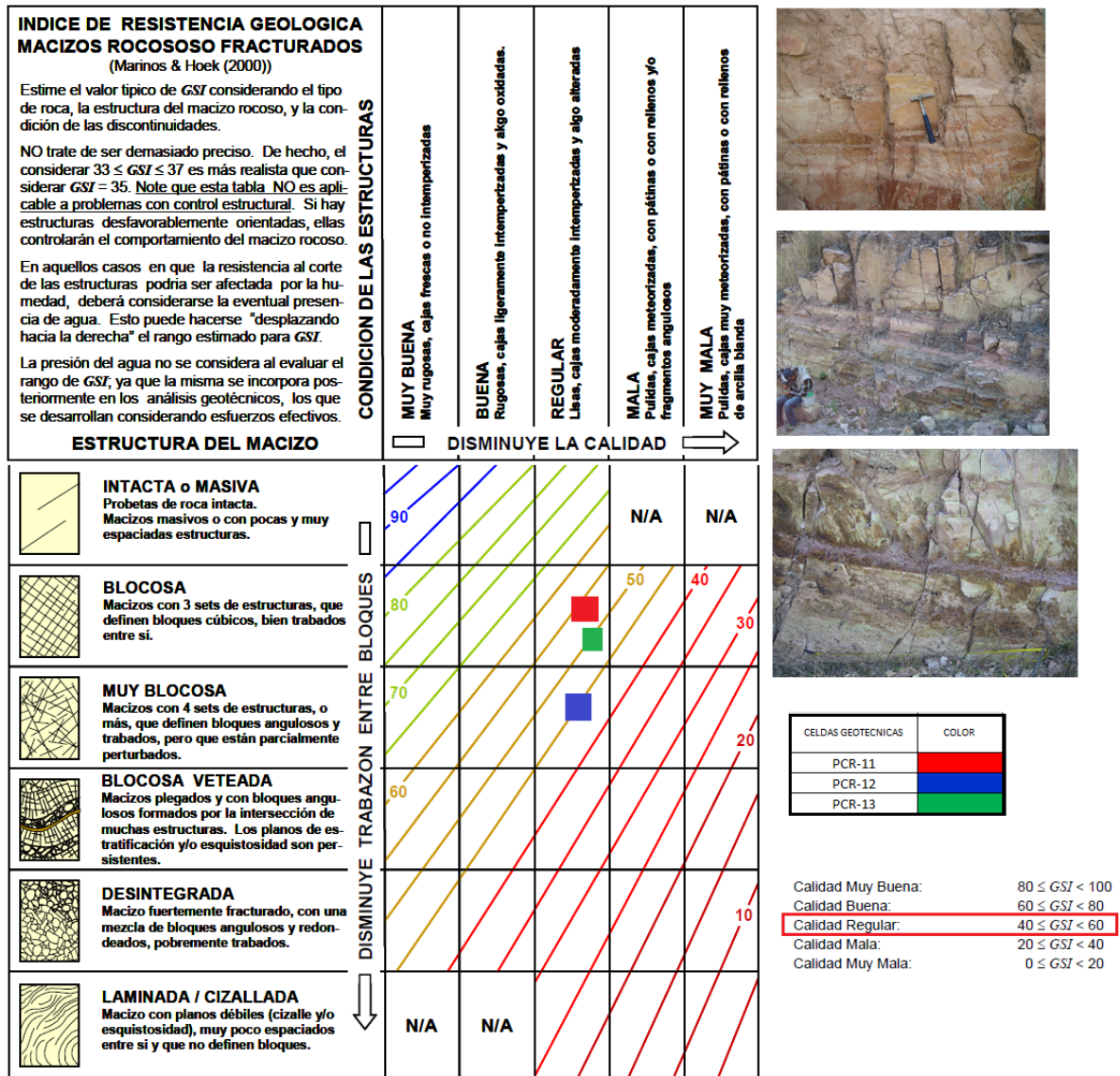


Figura 25. Carta para evaluar el índice de resistencia geológica en macizos rocosos fracturados (tomada de Marinos and Hoek 2000).

2.5 Caracterización Geotécnica Riodacita Del Carmen

2.5.1 Logueo Geotécnico

Los sondeos de investigación usando la herramienta de barrenación a diamante son la técnica de exploración más puntual del sitio, dentro de sus principales ventajas se encuentran poder obtener núcleos de perforación (muestras) a lo largo de todas las formaciones rocosas que se atraviesan, realizar ensayos in-situ e instalar dispositivos de medición (instrumentación). La descripción de los núcleos de barrenación evaluando las características necesarias para el análisis geotécnico del sitio se conoce como “Logueo geotécnico” para realizarlo es necesario definir el tipo de datos a identificar y la forma de obtenerlos de manera que se pueda garantizar la calidad de los mismos. Actualmente no existe una normativa para la descripción geotécnica de los núcleos, generalmente se hace por experiencia del personal encargado (geólogo o geotecnista) pero es importante definir una metodología que permita obtener la información de una forma sencilla y ordenada.

Para este trabajo de tesis se solicitó a la división de CONAGUA de San Luis Potosí acceso a los núcleos de los barrenos realizados en el área para realizar un logueo geotécnico y obtener la información necesaria para la clasificación geotécnica utilizando el método Geological Strength Index (GSI) propuesto por Hoek et al. (2013), que se desarrolló con el objetivo de obtener datos cuantificables que se debe evaluar por el personal responsable, de realizar este logueo, fue necesario establecer un procedimiento mediante una HOJA DE LOGUEO GEOTÉCNICO (Tabla 9) más completa con la cual se trabajó con tres de los barrenos realizados por Geotecnia S.C. los cuales se encuentran en el cauce del Río Santa María, y un situados en la margen izquierda que se realizó para colocar un piezómetro llamado BNO 5 M. con una longitud de 90 m (Figuras 26 y 29), el diámetro de los núcleos utilizados es NQ= 5.6 cm lo que cumple con la recomendación de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas.

Programa: Maestría en Ciencias en Geología Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.															
BARRENO		FECHA								PROYECTO					
UBICACIÓN		LONGITUD								LITOLOGIA					
INCLINACION		LOGEO													
INTERVALO		Distancia	REC	Distancia	RQD	N° Fracturas				Apertura	Material de relleno	CONDICION PAREDES	RUGOSIDAD	Persistencia o Extensión	SEPARACION FRACTURAS
DE	HASTA					%	%	%	0-30°						
metros (m)	metros (m)					Número/dominio	Número/dominio	Número/dominio	Número/dominio	cm				metros	cm

Tabla 9. Hoja de logeo geotécnico, incluye los parámetros para evaluar las condiciones de las juntas.

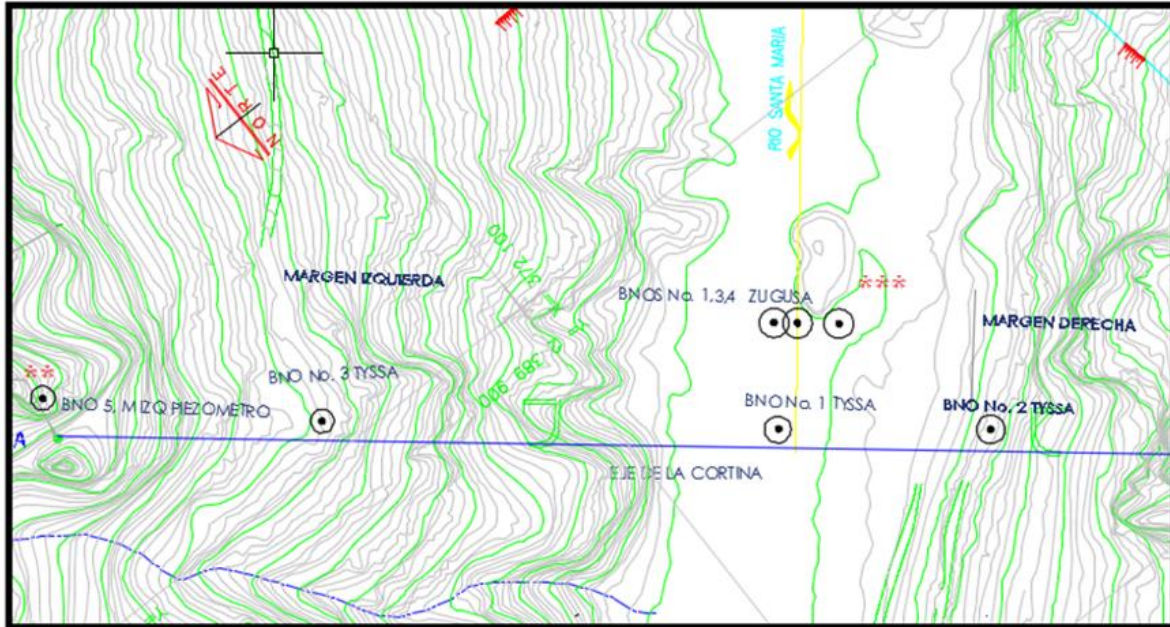


Fig. 26. Plano de ubicación de barrenos BNO 1, BNO 3, BNO 4, BNO 5 IZQ. Modificado de TYSSA (2009).

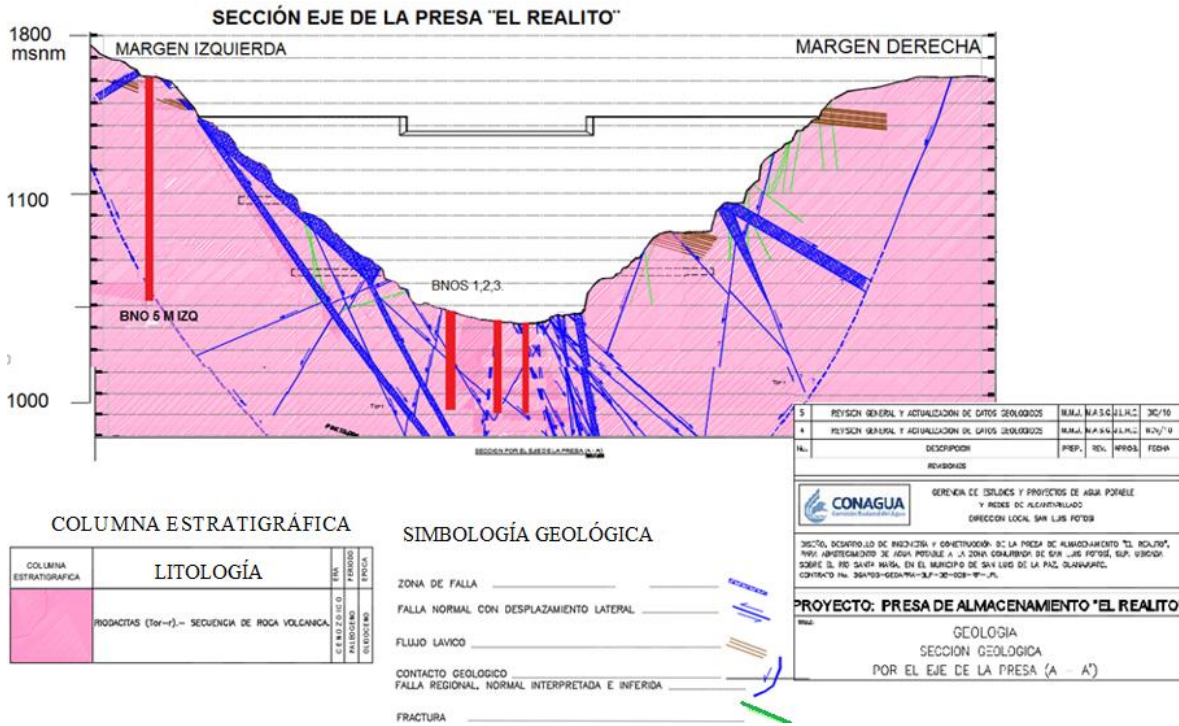


Fig. 27. Sección Eje de la presa El Realito con ubicación de barrenos BNO 1, BNO 3, BNO 4, BNO 5 IZQ. Tomado de CONAGUA (2010). Modificado.

En las litologías clasificadas anteriormente se abordó el método GSI y se mencionó que este valor depende de la percepción de quien realiza la clasificación lo cual lo expone a una gran variabilidad de resultados ante esto Hoek et al (2013), mediante la publicación del artículo *Quantification of the Geological Strength Index Chart*, plantean la necesidad de que el valor de GSI sea más cuantitativo utilizando los datos del logueo geotécnico y obtener ese valor mediante la Ecuación 3 en la cual se relacionan dos valores:

- A) Índice de Calidad de la Roca (RQD)
- B) Descripción de las discontinuidades J_c que se presenta en el índice RMR (Bieniawski, 1989).

$$GSI = 1.5 J_{Cond}89 + RQD/2..... Ecuación 3. \quad (\text{Hoek et. al, 2013})$$

A) Índice de Calidad de la Roca (RQD)

El Índice de Calidad de la Roca RQD (*Rock Quality Designation*) es un método descrito por Deere en 1966 que establece la calidad de la roca de manera cuantitativa, directamente de los núcleos, donde se obtiene el porcentaje de medida de los fragmentos de núcleos sanos mayores a 10 cm con respecto a 1 metro de longitud (Figura 28), descartando los fragmentos que no cumplen con las características (Figura 29), y considerando las siguientes limitaciones publicadas por Palmstrom (2005) :

- RQD = 0, puede dar cero cuando se produce una intersección conjuntas es menor de 10 cm o menos, mientras que por el contrario si esta la distancia es de 11 cm o más, el RQD = 100, lo clasifica totalmente contrario por algunos centímetros. (Figura 30).
- Otro inconveniente es que el RQD no proporciona información de las piezas del núcleo <10 cm excluidas, es decir, no importa si las piezas descartadas son similares a los materiales o piezas de roca fresca de hasta 10 cm de longitud.
- El valor de RQD depende de la dirección del barrenos con respecto a la dirección de las familias de discontinuidades, aunque se trate del mismo macizo rocoso.

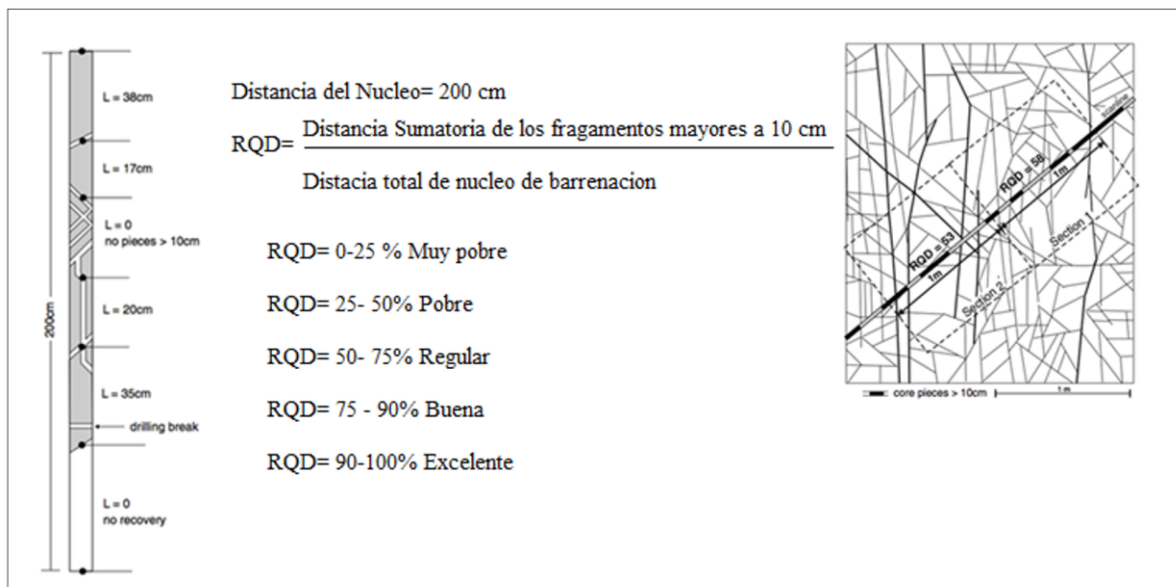


Figura 28. Procedimiento para la medición del RQD (Deere, 1989)

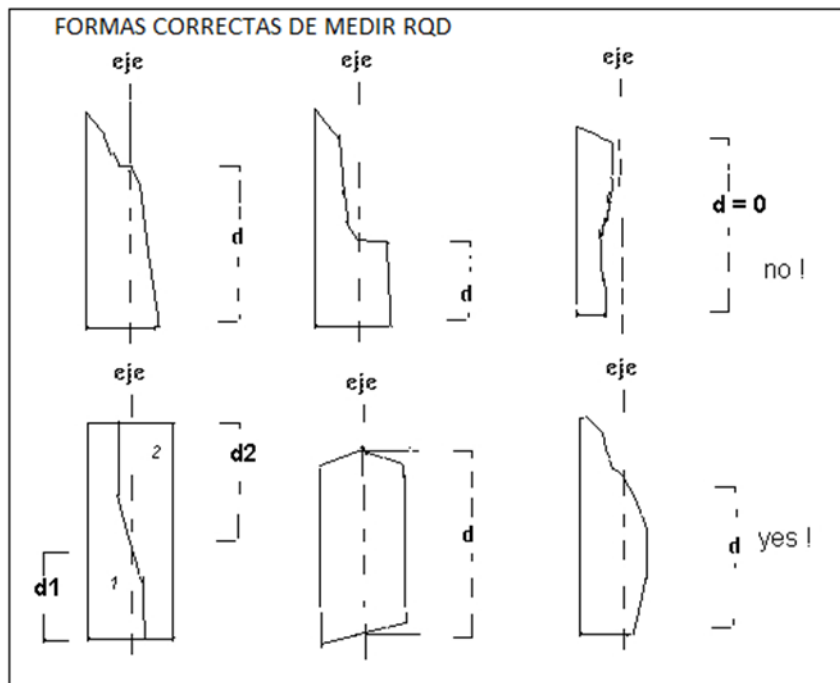


Figura 29. Formas correctas para medir RQD (Mariscal, 2014)

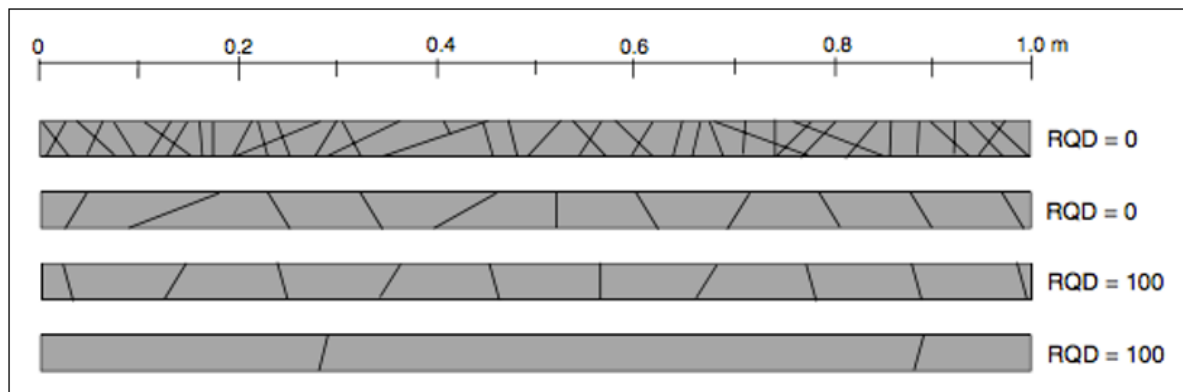


Fig. 30 Ejemplos de valores mínimos y máximos de RQD para varias densidades conjuntas a lo largo de núcleos de perforación (Palmstrom, 2001).

Siguiendo esta metodología durante el logeo núcleos se obtuieron los valores resumidos en la Tabla 10.

BARRENO	UBICACIÒN	LONGITUD	SECCIONES		RECUPERACIÒN	RQD
			DE	HASTA	%	%
Barreno 1	Cauce del Rio	53.25 m	4.65	10	86	41
			10	20	100	86
			20	30	100	74
			30	40	96	71
			40	53.45	100	65
Barreno 3	Cauce del Rio	53.45 m	0	10	84	32
			10	20	62	45
			20	30	87	34
			30	40	92	29
			40	53.45	100	78
Barreno 4	Cauce del Rio	53.35 m	0	10	97	61
			10	20	72	59
			20	30	99	34
			30	40	92	44
			40	53.35	93	62
Barreno 4	Cauce del Rio	96.8 m	0	10	99	46
			10	20	100	77
			20	30	100	60
			30	40	100	52
			40	50	100	81
			50	60	100	81
			60	70	94	72
			70	80	98	76
			80	96.8	95	47

Tabla 10. Resumen de los valores de RQD medidos en el logueo geotécnic dominios geotécnicos 10 m

Para realizar este trabajo se inició definiendo los dominios de logueo que son intervalos de testigo los cuales se zonifican principalmente por características distintivas como litologías, estructuras, meteorización, calidad de la roca, número y condiciones de las familias de discontinuidades, en este trabajo de tesis los dominios fueron definidos como tramos de 10 metros debido a que es la misma litología en la Riodacita de Carmen, el fracturamiento se observa constante a lo largo de cada uno de los segmentos en que se dividió el núcleo, otra característica que se tomó en cuenta es que son longitudes pequeñas de 50 a 96.8 m, el objetivo fue lograr una descripción más detallada de los 4 barrenos completos disponibles.

Otra forma de medir el RQD es mediante correlaciones con otros parámetros medidos también en los núcleos de barrenación como el J_v (*Join Volumetric*) y W_{jd} (*Weighted Joint Density*), también fueron calculados además de RQD a cada 1 metro de núcleo de barrenación, sin embargo los valores RQD calculados no son cercanos a los valores de RQD medidos por lo

que para el cálculo del valor de GSI se utilizó el valor medido de forma directa debido a que en las tablas de resultados obtenidos los valores de W_{jd} son cercanos a los valores de J_v , como lo considera Palmstrom cuando son dos o más sistemas de discontinuidades pero cuando es un solo sistemas de discontinuidades el valor de J_v es el doble de valor W_{jd} , también se distingue que cuando el valor de J_v es menor a 4 los valores del RQD superan el 100% y que para el valor de $J_v < 4$ el espaciamiento entre las discontinuidades cuando solo es un sistema tiene que ser menor a 25 cm.

FACTOR J_v

El factor J_v fue introducido por Palmstrom (1974) es una medida tridimensional para la densidad de las fracturas que cruzan con un volumen de un m^3 . Ante la dificultad de observar tridimensionalmente un afloramiento, el valor de J_v se suele determinar contando las discontinuidades de cada familia que interceptan una longitud determinada, se consideraron familias a cada intervalo de ángulos, en los que se divide los 90° que se forman entre la línea de medición y las discontinuidades a ella ($<15^\circ$, $15^\circ-30^\circ$, $30^\circ-60^\circ$, $>60^\circ$), y se mide el espaciamiento que existe entre las discontinuidades de cada familia, así como las fracturas aleatorias, con estos valores se utiliza la ecuación 2 para calcular el valor J_v , en la Tabla 12 se muestra como ejemplo los resultados del Barreno 1, y en el capítulo de anexos se presentan la información de los 4 barrenos.(Anexo 3)

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{1}{S_n} + \frac{N_r}{(5\sqrt{A})} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 4 (Palmstrom, 2005)}$$

Dónde:

S_1, S_2, \dots, S_n = Promedio de espaciamiento de las fracturas que pertenecen a esa familia.

N_r = Número de discontinuidades aleatorias.

A = Área de la superficie a evaluar en el caso de los barrenos se asume que un metro lineal representa un metro cúbico, por lo que el $A = 1 m^2$

Palmstrom (2001) define que el valor de J_v puede ser medido en barrenos como factor W_{jd} = *Weighted Joint density*, para obtenerlo se multiplica el número de discontinuidades de cada

familia con un valor de ajuste (Tabla 12), lo que da como resultado el valor f_1 y posteriormente se suman al final al obtener el valor de la sumatoria se divide entre la longitud del barreno, Ecuación 5.

$$wJd = \frac{1}{L} \sum fi \dots \dots \dots \text{Ecuación 5. (Palmstrom ,2001)}$$

Dónde:

L= Longitud del barreno.

$\sum fi$ = Sumatoria de los valores de fi

INTERVALOS DE ANGULOS Y VALORES DE L FACTOR F1 PARA CADA INTERVALO		
INTERVALOS DE ANGULOS ENTRE EL GRUPO DE DISCONTINUIDADES Y EL SONDEO	1/ sen δ	VALOR DE FACTOR F1
$\delta > 60^\circ$	< 1.16	1
$\delta = 30 - 60^\circ$	1.16- 1.99	1.5
$\delta = 15- 30^\circ$	2- 3.86	3.5
$\delta < 15^\circ$	> 3.86	6

Tabla 12. Intervalos de valores de ángulos para obtener el valor factor f_1 . (Palmstrom 2001)

Palmstrom (1982) encontró una nueva correlación entre RQD y J_v (*Volumetric joint count*) para dar resultados algo mejores que el RQD de uso común = $115 - 3.3J_v$, en 2005 Palmstrom público una modificación a esta Ecuación 6

$$RQD = 110 - 2,5 J_v \dots \dots \dots \text{Ecuación 6}$$

Programa Académico: Maestría en Ciencias en Geología Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.																	
BARRENO	Barreno 1 Plantilla de Permeabilización				FECHA	25-ene-17				PROYECTO	Presa El Realito						
UBICACIÓN	Cauce del Río Santa María, Bajo Cortina de Presa				LONGITUD	53.25 m				LITOLOGÍA	Riodacita Del Carmen (Trc)						
INCLINACIÓN	Vertical 90°				LOGEO	Vianney Vanessa Sosa Davila											
DE	A	RQD	No. Fx	$\delta < 15^\circ$ fi = 6	Esp.	$\delta 15-30^\circ$ fi = 3.5	Esp.	$\delta 30-60^\circ$ fi = 1.5	Esp.	fi x N	$\delta > 60^\circ$ fi = 1	Esp.	fi x N	Wjd	Jv	RQD=110-2.5Jv	
0	5	27	5					2	0,30	3	3	0,4	3	6	5,833	95	100
5	6	30	1								7	0,07	7	7	0,143	110	100
6	7	30	7	1	0,5										0,200	110	100
7	8	55	6	2	0,3						4	0,4	4	4	2,900	103	100
8	9	90	3					2	0,40	3	2	0,45	2	5	4,722	98	98
9	10	90	4					2	0,40	3	2	0,45	2	5	4,722	98	98
10	11	55	6								3	0,3	3	3	3,333	102	100
11	12	50	5					3	0,15	4,5					6,667	93	93
12	13	90	4								4	0,25	4	4	4,000	100	100
13	14	100	1								1	0,3	1	1	3,333	102	100
14	15	100	2								2	0,3	2	2	3,333	102	100
15	16	100	2								2	0,3	2	2	3,333	102	100
16	17	100	3								3	0,3	3	3	3,333	102	100
17	18	100	3								3	0,3	3	3	3,333	102	100
18	19	100	1								1	0,3	1	1	3,333	102	100
19	20	90	4								4	0,3	4	4	3,333	102	100
20	21	100	0													110	100
21	22	70	3								3	0,3	3	3	3,333	102	100
22	23	60	3								3	0,3	3	3	3,333	102	100
23	24	80	3	2	0,4						1	0,3	1	1	3,333	102	100
24	25	70	5								5	0,2	5	5	5,000	98	98
25	26	80	9								9	0,07	9	9	14,286	74	74
26	27	0	10								10	0,07	10	10	14,286	74	74
27	28	40	12								12	0,07	12	12	14,286	74	74
28	29	35	5								5	0,15	5	5	6,667	93	93
29	30	20	10								10	0,07	10	10	14,286	74	74
30	31	25	9								9	0,07	9	9	14,286	74	74
31	32	10	9								9	0,07	9	9	14,286	74	74
32	33	40	10								10	0,07	10	10	14,286	74	74
33	34	30	8								7	0,07	7	7	14,286	74	74
34	35	30	9								6	0,07	6	6	14,286	74	74
35	36	30	9								6	0,07	6	6	14,286	74	74
36	37	40	8			1	0,5				9	0,07	9	9	14,486	74	74
37	38	50	8								5	0,2	5	5	5,000	98	98
38	39	45	6								7	0,07	7	7	14,286	74	74
39	40	90	7	1	0,5						4	0,2	4	4	5,200	97	97
40	41	60	8								9	0,1	9	9	10,000	85	85
41	42	40	9								4	0,3	4	4	3,333	102	100
42	43	60	4								2	0,4	2	2	2,500	104	100
43	44	30	7			1	0,5				2	0,4	2	2	2,700	103	100
44	45	80	3								2	0,4	2	2	2,500	104	100
45	46	90	2								2	0,4	2	2	2,500	104	100
46	47	80	2								2	0,4	2	2	2,500	104	100
47	48	90	2					2	0,40	3				3	2,500	104	100
48	49	80	3			1	0,5								0,200	110	100
49	50	60	3	1	0,5										0,200	110	100
50	51	90	4					3	0,30	4,5					3,333	102	100
51	52	80	4					4	0,10	6					10,000	85	85
52	53	100	0													110	100
53	53,35															110	100

Tabla 11. Cálculo de los factores RQD, Jw, Wjd. Barreno 1 Plantilla de Permeabilización.

B) Descripción de las discontinuidades Jc que se presenta en el índice RMR (Bieniawski, 1989).

Se evaluaron las características de las familias de discontinuidades en los núcleos de los sondeos para obtener el valor Jc (*Join Condition*) para la Riodacita Del Carmen. (Tabla 13)

Programa Académico: Maestría en Ciencias en Geología Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.																					
BARRENO		Barreno 4				Plantilla de Permeabilización				FECHA		25-ene-17		PROYECTO		Presa El Realito					
UBICACIÓN		Cauce del Río Santa María, Bajo Cortina de Presa				LONGITUD		53.35 m		Revisó		Vianney Vanessa Sosa Davila		LITOLOGÍA		Riodacita Del Carmen (Trc)					
INCLINACIÓN		Vertical 90°				N° Fracturas		Apertura		Material de relleno		CONDICION PAREDES		RUGOSIDAD		Persistencia		SEPARACION		Join Condition	
DE	HASTA	Distancia	REC	Distancia	RQD	0-30°	31-45°	46-60°	60-90°	Apertura	Material de relleno	CONDICION PAREDES	RUGOSIDAD	Extensión	SEPARACION	Join Condition					
metros (m)	metros (m)	metros (m)	%	metros (m)	%	Número/don	Número/don	Número/don	Número/don	cm				metros	cm	JC					
0	10	9,7	97	6	61	SD	SD	11	SD	5	6	5	3	0	20 cm	19					
10	20	7,2	72	5,9	59	SD	SD	10	SD	5	6	5	1	0	20-60 cm	17					
20	30	9,9	99	3,4	34	SD	SD	SD	SD	5	6	6	3	0	40 cm	20					
						22	SD	SD	SD	5	6	5	3	0	40 cm	19					
						SD	SD	SD	SD	5	6	5	3	0	40 cm	19					
30	40	9,2	92	4,35	44	SD	SD	22	SD	5	6	5	3	0	20-40 cm	19					
						SD	SD	SD	SD	5	6	6	3	0	20 cm	20					
						2	SD	SD	SD	5	6	5	3	0	100 cm	19					
40	53,35	12,40	93	8,25	62	SD	SD	SD	SD	5	6	5	1	0	20-40 cm	17					
						SD	SD	26	SD	5	6	5	3	0	20-40 cm	19					
						SD	SD	SD	SD	5	6	6	3	0	20-40 cm	20					

Tabla 13. Resultado de los valores de la evaluación de las condiciones de las discontinuidades.

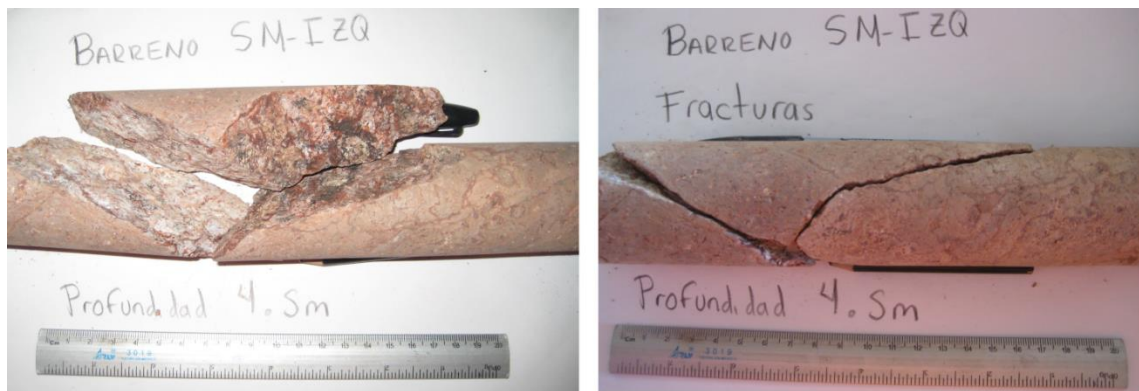


Figura 30. Discontinuidades evaluadas en los barrenos.



Figura 31. Barreno 4, profundidad 53.35 m, posición vertical Presa “El Realito”.

Los resultados del cálculo de valor de GSI para los 4 barrenos se resumen en la Tabla 14

CÁLCULO DE GSI						
Programa Académico: Maestría en Ciencias en Geología Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UASLP						
BARRENO	INTERVALO		REC	RQD	Join Condition	Valor de GSI
	DE	HASTA				
	metros (m)	metros (m)			%	%
Barreno 1	0	4.65	0	0		
	4.65	10	86	41	20.0	51
	10	20	100	86	20	73
	20	30	100	74	20	67
	30	40	96	71	17	61
	40	53.45	100	65	20	63
Barreno 3	0	10	84	32	20	46
	10	20	62	45	15	45
	20	30	87	34	18	44
	30	40	92	29	17	40
	40	53.25	100	78	18	65
Barreno 4	0	10	97	61	19	59
	10	20	72	59	18	56
	20	30	99	34	19	46
	30	40	92	44	19	51
	40	53	93	62	19	59
Barreno 5 M - IZQ	0	10	99	46	13	43
	10	20	100	77	14	60
	20	30	100	60	12	48
	30	40	100	52	17	52
	40	50	100	81	17	66
	50	60	100	96	19	76
	60	70	94	72	19	65
	70	80	98	76	19	67
80	97	95	47	19	52	

Tabla 14. Cálculo del valor GSI mediante la fórmula $GSI = 1.5 JCond_{89} + RQD/2$. (Hoek et al, 2013)

2.5.2 Análisis de discontinuidades en socavones

Se utilizó las descripciones geológicas de las discontinuidades realizadas por personal de TECHNOPERJET, S.A DE C.V, (2011) en el proyecto “Levantamiento Geológico a detalle de las Galerías, Presa El Realito, lo cual se resumió en la Tabla 15, y en base a esta información se completó la de descripción de condiciones de las juntas Jc; Bieniawski 1989 (Tabla 11) con esto se obtuvo un valor de $J_c = 20$, que permite compararlo con el valor de J_c obtenido en el logeo geotécnico los cuales son muy cercanos. Tabla 16.

