



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA
CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL**

**ESTABILIDAD DE UN TALUD EN LA SIERRA DE
GUADALUPE Y SU REPRESENTACIÓN GRÁFICA**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

P R E S E N T A :

ING. YESSICA ARIADNE DE ANDA CLEMENTE

DIRECTOR DE TESINA:

MTRO. REGINALDO JOSÉ HERNÁNDEZ ROMERO

Ciudad Universitaria, CD. MX.

DICIEMBRE, 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

La posibilidad de cursar el posgrado y con ello realizar este trabajo como parte de la culminación de la especialidad, ha sido gracias al apoyo económico y moral de instituciones y personas, por lo que agradezco:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante el año de estudio, la cual me permitió aprovechar cursos y congresos enfocados en mi educación.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrir las puertas al conocimiento mediante clases, bibliotecas físicas y digitales, programas, y demás, además de ofrecer recreación.

También, a mis profesores de la Especialidad en Geotecnia que transmitieron sus conocimientos en clases didácticas y analíticas, a pesar de las dificultades que se pudieron presentar como lo fue el aislamiento social. En particular, al Maestro Reginaldo Hernández por la dirección y el tiempo invertido en este trabajo; y a mi tutor, Ingeniero Legorreta Cuevas, por su tiempo e interés en estos semestres.

Un especial agradecimiento al Dr. Moisés Dávila y al Ing. Servando Arana por su ayuda y participación en este trabajo, que se nutrió con base en sus comentarios e información provista.

A mis papás, Rocío y Armando, y a mi hermano, Nael, que no tengo manera de agradecerles todo el apoyo, paciencia y palabras que me han dedicado y que siempre están ahí para motivarme y levantarme pese a todo. Mis logros, en gran parte, se deben a su confianza, fuerza y todo lo que me brindan.

A mi abuelita, Aurea, con quien he compartido bonitos momentos y a quien agradezco muchísimo sus enseñanzas y palabras, por acercarme a Dios a quien también tengo mucho que agradecer.

A Guillermo por la información y tiempo que dedicó a mis dudas y debates por más grandes o pequeños que sean, por estar en diversos ámbitos de vida como gran compañero y amigo.

A las grandes personas con las que compartí este recorrido, en especial a Sofia y Mario, por el conocimiento, los buenos momentos, el estrés, las risas, las pláticas y burlas, las experiencias y los planes que aún queremos cumplir individual y grupalmente.

Por último, a los ya amigos de vida, Ana, Claudia, Jonathan, Juan y Manuel que siguen formando parte de mi cotidianidad, de mis alegrías, dudas, emociones y momentos; en particular, a Daniel, por el tiempo de conocernos y de amistad, de pláticas, regaños, consejos y de saber recurrir al otro en tiempos buenos y malos.

*¡Qué maravilloso es que nadie necesite
esperar ni un solo momento antes de
comenzar a mejorar el mundo!*

**El Diario de Ana Frank
Ana Frank**

*Sea un hombre o sea más que un
hombre, sea firme con su propósito y
firme como una piedra.*

**Frankenstein
Mary Shelley**



Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
Método de trabajo	2
2. GENERALIDADES	4
Localización	4
Fisiografía.....	5
3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	10
Geología regional	10
Geomorfología.....	10
Estratigrafía.....	13
Imágenes satelitales	14
Sismicidad	16
4. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA DEL TALUD	18
Geología del talud.....	18
Geología estructural y representación gráfica	20
Geotecnia del talud	23
Caracterización del macizo	23
Calidad del macizo rocoso	26
Unidades geotécnicas	29
5. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD	32
6. PROYECTO DE ESTABILIZACIÓN DEL TALUD	49
Zona Geotécnica 1	49
Zona Geotécnica 2	53
Propuesta de diseño general de tratamientos.....	58
6. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES.....	60
7. REFERENCIAS	66
GLOSARIO y ABREVIATURAS	68



Índice de figuras

Figura 1. Fotografía satelital del área de estudio.	4
Figura 2. Mapa de localización.	5
Figura 3. Faja Neovolcánica Transmexicana.	6
Figura 4. Estaciones Climatológicas cerca del talud.	8
Figura 5. Mapa morfogenético.	12
Figura 6. Columna estratigráfica de Guadalupe- Sierra Muerta.	13
Figura 7. Fotografía aérea de Tlalnepantla de 1981	15
Figura 8 Zonas sísmicas de la República Mexicana.	16
Figura 9. Zonificación de la Ciudad y Valle de México.	17
Figura 10. Corte del talud con división de litologías.	19
Figura 11. Estereograma de familias de discontinuidades en talud	20
Figura 12. Estereograma de falla.	21
Figura 13. Algunas linealidades en talud.	22
Figura 14. Escala descriptiva de observación para determinar la rugosidad (Hoek, 1981).....	27
Figura 15. Condiciones de las discontinuidades a diferentes escalas.	28
Figura 16. Estereograma inestabilidad de planos F1.....	32
Figura 17 Estereograma inestabilidad de plano F2.....	32
Figura 18 Estereograma inestabilidad de planos F3.....	33
Figura 19 Estereograma inestabilidad de planos F4.....	33
Figura 20 Estereograma inestabilidad de falla.	34
Figura 21 Estereograma inestabilidad de cuña formada por discontinuidades F1 y F2.....	34
Figura 22 Estereograma inestabilidad de cuña formada por discontinuidades F1 y F3.....	35
Figura 23. Estereograma inestabilidad de cuña formada por discontinuidades F1 y F4.....	35
Figura 24. Estereograma inestabilidad de cuña formada por discontinuidades F2 y F3.....	36
Figura 25. Estereograma inestabilidad de cuña formada por discontinuidades F2 y F4.....	36
Figura 26. Estereograma inestabilidad de cuña formada por discontinuidades F3 y F4.....	37



Figura 27 Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 1, caso 1: sin fuerzas sísmicas ni hidráulicas.	40
Figura 28. Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 1, caso 2: considerando fuerzas hidráulicas.	41
Figura 29. Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 1, caso 3: fuerza sísmica de 7.84 t.	42
Figura 30 Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 2, caso 1: sin fuerzas sísmicas ni hidráulicas.	43
Figura 31. Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 2, caso 2: considerando fuerzas hidráulicas.	44
Figura 32. Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 2, caso 3: fuerza sísmica de 3.10t.	45
Figura 33. Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 3, caso 1: sin fuerzas sísmicas ni hidráulicas.	46
Figura 34. Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 3, caso 2: considerando fuerzas hidráulicas	47
Figura 35. Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 3, caso 3: fuerza sísmica de 1.09 t.	47
Figura 36. Graficas de factor de seguridad conforme variación del ángulo del talud en condiciones estáticas.	50
Figura 37. Diagrama de fuerzas en talud de zona geotécnica 1 con modificación de pendiente y altura.	50
Figura 38. Zona 1 con muralla en la berma superior del talud.	51
Figura 39. Diagrama de fuerzas en talud de zona geotécnica 1, en condiciones estáticas, con anclaje en 5 líneas.	52
Figura 40. Grafica de modificación de ángulo del talud y modificación en factor de seguridad dinámico.	53
Figura 41. Diagrama de fuerzas en talud abatido a 67° de zona geotécnica 2 en condiciones dinámicas.	54
Figura 42. Diagrama de fuerzas en talud de zona geotécnica 2 en condiciones estáticas, presión hidrostática del 18 %, y abatimiento de talud-	55
Figura 43. Variación de factor de seguridad dinámico por cambio de pendiente zona 3.	56
Figura 44. Muralla sobre ZG3.	57



Figura 45. Diagrama de fuerzas en talud de zona geotécnica 3, en condiciones estáticas, con anclaje en 2 líneas.	58
Figura 46. Sección longitudinal del talud.....	63
Figura 47. Secciones transversales al eje de talud señaladas en la sección longitudinal, indicando tratamientos correspondientes a cada zona geotécnica.	65



Índice de tablas

Tabla 1. Precipitación Estación Las Arboledas.....	8
Tabla 2. Precipitación Estación San Martin Obispo.....	9
Tabla 3. Precipitación Estación San Mateo Tecoloapan.....	9
Tabla 4. Valor RQD de las unidades litológicas.....	23
Tabla 5. Dimensiones de unidades litológicas.....	23
Tabla 6. Identificación en campo de resistencia a la compresión simple mediante martillo geológico.....	24
Tabla 7. Compresión simple de unidades.....	25
Tabla 8. Peso volumétrico de la roca.....	25
Tabla 9. Módulo de elasticidad y coeficiente Poisson de la roca intacta.....	26
Tabla 10. Clasificación del macizo rocoso de acuerdo con su zonificación.....	27
Tabla 11. Zonificación geotécnica del talud.....	29
Tabla 12. Parámetros RQD, espesor, resistencia a la compresión y peso volumétrico del macizo por zonas.....	30
Tabla 13. Parámetros mecánicos de las zonas geotécnicas.....	31
Tabla 14. Dip/Dip direction de familias que perjudican al talud.....	37
Tabla 15. SMR para zona geotécnica 1.....	38
Tabla 16. SMR para zona geotécnica 2.....	38
Tabla 17. SMR para zona geotécnica 3.....	38
Tabla 18. Factores de Seguridad y Factores de falla para los casos 1, 2 y 3 de zona geotécnica 1.....	42
Tabla 19. Factores de Seguridad y Factores de falla para los casos 1, 2 y 3 de zona geotécnica 2.....	45
Tabla 20. Factores de Seguridad y Factores de falla para los casos 1, 2 y 3 de zona geotécnica 3.....	48
Tabla 21. Factores de Seguridad y Factores de falla para los casos 1, 2 y 3 de zona geotécnica 1 con anclaje para mejoramiento de estabilidad.....	52
Tabla 22. Factores de Seguridad y Factores de falla para los casos 1, 2 y 3 de zona geotécnica 2 con anclaje y abatimientos del talud para mejoramiento de estabilidad.....	55
Tabla 23. Factores de Seguridad y Factores de falla para los casos 1, 2 y 3 de zona geotécnica 3 con anclaje para mejoramiento de estabilidad.....	57
Tabla 24. Resumen de propuestas para estabilización del talud en sus diferentes zonas geotécnicas.....	59



1.INTRODUCCIÓN

Durante la construcción de cualquier vía terrestre, es común encontrar elevaciones topográficas naturales que impiden tener un camino recto y plano; debido a que, por trazo de diseño y relieve no siempre se puede evadir dicha geomorfología, se necesita realizar cortes inclinados en las elevaciones que permitan continuar con la obra. Para la construcción y estabilidad de esta estructura, llamada talud, se debe de tomar en consideración factores que influyan durante su tiempo de vida útil y que reduzcan el riesgo de falla, por ejemplo, los deslizamientos o los derrumbes. Así pues, cuando las condiciones iniciales no son las más favorables, entonces deben implementarse tratamientos pertinentes para aumentar su condición de seguridad.

La estabilidad de un talud involucra diversos factores como geometría, inclinación, sismicidad, condiciones climatológicas, hidráulicas, entre otros, sin embargo, la que influyen mayormente son las características geológicas - geotécnicas.

A pesar de existir diversas teorías y prácticas para la estabilidad de taludes, cada caso es particular pues las condiciones varían de un lugar a otro lugar, y en geología, ningún sitio comparte exactitud de características respecto a otro. Es por eso que se caracterizará de manera geológica- geotécnica mediante RMR (Bieniawski, 1989), GSI (Hoek & Marinos, 2000) y GSI (Romana,1995) con apoyo de su representación gráfica mediante la red de Wulff para determinar las posibles fallas de acuerdo con sus discontinuidades. En este trabajo, serán aplicadas a las condiciones de inestabilidad de un talud en la zona Suroriente de la Sierra de Guadalupe, dando, conforme a sus peculiaridades, recomendaciones para su realización y/o tratamiento, y con ello establecer medidas de seguridad que prevengan o mitiguen los riesgos.

Para lograr un estudio más completo, se pretende abordar algunos aspectos geológicos que perjudican la estabilidad del talud, además de examinar otros factores externos que modifiquen de manera directa la seguridad del mismo para, a partir de su reconocimiento, plantear diversas remediaciones y escoger el procedimiento más adecuado para ello.



El trabajo consta de la presentación del método de trabajo y de las generalidades de la zona de estudio para tener un reconocimiento del sitio, abarcando temas como ubicación, fisiografía, condiciones climatológicas y de precipitación. En segundo lugar, se ahonda en la geología regional de la Sierra de Guadalupe, considerando su geología, historia geológica, geomorfología, zonas estructurales, tectónica y sismicidad. A continuación, es descrita de manera local y a detalle la zona de estudio de manera geológica, teniendo en cuenta la fotogeología y estratigrafía para con ello y observaciones de campo, caracterizar de manera geotécnica determinando la calidad de la roca, el análisis de la estabilidad y las alternativas de remediación para la seguridad del talud. Finalmente, se incluyen las recomendaciones de trabajos a realizar en la zona de estudio de acuerdo con las condiciones anteriormente analizadas. Además, se agrega un glosario y una lista de abreviaturas que son utilizadas durante este escrito.

Método de trabajo

El cuerpo del trabajo se desarrolló en diversas fases, las cuales pueden englobarse en cuatro grupos:

1. Trabajos preliminares

- Recopilación y análisis de información local y regional referente a la ubicación del talud, abarcando características tales como el clima, fisiografía, geomorfología, tectónica y geología histórica.
- Obtención de información estructural en campo, recopilando 322 datos de fallas y fracturas presentes en el talud.
- Análisis e interpretación geológica de imágenes satelitales adquiridas de Google Earth e INEGI, identificando litologías, lineamientos y estructuras mayores.

2. Trabajos de campo

El levantamiento geológico-geotécnico que a su vez se subdividió en:

- a. Reconocimiento de las unidades litológicas, identificando



continuidad y disposición de las unidades, así como estructura, textura, composición y grado de intemperismo.

- b. Identificación y medición de discontinuidades. Contemplando las características propias como rumbo, echado, espaciamiento, continuidad, abertura, rugosidad, relleno y presencia de agua.

3. Procesamiento de información

Con las características geológicas y propiedades geomecánicas de las unidades geotécnicas, se clasificó de manera geomecánica el macizo rocoso mediante la clasificación Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1979), GSI de Hoek (1995) y SMR de Romana (1985), obteniéndose la calidad del macizo.

Con los datos estructurales se generaron redes estereográficas de Wulff estableciéndose las familias principales de discontinuidades y su interacción con las demás familias en el talud.

4. Diseño y proyecto

Considerando el procesamiento de la información y la generación de un modelo geológico-geotécnico, se analizó y determinó la estabilidad y mecanismos de rotura potencial, para con ello realizar una propuesta para la estabilidad del talud y remediación o protección en caso de ser necesario para cada situación de inestabilidad.



2. GENERALIDADES

La ampliación del Panteón Jardines del Recuerdo ha requerido adecuar nuevas zonas con fines funerarios, y con ello, se ha necesitado construir vías de acceso que faciliten la comunicación de áreas; para generar esta facilidad y el incremento de terreno, fue necesario realizar cortes en roca, con taludes que garanticen su estabilidad pues se pretende el tránsito de personal por la demarcación.

La zona de estudio se localiza en el panteón anteriormente mencionado, en Tlalnepantla, Estado de México. Se compone de dos taludes con diferente rumbo, en total tienen una longitud de 114 metros, de los cuales se analizarán 53 m de la porción noreste, que corresponde con el talud norte del área (Figura 1). El talud presenta rumbo noreste y una pendiente semi- vertical.



Figura 1. Fotografía satelital del área de estudio.

Localización

Tlalnepantla es un municipio Estado de México que está dividido geográficamente en dos superficies por las alcaldías Gustavo A. Madero y Azcapotzalco de la Ciudad de México (Figura 2), por lo que, presenta diferentes fronteras en cada una de sus áreas. La porción Oeste, referente a la zona del estudio, está limitada, de NE al SW en sentido antihorario, por Tultitlán, Cuautitlán Izcalli, Atizapán de Zaragoza y Naucalpan de Juárez.



El talud se encuentra en una elevación topográfica a 2,470 m.s.n.m. perteneciente a la Sierra de Guadalupe. Para llegar al talud desde la Ciudad de México, se toma la autopista urbana Naucalpan – Ecatepec, se continua por la avenida de 6 carriles, Jesús Reyes Heróles con dirección al NW, y con destino al Panteón Jardines del Recuerdo, al cual se ingresa y recorre al NE por las vías de acceso pavimentadas, rumbo a la elevación topográfica; una vez llegando al camino de terracería se avanza hasta casi llegar al parteaguas, aproximadamente quince minutos en automóvil.

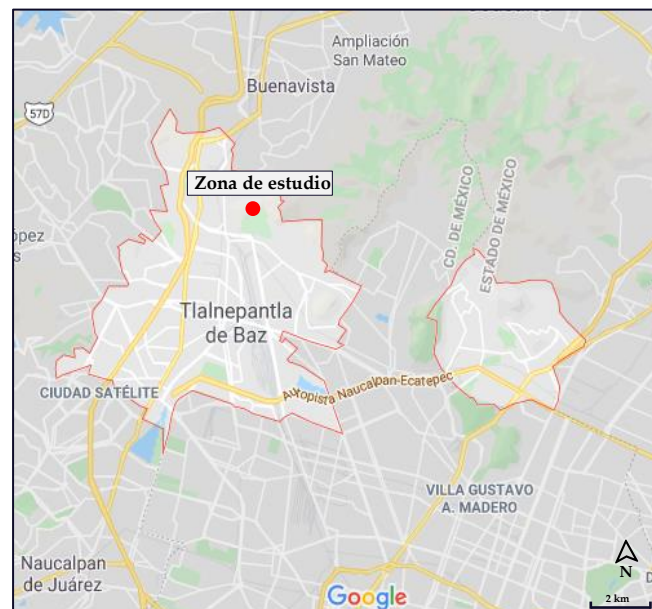


Figura 2. Mapa de localización.

El mejor punto de referencia para la ubicación del talud, es en el Panteón Jardines del Recuerdo ubicado al SE del área de estudio, además se observan torres de líneas de transmisión de electricidad en la parte superior del talud.

Fisiografía

La -Sierra de Guadalupe pertenece a la provincia fisiográfica denominada Faja Volcánica Transversal Mexicana (FVTM), anteriormente también ha sido llamada Eje Neovolcánico, Cinturón Volcánico Transversal Mexicano (CVTM). Como su nombre hace referencia, es un complejo que atraviesa de



manera horizontal el país, extendiéndose de la costa del Pacífico desde el Volcán de Colima hasta la costa del Golfo de México, el Pico de Orizaba y el Cofre de Perote; así pues, pasa por los estados de Veracruz, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo. Estado de México, Ciudad de México, Morelos, Guanajuato, Michoacán, Guanajuato, Colima, Jalisco, y Nayarit. Mientras en su extensión norte-sur no presenta una uniformidad; según Aguayo y Trápaga, en la parte central, desde la ciudad de San Luis Potosí hasta el poblado de Chaucingo, Morelos tiene alrededor de cuatrocientos kilómetros, mientras que, entre Teziutlán, Puebla y Orizaba, Veracruz hacia el Golfo de México tiene aproximadamente cien kilómetros (Figura 3).

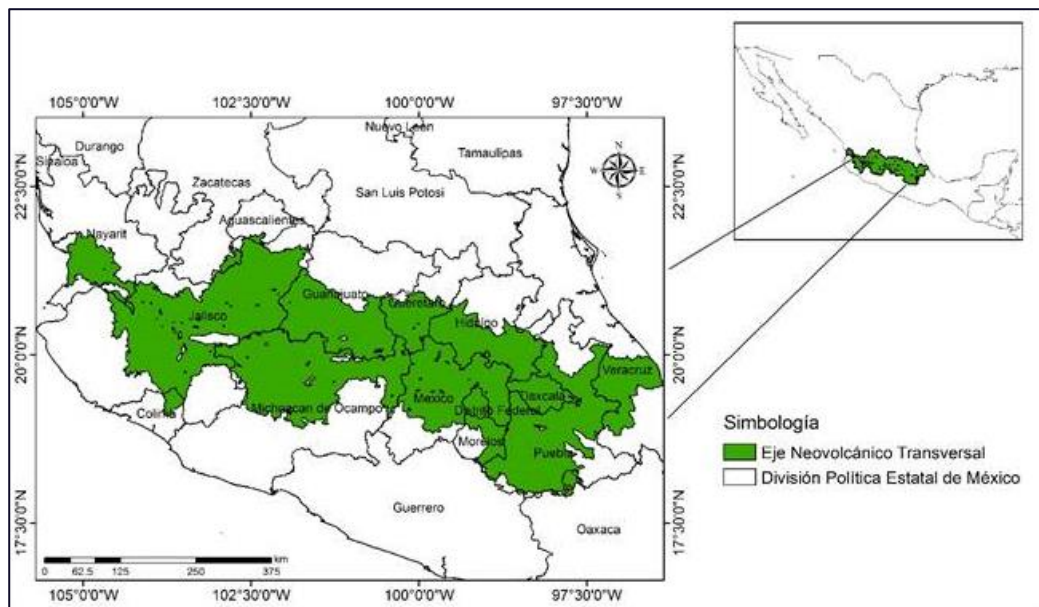


Figura 3. Faja Neovolcánica Transmexicana.

Tomada de scielo.org.mx

Las principales elevaciones de esta provincia tienen nombres nahuas o tarascos, como Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Malitzin, Paricutín, Zapicho. Además, también es posible encontrar mesetas, que a su vez presentan cuencas cerradas, como Pátzcuaro, Cuitzeo, la Antigua Ciénega del Lerma, los antiguos lagos del Valle de México (Yarza, 2003).