DISCONTINUIDADES MEDIDAS EN LAS GALERIAS DE LA PRESA " El Realito" Gto.							
ROCA: Riodacita del Carmen							
UBICACIÓN	Discontinuidad	Rumbo	Buzamiento	Rumbo Buzamiento	Relleno	Ancho	Rugosidad
Galería M. Derecha	FALLA	282	78	12	Arcilla	2 a 5 cm	
Galería M. Derecha	FALLA	350	36	80	Arcilla	1 cm	plana-lisa
Galería M. Derecha	FALLA	350	84	80	Arcilla	0.3 cm	plana-lisa
Galería M. Derecha	FALLA	285	35	15	Arcilla	0.3 cm	rugosa
Galería M. Derecha	FALLA	25	65	115	Arcilla	2 a 3 cm	rugosa
Galería M. Derecha	FALLA	285	85	15	calcita	1 mm	rugosa
Galería M. Derecha	Fractura	288	80	18	S/relleno	carrada	
Galería M. Derecha	Fractura	6	88	96	S/relleno	carrada	
Galería M. Derecha	Fractura	23	76	113	S/relleno	carrada	
Galería M. Derecha	Fractura	10	62	100	S/relleno	carrada	
Galería M. Derecha	Fractura	290	70	20	S/relleno	carrada	
Galería M. Derecha	Fractura	195	40	285	S/relleno	carrada	
Galería M. Derecha	Fractura	281	80	11	S/relleno	carrada	
Galería M. Derecha	Fractura	345	20	75	S/relleno	carrada	
Galería M. Derecha	Fractura	160	80	250	S/relleno	carrada	
Galería M. Derecha	Fractura	355	82	85	S/relleno	carrada	
Galería M. Derecha	Fractura	336	53	66	S/relleno	carrada	
Galería M. Derecha	Fractura	340	68	70	S/relleno	carrada	
Obra de desvio	Falla Desvio	325	60	35	arcilla	35 cm	lisa- rugosa
Obra de desvio	Falla Cause 1	314	74	24			
Galería M. Izquierda	Falla	338	64	62	arcilla	0.5 cm	rugosa

FUENTE DE DATOS : TECHNOPERJET, S.A. DE C.V. Levantamiento Geológico a detalle de la Galerías, Presa El Realito. 10 de Marzo de 2011

Tabla 15. Tabla resumen del Levantamiento Geológico a detalle de las Galerías, Presa El Realito, fuente de datos TECHNOPERJET 2011.

RIODACITA DEL CARMEN

JC: CONDICIONES DE LAS JUNTAS						
Descripción de la discontinuidad	S1	PUNTAJE	S2	PUNTAJE	Aleatorio	PUNTAJE
PERSISTENCIA (m)	3 A 10 m	2	3 A 10 m	2	3 A 10 m	2
APERTURA (cm)	0	6	1 a 3 cm	0	0	6
Tipo de relleno/ condición	0	6	Blando (Arcilla)	0	0	6
ALTERACION	Fresca	6	Fresca	6	Fresca	6
RUGOSIDAD	Algo Rugosa	3	Algo rugosa	3	Algo Rugosa	3
Valor de JC		23		11		23
	Promedio de las 3 familias de discontinuidades JC = 20					JC = 20

Tabla 16. Tabla de descripción de condiciones de las juntas Jc; Bieniawski (1989). Datos de las galerías presa El Realito.

BARRENO	Join Condition Jc
Barreno 1 Plantilla de Permeabilización	16
Barreno 3 Plantilla de Permeabilización	18
Barreno 4 Plantilla de Permeabilización	19
Barreno 5 M-IZQ (PIEZOMETRO)	16

Tabla 17. Resumen de los valores obtenidos en el logueo geotécnico de la descripción de condiciones de las juntas Jc; Bieniawski (1989).

2.6 Caracterización Geotécnica Brecha El Realito

Se desarrolló un mapeo geológico y geotécnico a lo largo del afloramiento con una longitud de 200 m los cuales fueron visibles después del corte del camino donde se pudo observar de una forma más completa, para su evaluación el afloramiento se dividió en 4 secciones de la misma longitud (50 m), en cada una de ellas se marcó 1 ventana de evaluación con las dimensiones establecidas de acuerdo con el proceso de evaluación de una *Bimrock*.

La dimensión de L_c (Dimensión de ingeniería característica) que se establece como la ventana de evaluación, debe ser igual a la raíz cuadrada del área total a evaluar o las dimensiones de la obra civil que se va a construir en este caso de estudio la dimensión se estableció por el primer método y los aspectos de evaluación son:

A) Diámetros de clastos: Diámetro mayor observado d_{mod} , Diámetros mayor y menor de los bloques presentes tanto el mayor como el menor, se designan para el menor que su diámetro sea igual a $0.05L_c$ y para el mayor $0.75L_c$.

B) Forma de los clastos.

C) Porcentaje de forma visual con respecto a la matriz para lo cual se hacen subdivisiones (Scanlines) donde su tamaño se define $L_c/10$.

D) Resistencia a la compresión simple tanto de fragmentos como de matriz, se utilizó el esclerómetro en posición perpendicular.

E) Valor de adherencia entre bloques y matriz. Tabla de Medley (2004).

F) Ángulo de alineación de los bloques con respecto a la horizontal.

Para esto se diseñó una tabla de mapeo con la cual se obtuvieron en campo los datos necesarios para obtener los parámetros geotécnicos. Tabla 18.

FECHA										FOLIO DE FOTOGRAFIA		ESTIMACION DEL PORCENTAJE DE BLOQUES EN CAMPO									
NOMBRE DEL PROYECTO																					
LUGAR										Longitud											
COORDENADAS																					
RESPONSABLE										Vianney Vanessa Sosa Davila.											
CLAVE DE LA CELDA										RUMBO TALUD:											
CARACTERISTICAS CELDA GEOTÉCNICA (ENGINEERING DIMENSION)																					
ÁREA (Talud)		Celda.	d max		FC	0.05 Lc	0.75 Lc	NLP	ALP 1	ALP 2	ALP 3	ALP...	LS=								
Altura	Ancho	Lc = VA	E. A. mayor	E. A. menor									Scanlines = Lc/ 10								
GRADO DE RESISTENCIA		ADERENCIA	Notas:																		
Datos Esclerometro																					
Matriz	Bloques																				
d max = Longitud del clasto mayor E.A.= Eje Axial FC= Forma de los clastos: Angulosos, Redondeados, Subredondeados. Scanlines = Lc/ 10 NLP= Número de lineaciones principales de los clastos ALP = Angulo de la lineacion principal con respecto a la horizontal IGT= Inclinación General del talud LS= Longitud Scanlines B/M = RELACION BLOQUE / MATRIZ (VISUAL) DESCRIPCION GENERAL DEL BIMROCK, OBSERVACIONES UCS. Tabla de criterios de resistencia en campo										<table border="1"> <thead> <tr> <th>DESCRIPCIÓN</th> <th>VALOR DE A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Casi no existe adherencia entre los bloques y la matriz. Bloques redondeados.</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Adherencia débil entre los bloques y la matriz. Bloques semi-redondeados.</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Adherencia moderada entre los bloques y la matriz. Bloques semi-angulares.</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>Adherencia fuerte entre los bloques y la matriz. Bloques angulares.</td> <td>500</td> </tr> </tbody> </table>		DESCRIPCIÓN	VALOR DE A	Casi no existe adherencia entre los bloques y la matriz. Bloques redondeados.	0	Adherencia débil entre los bloques y la matriz. Bloques semi-redondeados.	10	Adherencia moderada entre los bloques y la matriz. Bloques semi-angulares.	50	Adherencia fuerte entre los bloques y la matriz. Bloques angulares.	500
DESCRIPCIÓN	VALOR DE A																				
Casi no existe adherencia entre los bloques y la matriz. Bloques redondeados.	0																				
Adherencia débil entre los bloques y la matriz. Bloques semi-redondeados.	10																				
Adherencia moderada entre los bloques y la matriz. Bloques semi-angulares.	50																				
Adherencia fuerte entre los bloques y la matriz. Bloques angulares.	500																				
DATOS DE ESCLEROMETRO (POSICION PERPENDICULAR)										SCL 1											
MATRIZ										SCL 2											
BLOQUES										SCL 3											
										SCL 4											
										SCL 5											
										SCL 6											
										SCL 7											
										SCL 8											
										SCL 9											
										SCL 10											

Tabla 18. Tabla de levantamiento geotécnico para un afloramiento de un material tipo *Bimrock*. (Sosa-Davila, 2019).

2.6.1 Características para considerar un material como *Bimrock*

Es necesario que los valores de los parámetros mecánicos de los bloques sean mayores frente a los valores de los parámetros de la matriz para que esta masa pueda ser considerada como *Bimrock*.

- 1) Relación entre la rigidez de los bloques E_{bloque} y la rigidez de la matriz E_{matriz} a partir del módulo de elasticidad, para generar fallas inducidas a través de los contactos roca/matriz:

$$E_{bloque} / E_{matriz} > 2,0 \dots \dots \dots \text{Ecuación 7 (Lindquist and Goodman ,1994)}$$

- 2) Relación entre ángulo de fricción interna de los bloques y la matriz

$$\phi_{bloque} / \phi_{matriz} > 1,2 \dots \dots \dots \text{Ecuación 8}$$

Propuesta por Medley (2004) basado en el trabajo Lindquist and Goodman (1994) y Medley (1994).

- 3) Rango de tamaños de bloques que influyen en las propiedades mecánicas de los *Bimrocks*, para que un bloque sea catalogado como tal en un material tipo *Bimrock*, debe tener una dimensión en un rango de dimensiones en función del tamaño del proyecto o área de evaluación (ventana geotécnica) denotado como L_c .

$$0,05(L_c) \leq d \leq 0,75 (L_c) \dots\dots\dots \text{Ecuación 9 (Medley ,2002)}.$$

Este último criterio fue el utilizado ya que los diámetros de los bloques que contiene el *Bimrock* cumplen con estas características, la resistencia a la compresión simple obtenida en campo con el esclerómetro de clastos y matriz supera el valor de 1 MPa que establece la ISRM como límite para considerar este material como suelo.

2.6.2 Tipos de *Bimrock*

Los *Bimrock* pueden clasificarse como adheridos o no adheridos, en función de las condiciones de resistencia en el contacto entre el bloque y la matriz.

Los *Bimrock* adheridos fueron formados bajo condiciones altas de presiones y temperatura y se acepta que la resistencia del contacto entre la matriz y el bloque es aproximadamente igual a la resistencia de la matriz, contrario a este ambiente de formación los *Bimrocks* no adheridos, las presiones y temperaturas fueron bajas durante su formación.

El comportamiento de ambos tipos cambia con relación a la porción volumétrica de los bloques en el caso de los *Bimrocks* adheridos la resistencia del contacto, la resistencia a la compresión simple aumenta cuando la proporción volumétrica de los bloques también aumenta. Por su parte, el comportamiento de la resistencia de los *Bimrocks* no adheridos es completamente diferente, pues mientras la proporción volumétrica se incrementa, el ángulo de fricción aumenta también, pero la cohesión y la resistencia a la compresión simple disminuyen. Sönmez et al (2009).

2.6.3 Proporción, forma y alineación de bloques en Bimrock

Se han realizado investigaciones para conocer cuál es el efecto del porcentaje de bloques que se encuentran en coluviones sobre su comportamiento mecánico, Guerra and Pinzón (2015), presentan en su trabajo de tesis de maestría unas gráficas (Figura 32), donde relacionan el porcentaje de bloques con los valores de cohesión y ángulo de fricción con base en investigaciones realizadas por varios autores, (Tabla 19), de acuerdo a el porcentaje calculado para el *Bimrock* del área de estudio se ubicó dentro de estas gráficas la línea del trabajo de Coli et al. (2012), y se obtuvieron los valores de los parámetros cohesión y ángulo de fricción.

Estudios más relevantes realizados hasta ese momento acerca de la resistencia en coluviones Irfan and Tang (1993),		
AUTOR	ENSAYO	CONCLUSIÓN
Gibbs y Holtz , 1955	Ensayos triaxiales drenados en arenas con gravas cambiando el porcentaje volumétrico de bloques	La resistencia depende de la proporción volumétrica de bloques de la muestra más no del tamaño de los mismos
Miller y Sowers, 1957.	Ensayos triaxiales no drenados	La proporción volumétrica de bloques afecta la resistencia cuando esta es mayor al 67 %
Patwardhan, Rao y Gaidhane, 1970	Ensayos de corte directo a gran escala	La resistencia al corte aumenta gradualmente hasta el 40 % de proporción volumétrica de bloques y a partir de ahí lo hace abruptamente
Sonmez et al. ,2006	Ensayaron 270 muestras de diferente origen geológico en la misma zona,realizándoles ensayos de compresión simple	La heterogeneidad y anisotropía del material, involucrando los procesos de génesis de los mismos y la generación de sedimentos cementantes que tiene una influencia cuantificable en la resistencia del espécimen, producto de los procesos de cementación del material tipo Bimrock.
Kahraman et al. (2008)	Analizaron las correlaciones existentes entre la resistencia a la compresión uniaxial UCS , módulo elástico E, esfuerzos desviadores q, la densidad, velocidad de ondas P y ondas S, la proporción volumétrica de bloques PV B, diámetro medio de bloques y la redondez	Se concluyó que la forma de los bloques en función de la redondez, genera una disminución en el ángulo de fricción y un aumento en la cohesión para una misma proporción volumétrica de bloques.
Cantor and Estrada (2014)	Realizaron ensayos biaxiales de simulación numérica de bloques en matriz fina en elementos discretos, para las diferentes proporciones volumétricas de bloques.	Los resultados muestran que la mayor compacidad se da al 75% de bloques. Éstase describe como la capacidad de las partículas de acomodarse en el espacio disponible, justificando el aumento considerable de la resistencia hasta este punto.

Tabla 19. Resumen de los resultados de las investigaciones Fuente de datos Guerra and Pinzón, (2015).

Para definir la relación entre volumen de bloques y matriz es necesario seguir un procedimiento completo y complejo ya que el espaciamiento entre bloques, tamaño, forma y orientación de los mismos nunca es homogénea además las partes más débiles de un *Bimrock* son los contactos entre matriz y bloques, la matriz ejerce sobre los bloques un esfuerzo de tensión que los mantiene estables y modificar este esfuerzo trae por consecuencia un reacomodo.

En este trabajo se utilizó la tabla Terry y Chilingar 1955, (Figura 31), que se utiliza en geología para definir el porcentaje visual de clastos dentro de una matriz, las imágenes se escalaron en el programa *AutoCAD 2015*, donde se midió el área de los bloques para obtener un porcentaje.

Una vez definido el porcentaje, forma y alineación de bloques en cada una de las celdas geotécnicas situadas dentro del afloramiento se definieron un promedio para asignar los valores de los parámetros geotécnicos.

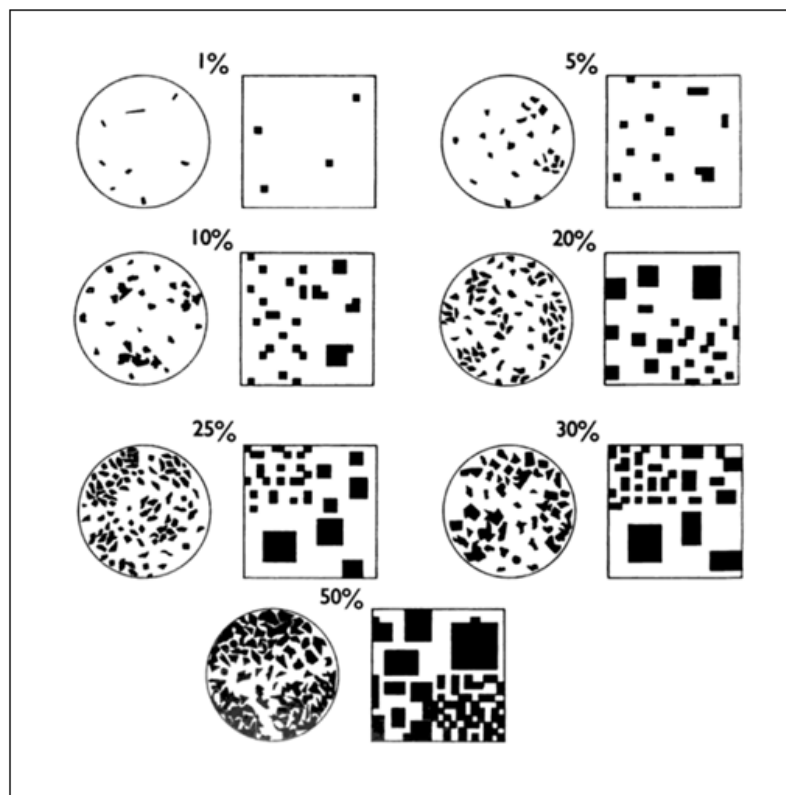


Figura 31. Comparación visual para la estimación de porcentaje de clastos. Tomado de Folk et al. (1970).

2.6.4 Determinación de porcentaje de bloques y matriz en 2D

La obtención de muestras inalteradas de una mezcla de bloques rígidos en una matriz fina es casi imposible, aun siendo capaz de obtener una muestra inalterada, es virtualmente imposible que esta muestra sea representativa de la masa de interés debido a la aleatoriedad en la distribución de estos bloques en dicha masa (Lindquist and Goodman, 1994; Medley, 2002).

Para evaluar de una manera más completa el afloramiento se tomaron fotografías a las celdas de mapeo geotécnico para determinar porcentaje de los clastos y matriz por medio del programa *AutoCAD 2015* (Figura 32), se realizó un promedio entre el porcentaje calculado en campo de forma visual y el porcentaje medido con el programa con lo que se concluye un valor de 25% de bloques. (Tabla 20)

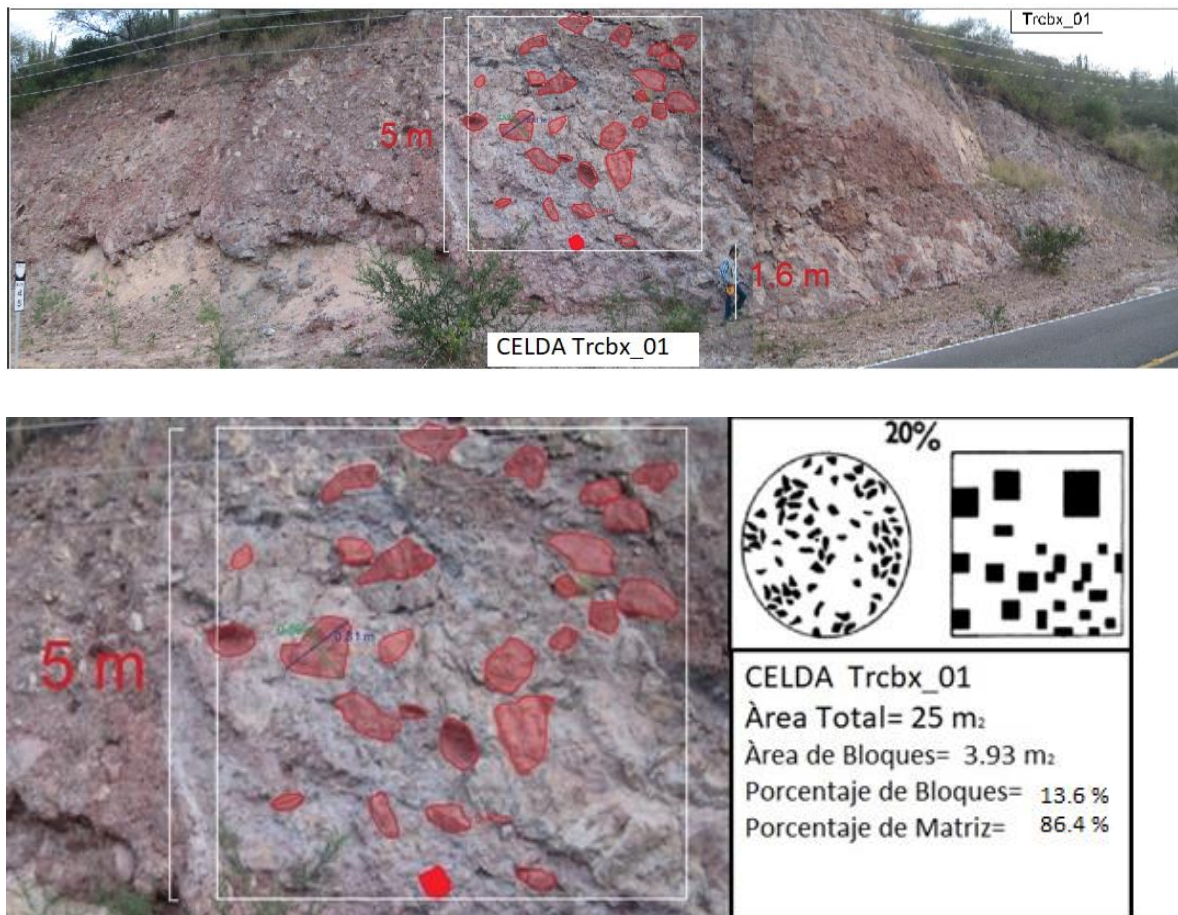


Figura 32.CeldaTrcbx_01.

FECHA		12-ene-17				FOLIO DE FOTOGRAFÍA				ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE BLOQUES EN CAMPO	
NOMBRE DEL PROYECTO		Presa Realito, Talud de camino				435					
LUGAR						CLAVE DE LAS MUESTRAS					
COORDENADAS		Inicial 371809, 2389504, 1169		Final 371821, 2389532, 1162		BRPRCR-01					
RESPONSABLE		Vianney Vanessa Sosa Davila.									
CLAVE DE LA CELDA		Trcbx_01		RUMBO S 62° W		IGT 74° NW				Lineas de evaluación	
CARACTERÍSTICAS CELDA GEOTÉCNICA (ENGINEERING DIMENSION)											
AREA (Talud)		Celda.		d max		FC		0.05 Lc		0.75 Lc	
Altura	Ancho	Lc = √A	E. A. mayor	E. A. menor	Subredondeados	25 cm	3.75 m	NLP	ALP 1	ALP 2	ALP 3
17 m	50 m	24.73	60 cm	40 cm	sin lineaciones						
GRADO DE RESISTENCIA		ADERENCIA		Notas:		Porcentaje de clastos en campo,		60			
Datos Esclerometro				Contacto con Riodasita y Toba Alamos.		Porcentaje de matriz en campo,		40			
Matriz	Bloques	500									
22.3	48.4										
d max = Longitud del clasto mayor E.A. = Eje Axial FC = Forma de los clastos: Angulosos, Redondeados, Subredondeados. Scanlines = Lc/10 NLP = Número de lineaciones principales de los clastos ALP = Ángulo de la lineación principal con respecto a la horizontal IGT = Inclinación General del talud LS = Longitud Scanlines B/M = RELACIÓN BLOQUE / MATRIZ (VISUAL) DESCRIPCIÓN GENERAL DEL BIMROCK, OBSERVACIONES UCS. Tabla de criterios de resistencia en campo						DESCRIPCIÓN		VALOR DE A			
DATOS DE ESCLEROMETRO (POSICION PERPENDICULAR)						Casi no existe adherencia entre los bloques y la matriz. Bloques redondeados.		0			
MATRIZ 12, 22, 0, 0, 10, 28, 26, 0, 20, 14, 16, 18, 26						Adherencia débil entre los bloques y la matriz. Bloques semi-redondeados.		10			
BLOQUES 44, 40, 30, 18, 64, 42, 24, 0, 0, 32, 40, 52						Adherencia moderada entre los bloques y la matriz. Bloques semi-angulares.		50			
						Adherencia fuerte entre los bloques y la matriz. Bloques angulares.		500		61	
										SCL 1 60	
										SCL 2 70	
										SCL 3 50	
										SCL 4 50	
										SCL 5 60	
										SCL 6 40	
										SCL 7 70	
										SCL 8 70	
										SCL 9 70	
										SCL 10 70	

Tabla 20. Tabla de levantamiento geotécnico celda Trcbx_01

CELDA	PORCENTAJE DE CLASTOS		
	MEDIDO	VISUAL	PROMEDIO
Trcbx_01	20	13.56	16.78
Trcbx_02	25	19.72	22.36
Trcbx_03	20	11.2	10.6
Trcbx_04	25	19.27	22.13

Tabla 21. Tabla de resumen de los porcentajes de bloques calculados en las ventanas de evaluación.

CAPÍTULO III. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS MECÁNICOS DE LAS UNIDADES GEOTÉCNICAS

Para determinar los parámetros mecánicos del macizo rocoso es necesario realizar ensayos en campo y en laboratorio que definan los parámetros de la roca intacta, si los valores de la roca intacta son producto de muestras representativas y buenas prácticas de análisis en laboratorio y campo, la determinación de los parámetros del macizo rocoso estará muy cerca de la realidad, se debe tener en cuenta que cuando el macizo rocoso es muy grande puede su comportamiento ser muy lejano de los resultados de la roca intacta medidos en el laboratorio, el comportamiento de un macizo rocoso es complicado de determinar para un mejor resultado se utilizan fórmulas matemáticas que relacionan los resultados laboratorio con los resultados de las clasificaciones geotécnicas o geomecánicas por lo que una determinación de estos valores con una campaña de campo adecuada y representativa es totalmente necesario y es la base para el diseño del sostenimiento. El grado de incertidumbre al emplear estas correlaciones es naturalmente muy grande e incluso entre unos criterios y otros pueden encontrarse valores muy distintos, además existen factores principales que limitan la certeza de los valores los cuales que son:

- a) El macizo rocoso se comporta distinto en términos deformacionales cuando se produce una descarga del estado de esfuerzos (excavación) que cuando se produce una carga.*
- b) Es muy difícil saber el grado de daño producido por los trabajos de excavación, así como la forma en que dicho daño se ira disipando hacia adentro del macizo rocoso.*
- c) La rigidez del macizo puede estar muy ligada al confinamiento del material, el cual puede variar ampliamente con la profundidad y los cambios de estados de esfuerzos producidos por la obra (Sánchez-Reyes ,2016).*

En el área de estudio durante el proceso de construcción de la Presa “El Realito” se obtuvieron los parámetros mecánicos de la roca Riodacita del Carmen mediante estudios geofísicos por lo que existe un valor medido de módulo de deformabilidad igual a $E = 10,519 \text{ kg/cm}^2$ medido en dirección horizontal, el cual se obtuvo del estudio realizado por la empresa Technoproject de nombre P.H. “EL REALITO”, EDO. DE GUANAJUATO OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE DEFORMABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO A PARTIR DE UNA PRUEBA DE PLACA RÍGIDA (P No. 1), donde se utilizó la Ecuación 10

$$(E = \frac{\pi}{4})(\sigma B)(1 - \nu^2)/S)..... Ecuación 10$$

E= módulo de Young, correspondiente a cada ciclo

σ = presión de contacto del ciclo considerado = 35. 5 kg/cm²

B = diámetro de la placa rígida = 60 cm.

ν = relación de Poisson del Macizo rocoso = 0.36 (valor estimado para rocas blandas).

s = deformación medida en el ciclo considerado = 0.1943- 0.0559 cm =0.1384 , obtiene de la gráfica esfuerzo-deformación, para los cuales se consideraron dos aspectos ; El primero en el que se conocía la relación esfuerzo-deformación de los ciclos efectuados en la prueba de placa rígida, y el segundo que también se conocían los niveles de esfuerzos de trabajo que la obra terminada ejercerá sobre el terreno, con lo que se eligió el cuarto ciclo, debido a cada ciclo le corresponde un módulo diferente. Existen también valores de módulos de Young, módulo g y relación de poisson para la margen izquierda y cauce del río a cada metro desde la superficie hasta 40 metros de profundidad de las tablas de los resultados del INFORME DEL ESTUDIO GEOFÍSICO DE CROSS HOLE PARA OBTENER LOS MÓDULOS ELÁSTICOS DINÁMICOS DEL PROYECTO DE PRESA EL REALITO, MUNICIPIO DE SAN LUIS DE LA PAZ, ESTADO DE GUANAJUATO elaborado por la empresa TECNOLOGÍA Y SISTEMAS, S.A. (Anexo 2). En este estudio se perforaron un par de pozos en la margen izquierda, junto al barreno exploratorio realizado por Comisión Federal de Electricidad (CFE) identificado con el numero PSMR-3, y uno más en el cauce junto al barreno identificado con el número 1, realizado por Tecnología y Sistemas, S. A. (TYSSA), esta misma empresa desarrollo también pruebas mecánicas en núcleos de rocas de tres barrenos en el eje de la cortina Bno 1 cauce del río, Bno 2 margen derecha y Bno 3 margen derecha de los cuales se obtuvieron los valores de peso volumétrico, resistencia a la compresión simple, resistencia a la tensión, módulo de elasticidad, relación de poisson. (Anexo 3).

3.1 Estimación de las propiedades de deformabilidad del macizo rocoso E_m y V_m

Las unidades litológicas de área de estudio que cumplen con las características de un macizo rocoso son Riodacita del Carmen, Toba Álamos e Ignimbrita El Órgano, por lo que con base al resultado de sus clasificaciones geotécnicas se estimaron los dos parámetros que controlan la deformación elástica del macizo según los apuntes de Sánchez Fermín (2016) estos son el módulo de deformación y el coeficiente de Poisson los cuales se ven influenciados por el factor escala, por ende, no pueden ser medidos directamente en laboratorio, en la actualidad se admite la hipótesis simplista de que la relación de Poisson del macizo rocoso es equivalente al de la matriz rocosa, mientras que el cálculo del módulo de deformación se puede estimar mediante correlaciones con las clasificaciones geomecánicas (Tabla 21) el rango de incertidumbre al emplear estas correlaciones es muy grande e incluso entre los criterios suele encontrarse valores muy distintos.

3.1.1 Módulo de elasticidad del macizo rocoso, E_m .

De las correlaciones matemáticas la menos recomendable es el de Bieniawski (1978), no solo por ser antiguo, sino porque, además, es excesivamente simplista (lineal), abarca un rango muy limitado de calidades ($RMR > 50$), (Sánchez García ,2013). Las correlaciones que se usaron para obtener módulo de elasticidad del macizo rocoso son: Gokceoglu, 2003 (RMR), Hoek 2004, (GSI) (Tabla XC). Otros criterios requieren del conocimiento del valor representativo de la resistencia a la compresión simple de la roca matriz, así como el factor de daño D. Para determinar los parámetros D y m_i que definen el daño ocasionado al macizo rocoso durante la excavación se utilizó como apoyo el programa “*RocLab*”, el cual forma parte de la suite de “*Rocscience*”, el cual tiene valores estandarizados según el tipo de roca y el método de excavación utilizado (Figuras 22 y 23).

Autor	Correlación	Parámetros requeridos
Hoek et al, (2002)	$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_c'}{100} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}}} \rightarrow \sigma_c' < 100 \text{ MPa}$	GSI, σ_c' , D
	$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \rightarrow \sigma_c' > 100 \text{ MPa}$	
Bieniawski (1978)	$E_m = 2 \text{ RMR} - 100 \rightarrow \text{RMR} > 55$	RMR
Serafim y Pereira (1983)	$E_m = 10^{\frac{\text{RMR}-10}{40}} \rightarrow 10 < \text{RMR} < 50$	RMR
Barton (1992)	$E_m = 25 \text{ Log}_{10} Q$	Q
Barton (2002)	$E_m = 10 \left(\frac{Q}{100}\right)^{0.5}$	Q
Gokceoglu (2003)	$E_m = 0.073 \times e^{0.075 \text{ RMR}}$	RMR
Hoek (2004)	$E_m = 0.33 \times e^{0.004 \text{ GSI}}$	GSI
Hoek y Brown (1997)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_c'}{100} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}}}$	GSI, σ_c'
Hoek y Diederichs (2006)	$E_m = E_i \left(0.02 + \frac{1-D/2}{1 + e^{\frac{100+15D-GSI}{10}}}\right) 0.33 \times e^{0.004 \text{ GSI}}$	E_i , GSI, D
Nicholson y Bieniawski (1990)	$E_m = E_i \left[0.0028 \text{ RMR}^2 + 0.9 \left(\frac{\text{RMR}}{20}\right)\right] / 100$	E_i , RMR
Kim (1993)	$E_m = 300^{(0.07 \text{ RMR}) - 10^{-4}}$	RMR
Mátri et al (1994)	$E_m = \frac{E_i}{2} \left[1 - \cos\left(\pi \times \frac{\text{RMR}}{100}\right)\right]$	E_i , RMR
Read et al. (1999)	$E_m = 0.1 \left(\frac{\text{RMR}}{10}\right)^3$	RMR
Palmstrong y Singh (2001)	$E_m = 8 \text{ Q}^{0.4}$	Q
	$E_m = 7 \text{ RMI}^{0.4}$	RMI
Zhang y Einstein (2004)	$E_m = E_i 10^{(0.0186 \text{ RQD} - 1.91)}$	E_i , RQD
Sormez et al. (2004)	$E_m = E_i (s^*)^{0.4}$	E_i , s, a
Sormez et al. (2006)	$E_m = E_i 10^{(0.0001 \text{ RMR} - 100) \sqrt{100 - \text{RMR}} + 4000 \cdot e^{-0.0001 \text{ RMR}}}$	E_i , RMR
Chun et al. (2009)	$E_m = \frac{5.992 \text{ H}^2 + 1.883 \sigma_c' + 4.851 \text{ RQD}^3 + 0.031 \text{ JS}^4 + 23990.53 \text{ JC}}{10000}$	H, σ_c' , RQD, JS, JC

Tabla 21. Correlación entre módulo de deformabilidad y calidad de la roca. Tomado de Sánchez García, (2013).

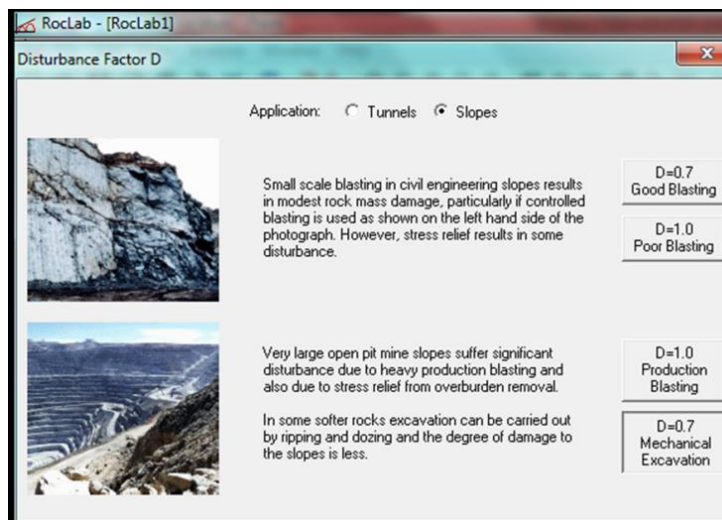


Figura 22. Factor de daño D. Grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por los efectos de las voladuras o por la relajación de esfuerzos RocLab 1.0 (2007).

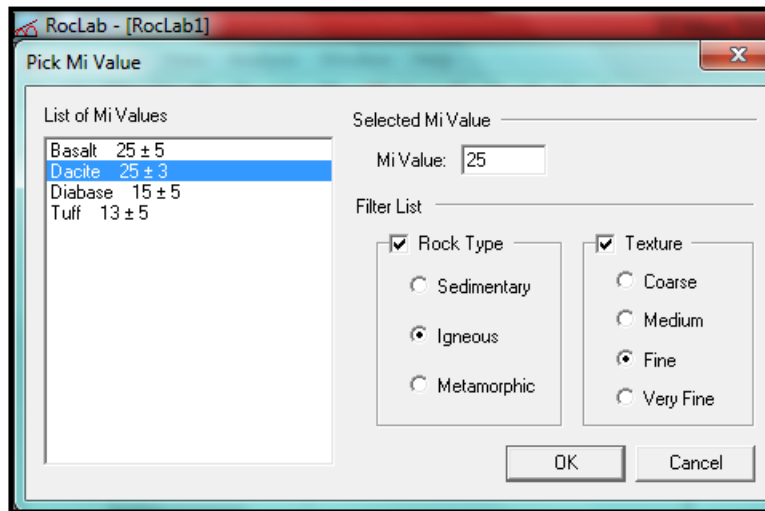


Figura 23. Factor Mi, Valor que depende de tipo de roca intacta. *RocLab* 1.0 (2007).

TIPO DE ROCA	RMR	GSI	Gokceoglu, 2003	Hoek, 2004
			$E_m = 0.073 \times e^{0.075 \text{ RMR}}$ (GPa)	$E_m = 0.33 \times e^{0.064 \text{ GSI}}$ (GPa)
Ignimbrita El Òrgano	53	70	3.89	29.12
Toba Àlamos	40	50	1.47	8.10

Tabla 22. Cálculo de E_m módulo de elasticidad del macizo rocoso mediante las correlaciones de Gokceoglu (RMR) y Hoek, (GSI). Formulas tomadas de Sánchez García, (2013).

Riodacita del Carmen				
BARRENO	DE (m)	HASTA (m)	GSI	Hoek, 2004
				$E_m = 0.33 \times e^{0.064 \text{ GSI}}$ (GPa)
BNO 1	4.65	10	51	8.39
	10	53.45	62	17.45
BNO 3	0	40	44	5.36
	40	53.25	65	21.14
BNO 4	0	20	54	10.60
	20	40		0.33
	40	53.35		0.33
BNO 5MIZQ	0	10	43	5.17
	10	20	60	15.35
	20	30	48	7.12
	30	40	52	9.20
	40	50	66	22.54
	50	60	69	27.31
	60	70	65	21.14
	70	80	67	24.03
80	90	52	9.20	

Tabla 23. Cálculo de E_m módulo de elasticidad del macizo rocoso mediante la correlación, Hoek (2004).

3.1.2 Coeficiente de Poisson, ν_m (Macizo Rocoso)

En la literatura sobre mecánica de rocas prácticamente no existen correlaciones empíricas para la estimación del módulo de Poisson del macizo rocoso. Sin embargo se encuentran algunas tablas con valores típicos para análisis de interacción con estructuras de soporte donde los valores van desde $\nu_m = 0.15$ a 0.35 , por lo que este parámetro puede ser ajustado a un valor dado por experiencias de casos similares, en la actualidad se admite la hipótesis simplificadora de que el valor del coeficiente de Poisson del macizo rocoso es el mismo que el de la roca intacta este trabajo de tesis se utiliza el valor de $\nu_m = 0.35$ para el modelado geotécnico de la Riodacita del Carmen, este valor es el promedio de los valores obtenidos en la pruebas geofísicas realizadas en los barrenos de exploración por la empresa TYSSA. S.A. DE C.V.

3.2 Estimación de las propiedades de resistencia del *Bimrock* cohesión c_m y el ángulo de fricción interna ϕ_m

Para el cálculo del valor de la resistencia del macizo rocoso es necesario son necesarios conocer la cohesión C_m y el ángulo de fricción interna ϕ_m cuando se usa el criterio de Mohr-Coulomb, estos últimos distinguen el comportamiento elástico, del comportamiento elastoplástico en los análisis tensodeformacionales de la excavación.

En el año de 1994, Lindquist y Goodman elaboraron modelos físicos de *Bimrocks* sometidos a pruebas triaxiales para estudiar el efecto que tiene la proporción y orientación de los bloques en las propiedades de resistencia y deformación de la masa de bimrocks. Los resultados indicaron la resistencia total del *Bimrock* está directamente relacionada con la proporción volumétrica de bloques y es independiente de la resistencia propia de los bloques, el incremento en la proporción de los bloques resulta generalmente en una disminución de la cohesión, un incremento en el ángulo de fricción interna y un incremento en el módulo de deformación.

La orientación de los bloques también afectó la resistencia de la masa de bimrock, especialmente la cohesión y el módulo de deformación. Los especímenes con la orientación más adversa de bloques (30°) tuvieron la cohesión más baja y el incremento en el módulo de deformación es más pronunciado para los modelos con bloques orientados verticalmente (0°).

El resultado de ese estudio se basó en la Tabla 3 de la cual se obtuvieron los valores de los parámetros de resistencia para el criterio de Mohr-Coulomb (cohesión y ángulo de fricción), se definieron dos características para encontrar estos valores:

- a) Los clastos no tienen una orientación preferencial
- b) El porcentaje de bloques es menor a 25%.

Esto ubica al *Bimrock* en el caso a de la Tabla 3, los valores de resultado se presentan en la Tabla 24.

Parámetros Geomecánicos de <i>Bimrock</i>	
Cohesión	48 Kpa
Angulo de fricción	25 °
Cohesión	48 KPa
Angulo de Friccion	23 a 48
Resistencia a la compresión simple	6.8 Mpa

Tabla 24. Parámetros Geomecánicos de *Bimrock*.

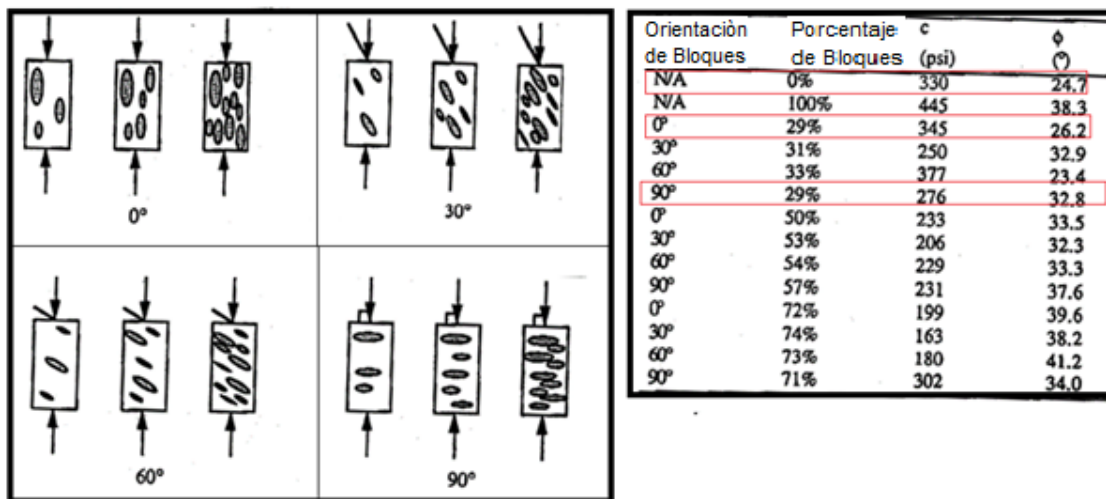
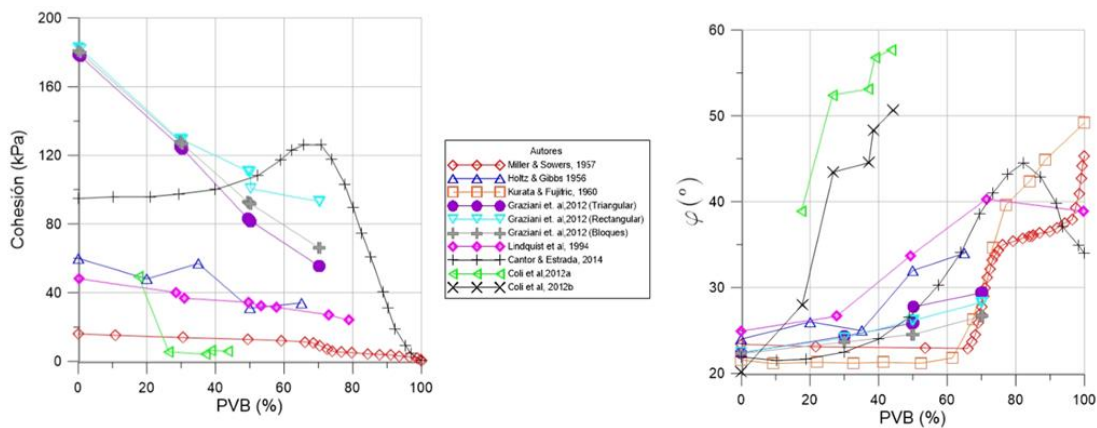


Figura 24. Valores de cohesión y ángulo de fricción con respecto a la porción y orientación de los clastos. Tomado de Lindquist y Goodman (1994).

Coli et al. (2012), desarrollaron seis ensayos de corte no convencionales en un tajo minero abierto en Santa Bárbara, Italia, con el fin de hacer la caracterización mecánica de un *Bimrock* de shale y limolita. Se trabajaron especímenes de 80 y 50 cm, los cuales fueron ensayados en un equipo diseñado especialmente para la prueba denominada *Bimtest*. Los parámetros de resistencia se correlacionaron con la PVB contenidas en dichos especímenes. Los resultados muestran una relación lineal positiva entre la PVB y el ángulo de fricción interno de los

especímenes de *Bimrock*, mientras que la cohesión se ve fuertemente afectada entre el 20% y 25% de PVB, los cuales fueron obtenidos a partir de un retro análisis mediante el equilibrio límite, además generaron modelos en elementos finitos en tres dimensiones, tomando la información de investigaciones previas, para las variables mecánicas y asumiendo la forma de las inclusiones. El modelo generó especímenes cilíndricos con inclusiones de forma preferencial elipsoidal y circular. Se mostró en el análisis del modelo preliminar en elementos finitos con inclusiones esféricas, la influencia de la proporción volumétrica de bloques en los *Bimrocks* en los parámetros mecánicos. (Guerra and Pinzón, 2015)



Variación de las propiedades mecánicas de los *Bimrocks* en función de la proporción volumétrica de bloques para los diferentes autores.

Figura 32 . Variación de las propiedades mecánicas del *Bimrock* en función de la proporción volumétrica de bloques para los diferentes autores. Modificado de Guerra and Pinzón. (2015).

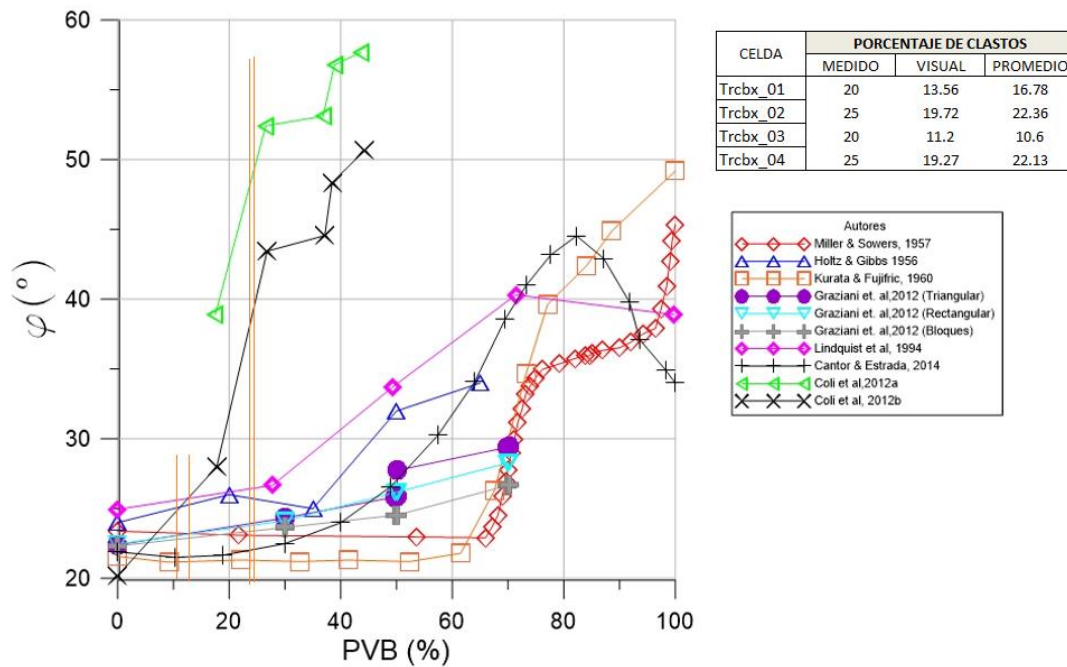


Figura 33. Variación del valor de Ángulo de fricción del *Bimrock* en función de la proporción volumétrica de bloques para los diferentes autores. Modificado de Guerra and Pinzón, (2015).

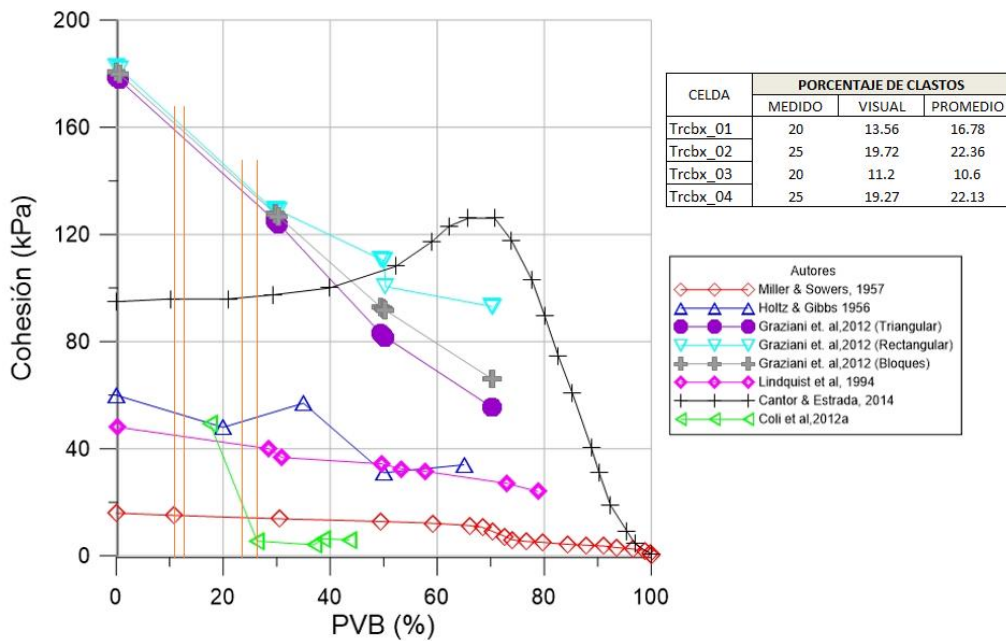


Figura 34. Variación del valor de Cohesión del *Bimrock* en función de la proporción volumétrica de bloques para los diferentes autores. Modificado de Guerra and Pinzón, (2015).

Los valores obtenidos para los parámetros de ángulo de fricción y cohesión del *Bimrock* del área de estudio se muestran en la Tabla 25 para cada una de las celdas de evaluación geotécnica según cada uno de los autores que se muestran en las gráficas realizadas por Guerra and Pinzón. (Figuras 33 y 34)

AUTOR	COHESION (KPa)				
	Trcbx_01	Trcbx_02	Trcbx_03	Trcbx_04	PROMEDIO
Miller&Sowers,1957	18	17	18	17	17,5
Holtz&Gibbs, 1956	58	57	58	57	57,5
Graziani et. Al., 2012 (Bloques)	161	138	161	140	150
Lindquist et al, 1994	43	41	43	41	42
Cantor & Estrada, 2014	95	96	95	96	95,5
Coli et al, 2012	SIN VALOR	15	SIN VALOR	20	17,5

AUTOR	ÁNGULO DE FRICCIÓN				
	Trcbx_01	Trcbx_02	Trcbx_03	Trcbx_04	PROMEDIO
Miller&Sowers,1957	23	22	23	22	22,5
Holtz&Gibbs, 1956	28	29	28	29	28,5
Graziani et. Al., 2012 (Bloques)	24	25	24	25	24,5
Lindquist et al, 1994	26	27	26	27	26,5
Cantor & Estrada, 2014	25	39	26	38	32
Coli et al, 2012	SIN VALOR	48	SIN VALOR	48	48

COHESIÓN (Kpa)	MIN	MAX	Ángulo de fricción	MIN	MAX
	18	150		23	48

Tabla 25. Variación del valor de Cohesión del *Bimrock* en función de la proporción volumétrica de bloques para los diferentes autores presentes en las gráficas realizadas por Guerra and Pinzón, (2015).

3.2.1 Resistencia a la compresión simple *Bimrock*

Existen reglas conceptuales que se han desarrollado a partir de los resultados de estudios realizados con el porcentaje de bloques es un *Bimrock* dentro de las cuales la relacionada a la resistencia a la compresión simple dice:

“La UCS *Bimrock* decrece cuando la UCS matriz se acerca a valores de 0 al igual y VBP = 0% entre VBP= 100%, mientras que cerca VPB es menor al 60% se presenta un contacto entre bloques casi nulo.” (Kalener A. et al, 2014)

Coli et al. 2011, desarrollaron un aparato para medir la resistencia la corte de un *Bimrock in-situ* al que llamaron *Bimtest* con base en los resultados de un estudio desarrollaron definieron una forma para obtener la resistencia a la compresión simple relacionando el criterio de linear Mohr-Coulomb mediante un parámetro nuevo llamado “A” para hacer aproximaciones

empíricas, el cual podemos obtener de la Tabla 26, y de los datos obtenidos en campo con el esclerómetro, para sustituirlos en la Ecuación 10.

Resumen de los valores de " A " calculados , basado en la angularidad de los bloques y tipo de matriz			
Fuente de datos	Angularidad y rugosidad de los bloque (α ángulo de reposo)	Tipo de matriz (UCS matriz)	Valor calculado de " A "
Lindquist (1994)	bloques redondos y subredondos (30°)*	Mezcla de Bentonita y cemento Portland (1030 kPa)	25
Altinsoy (2006)	bloques subangulosos - subredondos y redondos (entre 30° y 36° , 34° se uso como el valor promedio)	Tipo- 1:45% Yeso blanco, 5% Bentonita, 50% Agua (897.6)	30
		Tipo- 2:25% Yeso blanco, 35% cemento portland, 40% Agua (4102.2 kPa)	55
Coli et al. (2011)	bloques Angulosos - subangulosos y redondos (45°) *	Matriz de arcilla negra (58 kPa)	0,3
Afifipour and Moarefvand (2014)	bloques redondos - subredondos (agregados de río puede cambiar entre 20° y 30° , 25° se uso como el valor promedio)	Cemento Potland mezclado con agua , relación agua cemento 0.3 (-19 Mpa)	3
This study	bloques angulosos y subangulosos (45°)	Suelo arcilloso (155 Kpa)	3
	bloques subangulosos (35°)		2
	bloques subredondos - subangulosos (35°)	1,01	
	bloques angulosos y subangulosos (45°)	Similar a la tipo Altinsoy- 1: 45% Yeso balco,5%	70
	bloques subangulosos (38.5°)	bentonita, 50% agua (897.6 Kpa)	40
	bloques subredondos - subangulosos (35°)		30

* Valores Asumidos

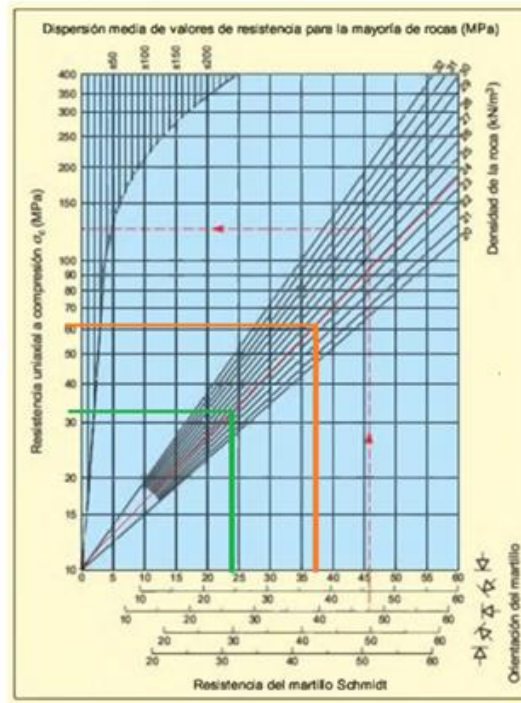
Tabla 26. Resumen de los valores de parámetro “A” basada en la forma de los bloques y el tipo de matriz. (Kalener A. et al, 2014)

DATOS DE ESCLERÒMETRO (POSICIÓN PERPENDICULAR)			
CELDA	MATRIZ	PROMEDIO	
Trcbx_01	12, 22, 0, 0, 10, 28, 26, 0, 20, 14, 16, 18, 26	23.3	23
Trcbx_02	12, 10, 14, 28, 16, 12, 0, 32, 34, 18, 22, 22, 30, 26, 18, 10, 0, 28, 22, 20, 32	26.9	27
Trcbx_03	12, 14, 14, 0, 0, 0, 0, 28, 14, 30, 24, 24, 30, 14, 24, 12, 14, 14, 28, 30	21.5	22
Trcbx_04	18, 20, 22, 0, 18, 0, 16, 20, 24, 30, 22, 10, 30, 12, 26, 12, 14, 28	24.6	25
CELDA	BLOQUES	PROMEDIO	
Trcbx_01	44, 40, 30, 18, 64, 42, 24, 0, 0, 32, 40, 52	47.3	47
Trcbx_02	34, 44, 38, 16, 18, 28, 20, 18, 44, 44, 18, 40, 30, 36, 30, 40, 42, 30, 34, 36	41	41
Trcbx_03	22, 20, 0, 10, 24, 24, 30, 36, 28, 40, 22, 20, 10, 0, 24, 30	29.5	30
Trcbx_04	24, 24, 10, 10, 12, 24, 30, 30, 40, 42, 28, 10, 12, 26, 32	30	30

Tabla 27. Tabla de datos medidos en campo con el esclerómetro.

DATOS DE ESCLERÒMETRO		
CELDA	Matriz	Bloques
Trcbx_01	23	47
Trcbx_02	27	41
Trcbx_03	22	30
Trcbx_04	25	30
PROMEDIO	24,25	37

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE	Mpa	
	MATRIZ	BLOQUES
	10	30



González de Vallejo (2002). Modificada de tabla para cálculo de la resistencia uniaxial a partir del martillo de Schmidt.

Figura 35. Resultados de valores de resistencia a la compresión simple UCS de bloques y matriz a partir de los datos medidos en campo con el esclerómetro.

CÁLCULO DEL VALOR DE RESISTENCIA LA COMPRESIÓN SIMPLE DEL BIMROCK

$$UCS \text{ bimrock} = \frac{(A - A^{(VBP/100)})}{(A-1)} UCS \text{ matriz (KPa)} \quad 0.1 \leq 500 \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 10}$$

(Kalener A. et al, 2014)

Cálculo:

$$UCS \text{ bimrock} = \frac{\left(0.3 - 0.3^{\left(\frac{25}{100}\right)}\right)}{(0.3 - 1)} 10000 = 6286.89721 \text{ KPa}$$

$$= 6.28 \text{ MPa}$$

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Sánchez- Reyes, (2016) en el documento “Ingeniería de Túneles” utilizado en la clase de Sistemas de Sostentamiento de la Maestría en Túneles y Obras Subterráneas UNAM, describe un Modelo Geomecánico como un análisis numérico del comportamiento del macizo rocoso que proporciona los resultados que servirán como base del pre-diseño de un proyecto ya que es el resultado de la integración completa de todos los estudios de campo y laboratorio realizados, éste se plantea en CAD (*Computer Assisted Drawing*, por sus siglas en inglés), donde se menciona la importancia de que quien lo realiza debe de entender los conceptos de la información que se le alimenta al Software de análisis que se está utilizando: “Para el estudio de la excavación de un túnel que se analizará por alguna técnica numérica (Elementos, Finitos, Diferencias Finitas, etc.) es necesario, en la etapa previa a la modelación matemática, comprender bien, todos o por lo menos, gran parte de los factores que podrían influir en el comportamiento de la obra. El programa de computadora para el análisis geotécnico utilizado debe tener en cuenta los aspectos fundamentales más importantes para una aproximación al problema real. Hay que destacar que la consideración de tales aspectos, en muchas ocasiones es imprescindible, y el hecho de ignorarlos o desconocerlos puede tener como consecuencia un resultado completamente ajeno al que posteriormente presentará la excavación.”

García Sánchez (2013), en su tesis de Maestro en Ingeniería “Análisis retrospectivo para la determinación de las propiedades geomecánicas y revisión de la estabilidad del talud izquierdo del vertedor de la C. H. La Yesca”, dentro del apartado 3.2. Análisis esfuerzo-deformación, Elección del método numérico a utilizar, da una explicación del papel de los métodos numéricos en la geotecnia y de la importancia de la elección al momento de realizar un análisis de estabilidad, el contenido del capítulo se puede resumir en lo siguiente: “Los métodos numéricos se suelen emplear en muchos problemas de estabilidad de macizos rocosos especialmente cuando tienen complejidades especiales, ya sea por la anisotropía del material, o bien por el comportamiento no lineal del mismo, ó por el estado de esfuerzos del macizo, por la presencia de agua o el efecto de los sismos, y por la complejidad en las características geológicas y geomecánicas del material. Dentro de la ingeniería geotécnica, los métodos de análisis más utilizados para la estabilidad de un talud son los métodos de cálculo de deformaciones (esfuerzo-deformación), que consideran las deformaciones del terreno, así como las leyes de la estática, analizan el proceso de deformación en cada uno de los puntos seleccionados del modelo, permiten evaluar la influencia de los diferentes parámetros como

esfuerzos naturales del terreno, fuerzas dinámicas, presiones de agua, etc. permiten resolver tanto problemas bidimensionales como tridimensionales, deben de aplicarse determinadas condiciones de frontera al modelo, de la aplicación de la ley de comportamiento adecuada del material y de las propiedades resistentes y deformacionales de las diferentes litologías involucradas en el modelo, los resultados que proporcionan son los valores de los esfuerzos, deformaciones y resistencias que se generan en el modelo analizado, aportando la naturaleza y magnitud de los desplazamientos del material, compatibles con la condición de equilibrio del talud. En la mecánica de rocas, se suelen usar principalmente tres tipos de métodos numéricos para resolver los problemas esfuerzo-deformación. Estos métodos son: 1. Método de Elementos Finitos (FEM), 2. Método de Elementos de Frontera (BEM), 3. Método de Elementos Discretos (DEM).

4.1 Cálculo del Estado de Esfuerzos In Situ

De acuerdo con los trabajos de Sánchez-Reyes, (2016) en su documento “Ingeniería de Túneles” se sabe que uno de los problemas más inciertos en Ingeniería Geotécnica y que condiciona más los resultados de los análisis, es el desconocimiento de estado tensional en el interior de un macizo rocoso. En cuanto al estado de esfuerzos geostático suele asumirse que los esfuerzos verticales obedecen una ley aproximadamente lineal en función del peso específico del macizo y de la profundidad. Sin embargo, los esfuerzos horizontales no varían con relaciones fácilmente identificables. En la gran mayoría de los casos los proyectos no justifican la gran inversión económica que representa llevar a cabo medidas in situ de los estados tensionales del macizo rocoso, por lo que es necesario establecer una serie de hipótesis sobre la relación de esfuerzos horizontales y verticales ($K_0 = \sigma_{\text{vertical}} / \sigma_{\text{horizontal}}$), basadas en la experiencia del proyectista y en las aproximaciones empíricas propuestas por algunos autores (Regla de Heim, Hoek y Brown, fórmula de Jacky, etc.). En suelos y rocas muy blandas una propuesta algo más realista en este caso sería la fórmula de Jaky: $K_0 = 1 - \sin \phi$. Esta fórmula es muy difundida en geotecnia y de hecho es la que algunos programas de elementos finitos utilizan por defecto. Sin embargo, la experiencia en macizos rocosos indica que la fórmula de Jaky puede subestimar los esfuerzos horizontales de forma importante, en caso de mecánica de rocas Hoek and Brown proponen una variación de K_0 con la profundidad de acuerdo con la siguiente expresión $K_0 = 100/z + 0.3 < K_0 < 100/z + 0.5$. (Tabla 28)

SITIO	PROFUNDIDAD	ECUACIÓN	PARÁMETROS	K0
	METROS (m)			
BIMROCK	15	Jaky; $K_0 = 1 - \tan \phi$	$\phi = 25$	1.13
TALUDES	50	Hoek and Brown $k_0 = 100/z + 0.3 < k_0 < 100/z + 0.5$	2.3	2.5
	100		1.3	1.5

Tabla 28 Cálculo de valores de K0.

4.2 Mapa geotécnico del área de estudio

Con base a los resultados de la evaluación de las características físicas y mecánicas de las unidades volcánicas del área de estudio mediante la utilización de los métodos de caracterización geotécnica RMR y GSI se dividieron en tres unidades geotécnicas; UG 1 (Unidad Geotécnica), UG 2 y UG 3 y se calcularon de los parámetros mecánicos Cohesión (C) y Ángulo de Fricción (ϕ).

La UG 1 incluye a la Riodacita del Carmen con valores de GSI de 60- 70 lo que la denomina como BUENA CALIDAD, su descripción geotécnica se describe como un macizo rocoso que presenta tres sistemas de discontinuidades (dos sistemas de fracturamiento principales y uno aleatorio) con paredes sin alteración, se encuentran cerradas, son superficies algo rugosas, la separación promedio entre las discontinuidades es de 60 cm y persisten a lo largo de los taludes donde se evaluaron los cuales superan la altura de 10 m, el promedio de RQD es de 60 %, la resistencia a la compresión simple de la roca intacta medida en laboratorio 20 MPa.

La UG 2 incluye las unidades litológicas Ignimbrita El Órgano y Toba Álamos con valores de GSI de 40- 60, se denomina como REGULAR CALIDAD se describe como un macizo rocoso que presenta tres sistemas de discontinuidades, las paredes se encuentran de sanas a algo alteradas, son superficies algo rugosas, su apertura no supera 1 cm, pero en los planos de pseudoestratificación podemos encontrar una capa de relleno blando (arcilla), la separación entre las discontinuidades es de 6-20 cm y persisten a lo largo de los taludes donde se evaluaron los cuales superan la altura de 10 m, no se observó presencia de agua en ninguno de los afloramientos, el promedio de RQD es de 60%, la resistencia a la compresión simple de la roca intacta calculada con el martillo de Schmidt es de 50 MPa.

La UG 3 corresponde a la unidad litológica caracterizada como Brecha El Realito, de manera geotécnica se clasifica como un material tipo *Bimrock*, el cual significa, en inglés, *block-in-matrix rocks* y su traducción al español es bloques de rocas en matrices para designar a una mezcla de bloques de rocas geotécnicamente significantes dentro de una matriz más fina y débil, incluir el concepto geotécnicamente significantes en esta definición significa que estos bloques tienen un comportamiento significativo y diferente a la matriz dentro de esa masa rocosa, es por esto que definir su volumen dentro de la misma es de total importancia ya que de esto depende su comportamiento ante el cambio del estado de esfuerzos al que encuentra de forma natural por lo cual se evaluaron además del volumen.

- A) Bloques: Forma, tamaño de diámetros y ángulo de alineación con respecto a la horizontal
- B) Bloques y Matriz: Resistencia a la compresión simple y su valor de adherencia entre ambos.

Se obtuvieron los valores de los parámetros de resistencia para el criterio de Mohr-Coulomb, Cohesión 48 KPa, Ángulo de fricción = 25° y Resistencia a la compresión simple de 6.28 MPa.

Con la elaboración de este mapa geotécnico del área de estudio se cumple con uno de los objetivos de este trabajo de tesis de maestría definido como “Caracterización geomecánica de los macizos rocosos, por los métodos RMR de Bieniawski (1989) y GSI de Marinos and Hoek (2000), mediante levantamientos geotécnicos en campo, logeo geotécnico de núcleos de barrenación y correlación de fórmulas matemáticas geotécnicas para realizar el mapa geotécnico del área de estudio”. El mapa se nombra como Mapa Geotécnico de Área de la Presa El Realito (Figura 36)

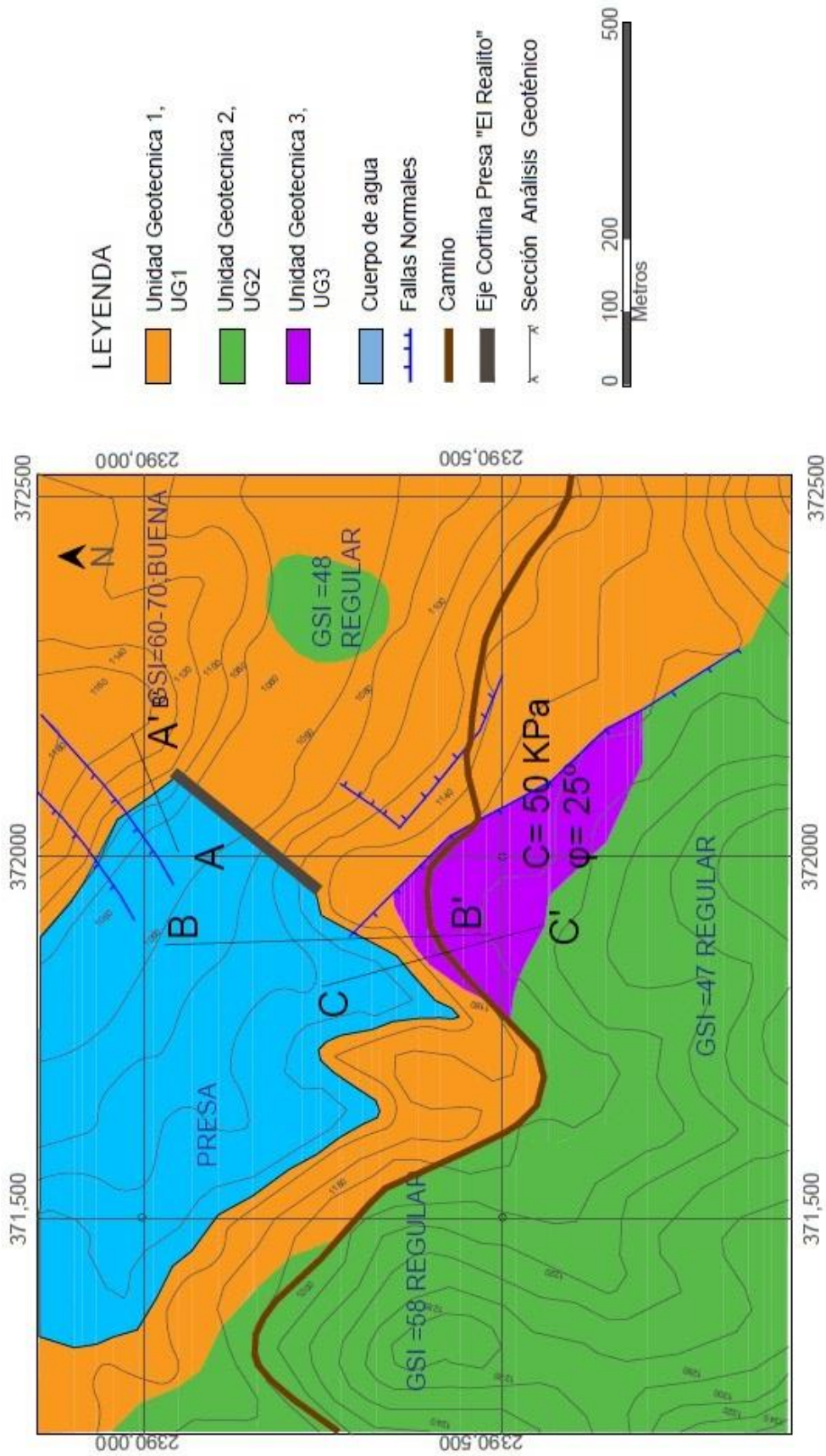


Figura 36 . Mapa Geotécnico de Área de la presa "El Realito"

4.3 Modelado del comportamiento de taludes

Actualmente la presa “El Realito” ya se encuentra en operación por lo que es imposible observar ambos taludes hacia el vaso de la presa, la clasificación y análisis geotécnico de estabilidad de taludes fue complejo, para el modelo numérico realizado se hizo uso del *software* SSAP 4.9.9-2019 (*Slope Stability Analysis Program*) desarrollado por Dr. Lorenzo Borselli. Se construyeron dos secciones una en la margen derecha y otra en la margen izquierda dentro del vaso de la presa, la línea piezométrica se colocó al nivel máximo de llenado con estas condiciones se realizaron los modelos con tres valores diferentes de coeficiente sísmico (K_h) que van desde la inexistencia de aceleración sísmica hasta una condición en la cual el sismo se presenta hasta con una magnitud de 5.0.