Ferrari (2016), menciona que el basamento de la Faja es heterogéneo y consta de dos regiones con edad e historia geológica distinta, pero presenta algunos



aspectos en toda su estructura que la hacen peculiar y diferente a otras provincias de arcos volcánicos:

1. Su parte central y oriental no son paralelas a la Trinchera Mesoamericana.
2. Sus principales estratovolcanes están alineados transversalmente.
3. Presenta una gran variabilidad geoquímica al tener no sólo productos típicos de ambientes de subducción sino también de tipo intraplaca.
4. Las placas en subducción son relativamente jóvenes (10 Ma para Rivera y entre 11 y 23 Ma para Cocos). Hechos que en otros casos dan lugar a un escaso volcanismo.
5. Hay ausencia de sismicidad por debajo de la zona volcánica.

Debido a la complejidad geológica y topográfica de la provincia, se ha complicado el desarrollo de vías terrestres de corte lineal, lo cual ha orillado a la creación de cortes carreteros, túneles y puentes.

Clima y precipitación

Gran cantidad de tipos de rocas son formadas a profundidad, con diferentes condiciones de presión y temperatura a las ubicadas en la superficie, por lo que al aflorar se encuentra en desequilibrio con su origen, así pues, al tener contacto con el ambiente comienzan modificaciones en su estructura y composición química y mineralógica. Condición que es acrecentada al realizar corte y dejar la roca expuesta al clima. Debido a que el agua es el factor natural que ejerce mayor poder sobre la roca y el suelo, el análisis se desenvuelve con base a las precipitaciones.

La Secretaría de Bienestar categoriza el clima de Tlalnepantla como templado, subhúmedo con temperaturas media anual de entre 12 y 18 °C, teniendo temperaturas de hasta 3 °C en los meses más fríos.

Para el análisis fueron contempladas estaciones climatológicas (E.C.) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en un radio de máximo siete kilómetros a partir del punto de estudio, esta circunferencia engloba cuatro



E.C. (Figura 4), la más cercana al talud a analizar está a aproximadamente 3.1 km al Oeste, denominada Las Arboledas; a mayor distancia pero en la misma dirección está ubicada la estación San Mateo Tecoloapan; la estación San Martín Obispo se localiza al NW y finalmente, Vaso Regulador Carreta fue desplantada hacia el SE y de la cual no se tienen datos de precipitación.

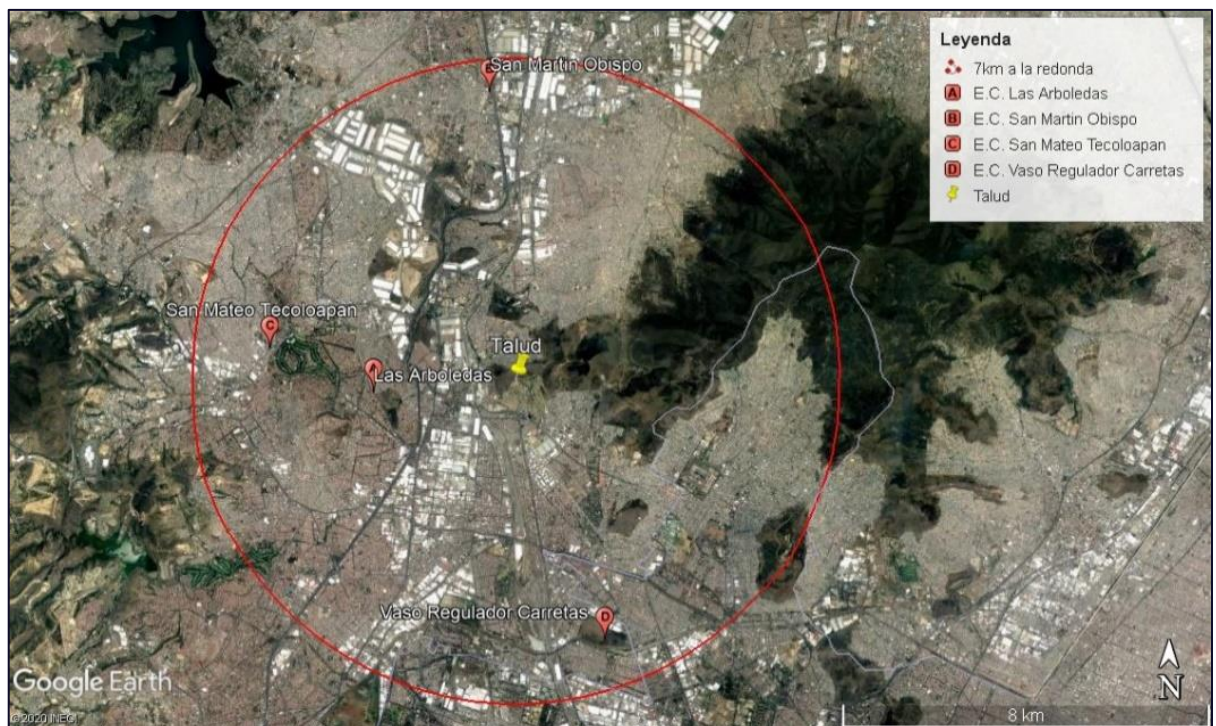


Figura 4. Estaciones Climatológicas cerca del talud.

A continuación, se presentan los datos del periodo de 1981 a 2010 de las E.C. antes mencionadas (Tabla 1 a Tabla 3), observándose claramente una mayor precipitación en los meses de la temporada de verano (junio a septiembre)

Tabla 1. Precipitación Estación Las Arboledas.

ESTADO DE: MEXICO												PERIODO: 1981-2010	
ESTACION: 00015047 LAS ARBOLEDAS												ALTURA: 2,270.0 MSNM.	
	LATITUD: 19°33'46" N.						LONGITUD: 099°12'57" W.						
PRECIPITACION	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
NORMAL	9.6	10.6	10.6	25	65.3	145	164.4	157.4	151.4	72.2	12.5	5.3	829.3
MAXIMA MENSUAL	50.5	68.3	39.5	80.7	118.7	270.1	320.9	314	372.7	164	59.5	35.2	
AÑO DE MÁXIMA	1992	2010	1988	1985	1982	1986	2010	1995	2009	1996	2002	1995	
MAXIMA DIARIA	20	38	33	35.5	37.5	74	63	66	109.5	67	41.5	14.7	
FECHA MAXIMA DIARIA	17/1981	22/1992	12/2009	26/2001	15/1985	25/1988	31/2007	24/1992	06/2009	05/1996	01/2004	30/1995	
AÑOS CON DATOS	26	29	28	28	21	29	28	29	29	29	29	21	



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería
Programa Único de Especializaciones de Ingeniería
Campo de conocimiento de Ingeniería Civil: Geotecnia



Tabla 2. Precipitación Estación San Martín Obispo.

ESTADO DE: MEXICO													PERIODO: 1981-2010		
ESTACION: 00015098 SAN MARTIN OBISPO													LATITUD: 19°37'18" N.	LONGITUD: 099°11'34" W.	ALTURA: 2,255.0 MSNM.
PRECIPITACION	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre			
NORMAL	7.2	9.1	10	29.5	48.1	119.5	134.1	129.5	116.4	65.3	8.7	4.7	682.1		
MAXIMA MENSUAL	31.5	69.1	35.8	312.5	96.5	268.5	231.1	244.7	299.8	150.3	50.3	21.5			
AÑO DE MÁXIMA	1992	2010	2006	2004	1995	1985	1983	2005	2002	1996	2002	1995			
MAXIMA DIARIA	16.8	22.4	21.8	22	31.2	59.4	53.5	69.5	63.1	56.3	36.6	12.3			
FECHA MAXIMA DIARIA	18/1983	04/2010	05/1988	12/2008	27/1996	30/1995	23/2010	08/1995	27/1983	10/1982	05/2002	07/1994			
AÑOS CON DATOS	29	27	29	29	29	29	29	28	27	26	26	23			

Tabla 3. Precipitación Estación San Mateo Tecoloapan.

ESTADO DE: MEXICO													PERIODO: 1981-2010		
ESTACION: 00015100 SAN MATEO TECOLOAPAN													LATITUD: 19°34'15" N.	LONGITUD: 099°14'15" W.	ALTURA: 2,285.0 MSNM.
PRECIPITACION	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre			
NORMAL	3.3	4.1	3.8	16.1	27.5	67.6	69.1	72.8	78.6	49	4.3	1.9	398.1		
MAXIMA MENSUAL	22	26	19.5	81	109	291	226	186.1	323.6	191.5	20	11			
AÑO DE MÁXIMA	1981	1984	1982	1985	1982	1985	1983	1984	1998	1995	1990	1989			
MAXIMA DIARIA	22	14	15	25	25	69	55	47	80	65	15	8			
FECHA MAXIMA DIARIA	17/1981	22/1981	01/1982	17/1981	15/1994	16/1985	12/1983	21/1994	19/1998	25/1995	11/1993	09/1989			
AÑOS CON DATOS	26	26	26	26	24	25	25	24	24	23	23	22			



3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Geología regional

La Ciudad de México está ubicada en una subcuenca a aproximadamente 2200 msnm, delimitada con numerosos aparatos volcánicos y sierras que van desde los 3490 hasta 5450 msnm por ello es una cuenca endorreica, ocupada anteriormente por el Lago de Texcoco (CIGSA, 2000). Dentro de la cuenca de México hay dos rangos volcánicos principales; uno de ellos es la Sierra de Guadalupe.

La sierra consiste en un grupo de domos y volcanes con diferentes tamaños, identificándose al menos catorce unidades volcánicas. Las principales estructuras volcánicas son domos (El Tenayo, Chalma de Guadalupe, Tlayacampa, El Tecojote y Chiquihuite) y estratovolcanes colapsados (Pico Tres Padres, Moctezuma, El Jaral, Picacho y La Presa) Hay flujos de lava y piroclastos, ceniza, avalanchas y lahares asociados con estas estructuras volcánicas. Las rocas son de composición dacítica y riolítica, y en menor proporción rocas intermedias (García-Palomo et al., 2006).

La sierra está atravesada por fallas y fracturas en diferentes direcciones, la que atañe principalmente a la zona de estudio es la NE-SW que contiene dos fallas prominentes (Tenayuca y Chiquihuite), y es responsable de la formación del graben Cuauhtepac ubicado en la parte central del SG (Mooser, 1992). Además, se encuentran otras familias de fallas y fracturas; el primer y más antiguo sistema de fallas dirección N-S, caracterizado por una serie de estructuras horst y graben y zonas de falla con desplazamiento; el sistema de falla más joven es una falla normal que afecta a E-W, ubicado en la parte occidental de la sierra de Guadalupe. (García-Palomo et al., 2006).

Geomorfología

La sierra de Guadalupe con una altitud de 2,240 hasta la máxima de 3,000 m.s.n.m. se localiza en el extremo septentrional de la Ciudad de México y porciones contiguas del Estado de México. Es un conjunto de elevaciones volcánicas independientes y sobrepuestas. Vista en planta es de forma casi circular y con un diámetro aproximado de diecisiete kilómetros. (Lugo, 1996)



Las principales elevaciones se encuentran formadas por rocas ígneas extrusivas y material piroclásticos (formaciones mixtas), otras de menor elevación fueron formados fundamentalmente por roca extrusiva. La roca volcánica es considerada por diversos autores como Ordoñez (1895), Campa-Uranga (1965), y Lozano-Barraza (1968) como rocas principalmente andesíticas con variaciones a dacita y riolita, en menos proporción. Ejemplos de formaciones mixtas son los estratovolcanes Pico Tres Padres, Zacatenco, María Auxiliadora, Moctezuma, entre otros, mientras los formados mayoritariamente por roca, ubicadas en la periferia, tal como Chiquihuite, Gordo, Tepeyac, entre otros.

Las superficies presentan grandes espesores de suelo o material no consolidado, lo cual mejora la filtración del agua hacia la roca mediante las fracturas y vesículas. Mientras en los pies de monte (Figura 5) se encuentra una intercalación de materiales volcánicos y piroclásticos, con depósitos de ladera, fluviales y lacustres.

Lugo (*op. cit.*) atribuye la predominancia de las laderas cóncavas a una continua y prolongada exposición de la roca a agentes de erosión que han reducido el volumen del material rocoso, pues las laderas convexas son mejor conservadas y bien expuestas en la periferia de la sierra, además, los domos por su forma y composición homogénea, son muy resistentes a la erosión (Figura 5).



Figura 5. Mapa morfogénético.

1, Superficie de divisoria de aguas; 2, laderas convexas, de lava, poco modificadas por la erosión; 3, estratovolcanes; domos volcánicos (4-5): 4. Principales; 5, secundarios; 6, mesa de lava; piedemonte (7-10): 7, planicie de acumulación lacustre, fluvial y volcánica, inclinada 0.5-1.5°, 2,240 a 2,260 m.s.n.m.; 8, con inclinación 1.5-3°, 2,260-2,280 m.s.n.m., origen esencialmente volcánico; 9, origen esencialmente volcánico, inclinación de 3-6°; 10, superficie de erosión formada por retroceso de las laderas de la lava, con pendiente de 1.5-6°, a más de 2,260 m.s.n.m.; 11, planicie lacustre, limitada de manera convencional a 2,240 m.s.n.m.; formas de disección (12-17): 12, laderas cóncavas y rectas; 13, valles erosivos; 14, circos erosivos; 15, escarpes.



Estratigrafía

La cuenca del Valle de México es una cuenca lacustre rodeada de elevaciones ígneas y una compleja estratigrafía, que ha sido poco estudiada de manera

geológica a semi detalle; por lo que se hace una generalidad de la zona pues, se dan por sentados conocimientos sobre dicha área.

La columna litológica (Figura 6) representa, de manera simplificada, las edades del emplazamiento de las rocas volcánicas que sobreyacen a cuerpos de rocas sedimentarias, calizas y margas, existiendo etapas de nulo depósito o emplazamiento, o periodos de meteorización por lo cual no queda evidencia de la roca formada en ciertos periodos.

La roca que aflora en la zona de estudio únicamente es de origen ígneo del Cenozoico.

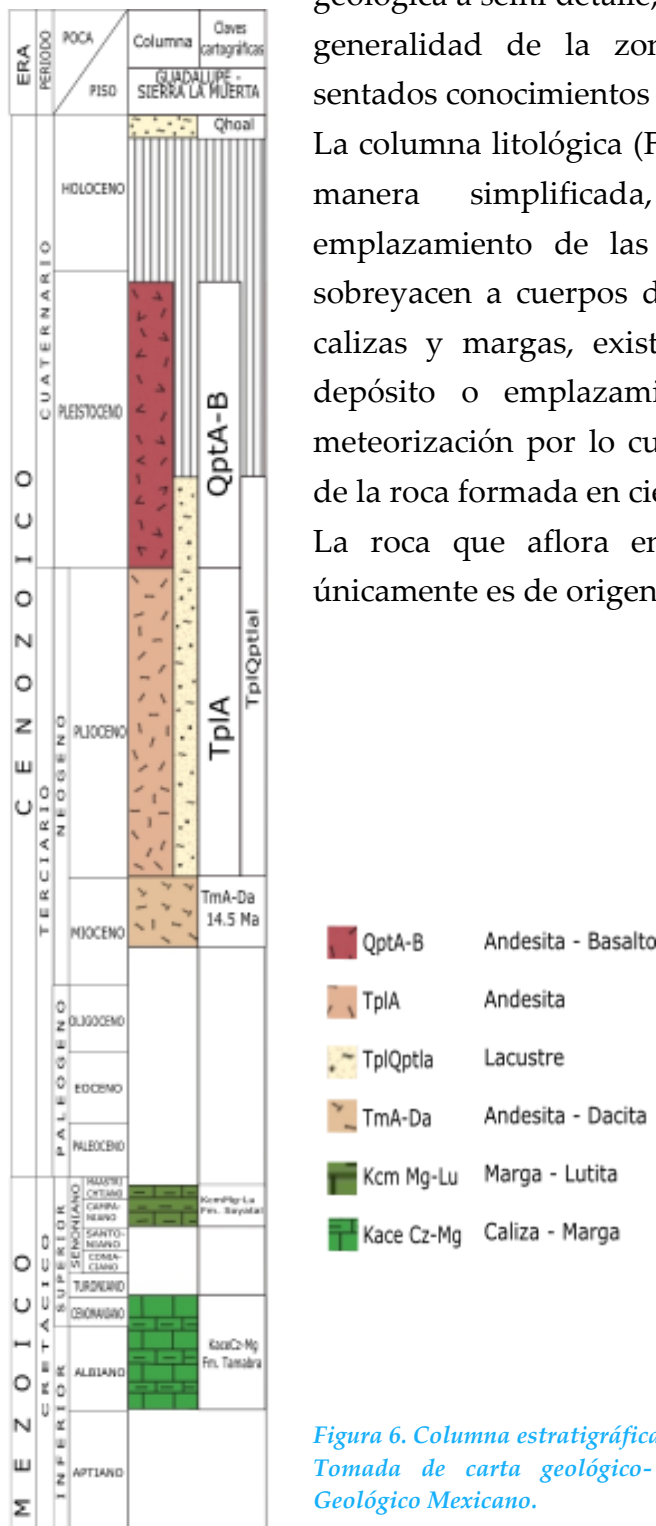


Figura 6. Columna estratigráfica de Guadalupe-Sierra Muerta. Tomada de carta geológico-minera E14-2 del Servicio Geológico Mexicano.



Imágenes satelitales

La fotogeología forma parte fundamental de un estudio geológico – geotécnico, permitiendo determinar las linealidades de la zona, sin embargo, en ocasiones y de acuerdo con la región, es difícil obtener fotografías aéreas o satelitales antiguas que no sean afectadas por la urbanización, creando falsos lineamientos estructurales.

La Ciudad de México es un caso, en cuya visualización geológica en las imágenes satelitales actuales, es afectada por las obras de comunicación, vivienda, servicios y demás, por lo que se recurrió a las fotografías aéreas más antiguas publicadas por el INEGI, que corresponden a vuelos del año 1981.

La fotografía E14A29-E (Figura 7) muestra los lineamientos estructurales (líneas amarillas) con dirección principalmente al NE-SW, éstas se presentan cerca de las elevaciones más bajas y en el cambio de pendiente; mientras otra de las linealidades con dirección NW-SE tiende a tener mayor presencia hacia el NE de la Sierra de Guadalupe y la corta transversalmente. Además, las escorrentías mayores (líneas azules), que marcan áreas de menor resistencia, no presentan un patrón definido y su presencia es mayor en los taludes que buzanan, en distintos rumbos, al sur. Los contactos litológicos son difíciles de apreciar pues, a pesar de ser una fotografía antigua, la zona estaba poblada, cubriendo rasgos que permitieran la interpretación geológica – estructural.

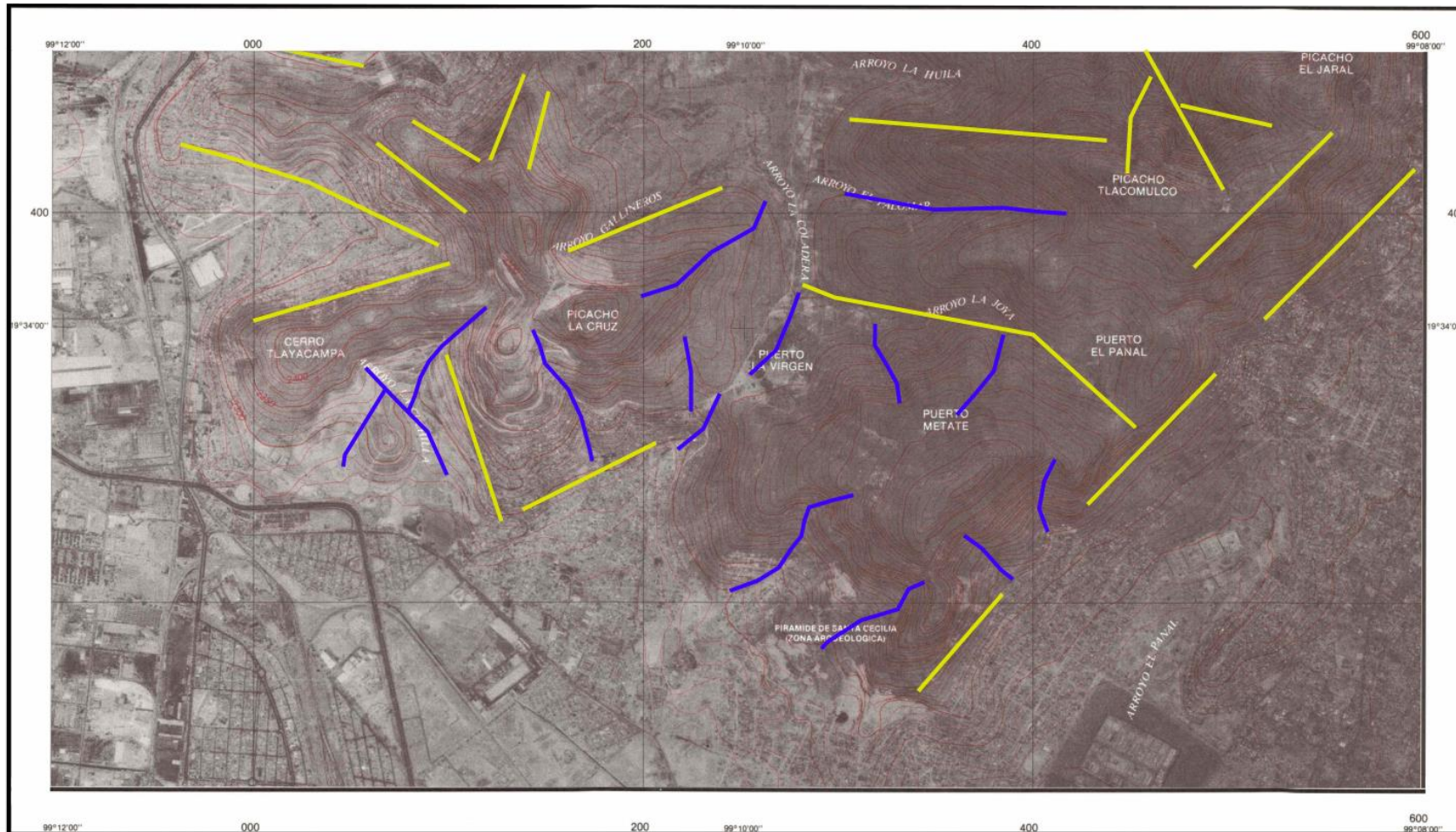


Figura 7. Fotografía aérea de Tlalnepantla de 1981 (modificada del INEGI) con linealidades Amarillo: Linealidades estructurales. Azul: linealidades por escorrentía. Mas linealidades



Sismicidad

La ciudad de México se encuentra en una zona sísmica alta pues, la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa de Norteamérica al suroeste del país, afecta de manera directa a la región. Además, asociada a la zona de subducción produciendo fallas al interior de la placa de Norteamérica, lo que, en ocasiones, genera movimientos intraplaca de magnitud variable, ocasionando sismos como el sucedido en 19 de septiembre 2017 con epicentro Axochiapan, Morelos.