La aplicación de la metodología híbrida entre equilibrio límite y elementos finitos es empleada en los análisis de estabilidad de taludes, debido a que utiliza un método numérico aplicado para la resolución de un problema esfuerzo-deformación, además puede ser aplicable el criterio de ruptura no lineal, este método se adapta a la simulación del problema, cumpliendo las condiciones de equilibrio, compatibilidad, y que además permite reflejar las condiciones de contorno y, de alguna manera, los procesos de excavación.

4.3.1 Análisis de estabilidad del margen izquierdo de la Presa El Realito

Los parámetros geotécnicos del margen izquierdo se muestran en la Tabla 28, esta margen se dividió en tres estratos según el valor de GSI, para el modelado se dibujaron estos tres estratos divididos de forma horizontal, se dibujó la superficie del agua a máximo nivel de la presa, para el cálculo del valor del factor de seguridad y los diagramas de superficie de falla con mayor potencial y presión de poro. El resumen de resultados se presenta en la Tabla 29, donde se muestra el factor de seguridad obtenido para diferentes escenarios en la margen izquierda, en todos los casos los valores de factor de seguridad superan $FS = 1.5$.

Parámetros geotécnicos	ESTRATO 1	ESTRATO 2	ESTRATO 3
GSI	52	70	51
Peso específico SECO	21.4	21.4	21.4
Peso específico SATURADO	21.5	21.5	21.5
Resistencia a la compresión simple (Mpa)	38	38	38
mi	21	21	21
D	0	0	0

Tabla 28. Parámetros geotécnicos de la margen izquierda.

CASO	Coeficiente sísmico horizontal (Kh)	Coeficiente sísmico vertical (Kv)	FS Mínimo	FS Máximo
1	0.0	0.0	2.2792	2.3466
2	0.06	0.03	1.6913	1.8511
3	0.1	0.05	1.5780	1.6529

Tabla 29. Resumen de resultados cálculo de Factor de Seguridad, Margen Izquierda.

CASO 1; Margen Izquierda

SECCIÓN A- A', DENTRO DE LA PRESA

- Coeficiente sísmico = 0.0
- Presa llena al MÁXIMO NIVEL
- TRES ESTRATOS GEOTÉCNICOS:

1. GSI = 51 CALIDAD REGULAR
2. GSI = 70 CALIDAD BUENA
3. GSI = 52 CALIDAD REGULA

FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO, FS = 2.27 (Figuras 37 y 38)

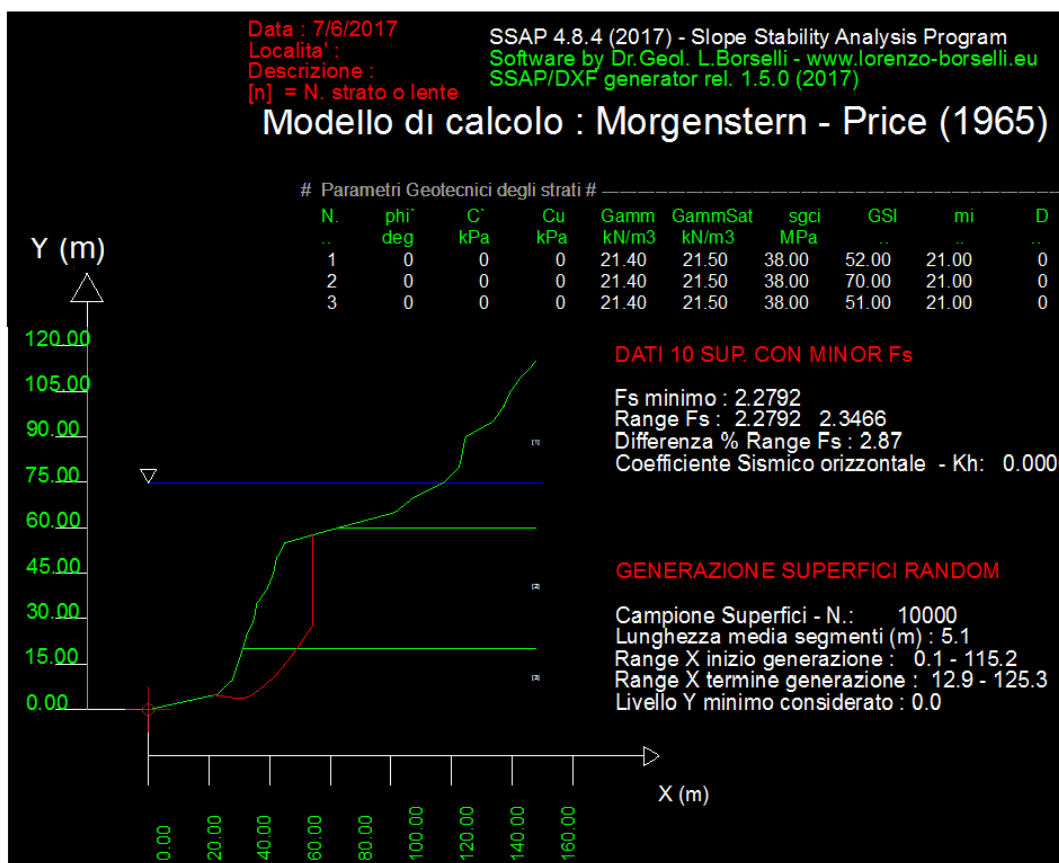


Figura 37. Superficie de FALLA, PRINCIPAL, caso 1; Margen Izquierda

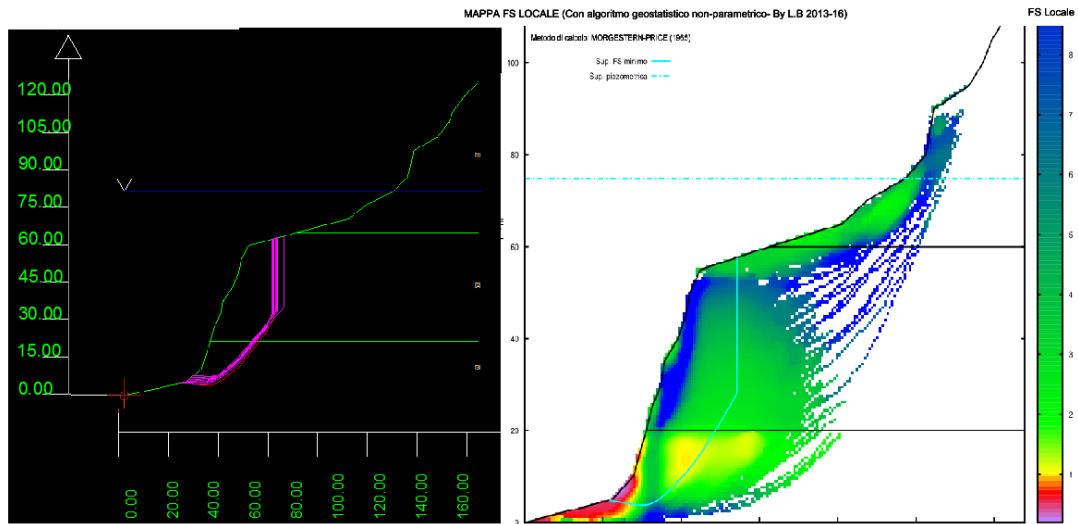


Figura 38. Superficie de CÁLCULO DE FACTOR DE SEGURIDAD falla, caso 1; Margen Izquierda.

CASO 2; Margen Izquierda

- ▶ SECCIÓN A- A', DENTRO DE LA PRESA
- ▶ Coeficiente sísmico

$$K_h = 0.06$$

$$K_v = 0.03$$

- ▶ Presa llena al MÁXIMO NIVEL
- ▶ TRES ESTRATOS GEOTÉCNICOS:
 1. GSI = 51 CALIDAD REGULAR
 2. GSI = 70 CALIDAD BUENA
 3. GSI = 52 CALIDAD REGULAR

FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO, FS = 1.69 (Figuras 39, 40 y 41)

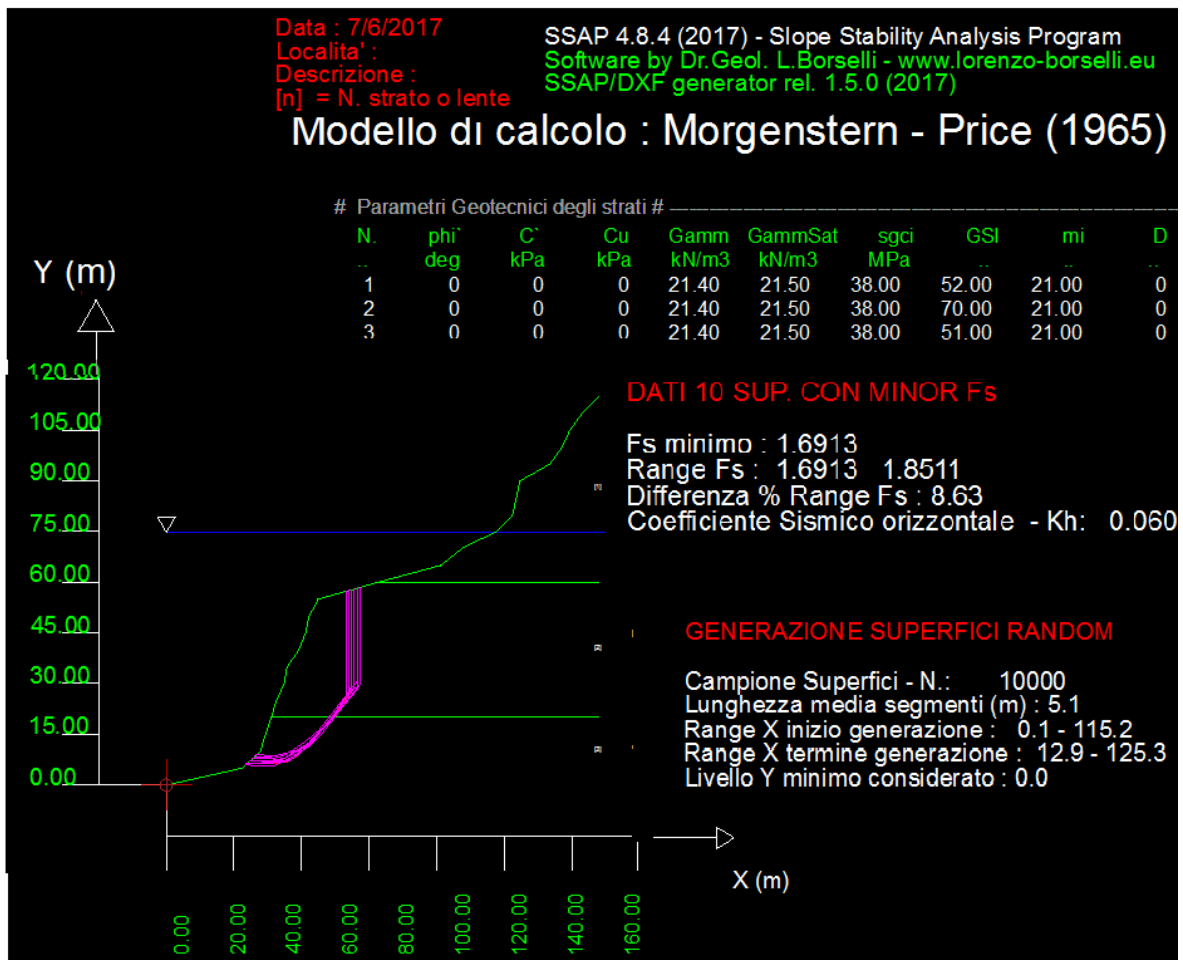


Figura 39. Superficie de FALLA, PRINCIPAL, caso 2; Margen Izquierda

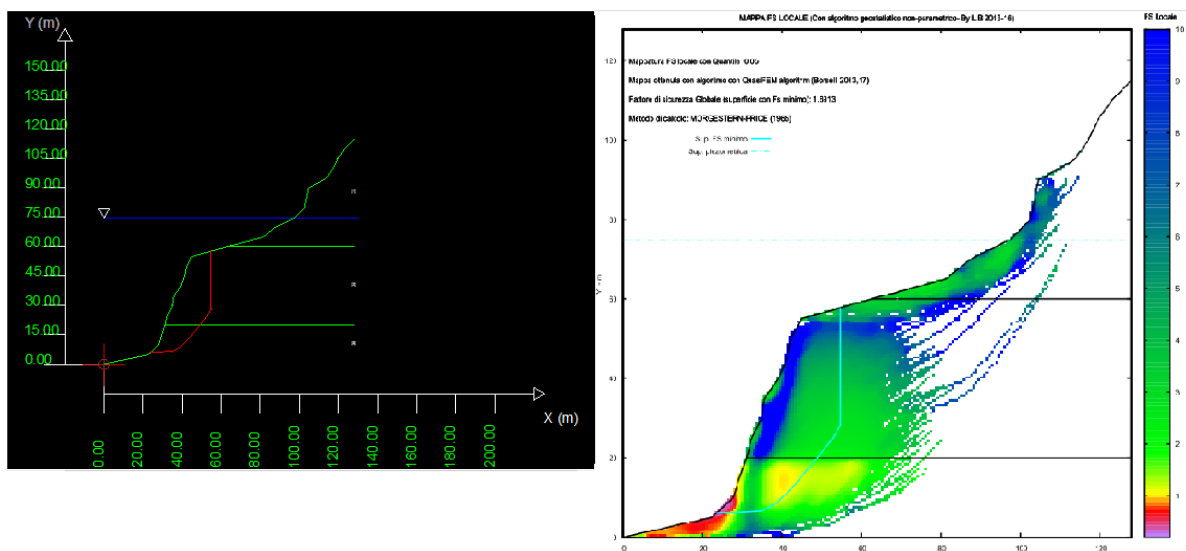


Figura 40. Superficie de CÁLCULO DE FACTOR DE SEGURIDAD falla, caso 2; Margen Izquierda.

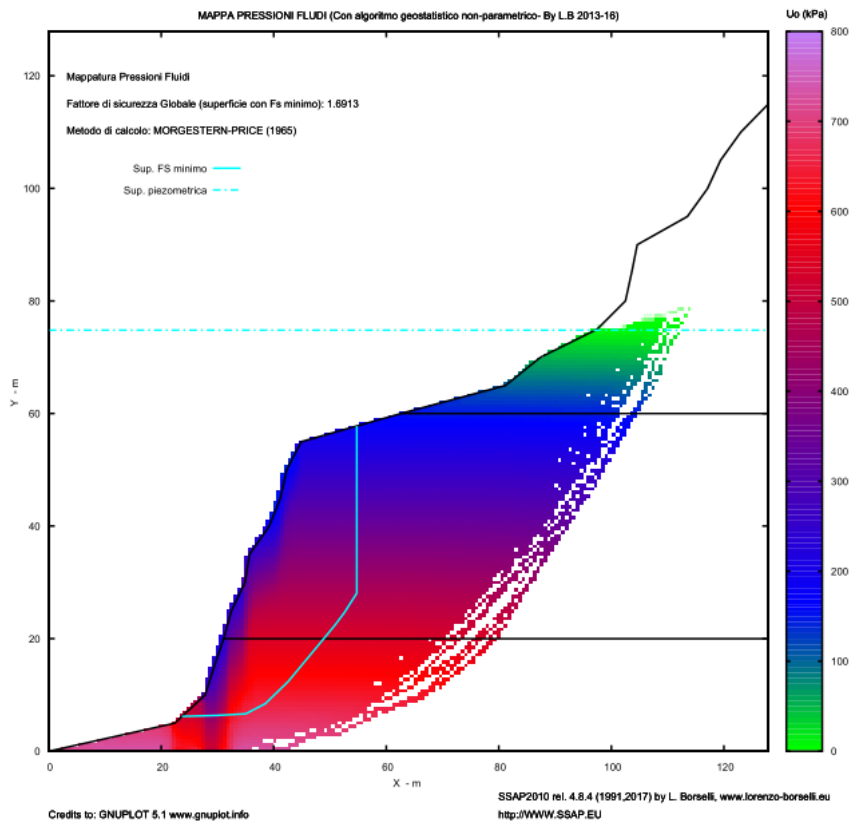


DIAGRAMA DE PRESIÓN DE PORO, MARGEN IZQUIERDA "El Realito" sección A-A'

Figura 41. Diagrama de PRESIÓN DE PORO, caso 2; Margen Izquierda.

CASO 3; Margen Izquierda

- ▶ SECCIÓN A- A', DENTRO DE LA PRESA
- ▶ Coeficiente sísmico máximo valor

$K_h = 0.1$

$K_v = 0.05$

- ▶ Presa llena al MÁXIMO NIVEL
- ▶ TRES ESTRATOS GEOTÉCNICOS :
 1. GSI = 51 CALIDAD REGULAR
 2. GSI = 70 CALIDAD BUENA
 3. GSI = 52 CALIDAD REGULAR

FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO, $FS = 1.57$ (Figuras 42, 43 y 44)

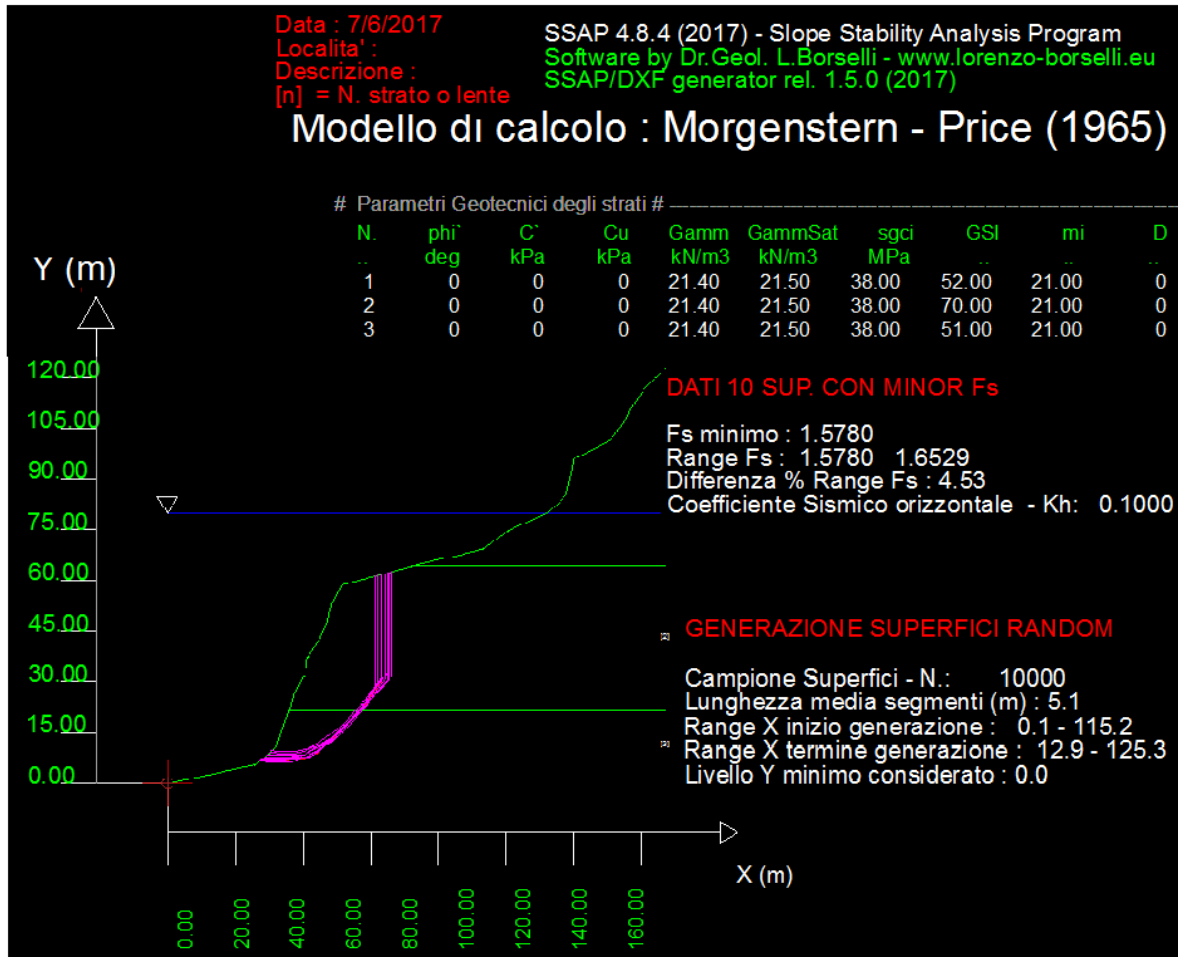


Figura 42. Superficie de FALLA, PRINCIPAL, caso 3; Margen Izquierda

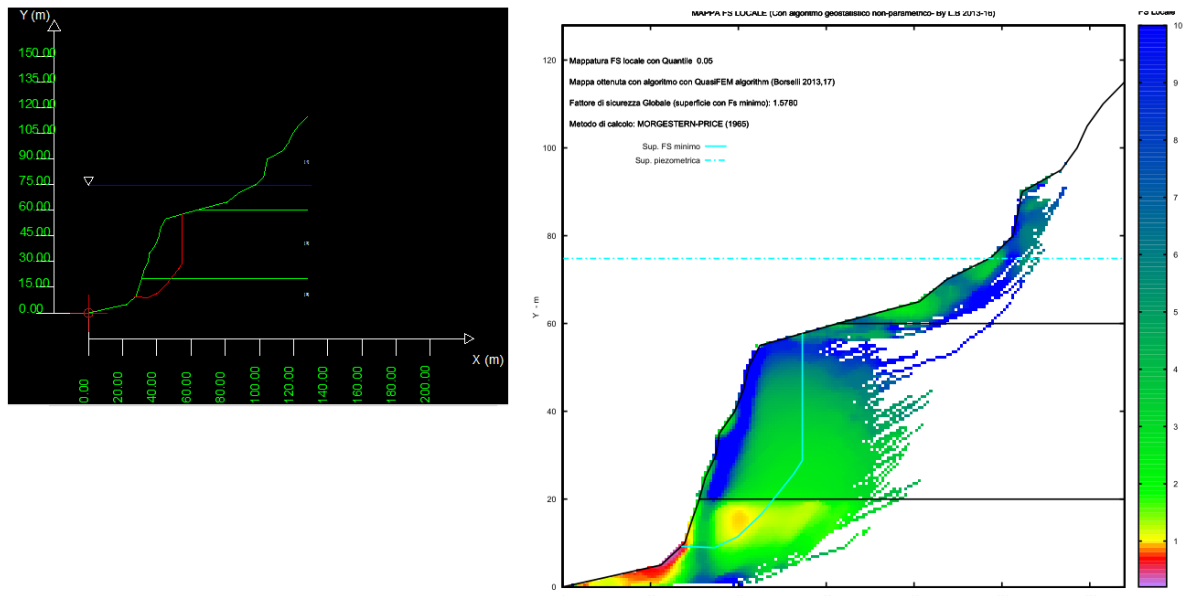


Figura 43- Superficie de CÁLCULO DE FACTOR DE SEGURIDAD falla, caso 2; Margen Izquierda.

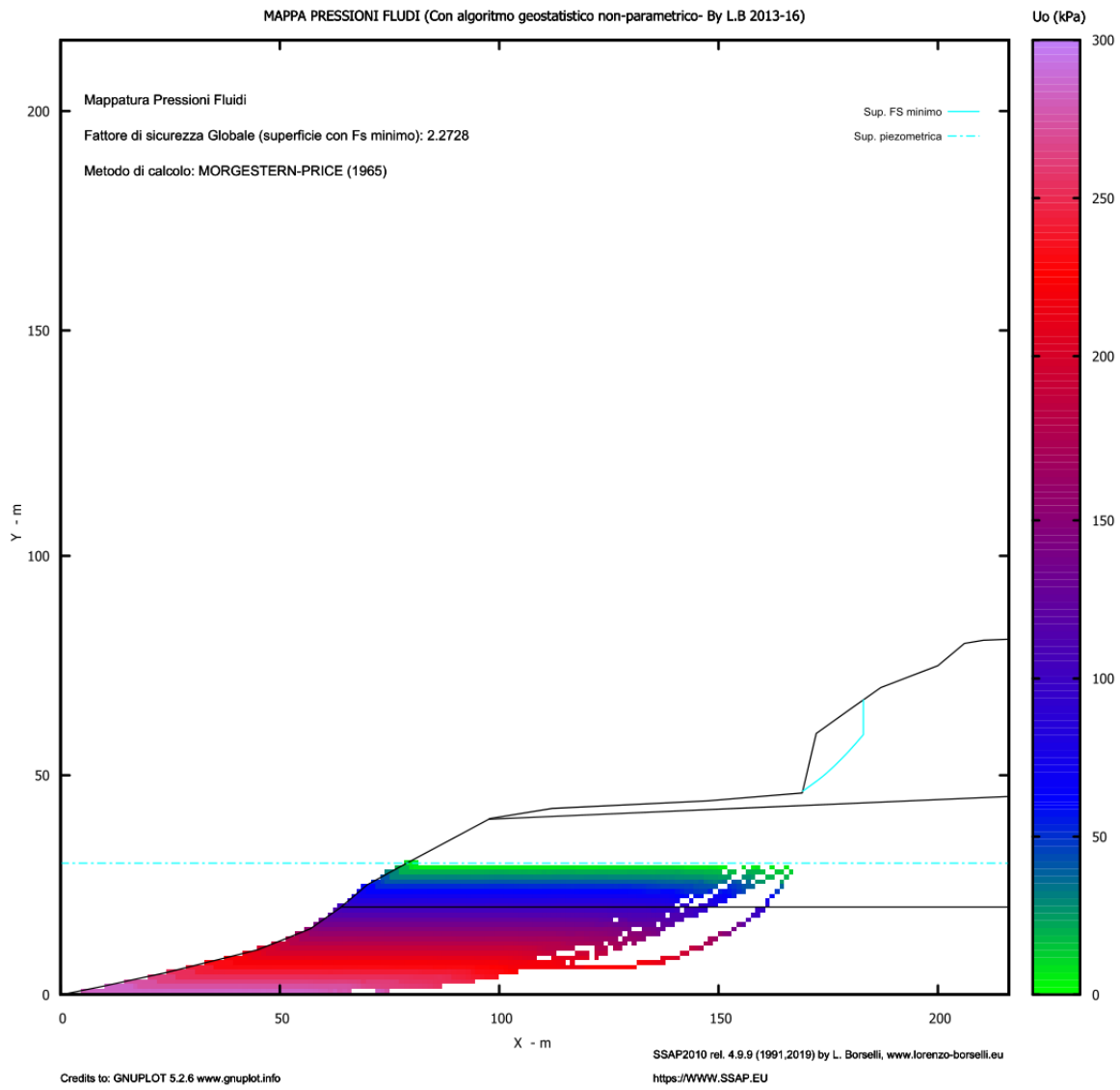


Figura 44. Diagrama de PRESIÓN DE PORO, caso 3; Margen Izquierda.

4.3.1 Análisis de estabilidad del margen derecho de la Presa El Realito

Los parámetros geotécnicos del margen derecho se muestran en la Tabla 30, esta margen se dividió en cuatro estratos, tres de ellos en roca Riodacita del Carmen y según el valor de GSI, para el modelado se dibujaron estos tres, divididos de forma horizontal, en la parte superior se dibujó una estrato que corresponde al *Bimrock* al cual se le asignaron los parámetros de ángulo de fricción y cohesión, también se dibujó la superficie del agua a máximo nivel de la presa, para el cálculo del valor del factor de seguridad y los diagramas de superficie de falla con mayor potencial y presión de poro. El resumen de resultados se presenta en la Tabla 31 donde se muestra el factor de seguridad obtenido para diferentes escenarios en la margen izquierda, en todos los casos los valores de factor de seguridad superan FS= 1.5.

Parámetros geotécnicos	ESTRATO 1	ESTRATO 2	ESTRATO 3
GSI	52	70	50
Peso específico SECO	21.4	21.4	21.4
Peso específico SATURADO	22	22	22
Resistencia a la compresión simple (Mpa)	18.5	18.5	18.5
mi	25	25	25
D	0	0	0

	BIMROCK
Ángulo de Fricción	43°
Cohesión	150 (kPa)
Peso específico SECO	23
Peso específico SATURADO	24

Tabla 30. Parámetros geotécnicos de la margen izquierda.

CASO	Coefficiente sísmico horizontal (Kh)	Coefficiente sísmico vertical (Kv)	FS Mínimo	FS Máximo
SECCIÓN B- B', DENTRO DE LA PRESA				
1	0.0	0.0	5.4863	5.4920
2	0.06	0.03	4.3267	4.3402
3	0.1	0.05	2.0712	2.6167
4	VACIADO RÁPIDO		3.8127	3.8386
SECCIÓN C- C', DENTRO DE LA PRESA				
1	0.0	0.0	2.6696	2.4811
2	0.06	0.03	2.4205	2.4811
3	0.1	0.05	2.2728	2.3463

Tabla 31. Resumen de resultados cálculo de Factor de Seguridad, Margen Izquierda.

CASO 1; Margen Derecha

SECCIÓN B- B', DENTRO DE LA PRESA

- Coeficiente sísmico = 0.0
- Presa llena al MÁXIMO NIVEL
- CUATRO ESTRATOS GEOTÉCNICOS:
 1. GSI = 51 CALIDAD REGULAR
 2. GSI = 70 CALIDAD BUENA
 3. GSI = 50 CALIDAD REGULA
 4. *BIMROCK*

FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO, FS = 2.27 (Figuras 45,46 y 47)

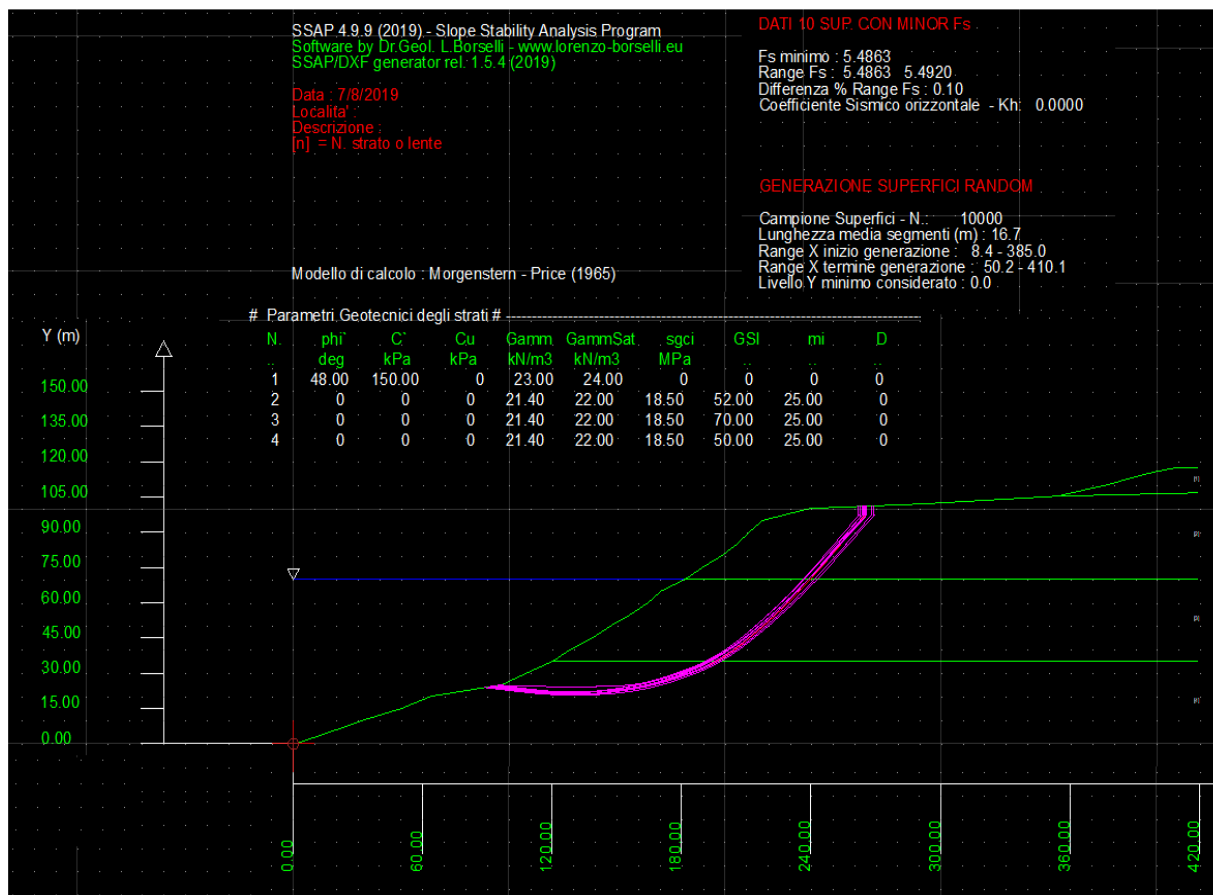


Figura 45. Superficie de FALLA, PRINCIPAL, caso 1; Margen Derecha.

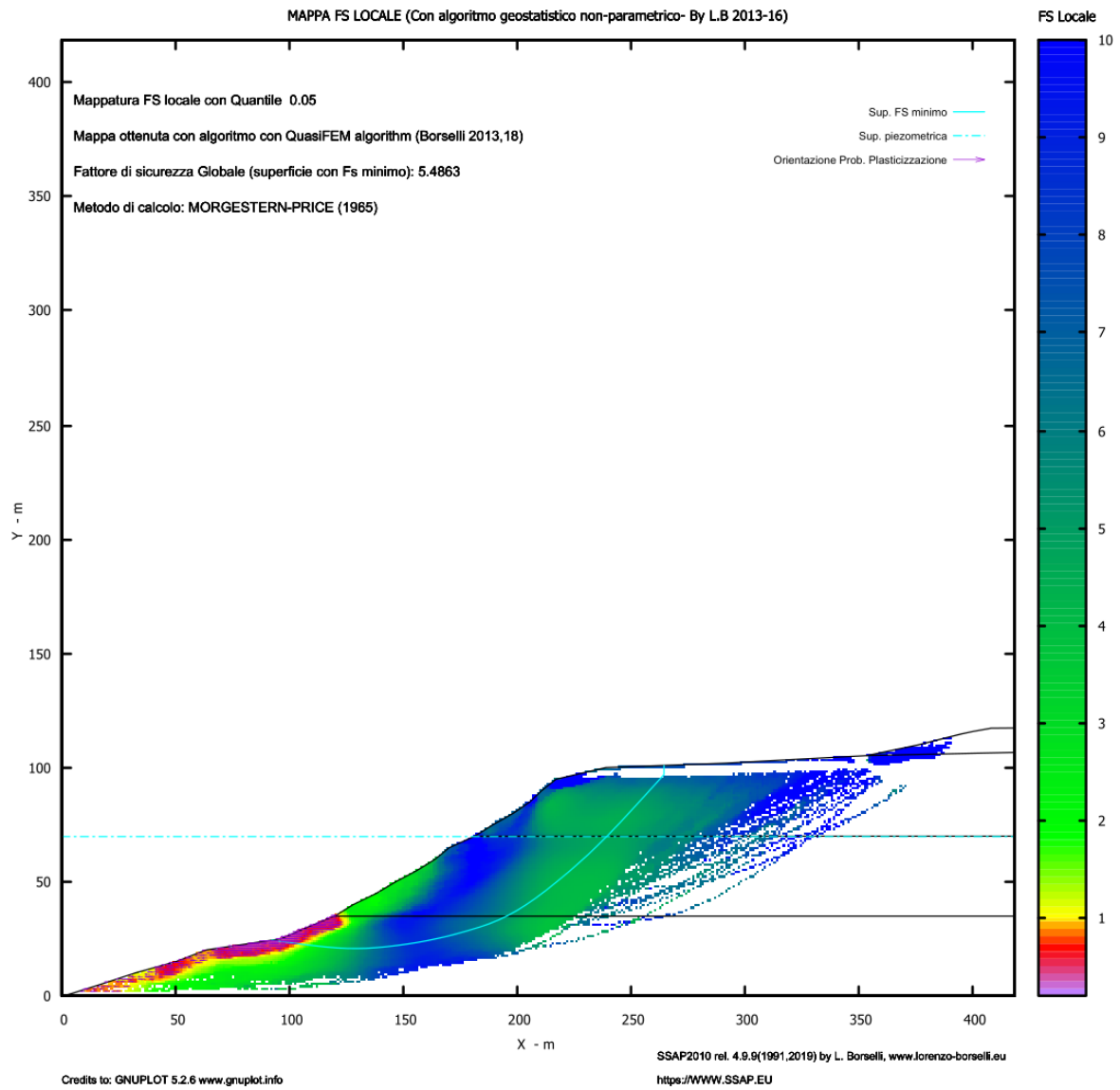


Figura 46- Superficie de CÁLCULO DE FACTOR DE SEGURIDAD, caso1, Margen Derecha.

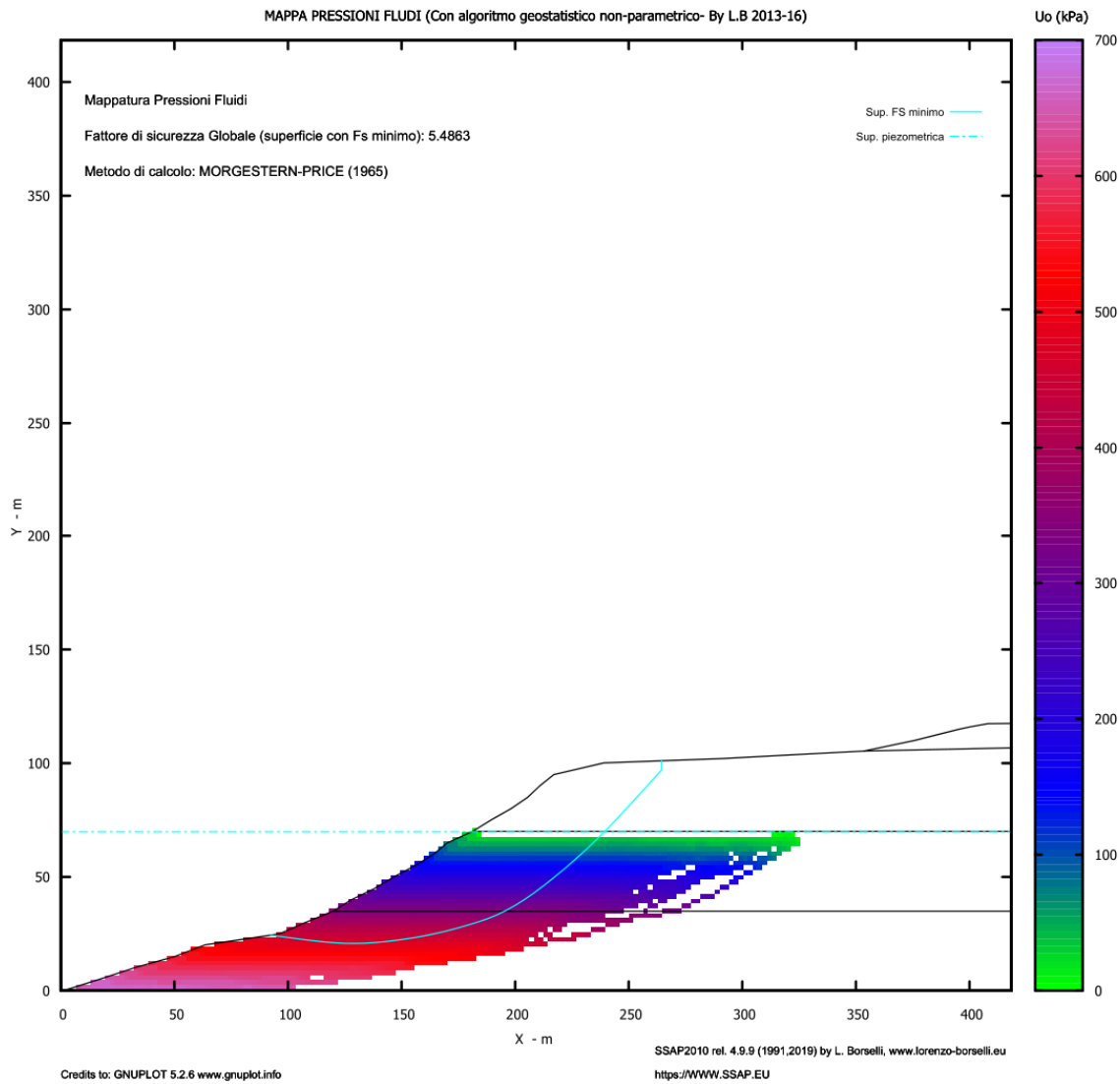


Figura 47. Diagrama de PRESIÓN DE PORO, caso 1; Margen Derecha.

CASO 2; Margen Derecha

- ▶ SECCIÓN B- B', DENTRO DE LA PRESA
- ▶ Coeficiente sísmico

$$K_h = 0.06$$

$$K_v = 0.03$$

- ▶ Presa llena al MÁXIMO NIVEL
- ▶ CUATRO ESTRATOS GEOTÉCNICOS:

1. GSI = 51 CALIDAD REGULAR
2. GSI = 70 CALIDAD BUENA
3. GSI = 52 CALIDAD REGULAR
4. *Bimrock*

FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO, FS = 4.32 (Figuras 48, 49 y 50)

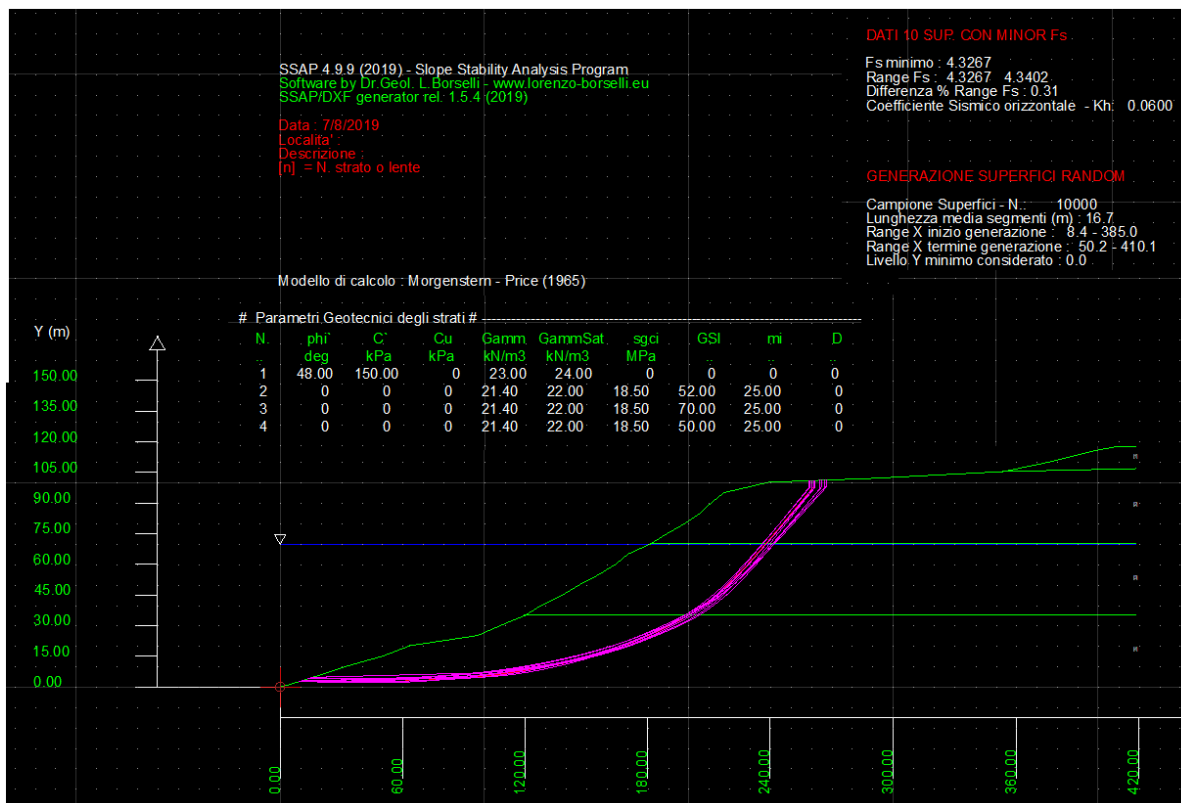


Figura 48. Superficie de FALLA, PRINCIPAL, caso 2; Margen Derecha.

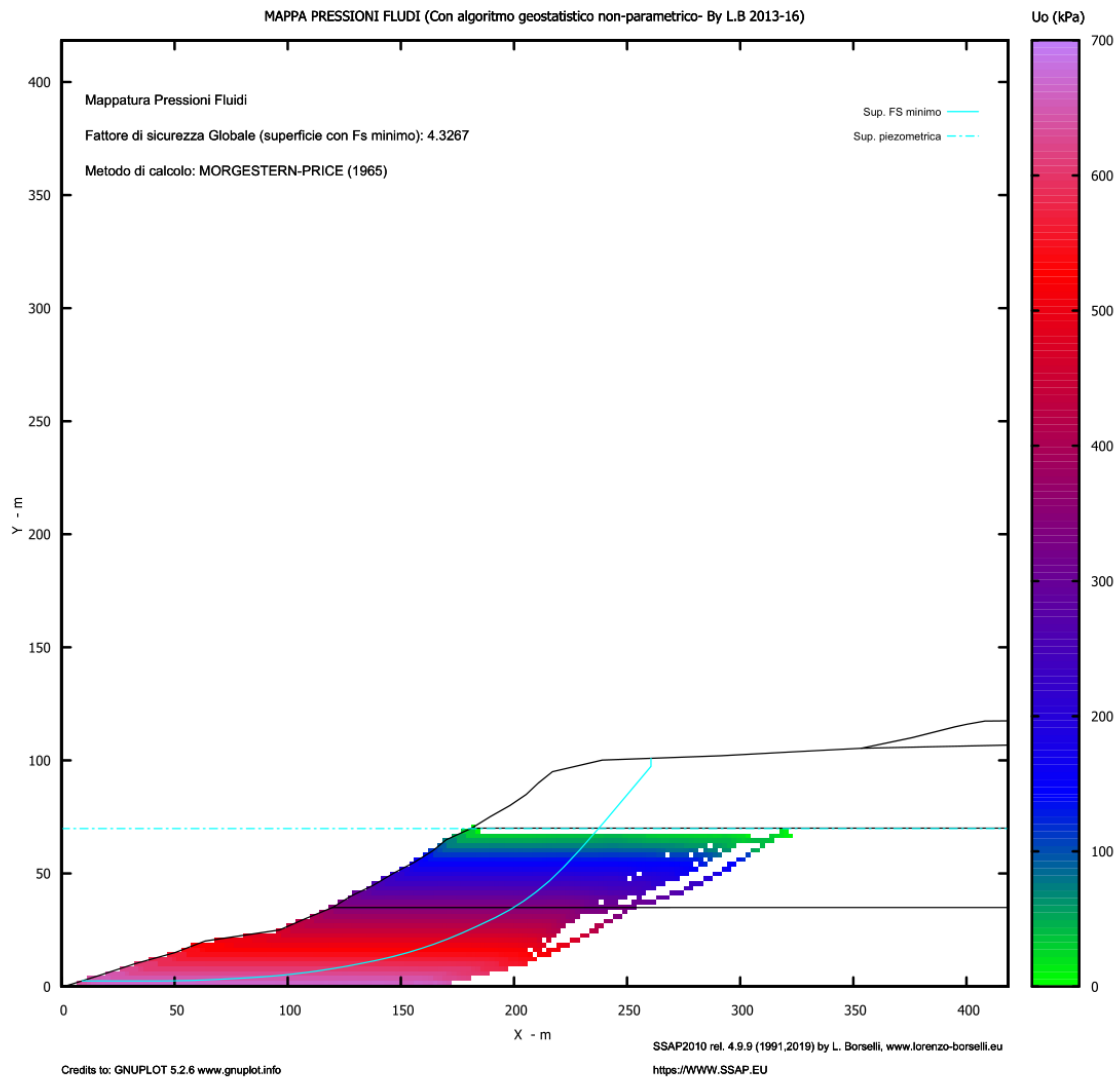


Figura 49- Superficie de CÁLCULO DE FACTOR DE SEGURIDAD, caso 2, Margen Derecha.

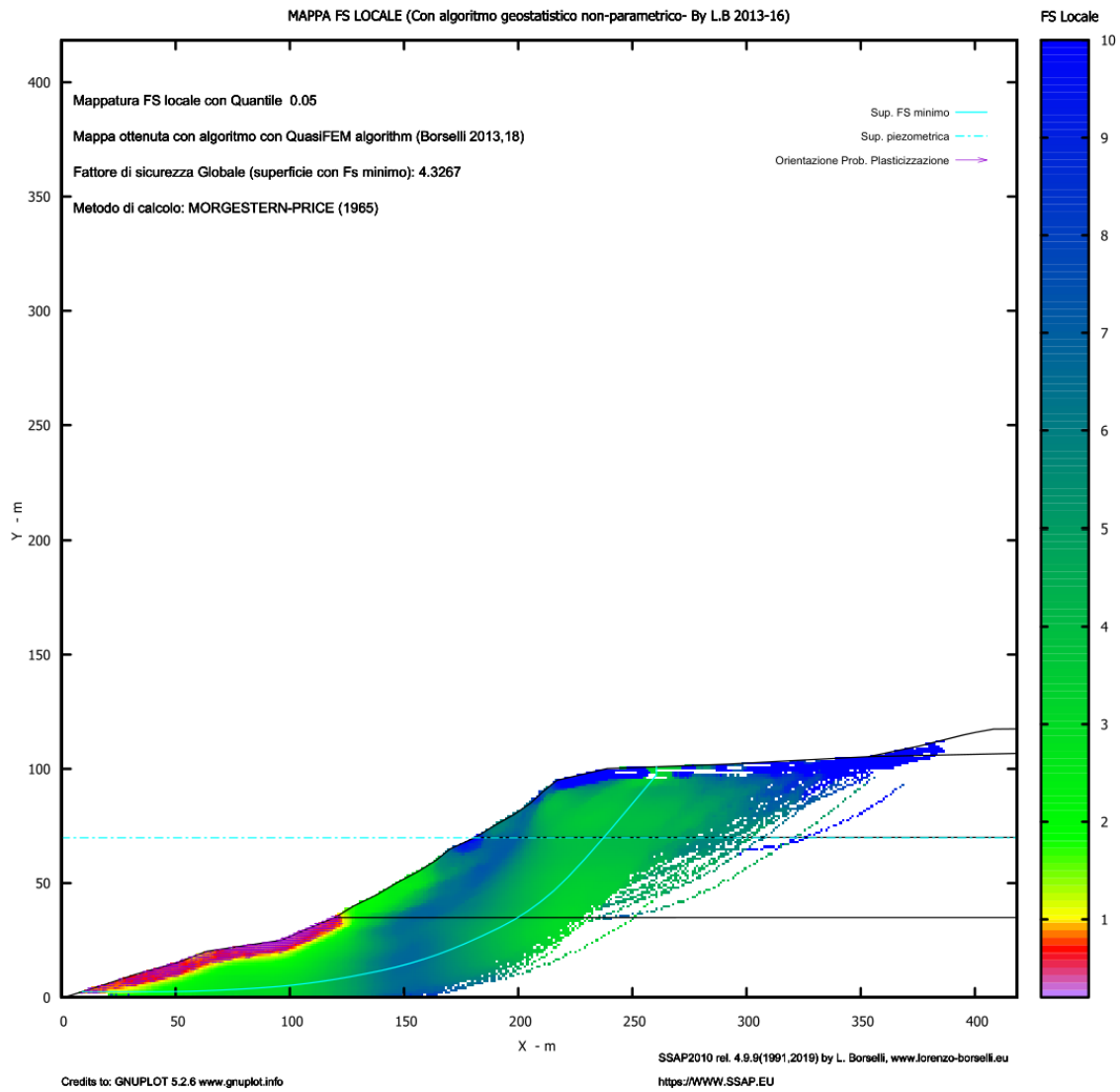


Figura 50. Diagrama de PRESIÓN DE PORO, caso 2; Margen Derecha.

CASO 3; Margen Derecha

- ▶ SECCIÓN B- B', DENTRO DE LA PRESA
- ▶ Coeficiente sísmico máximo valor

$K_h = 0.1$

$K_v = 0.05$

- ▶ Presa llena al MÁXIMO NIVEL
- ▶ CUATRO ESTRATOS GEOTÉCNICOS:

1. GSI = 51 CALIDAD REGULAR
2. GSI = 70 CALIDAD BUENA
3. GSI = 52 CALIDAD REGULAR
4. *Bimrock*

FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO, FS = 1.57 (Figuras 51, 52 y 53)

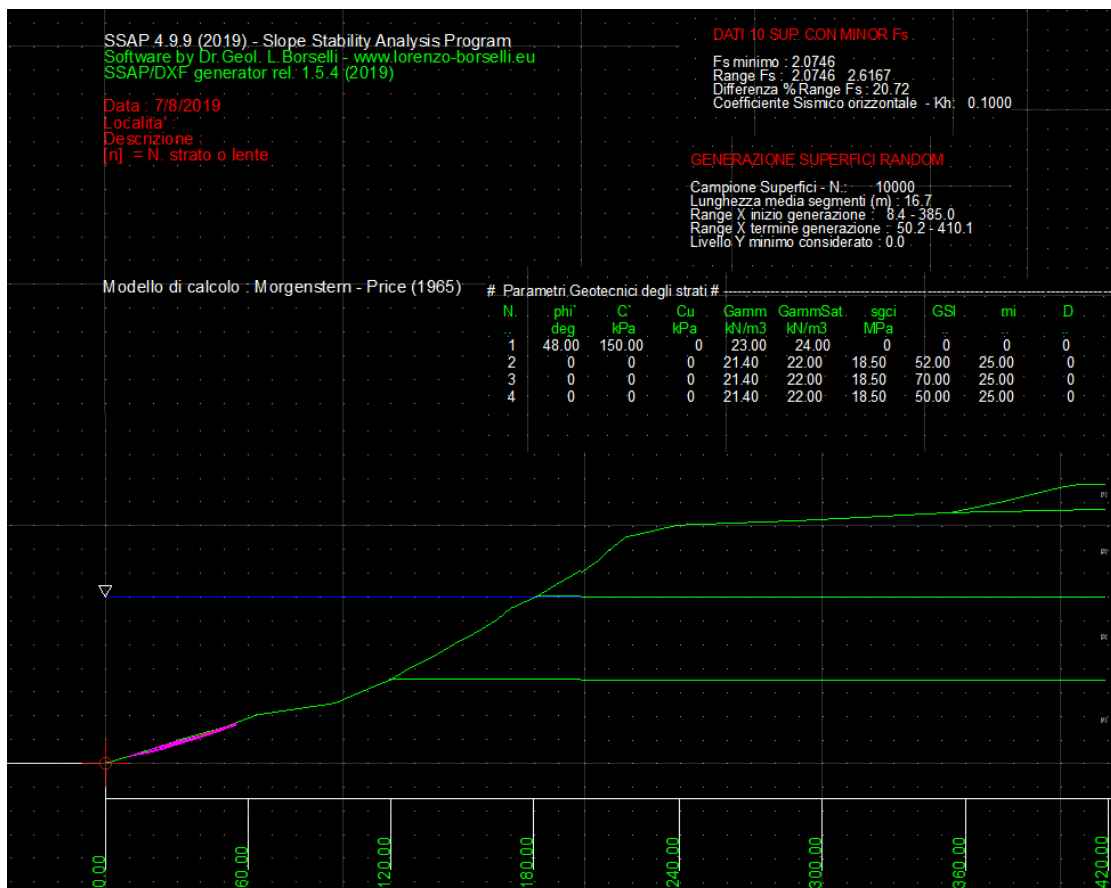


Figura 51. Superficie de FALLA, PRINCIPAL, caso 3; Margen Derecha.

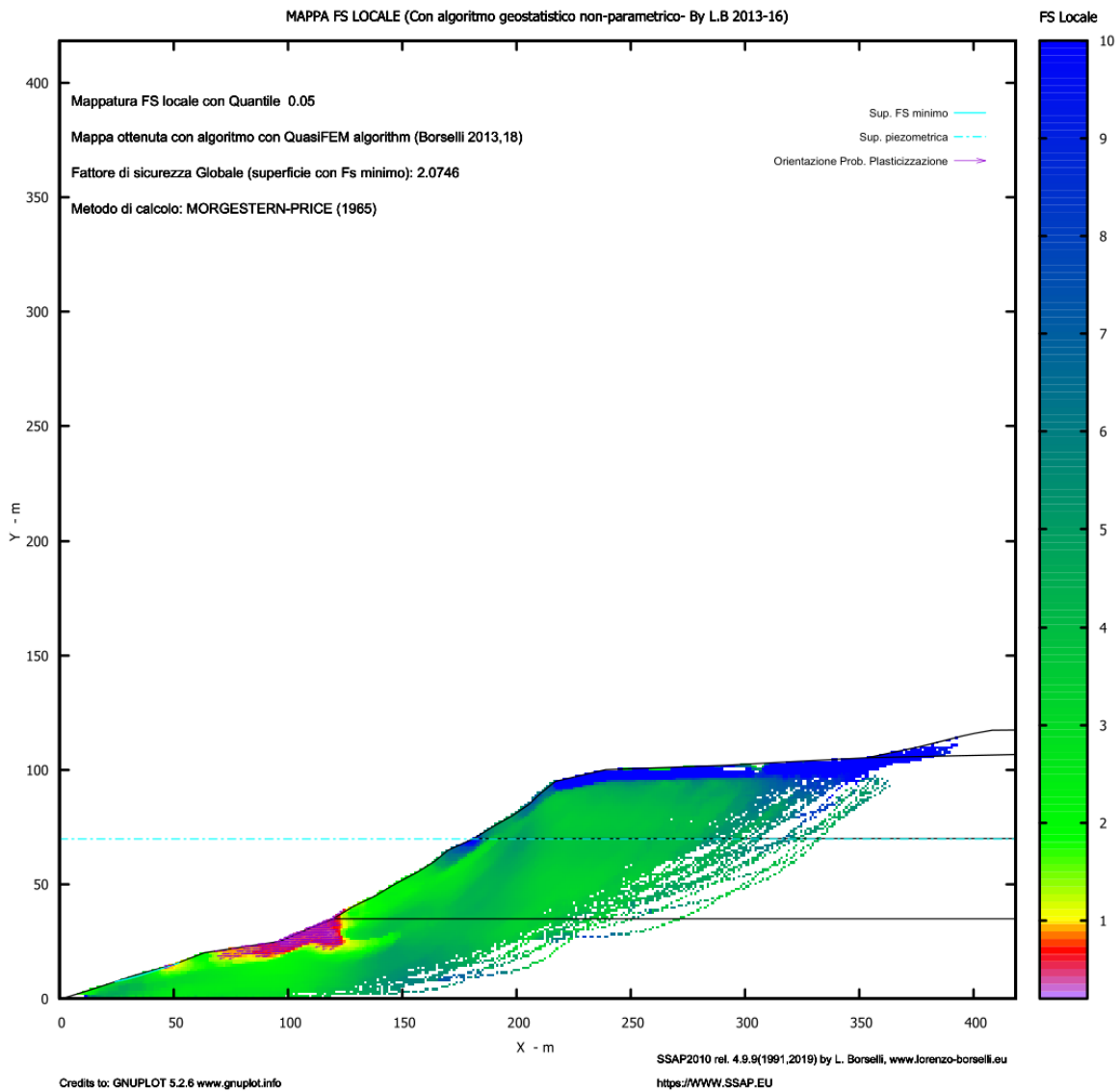


Figura 52- Superficie de CÁLCULO DE FACTOR DE SEGURIDAD, caso 3, Margen Derecha-

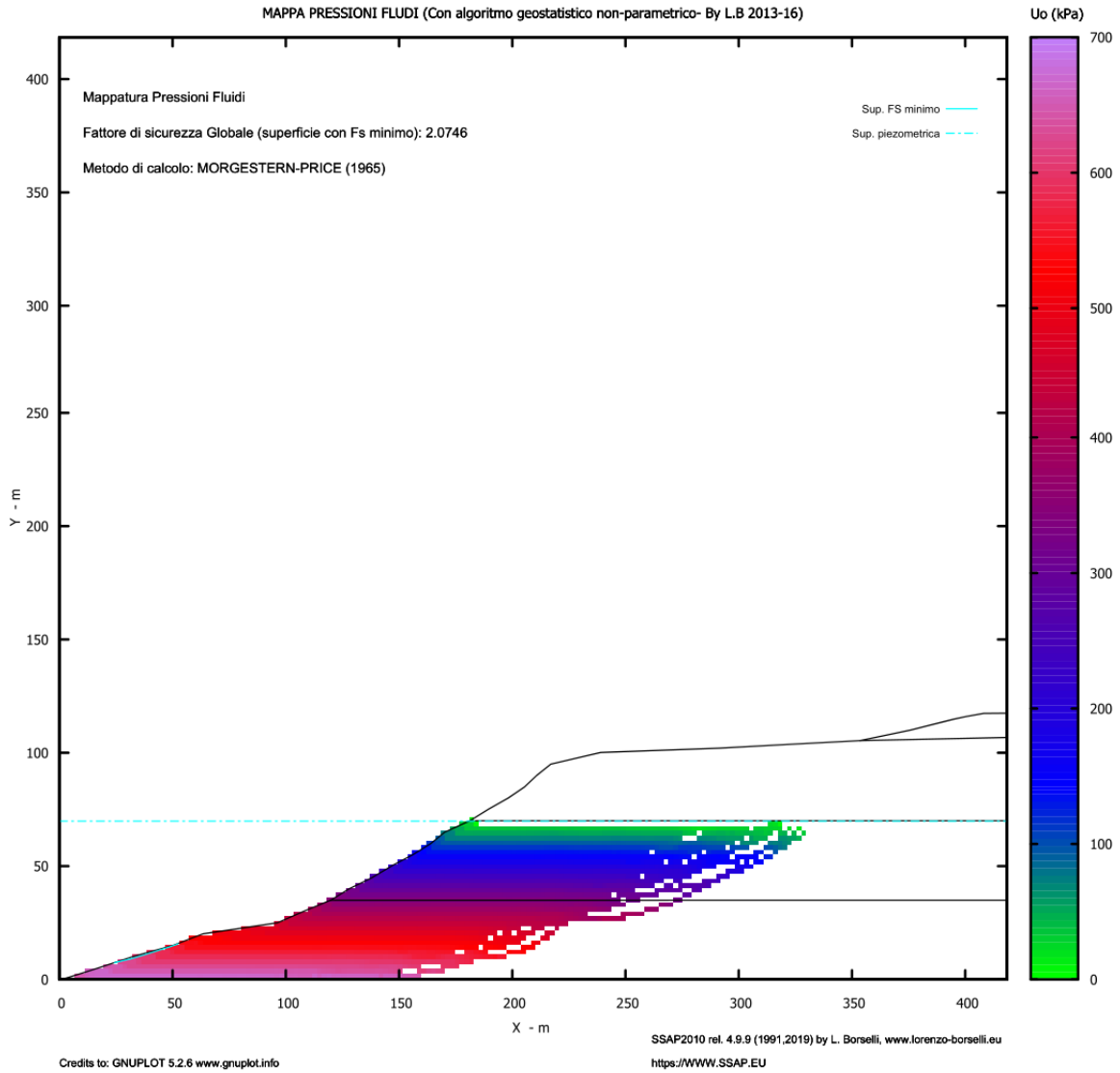


Figura 53. Diagrama de PRESIÓN DE PORO, caso 3; Margen Derecha.

CASO 4; Margen Derecha

- ▶ SECCIÓN B- B', DENTRO DE LA PRESA
- ▶ CONDICIONES DE VACIADO RÁPIDO

$K_h = 0.0$

$K_v = 0.0$

- ▶ Presa llena al MÁXIMO NIVEL
- ▶ CUATRO ESTRATOS GEOTÉCNICOS:

5. GSI = 51 CALIDAD REGULAR
6. GSI = 70 CALIDAD BUENA
7. GSI = 52 CALIDAD REGULAR
8. *Bimrock*

FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO, FS = 3.8 (Figuras 54, 55 y 56)

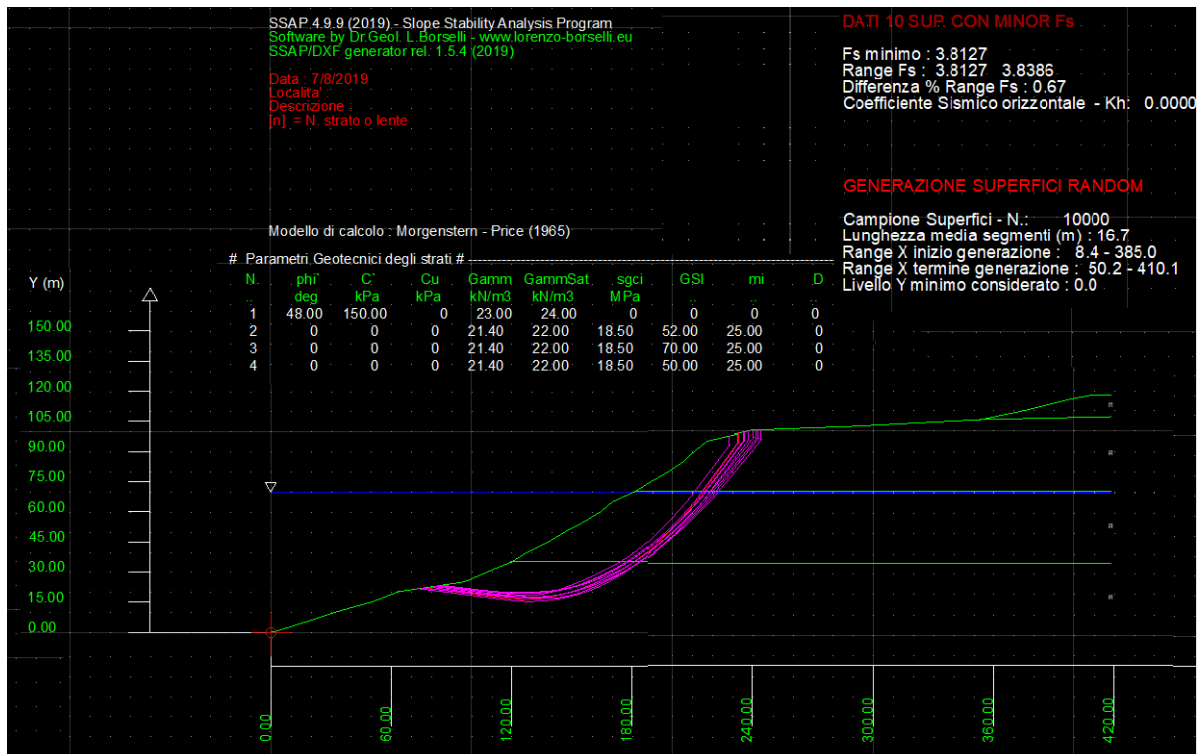


Figura 54. Superficie de FALLA PRINCIPAL, caso 4; Margen Derecha.