Figura 8 Zonas sísmicas de la República Mexicana.
Tomado de PRODISIS

De manera general, según el mapa sísmico de México, la ciudad está ubicada en la zona sísmica C, considerada como alta (Figura 8). En el Programa de Diseño Sísmico (PRODISIS), se muestra una aceleración máxima en roca de 99.03 cm/s^2 , mientras que el periodo máximo espectral para la estructura es 0.15 s , con una aceleración de 301.81 cm/s^2 . Considerando un factor de sitio 1 y un factor de respuesta de 3.05.



De manera local, y de acuerdo con la zonificación geotécnica de la Ciudad y Valle de México, el talud se encuentra en zona I, correspondiente a área de lomas, (Figura 9), conforme a ello, considerando el talud como una estructura del grupo B, según la clasificación de edificaciones, y que no presentan anomalías en el subsuelo, se contempla un coeficiente sísmico de 0.326 para la zona de acuerdo al SASID, siendo el software establecido en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, actualizadas en el 2017, para la obtención de este dato.

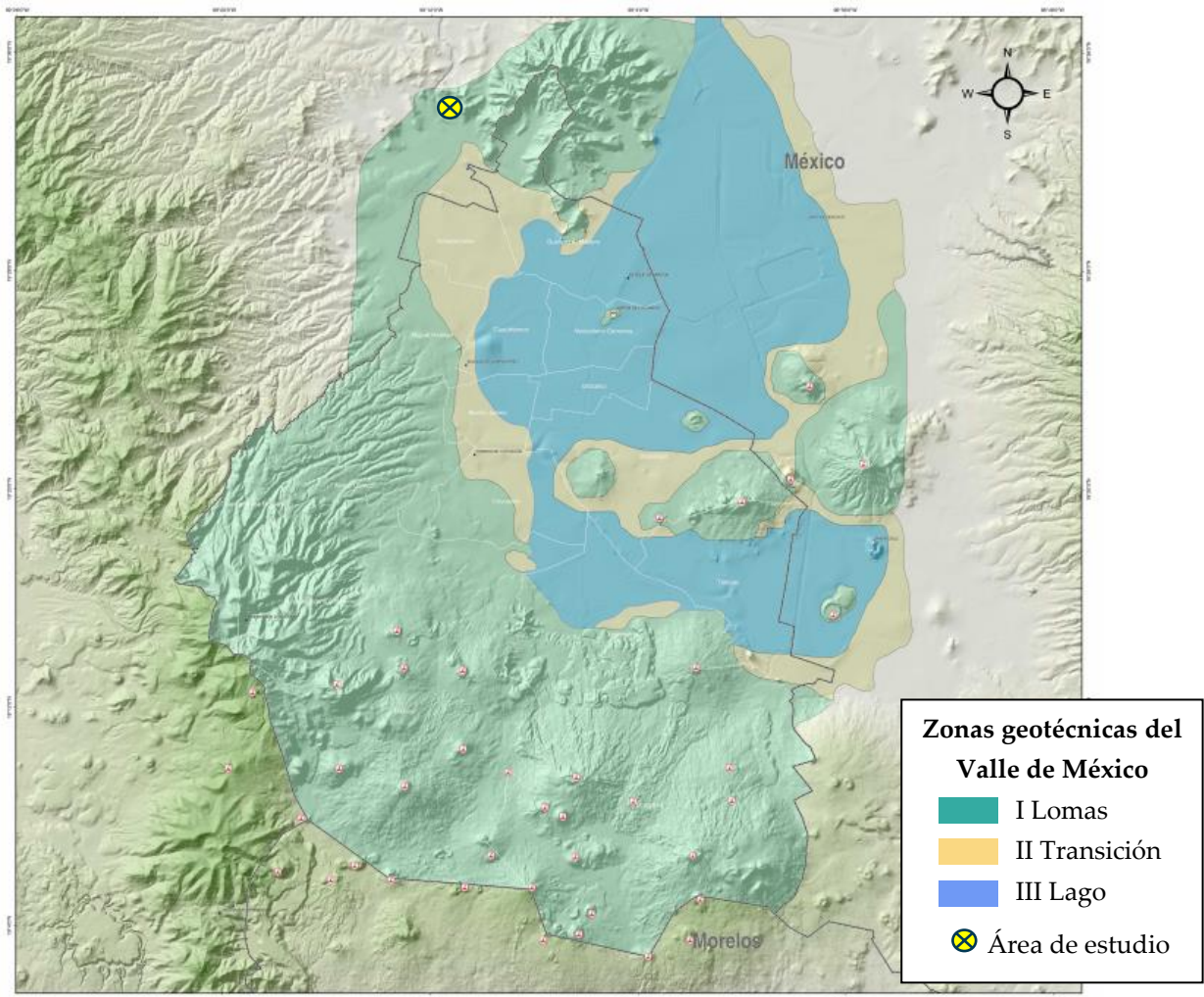


Figura 9. Zonificación de la Ciudad y Valle de México.
Tomado de Protección Civil CDMX.



4. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA DEL TALUD

Geología del talud

El macizo que aflora en superficie presenta una sola litología correspondiente a rocas ígneas de composición dacítica – riolítica, con discontinuidades por la afectación de distintos procesos que la han fracturado en diversas proporciones. En el talud de estudio, fueron identificadas 3 unidades litológicas de la misma composición, en disposición vertical (Figura 10) y divididas de acuerdo con su grado de fracturamiento, se describen de suroeste a noreste:

- RI-I: La roca que compone al macizo es de composición riolítica de color gris con fracturas de apertura aproximada de 0.5 mm, sin relleno, espaciamiento menor a 2 m y persistencia variable. Tiene una altura máxima de 10 metros y un espesor de 22.5 m. El intemperismo del macizo es de medio a bajo, poca presencia de vegetación.
- RI-II: La unidad de color grisácea presenta fracturamiento con espaciamientos de 0.4 m y persistencia de hasta 5 m. Existe intemperismo de medio a bajo, de igual forma, incrementa conforme se llega a la cima del talud. Las fracturas tienen aberturas promedio menores a 0.5 cm, con poco relleno de materia orgánica reciente. Abarca longitudinalmente 14.8 m. El color de la roca al fresco, es gris con tonos rosas.
- RI-III: Unidad de roca color rosa grisácea, está altamente fracturada, y medianamente intemperizada, lo cual se acrecienta hacia la elevación más alta, por presencia de vegetación. El espaciamiento entre discontinuidades, en la mayor parte, es menor a 10 cm y con persistencia similar a la altura del talud. Tiene un espesor de 15.7 m y una altura promedio de 3 m.
- Falla: Ubicada entre las unidades II y III y es identificada como zona potencialmente inestable (ZPI), presenta dirección y echado N52°W y 82°SW, además de una apertura de 5.7 cm en la pared frontal del talud, sin embargo, se va haciendo angosta hacia el interior del macizo, tiene relleno arenas medias a finas con materia orgánica fina reciente. Su persistencia es observable en todo el talud.

Las condiciones de humedad todas las unidades y de la fractura son secas, sin embargo, existen temporadas en las que se observan goteos en algunas unidades, principalmente RI-III.

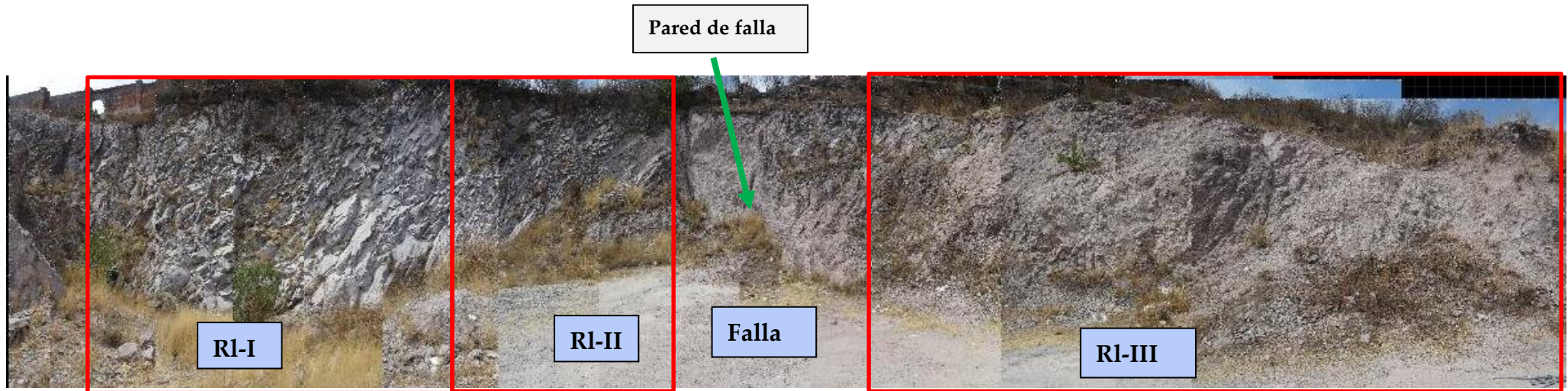


Figura 10. Corte del talud con división de litologías.

Geología estructural y representación gráfica

En campo fueron recolectados 322 datos estructurales obteniendo las familias que definen al macizo rocoso. Mediante el software Dips, se identifican principalmente 4 grupos de discontinuidades (Figura 11), representadas en dip/dip direction, cada una de ellas varía sus condiciones de apertura, continuidad, de acuerdo con su ubicación y a la unidad litológica en la que se presenta, las familias son enumeradas conforme a la concentración de sus discontinuidades.