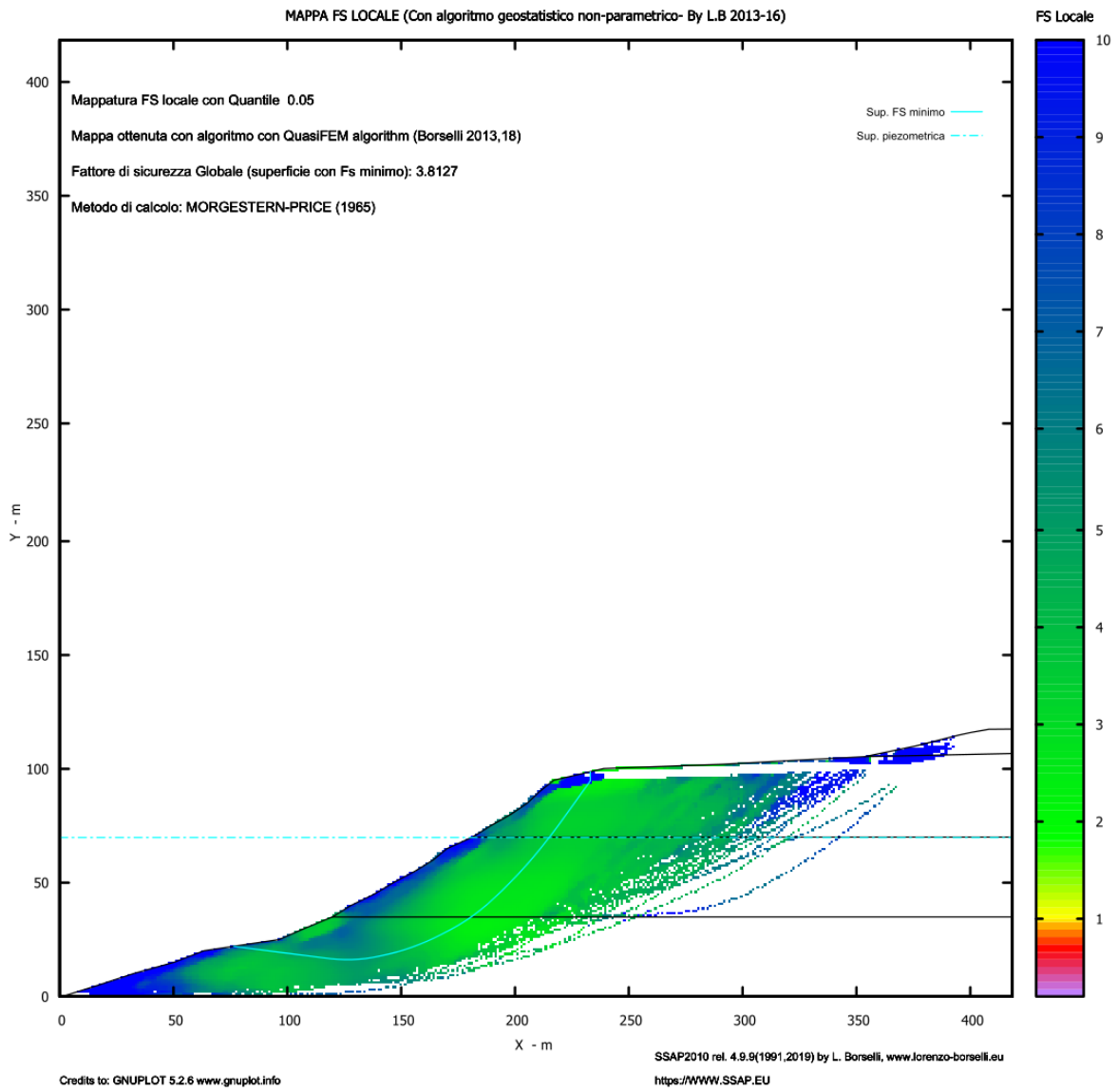


Figura 55- Superficie de CÁLCULO DE FACTOR DE SEGURIDAD, caso 4, Margen Derecha-

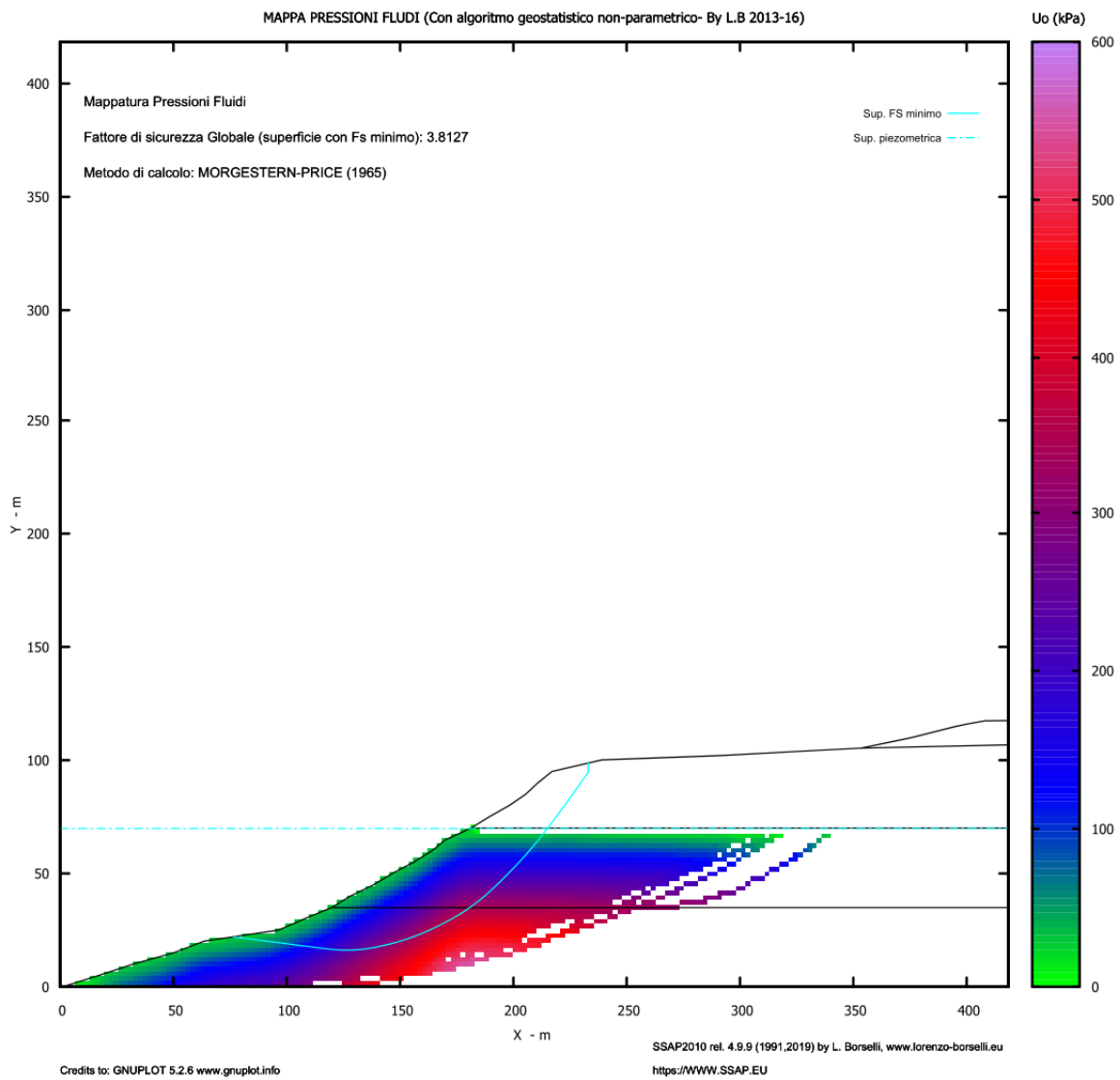


Figura 56. Diagrama de PRESIÓN DE PORO, caso 4; Margen Derecha

CASO 1; MARGEN DERECHA

SECCIÓN C- C', DENTRO DE LA PRESA

- Coeficiente sísmico = 0.0
 - Presa llena al MÁXIMO NIVEL
 - CUATRO ESTRATOS GEOTÉCNICOS:
5. GSI = 51 CALIDAD REGULAR
 6. GSI = 70 CALIDAD BUENA
 7. GSI = 50 CALIDAD REGULA
 8. *BIMROCK*

FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO, FS = 2.27 (Figuras 57, 58 y 59)

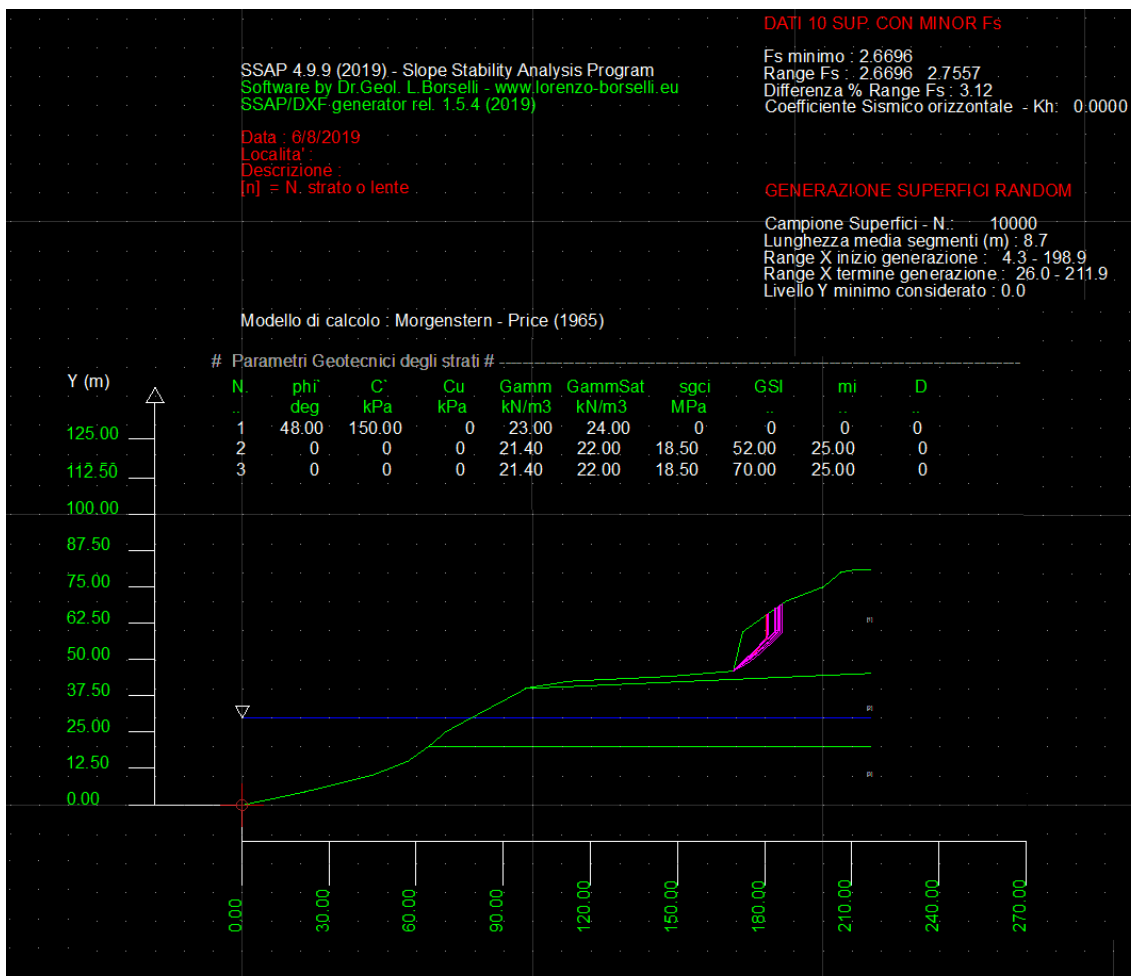


Figura 57- Superficie de FALLA PRINCIPAL, caso 1, Margen Derecha, SECCIÓN C- C'

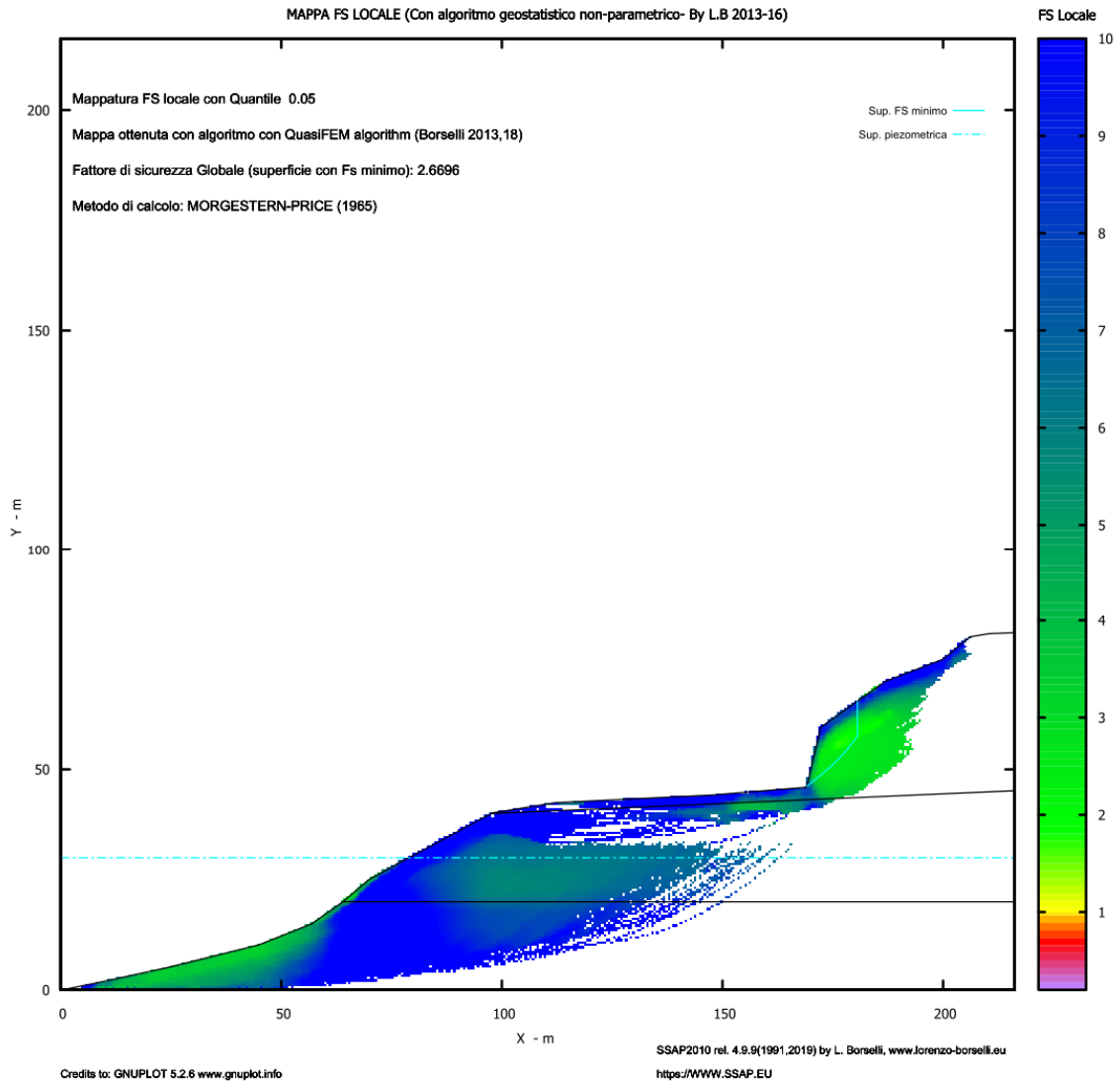


Figura 56. Superficie de CÁLCULO DE FACTOR DE SEGURIDAD, caso 1; Margen Derecha, SECCIÓN C- C´

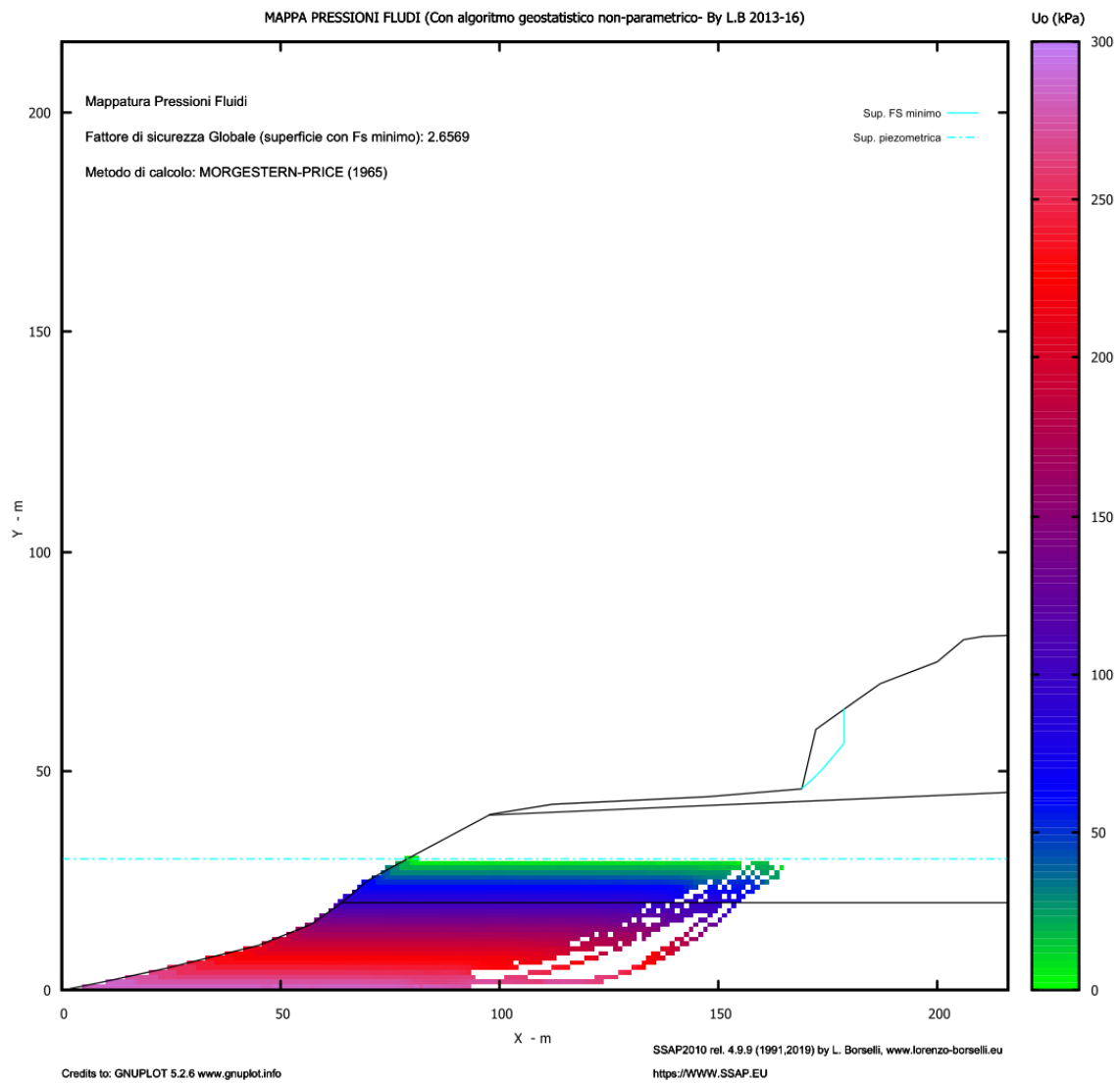


Figura 59. Diagrama de PRESIÓN DE PORO, caso 1; Margen Derecha. SECCIÓN C- C'

CASO 2; Margen Derecha

- ▶ SECCIÓN C- C', DENTRO DE LA PRESA
- ▶ Coeficiente sísmico máximo valor

$K_h = 0.06$

$K_v = 0.06$

- ▶ Presa llena al MÁXIMO NIVEL
- ▶ CUATRO ESTRATOS GEOTÉCNICOS:

1. GSI = 51 CALIDAD REGULAR
2. GSI = 70 CALIDAD BUENA
3. GSI = 52 CALIDAD REGULAR
4. *Bimrock*

FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO, FS = 2.4205 (Figuras 60, 61 y 62)

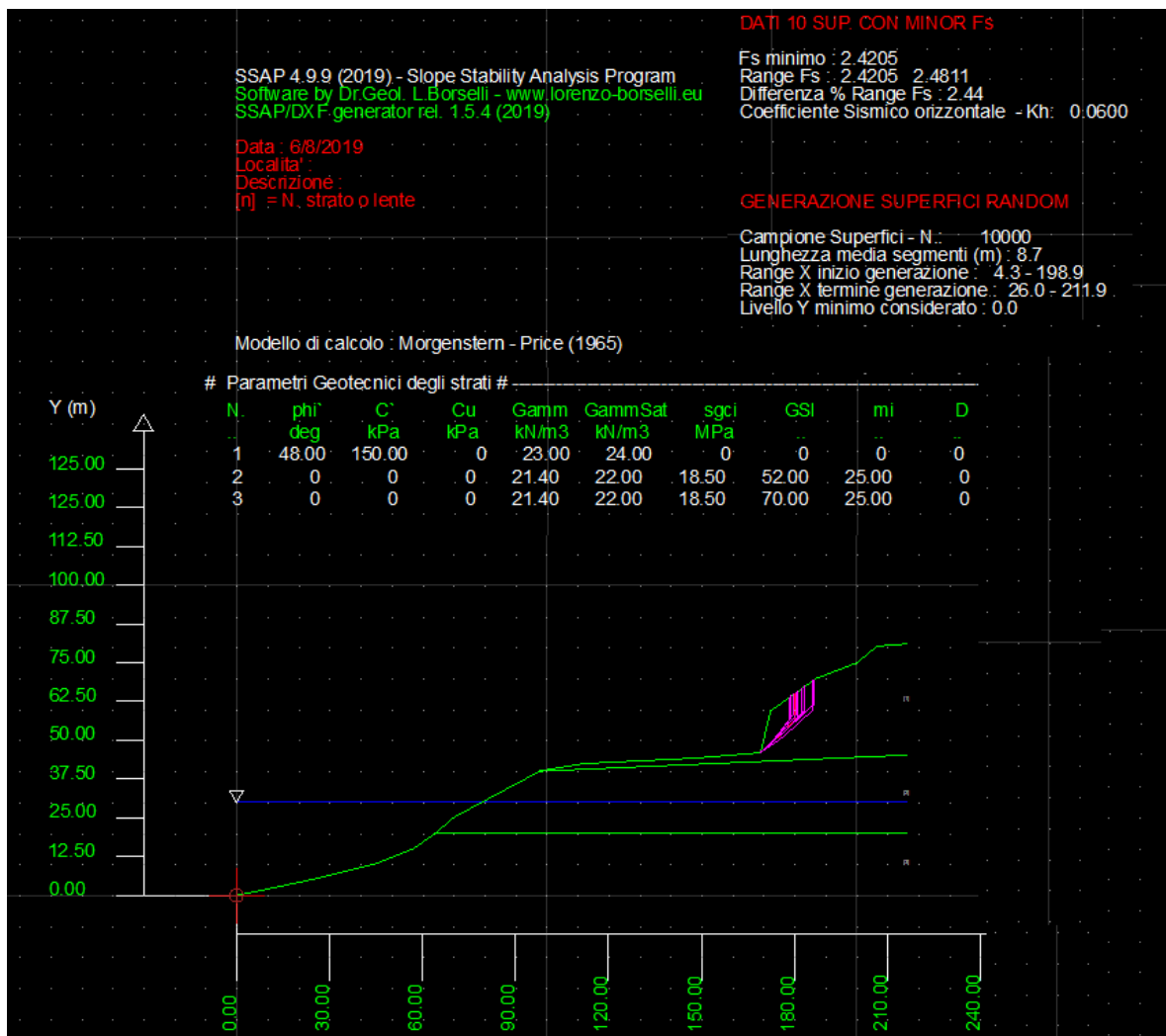


Figura 60.- Superficie de FALLA PRINCIPAL, caso 2, Margen Derecha- SECCIÓN C- C'

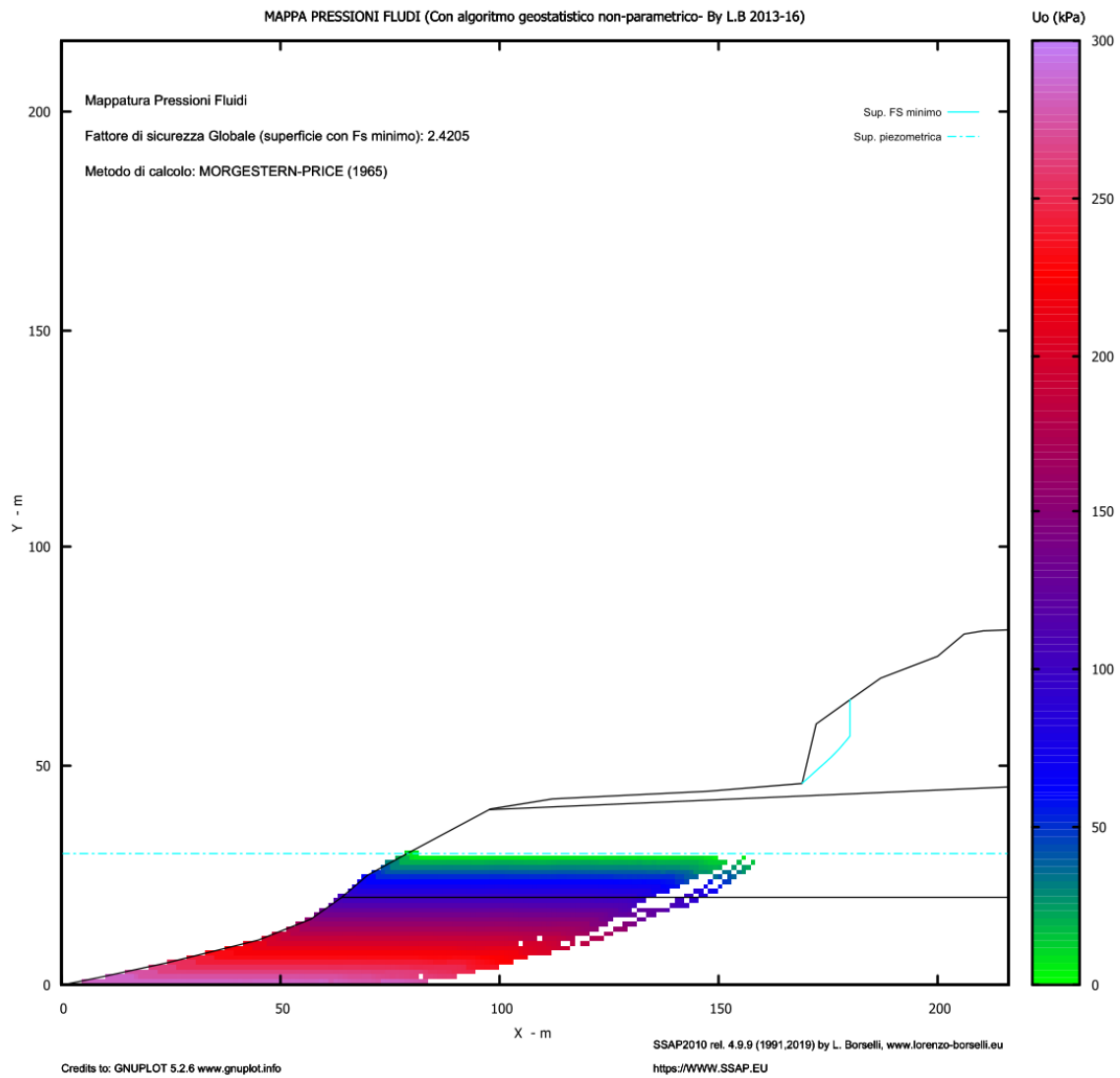


Figura 61. Superficie de CÁLCULO DE FACTOR DE SEGURIDAD, caso 2; Margen Derecha. SECCIÓN C- C'

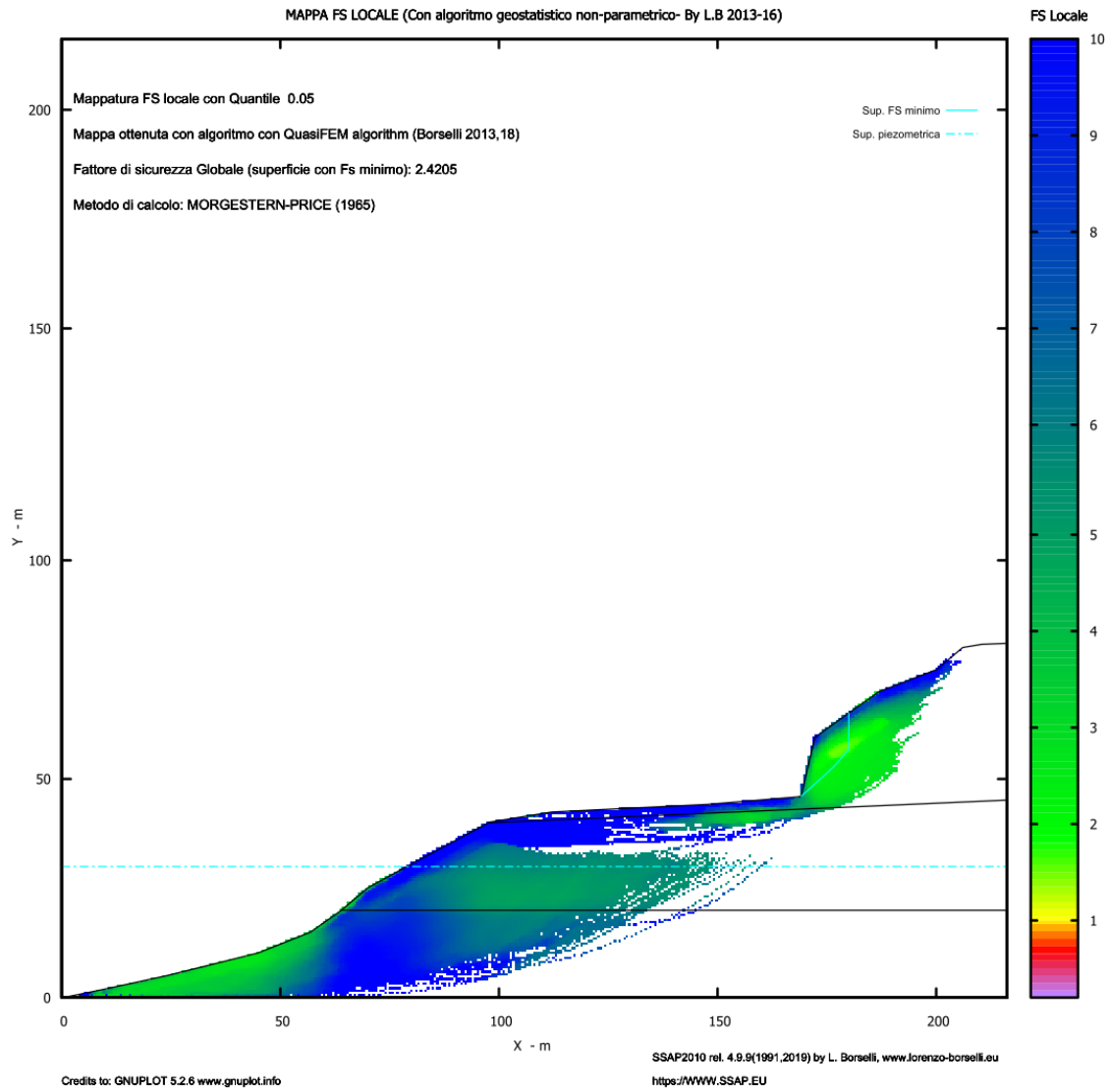


Figura 62. Diagrama de PRESIÓN DE PORO, caso 2; Margen Derecha SECCIÓN C- C'

CASO 2; Margen Derecha

- ▶ SECCIÓN C- C', DENTRO DE LA PRESA
- ▶ Coeficiente sísmico máximo valor

Kh= 0.1

Kv= 0.05

- ▶ Presa llena al MÁXIMO NIVEL
- ▶ CUATRO ESTRATOS GEOTÉCNICOS:

5. GSI = 51 CALIDAD REGULAR
6. GSI = 70 CALIDAD BUENA
7. GSI = 52 CALIDAD REGULAR
8. *Bimrock*

FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO, FS = 2.2728 (Figuras 63, 64 y 65)

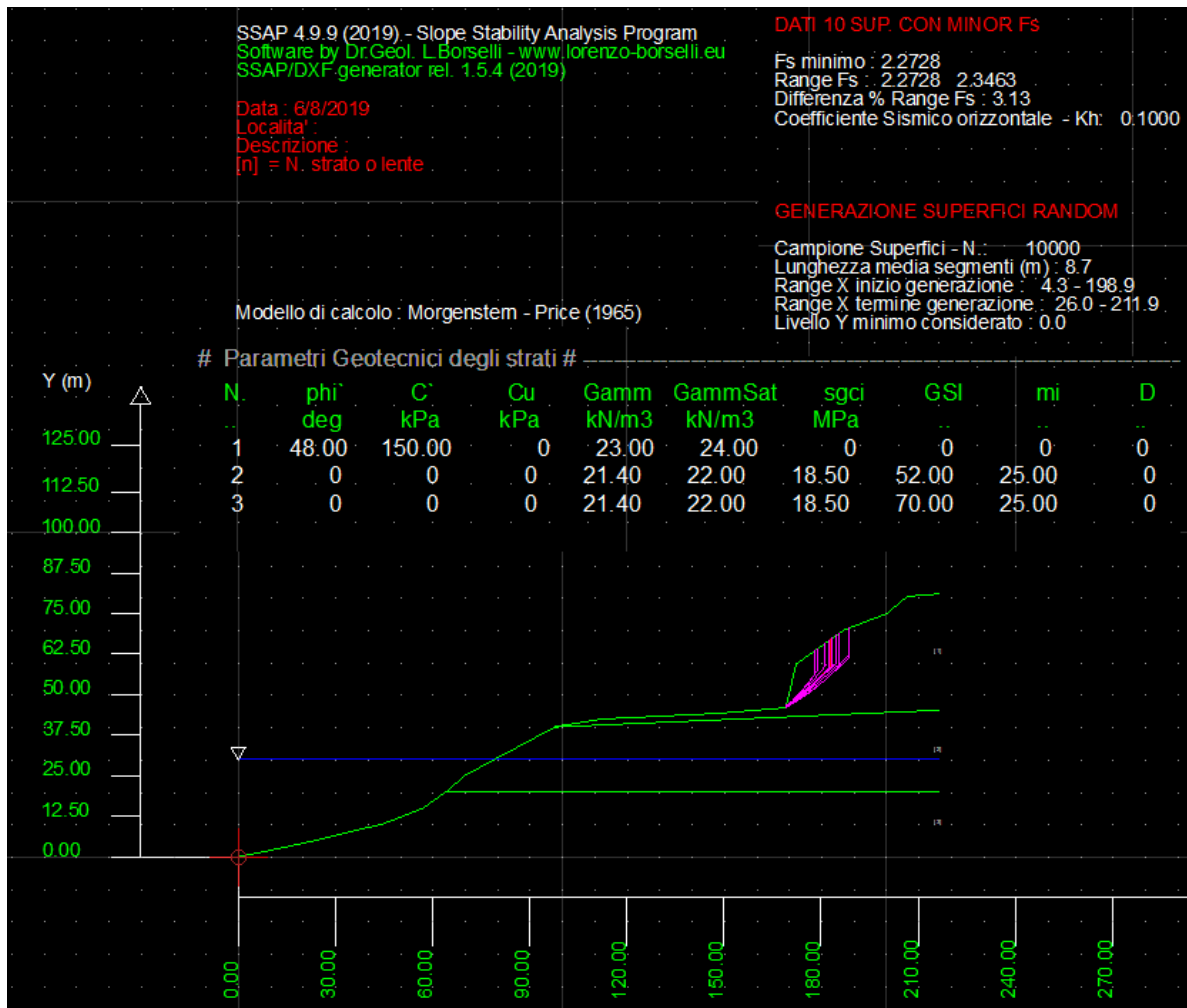


Figura 63- Superficie de FALLA PRINCIPAL, caso 3, Margen Derecha- SECCIÓN C- C'

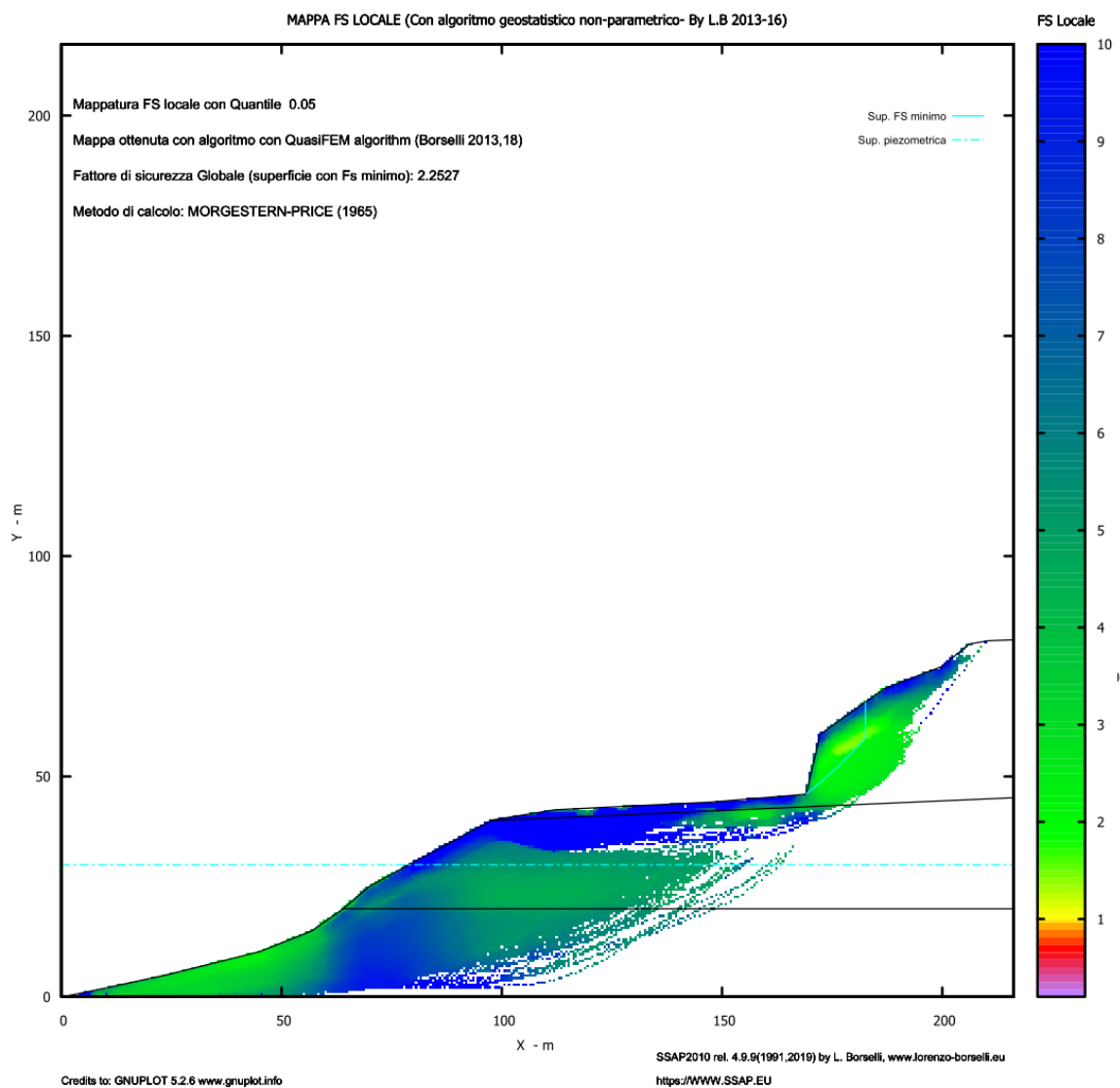


Figura 64. Superficie de CÁLCULO DE FACTOR DE SEGURIDAD, caso 3; Margen Derecha. SECCIÓN C- C'

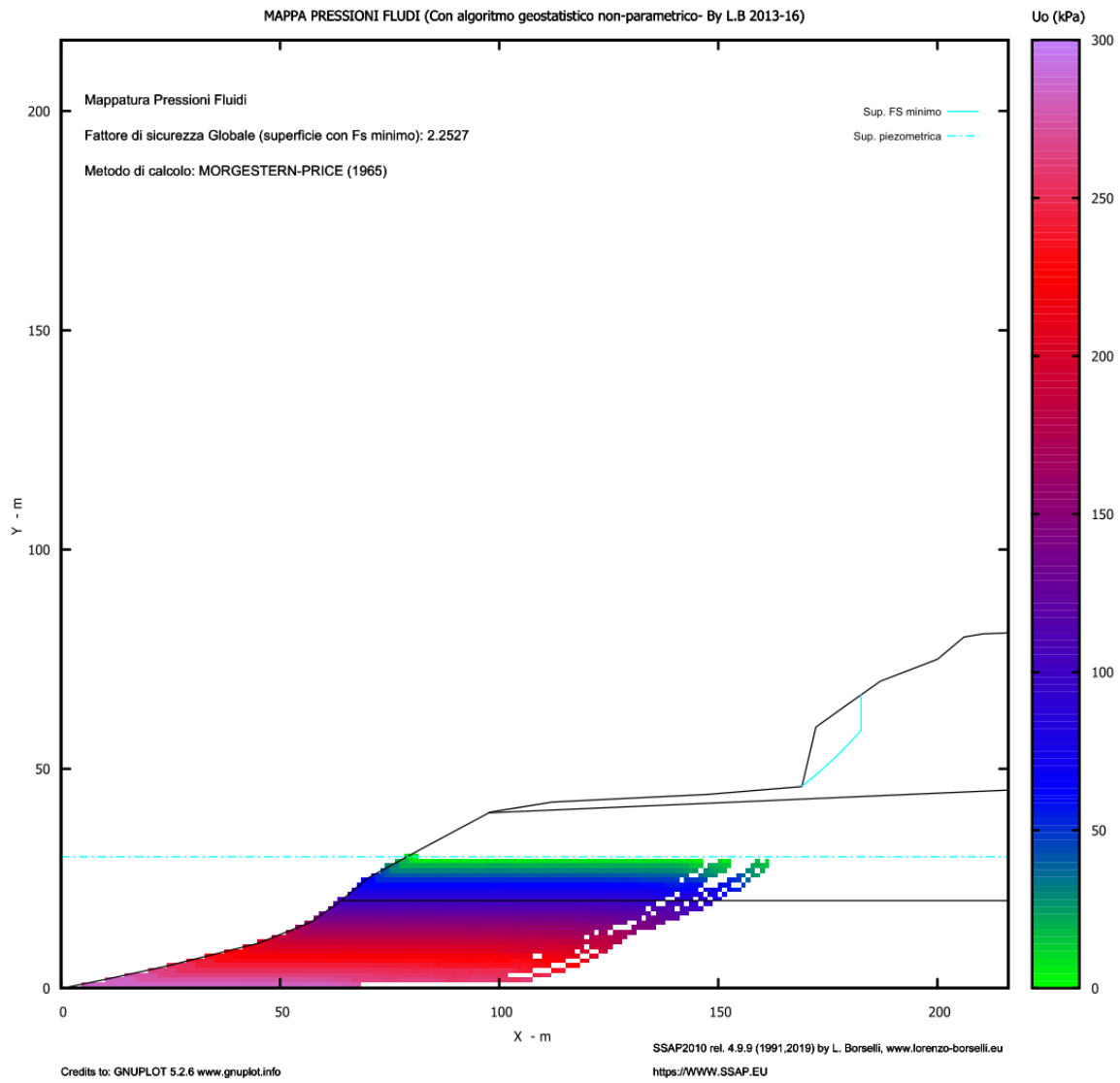


Figura 65. Diagrama de PRESIÓN DE PORO, caso 3; Margen Derecha SECCIÓN C- C'

CONCLUSIONES

Atendiendo los objetivos planteados al inicio de este trabajo de tesis, se realizó la caracterización geotécnica del macizo rocoso para usar el resultado en el análisis de estabilidad de ambos márgenes de la Presa "El Realito" en un estado post-construcción y en condiciones de máxima capacidad, las acciones realizadas en el área de estudio con el objetivo de conocer el grado de estabilidad nos demuestran que el trabajo que realizaron diferentes instituciones como CONAGUA, CFE y el Instituto de Geología UASLP, desde que se eligió el sitio y durante la construcción de la presa fueron realizados de un manera completa y correcta, por lo que se reconoce su certero mecanismo de trabajo, al cual se le sumaron las metodologías desarrolladas en este trabajo para caracterizar los macizos rocosos presentes en el área de estudio.

Los métodos utilizados para la determinación (estimación) de los parámetros geotécnicos del macizo rocoso de este trabajo de tesis, fueron elegidos para utilizar la información disponible de los estudios previos en esta área así como datos de las pruebas de laboratorio y las pruebas "in situ", además se evaluaron nuevos aspectos geotécnicos en los afloramientos de roca presentes y en los núcleos de barrenación, esto permitió tener una mejor concepción del comportamiento real de los macizos rocosos, además se utilizó un criterio de ruptura no lineal de Hoek and Brown (1980), para determinar los parámetros geotécnicos en el *software RockLab (Rocscience Inc.)*, trabajar con este criterio de ruptura es importante debido a que considera el comportamiento de las rocas las cuales incrementan su resistencia al aumentar los esfuerzos por confinamiento, si por el contrario se utiliza un criterio de ruptura lineal como el de Mohr- Coulomb no reflejaría correctamente el comportamiento del macizo rocoso, pero si de un material tipo *Bimrock* que es un material que se encuentra en el área de estudio y fue un material muy difícil de evaluar en el cual los valores de los parámetros geomecánicos fueron generados por aproximaciones empíricas encontradas en los artículos relacionados con este tipo de materiales, es notable que existe gran variedad de métodos para obtenerlos pero que en cada uno de ellos se hace hincapié de la incertidumbre de los mismo, esto debido principalmente a la dificultad de obtener un valor del porcentaje de bloques y se conoce con seguridad que de esto depende el comportamiento mecánico del material.

La metodología desarrollada para evaluar los materiales tipo *Bimrock* en este trabajo de tesis fue con el enfoque de obtener una guía práctica para recolectar los datos necesarios en el afloramiento durante el trabajo de campo, así como una guía de cómo obtener los parámetros

geomecánicos una vez determinado el porcentaje de bloques, se basó totalmente en la información disponible en la actualidad, aunque se admite que las metodologías de evaluación en este tipo de material no son muy comunes por lo que existieron algunas lagunas al realizar este trabajo.

Otro macizo rocoso difícil de evaluar, es el que actualmente está cubierto en gran parte por agua, para el cual fue necesario para la obtener el GSI recurrir a la evaluación detallada de los núcleos de exploración, utilizando la propuesta de Hoek et. al (2013), la cual demostró ser de gran utilidad para aprovechar esta valiosa información de una zona en donde no se puede observar de forma directa el afloramiento, promueve que durante los levantamientos geológicos de las áreas de estudio se realice una evaluación más completa de las familias de discontinuidades, lo cual se le suma a el método tradicional de evaluación de los núcleos por el método de RQD, utilizarla desde la etapa de exploración de un proyecto permite anticipar valores de GSI del macizo rocos en el que se va a trabajar y generar un proyecto más completo y nutrido en el aspecto geotécnico, por otro lado para proyectos ya en operación como es el caso de este estudio nos permite obtener un factor de seguridad post-construcción mediante información que ya existe.

En cuanto al uso de un *software* de análisis geotécnico se reconoce que es un punto importante para tener en cuenta debido que aunque existe gran variedad de *softwares* con este enfoque depende de la situación a evaluar el elegir alguno en el que su método de análisis represente de una manera cercana la situación real, para lo que en este trabajo de tesis se utilizó el *software* SSAP 4.9.9-2019 (*Slope Stability Analysis Program*), que permitió realizar un modelo con la geometría actual tanto de los perfiles de los taludes como de cada uno de los estratos geotécnico al limitarlos y añadirles sus parámetros geotécnicos particulares, permitió también considerar la superficie del agua al máximo nivel conocer la presión de poro que genera y simular condiciones de vacío rápido obteniendo como resultado el valor del factor de seguridad y la superficie de falla en diferentes escenarios realizados a los cuales se les añadió la presencia de movimientos telúricos aunque el área no es una región sísmica reconocida pero se han presentado eventos de baja escala cerca de la zona, se obtuvieron para cada uno de estos escenarios valores de factor de seguridad superiores a 1.5.

BIBLIOGRAFÍA

Barton, N., 1978, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. ISRM, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, International Society for Rock Mechanics. Volume 15, Issue 6, 319-368 pp.

Bieniawski Z.T., 1989, Engineering rock mass classification: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering. John Wiley & Sons, 251 p.

Borselli, L., 2017, Manuale di Riferimento, Versione 4.8.8, SSAP (Slope Stability Analysis Program) San Luis Potosí, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

[www.ssap.eu/manualeessap2010.pdf, acceso libre..]

CEAG, 2001. Comisión Estatal del Agua, Estado de Guanajuato. Manifiesto de Impacto Ambiental, Modalidad Regional, Sector Hidráulico. Para la Presa El Realito, municipio de San Luis de la Paz. 676 p.

[sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/.../gto/.../2005/11GU2005HD004.p...]

CFE, 2010. Comisión Federal de Electricidad. Estudio Complementario de Factibilidad Geológica para la construcción de una presa sobre el Río Santa María, en el estado de Guanajuato. 204 p.

CONAGUA, 2011. Comisión Nacional del Agua, Modelo Geológico- Geotécnico y Geofísico, para determinar la Estanqueidad del Vaso Presa El Realito Colaboración con el Instituto de Geología. UASLP. Tomo 1, 84 p. y Tomo 2, 183 p.

CONAGUA, 2012. Comisión Nacional del Agua. Libro Blanco CONAGUA-08 Diseño, desarrollo de ingeniería y construcción de la presa de almacenamiento El Realito. 123 p.

[www.conagua.gob.mx/contenido/Documentos/LIBROS BLANCOS...]

CONAGUA, 2016. Comisión Nacional del Agua, Proyectos Estratégicos, Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, Presas. Ilustración de Localización y vías de acceso a La Presa El Realito. 99 p.

Coli, N., Berry, P., Boldini, D., and Bruno, R. 2011. The contribution of geostatistics to the characterisation of some bimrock properties. *Engineering Geology*, 53–63 pp.

Deere, D.U. 1989. Rock quality designation (RQD) after 20 years. U.S. Army Corps of Engineers. Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.

Folk R.L., Andrews B.P., Lewis D.W., 1970. Comparison chart to aid estimation of percentage. Detrital Sedimentary Rock Classification and Nomenclature for Use in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* Dec 1970. Vol 13 pag. 946.

García Sánchez (2013) Análisis retrospectivo para la determinación de las propiedades geomecánicas y revisión de la estabilidad del talud izquierdo del vertedor de la C.H. LA YESCA. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Maestría en Ingeniería Civil – Geotecnia México, D. F. 172 p.

GEOTECNIA S.C. 2009. Perforación con diámetro NQ en el eje de la cortina y canal de desvío en la presa de almacenamiento El Realito, ubicada sobre el río Santa María, municipio de San Luis de la Paz, Estado de Guanajuato. 40 p.

Guerra Guevara C. and Pinzón Hernández J. 2015. Modelación numérica multiescala de Bimrocks para el análisis de estabilidad de taludes. Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Javeriana Maestría en Ingeniería Civil Bogotá, Colombia, 98 p.

Guerrero-Ibarra, C. A., 2012, Geología a detalle del vaso de la presa El Realito, municipio de Victoria, Guanajuato: San Luis Potosí, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Licenciatura, 70 p.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2001). *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson Educación, 713 p.

Hernández- García, A.R., 2015, Análisis del posible origen caldérico de los flujos piroclásticos de las ignimbritas santa maría-el órgano, a partir de imágenes satelitales, San Luis Potosí, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Licenciatura, 102 p.

Hoek et al. 2013. Charth, Hoek, E., Carter, T.G., 2013. Quantification of the Geological Strength Index Diederichs, M.S. American Rock Mechanics Association, 47th US Rock Mechanics /Geomechanics Symposium held in San Francisco, CA, USA. 23-26 pp.

INEEL 2018. Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. Programa PRODISIS (Programa de Diseño Sísmico) Análisis de los valores sísmicos.

[www2.ineel.mx/prodisis/es/prodisis.php]

ISRM, 1981. International Society for Rock Mechanics . Estimación aproximada y clasificación de la resistencia a compresión simple de suelos y rocas a partir de índices de campo. Manual de diseño y construcción de túneles de carretera. Capítulo 4. Integración geotécnica y diseño preliminar, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 58 p.

Lindquist, E.S, and R.E. Goodman, 1994; Strength and deformation properties of a physical model melange, Proceedings, 1st North American Rock Mechanics Symposium, Austin, TX, 8 p.

Labarthe-Hernández, G., Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., Jiménez López, L.S., Romero, A., 1989, Cartografía geológica 1:50,000, de las Hojas El Refugio y Mineral El Realito, estados de San Luis Potosí y Guanajuato: Instituto de Geología, UASLP, Folleto Técnico no. 112, 76 p.

Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., 1984, Cartografía geológica 1:50,000 Salitrera, S.L.P.: Instituto de Geología, UASLP, Folleto Técnico no. 94, 85 p.

Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, Martínez-Ruiz, V.J., 1983, Estudio Geohidrológico de la Hoja Melchor, Estados de San Luis Potosí y Guanajuato: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico no. 92, 110 p.

Labarthe-Hernández, G., Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., Jiménez-López, L.S., Romero, A., 1989, Cartografía geológica 1:50,000, de las Hojas El Refugio y Mineral El Realito, estados de San Luis Potosí y Guanajuato: Instituto de Geología, UASLP, Folleto Técnico no. 112, 76 p.

Marinos P. and Hoek E. (2000). "GSI: A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation". Document IDISRM-IS-2000-035. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering Source ISRM International Symposium, Melbourne, Australia, 19 p.

Medley, E.W. and Goodman, R.E., 1994; Estimating the block volumetric proportions of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks), Proceedings, 1st North American Rock Mechanics Symposium, Austin, TX.

Medley, E., 1997; Uncertainty in estimates of block volumetric proportions in mélange bimrocks, Proceedings, International Association of Engineering Geologists, Athens, Greece, 23–27 pp.

Medley, E., 2002; Estimating block size distributions of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks), Proceedings, 5th North American Rock Mechanics Symposium, University of Toronto, Toronto, Canada, 599–606 pp.

Murcia F., Borrero A., Pardo N. Alvarado E., Arnosio M., 2013: Depósitos volcániclasticos: términos y conceptos para una clasificación en español. Revista Geológica de América Central, ISSN: 0256-7024, 15-39 pp.

Ortiz-López J.E. 2017. Levantamiento geomecánico de la estabilidad de taludes en la carretera tierra nueva El Realito, municipio de Victoria Guanajuato kilómetro 43+300 al 45+140. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, 207 p.

Palmstrom, A., 1974. Characterization of jointing density and the quality of rock masses. Internal report, A.B. Berdal, Norway, 1974, 26 p.

Palmstrom, A., 2001. Measurement and characterization of rock mass jointing. In: Sharma, V.M., Saxena, K.R. (Eds.), In Situ Characterization of Rocks. A.A. Balkema Publishers, 49–97 pp.

Palmstrom A. 2005. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). ELSEVIER Tunnelling and Underground Space Technology. Incorporating Trechless Technology Research., Vol. 20, 362-377 pp.

Puente-Castillo W. 2014. Estudio geotécnico y de peligro geomorfológico de una porción de la Sierra de San Miguelito, S.L.P. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Centro de Investigación y Estudios de Posgrado. pp. 199.

Raymond A. Loren (1984). Melanges: Their Nature, Origin and Significance. Geological Society of America. Volume 198.

RocLab 1.0, 2007 “Rock mass strength analysis using the Hoek-Brown failure criterion”. User’s guide, Rocscience Inc, 2007.

Sánchez-Reyes F. (2016) “Ingeniería de Túneles”. Borrador. Registro número: 03-2015-012110003000-1 SEP- INDAUTOR. Notas de clase Maestría en Túneles y Obras Subterráneas. Clase Sistemas de Sostenimiento Ciudad Universitaria. Universidad Nacional Autónoma de México. 2017.

Sönmez, H., K. Kasapoglu, C. Conkun, C. Tunusluoglu, E. Mendley, R. Zimmerman, 2009. Rock Engineering in Difficult Ground Conditions, Karst and Soft Rock, Int. Soc. Rock Mechanics Regional Symposium, Dubrovnik, Croatia, 29- 31 pp.

Tristán-González et al, 2009. Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J.R., Torres-Hernández, J.R., Bellon, H., López-Doncel, R.A., Rodríguez-Ríos, R., Labarthe-Hernández, G., 2009, Geocronología y distribución espacial del Campo Volcánico de San Luis Potosí: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. 61, no. 3, 287-303 pp.

Tristán-González, M., Barboza-Gudiño, J.R., Labarthe-Hernández, G., 2010, Modelo estratigráfico-estructural del sitio de boquilla, Presa El Realito, Estados de Guanajuato y San Luis Potosí. Informe preparado para CONAGUA, San Luis Potosí Instituto de Geología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

TYSSA, 2008, TECNOLOGIA Y SISTEMAS, S.A (2008) Estudio de Geofísica Sísmica de Refracción en el Cauce del Rio Santa María.

TECHNOPROJECT, 2011, Levantamiento Geológico a detalle de las Galerías, Presa El Realito, CONAGUA 2011. 24 p.

Zanella-Carrizales, J., 2013, Análisis estructural del vaso de la presa el Realito, Gto. San Luis Potosí, México, , Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, 62 p.

ANEXOS

Anexo 1. INFORMACIÓN DE LOS ESTUDIOS GEOFÍSICOS DE LA ZONA.

Anexo 1.1 SECCIONES GEOSÍSMICAS

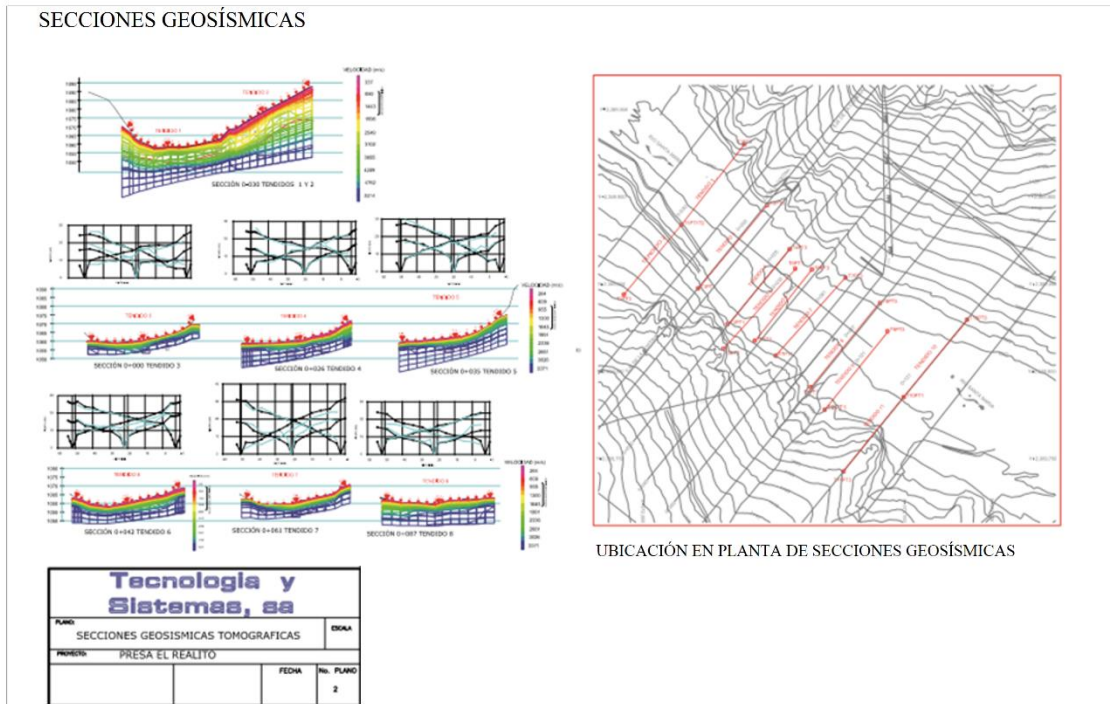


Figura 1. Secciones Geosísmicas Tomográficas Presa El Realito. Tecnología y Sistemas S.A. (2008).

ANEXO 1.2. RESULTADOS DE LA PRUEBA *CROSS-HOLE*

CROSS-HOLE BARRENO 1

PRESA EL REALITO

CALCULO DE MODULOS ELÁSTICOS DINAMICOS

Profundidad (m)	Tiro a 5.00 m		Velocidades (m/s)		Peso	Rel.	Módulo	Módulo
	Tiempo P de Campo	Tiempo S de Campo	Con PT a 5.00 m		Vol.	Pois.	Rigidez (Kg/cm ²)	Young (Kg/cm ²)
			Vp	Vs	(T/m ³)			
1	25.00	117.00	200	43	1.800	0.48	34	99
2	5.10	11.90	980	420	2.000	0.39	3599	9988
3	2.40	4.30	2083	1163	2.000	0.27	27565	70224
4	3.40	6.00	1471	833	2.000	0.26	14158	35777
5	1.60	3.40	3125	1471	2.000	0.36	44090	119730
6	1.30	2.80	3846	1786	2.000	0.36	65011	177167
7	1.20	2.60	4167	1923	2.000	0.36	75397	205783
8	1.60	3.10	3125	1613	2.350	0.32	62318	164326
9	1.80	3.20	2778	1563	2.350	0.27	58484	148383
10	1.40	3.50	3571	1429	2.350	0.40	48888	137352
11	1.10	2.40	4545	2083	2.350	0.37	103972	284266
12	1.20	2.00	4167	2500	2.350	0.22	149720	364942
13	1.00	2.00	5000	2500	2.350	0.33	149720	399252
14	1.20	2.10	4167	2381	2.500	0.26	144468	363360
15	1.50	2.70	3333	1852	2.350	0.28	82151	209778
16	1.30	2.10	3846	2381	2.350	0.19	135800	323025
17	1.00	1.80	5000	2778	2.350	0.28	184839	472000
18	0.90	1.70	5556	2941	2.350	0.31	207224	540975
19	1.10	1.90	4545	2632	2.560	0.25	180719	451044
20	1.40	2.70	3571	1852	2.560	0.32	89492	235567
21	1.20	2.10	4167	2381	2.000	0.26	115575	290688
22	1.00	2.10	5000	2381	2.560	0.35	147935	400424
23	1.00	1.80	5000	2778	2.560	0.28	201357	514179
24	1.20	3.90	4167	1282	2.560	0.45	42893	124192
25	2.40	4.80	2083	1042	2.560	0.33	28316	75509
26	1.50	3.70	3333	1351	2.560	0.40	47655	133592
27	1.10	5.90	4545	847	2.565	0.48	18778	55658
28	2.50	4.30	2000	1163	2.560	0.24	35284	87834
29	1.80	4.30	2778	1163	2.560	0.39	35284	98355
30	1.30	2.60	3846	1923	2.560	0.33	96508	257355
31	1.30	3.00	3846	1667	2.560	0.38	72488	200707
32	1.80	4.20	2778	1190	2.560	0.39	36984	102630
33	1.40	3.10	3571	1613	2.560	0.37	67887	186268
34	1.80	4.80	2778	1042	2.560	0.42	28316	80314
35	1.60	3.10	3125	1613	2.560	0.32	67887	179010
36	1.40	4.30	3571	1163	2.430	0.44	33492	96505
37	1.20	2.60	4167	1923	2.430	0.36	91607	250026
38	1.40	2.60	3571	1923	2.430	0.30	91607	237416
39	1.70	2.90	2941	1724	2.430	0.24	73634	182352
40	1.60	2.80	3125	1786	2.430	0.26	78988	198667
41	2.00	3.50	2500	1429	2.430	0.26	50552	127147
42	1.90	3.60	2632	1389	2.430	0.31	47783	124900
43	1.60	3.50	3125	1429	2.730	0.37	56793	155376
44	1.40	2.50	3571	2000	2.430	0.27	99083	251979

Figura 2. Resultados de la prueba Cross-Hole. Barreno 1, Presa El Realito. Tecnología y Sistemas S.A (2008).

CROSS-HOLE BARRENO PSMR3

PRESA EL REALITO

CALCULO DE MODULOS ELÁSTICOS DINAMICOS

Profundidad (m)	Tiro a 4.00 m		Velocidades (m/s)		Peso	Rel.	Módulo	Módulo
	Tiempo P de Campo	Tiempo S de Campo	Con PT a 4.00 m		Vol.	Pois.	Rigidez (Kg/cm ²)	Young (Kg/cm ²)
			Vp	Vs	(T/m ³)			
1	3.10	7.50	1290	533	1.800	0.40	5219	14582
2	3.30	7.00	1212	571	1.800	0.36	5991	16262
3	1.50	5.60	2667	714	1.900	0.46	9882	28881
4	1.70	6.70	2353	597	2.000	0.47	7267	21300
5	1.50	5.10	2667	784	2.000	0.45	12541	36436
6	1.50	6.30	2667	635	2.000	0.47	8219	24162
7	2.10	4.50	1905	889	2.000	0.36	16109	43841
8	2.00	4.50	2000	889	2.350	0.38	18928	52123
9	2.30	5.80	1739	690	2.350	0.41	11394	32055
10	2.40	4.30	1667	930	2.350	0.27	20729	52808
11	2.40	4.30	1667	930	2.350	0.27	20729	52808
12	1.80	4.20	2222	952	2.350	0.39	21728	60295
13	1.30	4.20	3077	952	2.350	0.45	21728	62882
14	1.50	4.50	2667	889	2.500	0.44	20136	57890
15	2.30	3.90	1739	1026	2.350	0.23	25199	62160
16	2.10	3.70	1905	1081	2.350	0.26	27997	70687
17	2.80	5.20	1429	769	2.350	0.30	14175	36736
18	2.10	4.00	1905	1000	2.350	0.31	23955	62750
19	1.80	3.40	2222	1176	2.560	0.31	36119	94291
20	1.60	3.70	2500	1081	2.560	0.38	30499	84482
21	1.50	3.30	2667	1212	2.000	0.37	29954	82061
22	1.60	3.60	2500	1111	2.560	0.38	32217	88721
23	2.00	5.00	2000	800	2.560	0.40	16701	46923
24	1.60	4.20	2500	952	2.560	0.42	23670	66991
25	1.60	3.80	2500	1053	2.560	0.39	28915	80514
26	1.50	4.30	2667	930	2.560	0.43	22582	64616
27	1.90	4.00	2105	1000	2.565	0.35	26147	70822
28	1.40	3.50	2857	1143	2.560	0.40	34084	95761
29	1.30	2.70	3077	1481	2.560	0.35	57275	154540
30	1.30	3.30	3077	1212	2.560	0.41	38341	107980
31	1.30	2.50	3077	1600	2.560	0.31	66805	175657
32	1.30	4.30	3077	930	2.560	0.45	22582	65473
33	1.10	2.50	3636	1600	2.560	0.38	66805	184377
34	1.30	2.60	3077	1538	2.560	0.33	61765	164707
35	1.50	5.40	2667	741	2.560	0.46	14319	41759
36	1.30	2.20	3077	1818	2.430	0.23	81886	201727
37	1.50	3.70	2667	1081	2.430	0.40	28950	81157
38	0.70	1.60	5714	2500	2.430	0.38	154817	427802
39	0.80	2.00	5000	2000	2.430	0.40	99083	278375
40	0.90	1.70	4444	2353	2.430	0.31	137139	358011

Figura 3. Resultados de la prueba Cross-Hole. Barreno PMSR3, Presa El Realito. Tecnología y Sistemas S.A. (2008).

ANEXO 1.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS A NÚCLEOS.

Barreno No.	Muestras No.	Profundidad (m)
1	1	13.30
	2	25.00
	3	41.65
2	1	13.60
	2	34.60
	3	41.23
3 Bis	1	16.60
	2	29.60
	3	39.60

**Tecnología y
Sistemas, sa**

TABLA No. 1									
Proyecto: Presa "El Realito", Mpio. San Luis de la Paz, Guanajuato									
Barrenos realizados en el eje de Cortina									
Resultados de las pruebas mecánicas realizadas a los núcleos de roca									
Bno. No.	Muestra No.	Prof. m.	Absorción en %	P. Vol Seco Ton/m ³	P. Vol Húmedo Ton/cm ³	Resistencia Compresión Simple en kg/cm ²	Resistencia a la Tens. Comp. Bras. en kg/cm ²	Mod. Elas. Tangente en kg/cm ²	Relación de Poisson
1	1	13.35	1.79	2.31	2.35	60.93	16.79	5,982.09	0.32
	2	29.80	0.09	2.55	2.56	220.73	61.16	15,892.56	0.15
	3	41.70	0.49	2.41	2.43	193.58	62.67	13,401.79	0.16
2	1	13.75	0.72	2.37	2.38	172.80	33.78	11,962.72	0.23
	2	34.60	0.55	2.50	2.52	182.73	39.48	15,180.40	0.23
	3	41.37	0.99	2.44	2.46	182.11	40.98	11,848.16	0.18
3 Bis	1	16.70	2.99	2.22	2.29	168.21	34.28	10,749.39	0.21
	2	29.80	4.41	2.23	2.33	176.38	37.31	11,722.17	0.26
	3	39.60	2.5	2.27	2.32	184.41	43.23	11,855.02	0.28

Figura 4. Resultados de las pruebas mecánicas a núcleos, Presa El Realito. Tecnología y Sistemas S.A. (2008).

ANEXO 2. INFORMACIÓN DE LOS BARRENOS

Anexo 2.1. CÁLCULO Jv, Wjc, RQD

Figura 5. Cálculo Jv, Wjc, RQD; Barreno 3 Plantilla de permeabilización.

Programa Académico: Maestría en Ciencias en Geología Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.																	
Barreno 4 Plantilla de Permeabilización				PROYECTO Presa El Realito				FECHA 25-ene-17									
INCLINACION Vertical 90°				LITOLOGIA Riodacita Del Carmen (Trc)				REALIZO Vianney Vanessa Sosa Davila									
DE	A	RQD	No. Fx	δ<15° fi = 6	Esp.	δ 15-30° fi = 3.5	Esp.	δ 30-60° fi = 1.5	Esp.	fi x N	δ >60° fi = 1	Esp.	fi x N	Wjd	Jv	RQD=110-2.5Jv	
0	1	0	0												0	0.0	
1	2	0	0												0	0.0	
2	3	0	0												0	0.0	
3	4	50	4				4	0.2	6				6	5.00	98	0.2	
4	5	80	2				2	0.2	3				3	5.00	98	0.4	
5	6	100	2				2	0.3	3				3	3.33	102	0.4	
6	7	85	2							2	0.4	2	2	2.50	104	100	0.4
7	8	100	0												110	100	1.0
8	9	75	3							3	0.25	3	3	4.00	100	100	0.3
9	10	30	2							2	0.4	2	2	2.50	104	100	0.4
10	11	60	2							2	0.3	2	2	3.33	102	100	0.4
11	12	75	4							4	0.2	4	4	5.00	98		0.2
12	13	80	4							4	0.2	4	4	5.00	98		0.2
13	14	80	3							3	0.2	3	3	5.00	98		0.3
14	15	90	2							2	0.3	2	2	3.33	102	100	0.4
15	16	100	2							2	0.2	2	2	5.00	98		0.4
16	17	100	2							2	0.3	2	2	3.33	102	100	0.4
17	18	100	2							2	0.4	2	2	2.50	104	100	0.4
18	19	100	2							2	0.4	2	2	2.50	104	100	0.4
19	20	100	2							2	0.4	2	2	2.50	104	100	0.4
20	21	90	1							1	0.4	1	1	2.50	104	100	0.6
21	22	85	1							1	0.4	1	1	2.50	104	100	0.6
22	23	70	2				1	0.5	1.5	1	0.4	1	2.5	0.40	109	100	0.4
23	24	30	4							4	0.2	4	4	5.00	98		0.2
24	25	15	4				4	0.2	6				6	5.00	98		0.2
25	26	15	4				2	0.2	3	2	0.2	2	5	10.00	85		0.2
26	27	20	7				3	0.3	4.5	4	0.2	4	8.5	8.33	89		0.0
27	28	15	4				2	0.2	3	2	0.2	2	5	10.00	85		0.2
28	29	40	4				1	0.5	1.5	3	0.2	3	4.5	7.00	93		0.2
29	30	30	8							7	0.5	7	7	2.00	105	100	0.0
30	31	40	5				5	0.1	7.5				7.5	10.00	85		0.1
31	32	30	6				6	0.1	9				9	10.00	85		0.1
32	33	40	3				3	0.25	4.5				4.5	4.00	100		0.3
33	34	20	4				4	0.25	6				6	4.00	100		0.2
34	35	40	3				3	0.2	4.5				4.5	5.00	98		0.3
35	36	30	5		2	40				3	0.2	3	3	5.40	97		0.1
36	37	40	4				2	0.2	3	2	0.2	2	5	10.00	85		0.2
37	38	40	2		2	40				4	0.15	6	6	7.07	92		0.4
38	39	60	4				2	0.15	3	2	0.3	2	5	10.00	85		0.2
39	40	60	4							4	0.3	4	4	3.33	102	100	0.2
40	41	45	5							5	0.1	5	5	10.00	85		0.1
41	42	10	5							5	0.07	5	5	14.29	74		0.1
42	43	15	5		2	20				3	0.2	3	3	5.40	97		0.1
43	44	40	4							4	0.2	4	4	5.00	98		0.2
44	45	50	4		1	50							4.5	5.20	97		0.2
45	46	70	3				3	0.2	4.5				4.5	5.00	98		0.3
46	47	90	3							3	0.3	3	3	3.33	102	100	0.3
47	48	100	2							2	0.3	2	2	3.33	102	100	0.4
48	49	90	3							3	0.3	3	3	3.33	102	100	0.3
49	50	70	4				1	0.5	1.5	3	0.3	3	4.5	2.00	105	100	0.2
50	51	90	3				3	0.3	4.5				4.5	3.33	102	100	0.3
51	52	80	2				2	0.3	3				3	3.33	102	100	0.4
52	53	100	2				2	0.3	3				3	3.33	102	100	0.4

Figura 6. Cálculo Jv, Wjc, RQD; Barreno 4 Plantilla de permeabilización.