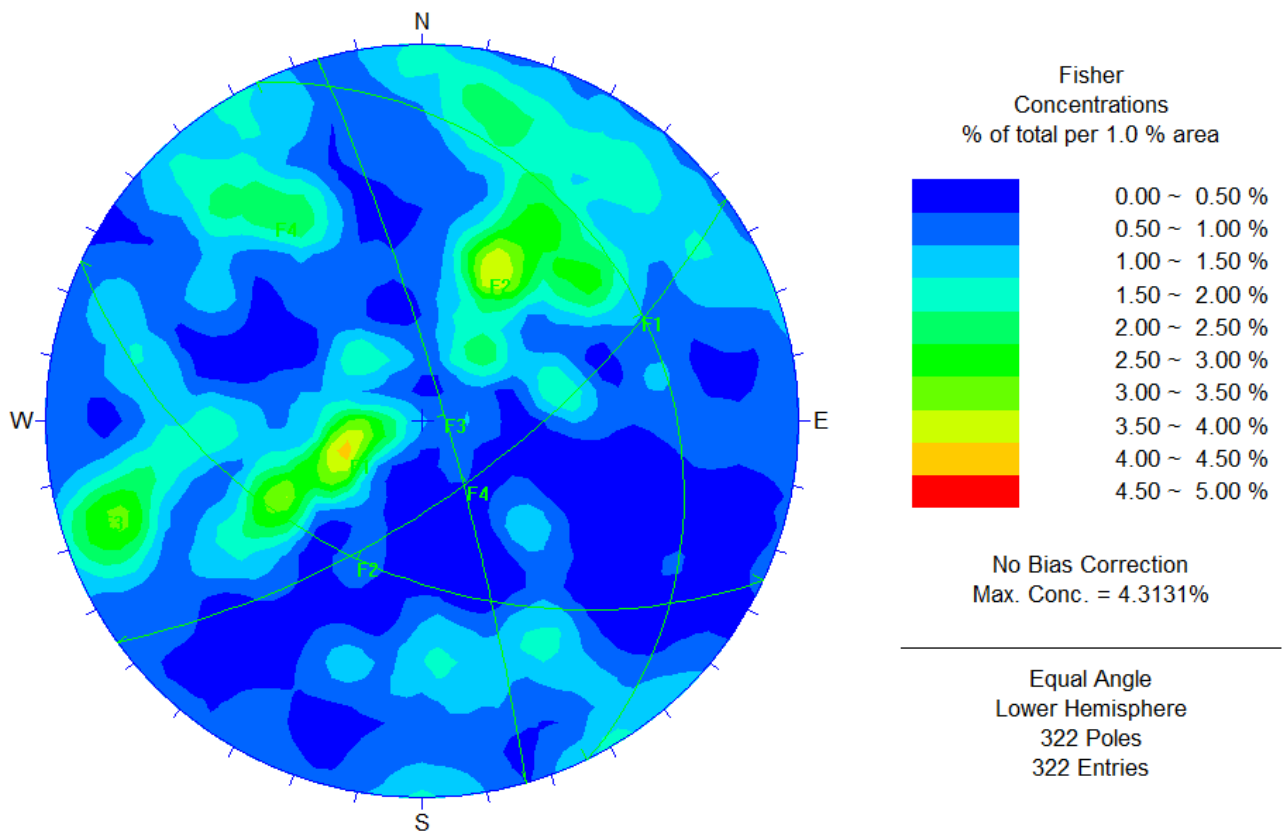


Figura 11. Estereograma de familias de discontinuidades en talud

Las familias de discontinuidades se describen de la siguiente manera:

- F1: Familia con mayor presencia de discontinuidades en el macizo, discontinuidades por fracturamiento posterior a la formación de la roca, presenta dip de 24° y dirección de 64° .
- F2: Facturas asociadas a fracturamiento, presentan una magnitud y rumbo del echado de $47^\circ/205^\circ$. Además de ser la de mayor presencia, también son las discontinuidades con mayor persistencia.
- F3: Familia de pseudo estratificación por enfriamiento, con magnitud y rumbo de echado $80^\circ/73^\circ$.



- F4: Se presentan en dip/dip direction de $66^{\circ}/145^{\circ}$. Discontinuidades por fracturamiento posterior al emplazamiento de la roca.

Además, como fue mencionado en el capítulo anterior, existe una falla principal entre las unidades R1- II y R1-III con orientación dip/dip direction, $82^{\circ}/218^{\circ}$. Se encuentran otras estructuras muy aisladas con igual dirección. (Figura 12)

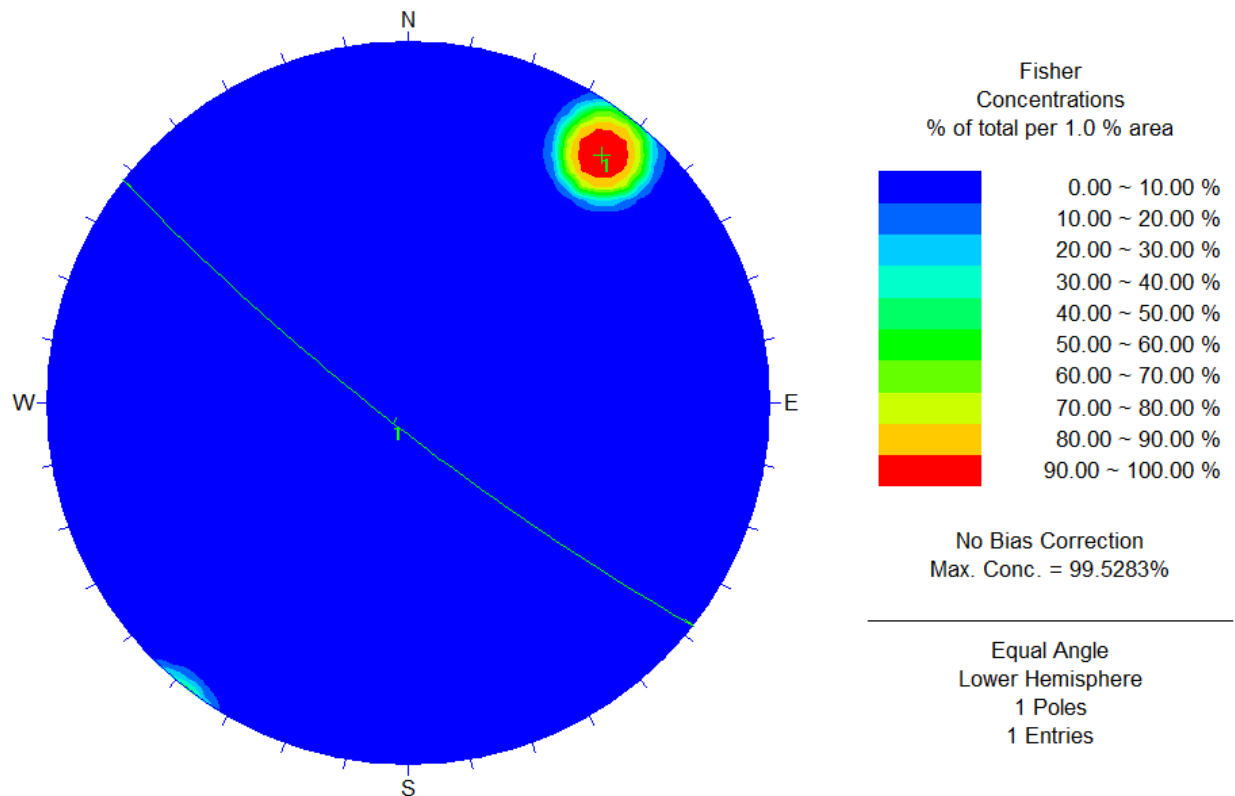


Figura 12. Estereograma de falla.



Algunas de las principales linealidades observadas en el talud se muestran en la Figura 13.

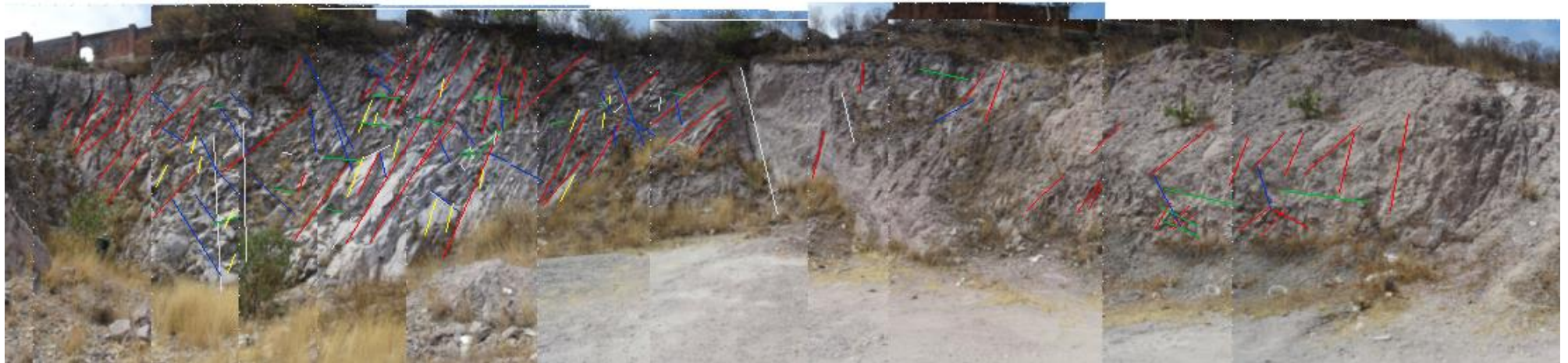


Figura 13. Algunas linealidades en talud.

F1: verde; F2: rojo; F3: azul; F4: amarillo; Falla (y estructuras asociadas): Blanco.



Geotecnia del talud

Caracterización del macizo

Se describen y cuantifican las características de las unidades litológicas y de la estructura de falla, siendo un área que necesita peculiar estudio pues sus características podrían tener afectaciones a el talud.

RQD

Debido al alcance de este estudio, fue imposible la realización de perforaciones que permitieran extraer núcleos con recuperación, por lo que se realizó su comparativa de acuerdo con espaciamiento de las discontinuidades que existieran en un metro cuadrado (Tabla 4).

Tabla 4. Valor RQD de las unidades litológicas

Unidad	RQD [%]	Calidad
RI-I	70	Regular
RI-II	50	Regular
RI-III	30	Pobre
Falla	NA	NA

El mayor número de discontinuidades por metro cuadrado se encuentra en la unidad RI-III, con clasificación pobre, mientras en la unidad RI-I y RI-II tienen mejores clasificaciones pues, aunque presenta las mismas familias de discontinuidades, su espaciamiento es mayor.