Programa Académico: Maestría en Ciencias en Geología Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.																
Barreno 5 MARGEN IZQUIERDA				PROYECTO				Presa El Realito				FECHA		25-ene-17		
INCLINACION				LITOLOGIA				Riodacita Del Carmen (Trc)				REALIZO				
Vertical 90°				LONGITUD				53.45 m				Vianney Vanessa Sosa Davila				
DE	A	RQD	No. Fx	$\delta < 15^\circ$	Esp.	$\delta 15-30^\circ$	Esp.	$\delta 30-60^\circ$	Esp.	$f_i \times N$	$\delta > 60^\circ$	Esp.	Wjd	Jv	RQD=110-2.5Jv	
				$f_i = 6$	$f_i = 3.5$		$f_i = 1.5$				$f_i = 1$					
1	2	50	3						3	0.15	3	3	6.667	93		
2	3	50	5						5	0.15	5	5	6.667	93		
3	4	40	5						5	0.15	5	5	6.667	93		
4	5	40	6			3	0.1	4.5	3	0.15	3	7.5	16.667	68		
5	6	90	3				0.1	0	3	0.2	3	3	15.000	73		
6	7	60	5			5	0.2	7.5				7.5	5.000	98		
7	8	50	5			5	0.2	7.5				7.5	5.000	98		
8	9	50	5			5	0.2	7.5				7.5	5.000	98		
9	10	100	2			2	0.2	3				3	5.000	98		
10	11	95	2			1	0.5	1.5	1	0.4	1	2.5	4.500	99		
11	12	90	3			1	0.5	1.5	2	0.15	2	3.5	8.667	88		
12	13	90	3			3	0.2	4.5				4.5	5.000	98		
13	14	85	2			2	0.3	3				3	3.333	102	100	
14	15	85	4			4	0.2	6				6	5.000	98		
15	16	85	2			2	0.4	3				3	2.500	104	100	
16	17	85	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100	
17	18	85	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100	
18	19	90	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100	
19	20	40	6			3	0.3	4.5	3	0.3	3	7.5	6.667	93		
20	21	80	4			4	0.2	6				6	5.000	98		
21	22	80	4			4	0.2	6				6	5.000	98		
22	23	70	5			5	0.2	7.5				7.5	5.000	98		
23	24	80	5			5	0.2	7.5				7.5	5.000	98		
24	25	0	3	1	0.4	2	0.2	3				3	5.200	97		
25	26	20	4	1	0.4	3	0.2	4.5				4.5	5.200	97		
26	27	20	3			3	0.2	4.5				4.5	5.000	98		
27	28	70	5			5	0.2	7.5				7.5	5.000	98		
28	29	40	5	1	0.4	4	0.2	6				6	5.200	97		
29	30	50	3			3	0.2	4.5				4.5	5.000	98		
30	31	30	2			2	0.2	3				3	5.000	98		
31	32	70	5			5	0.2	7.5				7.5	5.000	98		
32	33	50	3			3	0.2	4.5				4.5	5.000	98		
33	34	50	3			3	0.2	4.5				4.5	5.000	98		
34	35	60	4			4	0.2	6				6	5.000	98		
35	36	70	3			3	0.2	4.5				4.5	5.000	98		
36	37	80	3			3	0.2	4.5				4.5	5.000	98		
37	38	80	3			3	0.2	4.5				4.5	5.000	98		
38	39	40	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100	
39	40	70	4			4	0.2	6				6	5.000	98		
40	41	90	3			3	0.2	4.5				4.5	5.000	98		
41	42	80	4			4	0.2	6				6	5.000	98		
42	43	80	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100	
43	44	70	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100	
44	45	45	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100	
45	46	80	2			2	0.3	3				3	3.333	102	100	
46	47	50	2			2	0.3	3				3	3.333	102	100	
47	48	30	4			4	0.2	6				6	5.000	98		
48	49	60	2			4	0.2	6				6	5.000	98		
49	50	90	3			2	0.4	3				3	2.500	104	100	
50	51	40	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100	

Figura 7. Cálculo Jv, Wjc, RQD; Barreno 5 Margen Izquierda, Hoja 1.

Programa Académico: Maestría en Ciencias en Geología Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.															
Barreno 5 MARGEN IZQUIERDA				PROYECTO		Presa El Realito		FECHA		25-ene-17					
INCLINACION				Vertical 90°		LONGITUD						REALIZO ianney Vanessa Sosa Davi			
DE	A	RQD	No. Fx	$\delta < 15^\circ$	Esp.	$\delta 15-30^\circ$	Esp.	$\delta 30-60^\circ$	Esp.	fi x N	$\delta > 60^\circ$	Esp.	Wjd	Jv	RQD=110-2.5Jv
				fi = 6		fi = 3.5		fi = 1.5			fi = 1				
51	52	60	4			4	0.2	6				6	5.000	98	
52	53	50	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100
53	54	60	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100
54	55	70	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100
55	56	90	2			2	0.4	3				3	2.500	104	100
56	57	75	4			4	0.2	6				6	5.000	98	
57	58	90	4			4	0.3	6				6	3.333	102	100
58	59	20	2			2	0.4	3				3	2.500	104	100
59	60	50	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100
60	61	80	2			2	0.4	3				3	2.500	104	100
61	62	40	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100
62	63	90	2			2	0.4	3				3	2.500	104	100
63	64	90	2			2	0.4	3				3	2.500	104	100
64	65	80	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100
65	66	80	2			2	0.4	3				3	2.500	104	100
66	67	60	2			2	0.4	3				3	2.500	104	100
67	68	90	2			2	0.4	3				3	2.500	104	100
68	69	90	2			2	0.4	3				3	2.500	104	100
69	70	80	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100
70	71	90	3						3	0.3	3	3	3.333	102	100
71	72	80	2						2	0.3	2	2	3.333	102	100
72	73	40	3						3	0.3	3	3	3.333	102	100
73	74	100	3						3	0.3	3	3	3.333	102	100
74	75	100	5						5	0.2	5	5	5.000	98	
75	76	90	2			2	0.3	3				3	3.333	102	100
76	77	90	2			2	0.3	3				3	3.333	102	100
77	78	85	3			3	0.3	4.5				4.5	3.333	102	100
78	79	90	0									0		110	100
79	80	80	2			2	0.3	3				3	3.333	102	100
80	81	90	2			2	0.3	3				3	3.333	102	100
81	82	90	2			2	0.3	3				3	3.333	102	100
82	83	95	3						3	0.3	3	3	3.333	102	100
83	84	80	2						2	0.4	2	2	2.500	104	100
84	85	80	3						3	0.3	3	3	3.333	102	100
85	86	50	4									0		110	100
86	87	50	3			4	0.2	6				6	5.000	98	
87	88	60	4	1	0.5	2	0.2	3	2	0.3	2	5	5.200	97	
88	89	30	4			2	0.2	3	2	0.4	2	5	5.000	98	
89	90	50	3			3	0.2	4.5				4.5	5.000	98	
90	91	70	4			4	0.2	6				6	5.000	98	
91	92	0	0									0		110	100
92	93	70	3						3	0.3	3	3	3.333	102	100
93	94	100	3						3	0.3	3	3	3.333	102	100
94	95	40	4						4	0.1	4	4	10.000	85	
95	96	60	3						3	0.3	3	3	3.333	102	100
96	96.80	50	3						3	0.3	3	3	3.333	102	100

Figura 8. Cálculo Jv, Wjc, RQD; Barreno 5 Margen Izquierda, Hoja 2.

Anexo 2.2 Evaluación de las discontinuidades

Programa Académico: Maestría en Ciencias en Geología Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.														
BARRENO		Barreno 3 Plantilla de Permeabilización				FECHA	25-ene-17		PROYECTO	Presas El Realito				
INCLINACION		Vertical 90°				LONGITUD	53.25 m		LITOLOGIA	Riodacita Del Carmen (Trc)				
REALIZO						Vanessa Sosa Davila								
INTERVALO		N° Fracturas				Apertura	Material de relleno	CONDICION DE LAS PAREDES	RUGOSIDAD	Persistencia o extensión	SEPARACION DE FRACTURAS	Join Condition Jc		
DE	HASTA	0-30°	31-45°	46-60°	60-90°									
metros (m)	metros (m)	Número/dominio	Número/dominio	Número/dominio	Número/dominio	cm				m	cm			
0	10	SD	SD	SD	SD	12	5	6	6	3	0	20 - 40 cm	20	
10	20	SD	SD	SD	SD	12	4	2	6	3	0	20 cm	15	
10	20	SD	SD	SD	SD	4	5	6	6	3	0	20 cm	20	
		2	SD	SD	SD	SD	5	6	5	1	0	25 cm	17	
20	30	7	SD	SD	SD	SD	5	6	3	1	0	70 - 100 cm	15	
		SD	SD	SD	SD	SD	23	5	6	5	3	0	20 cm	19
		SD	SD	SD	SD	SD	8	5	6	5	3	0	40 cm	19
30	40	6	SD	SD	SD	SD	5	6	3	1	0	120 cm	15	
		SD	SD	SD	SD	SD	20	5	6	5	3	0	25 cm	19
40	53.45	5	SD	SD	SD	SD	5	6	3	1	0	60 - 100 cm	15	
		SD	SD	SD	SD	SD	17	5	6	6	3	0	20 - 40 cm	20
		SD	SD	SD	SD	SD	12	5	6	6	1	0	100 cm	18

Figura 9. Evaluación de las discontinuidades; Barreno 3 Plantilla de Permeabilización.

Programa Académico: Maestría en Ciencias en Geología Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.														
BARRENO		Barreno 4 Plantilla de Permeabilización				FECHA	25-ene-17		PROYECTO	Presas El Realito				
INCLINACION		Vertical 90°				LONGITUD	53.35 m		LITOLOGIA	Riodacita Del Carmen (Trc)				
REALIZO						Vianney Vanessa Sosa Davila								
INTERVALO		N° Fracturas				Apertura	Material de relleno	CONDICION DE LAS PAREDES	RUGOSIDAD	Persistencia o extensión	SEPARACION DE FRACTURAS	Join Condition Jc		
DE	HASTA	0-30°	31-45°	46-60°	60-90°									
metros (m)	metros (m)	Número/dominio	Número/dominio	Número/dominio	Número/dominio	cm				m	cm			
0	10	SD	SD	SD	SD	11	5	6	5	3	0	20 cm	19	
10	20	SD	SD	SD	SD	10	5	6	5	1	0	20-60 cm	17	
		11	SD	SD	SD	SD	5	6	5	3	0		19	
20	30	SD	SD	SD	SD	5	5	6	6	3	0	40 cm	20	
		22	SD	SD	SD	SD	5	6	5	3	0	40 cm	19	
		SD	SD	SD	SD	SD	17	5	6	5	3	0	40 cm	19
30	40	SD	SD	SD	SD	SD	5	6	5	3	0	20 - 40 cm	19	
		SD	SD	SD	SD	SD	18	5	6	6	3	0	20 cm	20
		2	SD	SD	SD	SD	SD	5	6	5	3	0	100 cm	19
40	53.35	12	SD	SD	SD	SD	5	6	5	1	0	20 - 40 cm	17	
		SD	SD	SD	SD	SD	26	5	6	5	3	0	20 - 40 cm	19
		SD	SD	SD	SD	SD	18	5	6	6	3	0	20 - 40 cm	20

Figura 10. Evaluación de las discontinuidades; Barreno 4 Plantilla de Permeabilización.

Programa Académico: Maestría en Ciencias en Geología Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.												
BARRENO	Barreno 5 M -IZQ (PIEZOMETRO)				FECHA	25-ene-17		PROYECTO	Presa El Realito			
UBICACIÓN	MARGEN IZQUIERDA RIO SANTA MARÍA						LITOLOGIA	Riodacita Del Carmen (Trc)				
INCLINACION	Vertical 90°				LONGITUD	96.80 m		REALIZO	Vianney Vanessa Sosa Davila			
INTERVALO		N° Fracturas				Apertura	Material de relleno	CONDICION DE LAS PAREDES	RUGOSIDAD	Persistencia o extensión	SEPARACION DE FRACTURAS	Join Condition Jc
DE	HASTA	0-30°	31-45°	46-60°	60-90°							
metros (m)	metros (m)	Número/dominio	Número/dominio	Número/dominio	Número/dominio	cm				m	cm	
0	10	7	SD	SD	SD	4	2	3	3	0	40- 60 cm	12
		7	SD	SD	SD	4	2	3	3	0	120 cm	12
		SD	SD	12	SD	4	2	5	3	0	40- 60 cm	14
		SD	SD	SD	11	4	2	5	3	0	20-40 cm	14
10	20	9	SD	SD	SD	4	2	5	3	0	80 cm	14
		SD	SD	SD	14	5	2	6	3	0	40 cm	16
20	30	13	SD	SD	SD	4	2	3	3	0	50 cm	12
		SD	SD	SD	12	4	2	3	3	0	40 cm	12
30	40	12	SD	SD	SD	5	2	5	5	0	80 cm	17
		SD	SD	SD	17	5	2	5	5	0	60 cm	17
		SD	SD	8	SD	5	2	5	5	0	40 cm	17
40	50	SD	SD	SD	14	5	2	5	5	0	60 cm	17
		SD	16	SD	SD	5	2	5	5	0	50 cm	17
50	60	SD	19	SD	SD	5	6	3	5	0	60 cm	19
		SD	SD	SD	16	5	6	3	5	0	50 cm	19
60	70	8	SD	SD	SD	5	6	3	5	0	60 cm	19
		SD	SD	7	SD	5	6	3	5	0	60 cm	19
		SD	SD	SD	12	5	6	3	5	0	60 cm	19
70	80	15	SD	SD	SD	5	6	3	5	0	60 cm	19
80	96.8	SD	SD	14	SD	5	6	6	3	0	40 cm	20
		SD	3	SD	SD	5	4	5	5	0	80 cm	19
		SD	SD	SD	5	5	4	5	5	0	60 cm	19
		SD	3	SD	SD	5	4	5	5	0	80 cm	19

Figura 11. Evaluación de las discontinuidades; Barreno 5 Margen Izquierda.

Anexo 2.3 FOTOGRAFÍAS DE LOS NÚCLEOS DE LOGUEO.



Figura 11. Barreno 5 Margen Izquierda, Foto 1.



Figura 12. Barreno 5 Margen Izquierda, Foto 2.



Figura 13. Barreno 1 Plantilla de Permeabilización.

**BARRENO 4, PRESA EL REALITO ,
PROFUNDIDAD 53.35 m, VERTICAL**



Figura 12. Barreno 4 Plantilla de Permeabilización.



Figura 13. Barreno 3 Plantilla de Permeabilización.

ANEXO 3. EVALUACIÓN DE VENTANAS GEOTÉCNICAS; *BIMROCK*



Figura 14. CeldaTrcbx_02.

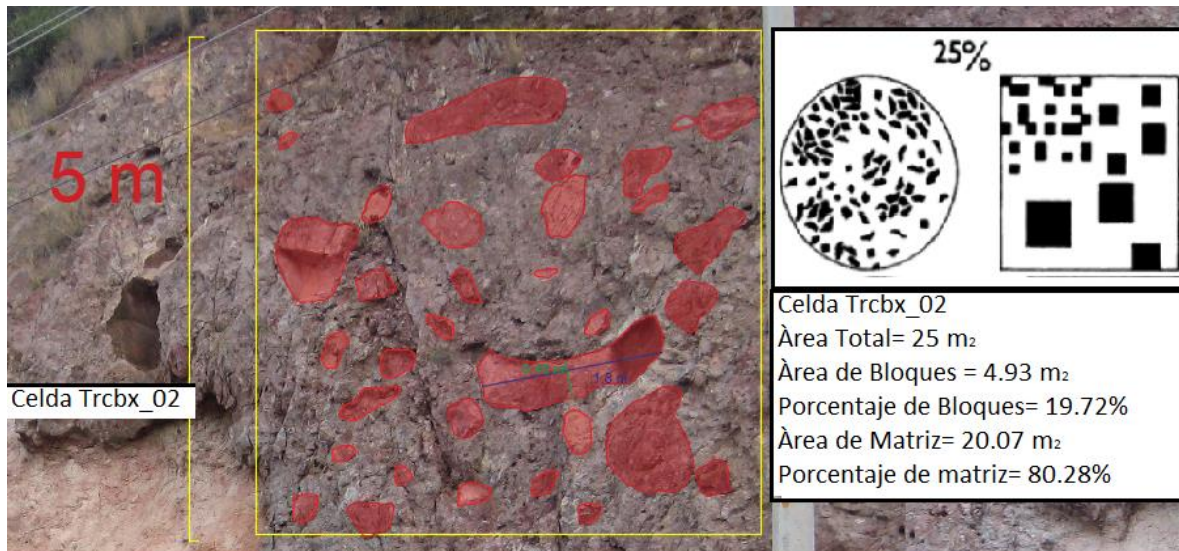


Figura 15. CeldaTrcbx_02, porcentaje de bloques.

FECHA		12-ene-17				FOLIO DE FOTOGRAFIA		ESTIMACION DEL PORCENTAJE DE BLOQUES EN CAMPO											
NOMBRE DEL PROYECTO		Presa Realito, Talud de camino		Longitud		1													
LUGAR				58 m		CLAVE DE LAS MUESTRAS													
COORDENADAS		371852	2389563	1156															
RESPONSABLE		Vianney Vanessa Sosa Davila.																	
CLAVE DE LA CELDA		Trcbx_02		RUMBO S 51° W		IGT 64° NW													
CARACTERISTICAS ENGINEERING DIMENSION																			
AREA (Talud)		Celda.	d _{max}		FC		ALP 1		ALP 2										
Altura	Ancho	Lc = VA	E. A. mayor	E. A. menor	Subredond	0.05 Lc	0.75 Lc	NLP	ALP 3	ALP....									
13	58m	22.5	55 cm	34 cm	eados	25 cm	3.75 m	sin lineaciones											
GRADO DE RESISTENCIA		ADERENCIA		Notas:		Porcentaje de clastos en campo,		45											
Datos Esclerometro				forma de talud= Rectangulo y Triangulo		Porcentaje de matriz en campo,		55											
Matriz	Bloques	500																	
25.5	44.2																		
<p>d_{max} = Longitud del clasto mayor E.A.= Eje Axial FC= Forma de los clastos: Angulosos, Redondeados, Subredondeados. Scanlines = Lc/ 10 NLP= Número de lineaciones principales de los clastos ALP = Angulo de la lineacion principal con respecto a la horizontal IGT= Inclinación General del talud LS= Longitud Scanlines B/M = RELACION BLOQUE / MATRIZ (VISUAL) DESCRIPCION GENERAL DEL BIMROCK, OBSERVACIONES UCS. Tabla de criterios de resistencia en campo</p>																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>DESCRIPCION</th> <th>VALOR DE A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Casi no existe adherencia entre los bloques y la matriz. Bloques redondeados.</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Adherencia débil entre los bloques y la matriz. Bloques semi-redondeados.</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Adherencia moderada entre los bloques y la matriz. Bloques semi-angulares.</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>Adherencia fuerte entre los bloques y la matriz. Bloques angulares.</td> <td>500</td> </tr> </tbody> </table>										DESCRIPCION	VALOR DE A	Casi no existe adherencia entre los bloques y la matriz. Bloques redondeados.	0	Adherencia débil entre los bloques y la matriz. Bloques semi-redondeados.	10	Adherencia moderada entre los bloques y la matriz. Bloques semi-angulares.	50	Adherencia fuerte entre los bloques y la matriz. Bloques angulares.	500
DESCRIPCION	VALOR DE A																		
Casi no existe adherencia entre los bloques y la matriz. Bloques redondeados.	0																		
Adherencia débil entre los bloques y la matriz. Bloques semi-redondeados.	10																		
Adherencia moderada entre los bloques y la matriz. Bloques semi-angulares.	50																		
Adherencia fuerte entre los bloques y la matriz. Bloques angulares.	500																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">DATOS DE ESCLEROMETRO (POSICION PERPENDICULAR)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MATRIZ</td> <td>12, 10, 14, 28, 16, 12, 0, 32, 34, 18, 22, 22, 30, 26, 18, 10, 0, 28, 22, 20, 32</td> </tr> <tr> <td>BLOQUES</td> <td>34, 44, 38, 16, 18, 28, 20, 18, 44, 44, 18, 40, 30, 36, 30, 40, 42, 30, 34, 36</td> </tr> </tbody> </table>										DATOS DE ESCLEROMETRO (POSICION PERPENDICULAR)		MATRIZ	12, 10, 14, 28, 16, 12, 0, 32, 34, 18, 22, 22, 30, 26, 18, 10, 0, 28, 22, 20, 32	BLOQUES	34, 44, 38, 16, 18, 28, 20, 18, 44, 44, 18, 40, 30, 36, 30, 40, 42, 30, 34, 36				
DATOS DE ESCLEROMETRO (POSICION PERPENDICULAR)																			
MATRIZ	12, 10, 14, 28, 16, 12, 0, 32, 34, 18, 22, 22, 30, 26, 18, 10, 0, 28, 22, 20, 32																		
BLOQUES	34, 44, 38, 16, 18, 28, 20, 18, 44, 44, 18, 40, 30, 36, 30, 40, 42, 30, 34, 36																		
		Scanlines = Lc/ 10																	
LS=		Scanlines		B/M															
SCL 1		60																	
SCL 2		50																	
SCL 3		40																	
SCL 4		50																	
SCL 5		50																	
SCL 6		40																	
SCL 7		45																	
SCL 8		35																	
SCL 9		40																	
SCL 10		40						45											

Figura 16. Tabla de levantamiento geotécnico celdaTrcbx_02

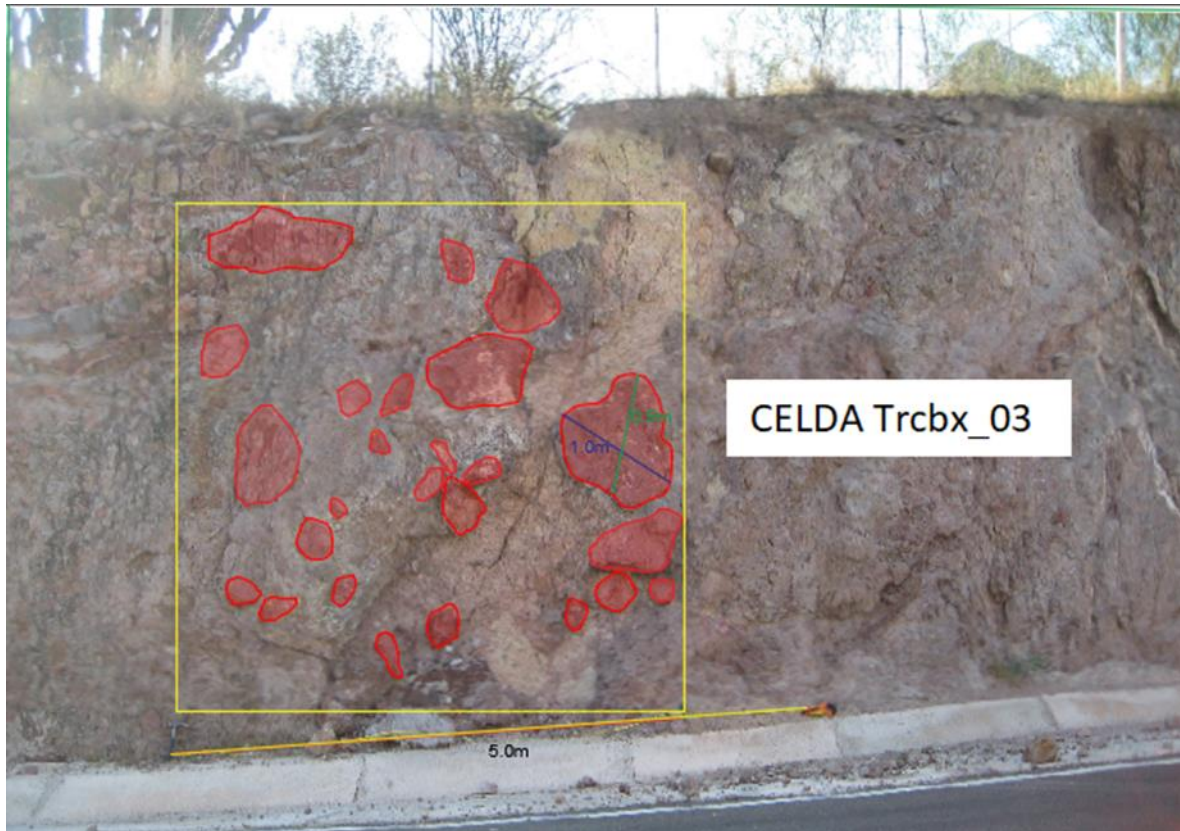


Figura 17. CeldaTrcbx_03

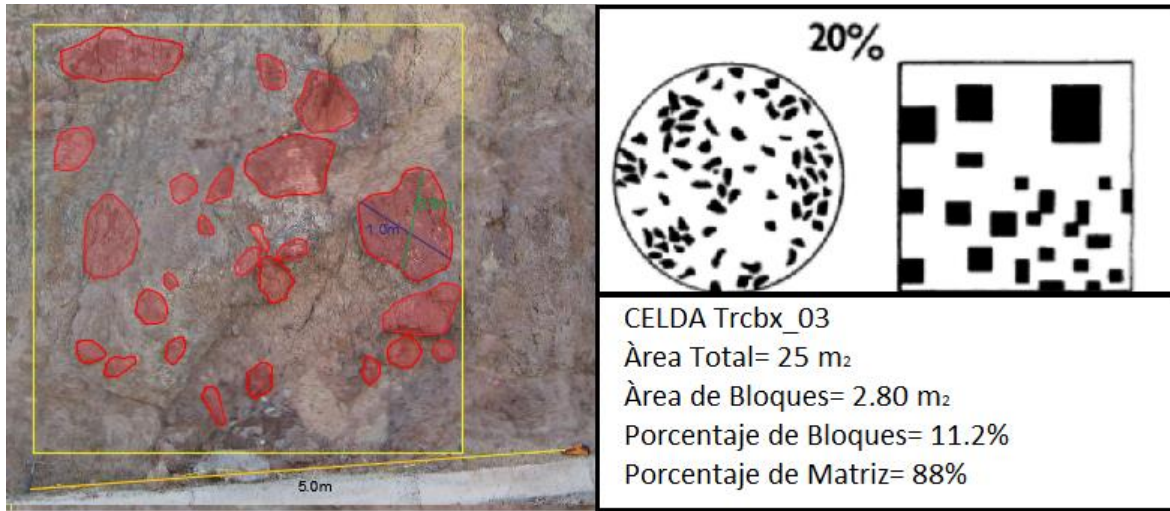


Figura 18. CeldaTrcbx_03, porcentaje de bloques.

FECHA		12-ene-17												ESTIMACION DEL PORCENTAJE DE BLOQUES EN CAMPO	
NOMBRE DEL PROYECTO		Presa Realito, Talud de camino		Longitud		FOLIO DE FOTOGRAFIA		3							
LUGAR				47 m		CLAVE DE LAS MUESTRAS									
COORDENADAS		371957 2389650 1162													
RESPONSABLE		Vianney Vanessa Sosa Davila.													
CLAVE DE LA CELDA		Trcbx_03		RUMBO TALUD: S 84° W		IGT 70° NW									
CARACTERISTICAS ENGINEERING DIMENSION															
AREA (Talud)		Celda.		d _{max}		FC		0.05 Lc		0.75 Lc		NLP		ALP 1 ALP 2 ALP 3 ALP...	
Altura	Ancho	Lc = VA	E. A. mayor	E. A. menor	Subredondeados	20 cm	3.00 m	sin lineaciones							
6	47 m	16	90 cm	80 cm											
GRADO DE RESISTENCIA		ADERENCIA		Notas:		Porcentaje de clastos en campo,		77							
Datos Esclerometro				forma de talud= 1 Rectangulo, 2 Triangulo		Porcentaje de matriz en campo,		23							
Matriz	Bloques	24	28	500	Área: 203 m ²										
d _{max} = Longitud del clasto mayor															
E.A. = Eje Axial															
FC= Forma de los clastos: Angulosos, Redondeados, Subredondeados.															
Scanlines = Lc/ 10															
NLP= Número de lineaciones principales de los clastos															
ALP = Ángulo de la lineacion principal con respecto a la horizontal															
IGT= Inclinación General del talud															
LS= Longitud Scanlines															
B/M = RELACION BLOQUE / MATRIZ (VISUAL)															
DESCRIPCION GENERAL DEL BIMROCK, OBSERVACIONES															
UCS. Tabla de criterios de resistencia en campo															
DATOS DE ESCLEROMETRO (POSICION PERPENDICULAR)															
MATRIZ		12, 14, 14, 0, 0, 0, 0, 28, 14, 30, 24, 24, 30, 14, 24, 12, 14, 14, 28, 30													
BLOQUES		22, 20, 0, 10, 24, 24, 30, 36, 28, 40, 22, 20, 10, 0, 24, 30													
		SCL 1 80													
		SCL 2 80													
		SCL 3 90													
		SCL 4 80													
		SCL 5 90													
		SCL 6 90													
		SCL 7 70													
		SCL 8 60													
		SCL 9 70													
		SCL 10 60													
														77	

Figura 19. Tabla de levantamiento geotécnico celdaTrcbx_03



Figura 20. CeldaTrcbx_04.

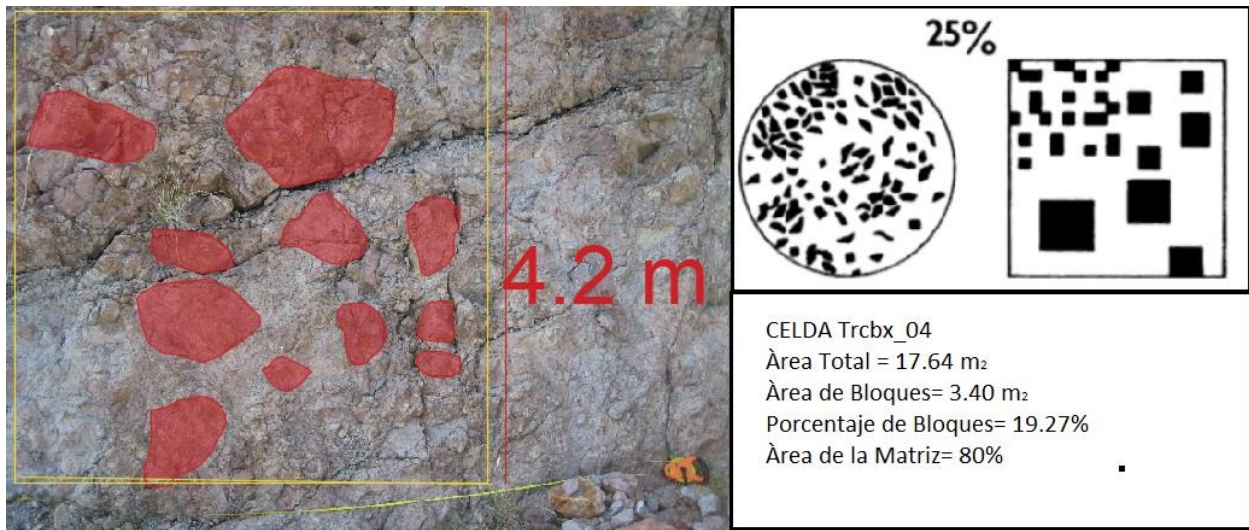


Figura 21. CeldaTrcbx_04, porcentaje de bloques.

FECHA		12-ene-17				FOLIO DE FOTOGRAFIA		ESTIMACION DEL PORCENTAJE DE BLOQUES EN CAMPO											
NOMBRE DEL PROYECTO		Presa Realito, Talud de camino		Longitud		3													
LUGAR				50 m		CLAVE DE LAS MUESTRAS													
COORDENADAS		372015 2389631 1145																	
RESPONSABLE		Vianney Vanessa Sosa Davila.																	
CLAVE DE LA CELDA		Trcbx_04		RUMBO TALUD: S 84° W		IGT 70° NW													
CARACTERISTICAS ENGINEERING DIMENSION																			
AREA (Talud)		Celda. Lc=VA		d _{max}		FC													
Altura	Ancho	E. A. mayor	E. A. menor	Subredondeados	0.05 Lc	0.75 Lc	NLP	ALP 1	ALP 2										
6	50 m	17.3	90 cm	50 cm	20 cm	3.15 m	sin lineaciones												
GRADO DE RESISTENCIA Datos Esclerometro		ADERENCIA		Notas:		Porcentaje de clastos en campo,		52											
Matriz	Bloques	500		forma de talud= 1 Rectangulo		Porcentaje de matriz en campo,		48											
24.6	31			Área: 300 m2															
d _{max} = Longitud del clasto mayor E.A. = Eje Axial FC= Forma de los clastos: Angulosos, Redondeados, Subredondeados. Scanlines = Lc/ 10 NLP= Número de lineaciones principales de los clastos ALP = Angulo de la lineacion principal con respecto a la horizontal IGT= Inclinación General del talud LS= Longitud Scanlines B/M = RELACION BLOQUE / MATRIZ (VISUAL) DESCRIPCION GENERAL DEL BIMROCK, OBSERVACIONES UCS. Tabla de criterios de resistencia en campo				<table border="1"> <thead> <tr> <th>DESCRIPCION</th> <th>VALOR DE A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Casi no existe adherencia entre los bloques y la matriz. Bloques redondeados.</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Adherencia débil entre los bloques y la matriz. Bloques semi-redondeados.</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Adherencia moderada entre los bloques y la matriz. Bloques semi-angulares.</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>Adherencia fuerte entre los bloques y la matriz. Bloques angulares.</td> <td>500</td> </tr> </tbody> </table>						DESCRIPCION	VALOR DE A	Casi no existe adherencia entre los bloques y la matriz. Bloques redondeados.	0	Adherencia débil entre los bloques y la matriz. Bloques semi-redondeados.	10	Adherencia moderada entre los bloques y la matriz. Bloques semi-angulares.	50	Adherencia fuerte entre los bloques y la matriz. Bloques angulares.	500
DESCRIPCION	VALOR DE A																		
Casi no existe adherencia entre los bloques y la matriz. Bloques redondeados.	0																		
Adherencia débil entre los bloques y la matriz. Bloques semi-redondeados.	10																		
Adherencia moderada entre los bloques y la matriz. Bloques semi-angulares.	50																		
Adherencia fuerte entre los bloques y la matriz. Bloques angulares.	500																		
DATOS DE ESCLEROMETRO (POSICION PERPENDICULAR)																			
MATRIZ		18, 20, 22, 0, 18, 0, 16, 20, 24, 30, 22, 10, 30, 12, 26, 12, 14, 28																	
BLOQUES		24, 24, 10, 10, 12, 24, 30, 30, 40, 42, 28, 10, 12, 26, 32																	
								Scanlines = Lc/ 10											
								LS=											
								Scanlines											
								B/M											
								SCL 1											
								70											
								SCL 2											
								90											
								SCL 3											
								90											
								SCL 4											
								50											
								SCL 5											
								50											
								SCL 6											
								40											
								SCL 7											
								30											
								SCL 8											
								30											
								SCL 9											
								30											
								SCL 10											
								40											

Figura 22. Tabla de levantamiento geotécnico celdaTrcbx_04