Espesores

Como fue mencionado anteriormente, el acomodo de las unidades es de forma paralela vertical, por lo que se contempla una altura y un espesor vertical promedio. (Tabla 5)

Tabla 5. Dimensiones de unidades litológicas.

Unidad	Espesor [m]	Altura [m]
RI-I	22.50	9
RI-II	14.80	6.5
RI-III	15.70	3
Falla	0.05	4



La unidad de mayor espesor corresponde a la I, y la más angosta es la unidad III; observándose la misma correspondencia en las alturas de cada área. Además, se observa que la falla es de espesor pequeño pero gran persistencia, abarcando toda la altura del talud que la contiene.

Compresión simple

Se realizaron pruebas de campo considerando, principalmente, la pica geológica, además de contemplar los valores proporcionados por Ramírez, P. et al (2004), con los cuales pudo obtenerse obtuvo una estimación de la resistencia a la compresión simple (R_c) de cada unidad. Según este autor, los valores R_c para riolitas y dacitas son de 80 a 160 MPa.

La prueba de campo consiste en caracterizar la respuesta del macizo ante el golpe del martillo o pica geológica, obteniendo un rango aproximado para el valor a la compresión simple de la roca (Tabla 6).

Tabla 6. Identificación en campo de resistencia a la compresión simple mediante martillo geológico.

Descripción	Identificación en campo	Valor aproximado a la resistencia a C.S.
		MPa
Roca muy blanda	Deleznable bajo golpes del martillo de geólogo, puede rayarse con una navaja. Se talla fácilmente con una navaja	1.0 - 5.0
Roca blanda	Puede rayarse con dificultad con la navaja, se pueden hacer marcas poco profundas golpeando fuertemente con la punta del martillo	5.0 - 25
Roca moderadamente dura	No se puede rayar con una navaja la muestra de mano, se puede romper con un golpe firme del martillo de geólogo, al impacto la punta del martillo indenta hasta 5 mm	25 - 50
Roca dura	Se necesita de un golpe con el martillo de geólogo para romper la muestra especímenes sostenidos en la mano se rompe con un simple golpe de martillo	50 - 100
Roca muy dura	Se necesita muchos golpes con el martillo de geólogo para romper la muestra.	100 - 250
Roca extremadamente dura	El martillo produce solamente descarrillado de la muestra, sonido metálico de golpe. Solo saltan esquirlas de roca	> 250



De acuerdo a ello, se obtuvieron los rangos de valores R_c para las unidades del talud (Tabla 7).

Tabla 7. Compresión simple de unidades

Unidad	R_c [MPa]
RI-I	100-250
RI-II	100-250
RI-III	50-100
Paredes de falla	25-50

El menor valor de resistencia se obtiene en la zona de falla y en la zona más intemperizada, con mayor número de discontinuidades y condiciones de agua, unidad III, mientras que en la RI-II y RI-I presentan condiciones similares, pues la roca presenta menos intemperismo comparada con las primeras.

Peso volumétrico

Con información de la Universidad de Granada (2007), se obtuvo el peso volumétrico de la roca de estudio (Tabla 8), considerando características de roca sana y una reducción, a criterio, de acuerdo con sus condiciones de alteración.

Tabla 8. Peso volumétrico de la roca.

Unidades	γ [t/m ³]
RI-I	2.5
RI-II	2.5
RI-III	2.3
Falla	NA

El peso volumétrico de la roca de la unidad RI-III es ligeramente menor a la de la RI-II, por la alteración ocasionada, principalmente por el agua que permea por las discontinuidades alterando la roca.

Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson

Se obtuvieron los valores para el coeficiente de Poisson y módulo de elasticidad según la recopilación bibliográfica de Ramírez (2004),



considerando que el macizo está compuesto por una sola litología y modificando los valores, acorde al grado de intemperismo que presenta cada unidad (Tabla 9).

Tabla 9. Módulo de elasticidad y coeficiente Poisson de la roca intacta

Unidad	E [MPa]	ν
RI-I	16,000	0.2
RI-II	13,000	0.2
RI-III	10,000	0.2
Falla	NA	NA

Calidad del macizo rocoso

De acuerdo con las condiciones presentes en cada unidad y características determinadas en el apartado anterior, se evaluaron las unidades del macizo rocoso con los sistemas de clasificación RMR (Bieniawski, 1989) y GSI (Hoek & Marinos, 2000). La clasificación RMR no presenta reducción de puntuación por corrección por la orientación de las discontinuidades, pues este valor será utilizado en análisis estructurales posteriores.

- RI-I: Calidad RMR es buena con puntuación de 64. Mediante GSI se describe como una roca muy fracturada (MF) en su estructura, pero con condiciones en las superficies de las discontinuidades como buena (B), teniendo un rango de puntuación de 56 a 59.
- RI-II: La estructura está definida como muy fracturada y de condiciones buenas en la superficie de las discontinuidades, pero con menor puntaje que la RI-I pues ambas condiciones son ligeramente más deterioradas, por lo que en GSI se considera un rango de 48 a 51. Mediante el método RMR es clasificada con una calidad media con puntuación de 54.
- RI-III: La calidad del macizo es media con una evaluación de 43 en RMR, mientras en clasificación GSI se caracteriza como un macizo muy fracturado y con superficies de discontinuidades ligeramente rugosas con alto grado de meteorización, consideradas como regulares y una puntuación de 38 a 41.



En la Tabla 10 los valores de clasificación GSI, se presentan puntuales para siguientes análisis.

Tabla 10. Clasificación del macizo rocoso de acuerdo con su zonificación

Unidad	RMR		GSI	
	Calidad	Puntuación	Descripción	Puntuación
1	Buena	64	MF-B	56-58
2	Media	54	MF-B	48-51
3	Media	43	MF-R	38-41

En el Anexo I: Calidad del macizo rocoso se muestran las puntuaciones para cada categoría de RMR y la gráfica GSI conforme a las condiciones del macizo observadas en campo.

Resistencia al corte de las discontinuidades

Las fracturas, a pesar de exhibir condiciones diferentes a lo largo del talud, es observable que existe un relleno de arenas medias a gruesas, además, en menor proporción, material orgánico reciente tales como hojas de árboles.

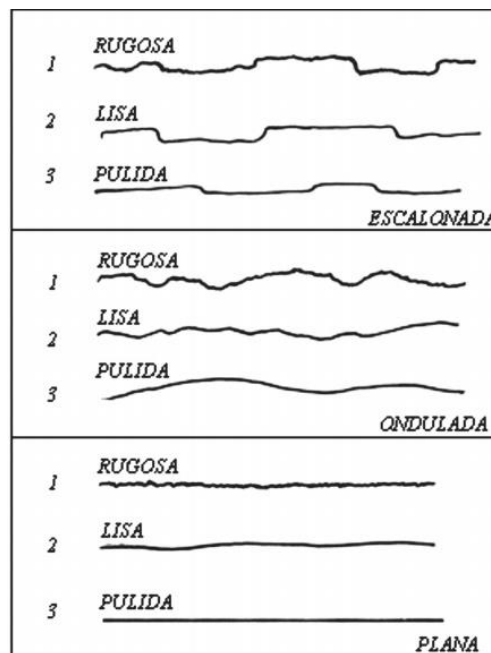


Figura 14. Escala descriptiva de observación para determinar la rugosidad (Hoek, 1981)

Según la clasificación de Hoek (1981), las paredes de las discontinuidades se observan poco alteradas, con geometría ondulada, y lisas a rugosas; con predominancia de lisas (Figura 15)



Figura 15. Condiciones de las discontinuidades a diferentes escalas.



Además, de acuerdo con el coeficiente de rugosidad de la discontinuidad de Hoek, 2007 de estimación visual, se considera un JRC de 8 a 10.

Unidades geotécnicas

En la revisión del macizo se consideraron 3 zonas geotécnicas de acuerdo, principalmente, al grado de fracturamiento y condiciones de agua presente en ellas, estas unidades corresponden directamente a la división vertical de las unidades litológicas anteriormente descritas, además de aunar la falla a la litología RI-II, en la zona geotécnica (ZG) 2, considerando que es una estructura que requiere especial atención. Por lo que, a partir de ahora, las características del macizo se referirán a la litología y discontinuidades que conforme la zona geotécnica de acuerdo con la Tabla 11.

Tabla 11 Zonificación geotécnica del talud.

Zona Geotécnica	Litología o Estructura
1	RI- I
2	RI-II y falla
3	RI-III

A pesar de la unidad RI-II y RI-I tienen características similares, se optó por dividir las zonas debido al grado de fracturamiento que perjudicara en la resistencia del macizo.

- ZG1: La zona presenta discontinuidades en espaciamientos de 0.6 a 2 metros, y persistencias de hasta 10 metros de manera vertical al talud, la abertura es estrecha, aproximadamente 1 mm y sin algún relleno. Las paredes o planos de deslizamientos presentan ligera rugosidad y ondulación. La roca presenta buenas condiciones de resistencia, pues con la prueba de martillo geológico presenta valores entre 100 y 160 por lo que se considera un valor de 130 MPa. Además, las condiciones de agua son de secas a ligeramente secas y poca permeabilidad.
- ZG2: Se considera una resistencia a la compresión simple de 110 MPa para



la matriz rocosa, reducida por las características de las discontinuidades, presentadas con espaciamientos de 0.2 a 0.6 m con paredes rugosas, con separación entre ellas de aproximadamente 3 mm y ligeramente alteradas; además con relleno blando de materia orgánica reciente. Se observa que la zona es seca, sin embargo, en temporada de lluvias, su permeabilidad aumenta generando un estado húmedo.

- ZG3: Zona de menor calidad a las zonas anteriores, se observa una notable mala condición del macizo por la cantidad de discontinuidades que reducen su RQD teniendo separaciones de hasta 6 cm entre una y otra, en su mayoría presentan aberturas menores a 1 mm que impiden un relleno notable, las paredes de las discontinuidades son ligeramente rugosas, pero con alteración tanto en la roca como en las discontinuidades. En temporada de precipitaciones o neblina, existe goteo. Presenta alteración que aumenta hacia la cima, provocada por vegetación de raíces poco profundas.

Una vez generada la zonificación, es posible generar los datos que caractericen las zonas geotécnicas (Tabla 12). Para la compresión simple (R_c) se contemplo un valor medio estimado por los rangos del valor de campo y los valores teóricos mencionados en el apartado Compresión Simple, de este mismo capítulo.

Tabla 12. Parámetros RQD, espesor, resistencia a la compresión y peso volumétrico del macizo por zonas.

Zona	RQD [%]	Espesor [m]	R_c [MPa]	γ [t/m ³]	GSI
1	70	22.50	130	2.5	58
2	50	14.85	110	2.5	50
3	30	15.70	85	2.3	40

Mediante RocLab fueron obtenidos los parámetros de cohesión (c), fricción (Φ) y módulo de elasticidad (E) de cada zona del macizo rocoso considerando la estructura que se formará con la roca, que en este caso es talud, con un factor de disturbio de 1. Los datos de esfuerzo a la compresión simple, y módulo de elasticidad de la roca intacta, así como el valor GSI de las zonificaciones están concentrados en la Tabla 13.



Tabla 13. Parámetros mecánicos de las zonas geotécnicas.

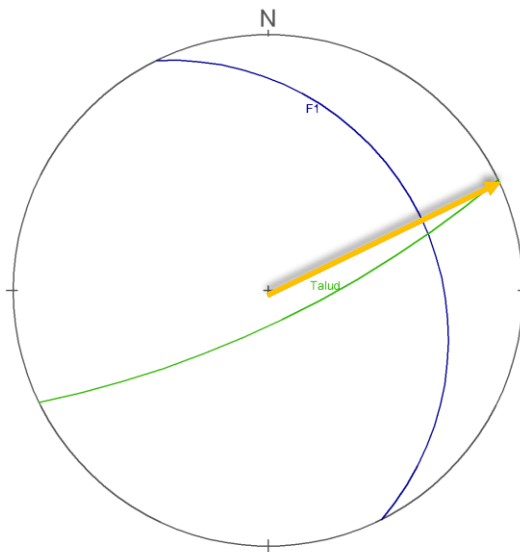
Zona	c [MPa]	Φ [°]	E_{rm} [MPa]
1	0.415	63.72	5 603.34
2	0.197	61.88	2 934.95
3	0.068	60.79	1 357.55

Las características del macizo rocoso afectaran directamente a estos parámetros mecánicos, por ello los valores incrementan en la zona geotécnica 1, y disminuyen en la zona geotécnica 3. También podemos identificar que los valores de cohesión son bajos comparados con la fricción, además de saber el comportamiento de las rocas, por lo que es caracterizada como medio friccionante. Con ayuda de estos parámetros, principalmente la fricción, se determina que tan factible es que deslice un bloque.



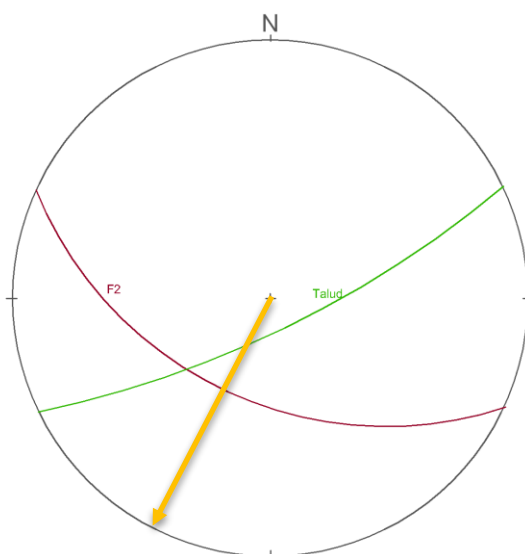
5. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD

Para el estudio cinemático, se examinan los planos de falla y las intersecciones de los planos que forman cuñas (*Figura 16* *Figura 17* a *Figura 26*), respecto al talud con orientación $N64^{\circ}E$ e inclinación 78° al SE, considerando los vectores y la viabilidad de salida de la cuña o plano, distinguiéndose lo siguiente:



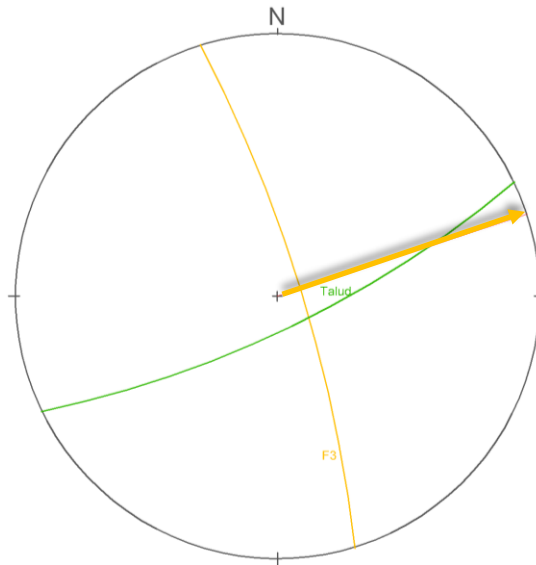
La F1 ($24^{\circ}/64^{\circ}$) no presenta salida debido a la casi perpendicularidad que existe entre este plano y el plano del talud. Por lo que no representa un riesgo para la estabilidad del talud.

Figura 16. Estereograma inestabilidad de planos F1.



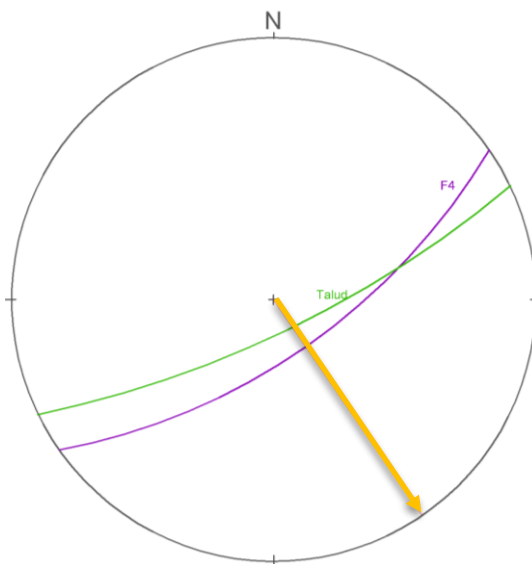
Las discontinuidades de la F2 ($47^{\circ}/205^{\circ}$) presentan salida del talud, sin embargo, por el rumbo que presenta este plano respecto al talud, las cuñas se encontraran confinadas por el propio macizo rocoso.

Figura 17 Estereograma inestabilidad de plano F2.



Al igual que en el caso anterior, al presentarse los planos del talud y de la discontinuidad F3 ($80^{\circ}/73^{\circ}$), casi perpendiculares, no existe algún riesgo de deslizamiento por el confinamiento que presenta la discontinuidad.

Figura 18 Estereograma inestabilidad de planos F3.



Debido a que los planos son casi paralelos con diferencia en rumbo menor a 20° , y el echado mayor en el talud, se determina que la falla que puede existir es de forma plana.

Figura 19 Estereograma inestabilidad de planos F4.

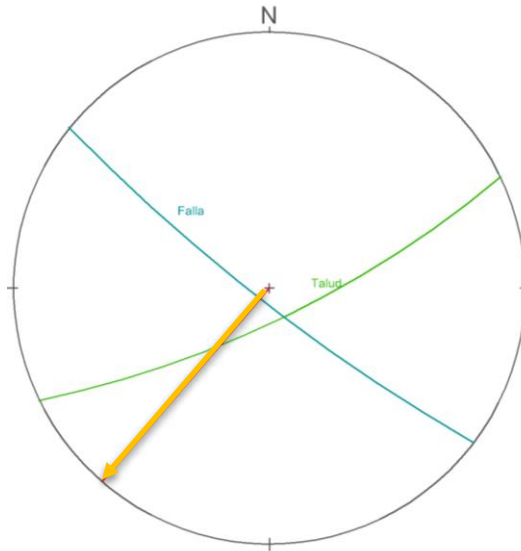


Figura 20 Estereograma inestabilidad de falla.

Debido al grado de oblicuidad que existe entre los planos, de falla y de talud, es poco probable el deslizamiento de la masa debido a la falla por lo que no se consideran grandes efectos sobre el plano del talud.

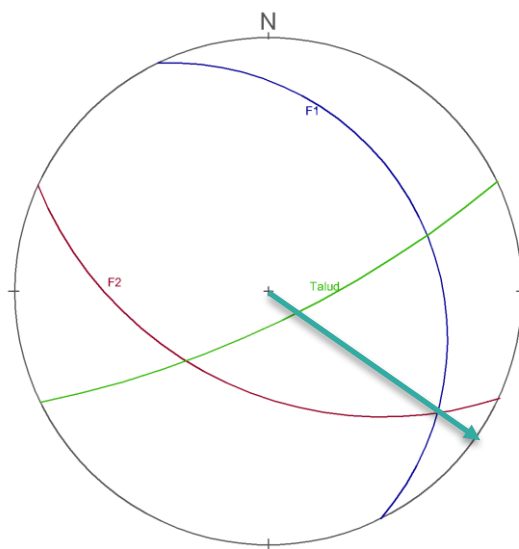
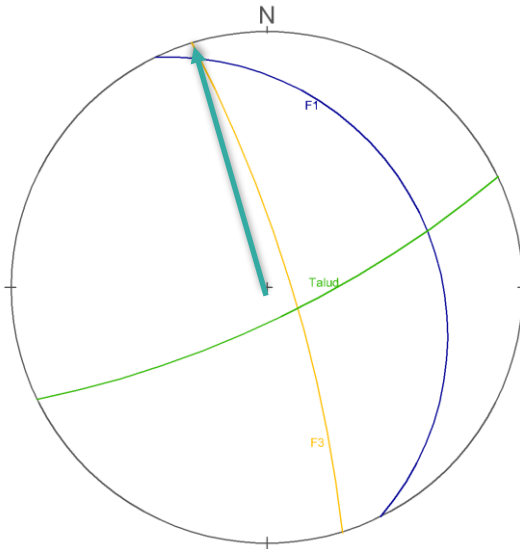


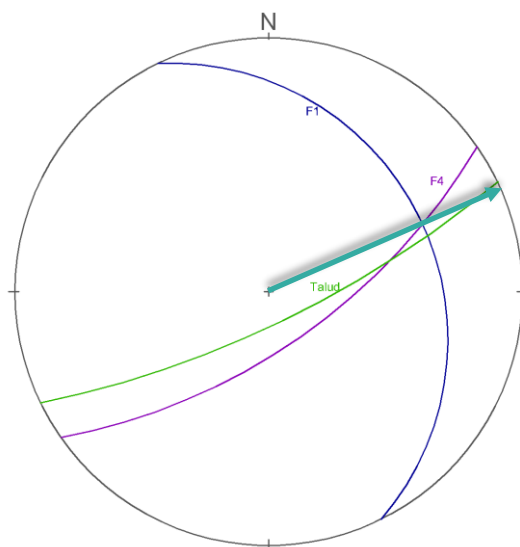
Figura 21 Estereograma inestabilidad de cuña formada por discontinuidades F1 y F2.

La cuña generada por las familias F1 y F2 es directa, con salida de la masa de manera semi perpendicular hacia afuera del talud, determinado por el vector de salida. La intersección de los planos se localiza en rumbo 133° y echado 09° .



Las cuñas que se formen por las familias F1 y F3, son cuñas inversas que no tienen salida, por lo que se considera que no afectan la estabilidad del talud al presentarse en esta dirección. Su intersección se ubica al $344^{\circ}/05^{\circ}$.

Figura 22 Estereograma inestabilidad de cuña formada por discontinuidades F1 y F3.



La cuña que se crea con la combinación de la familia F1 y F4, es una cuña directa y sin salida, lo que implica que no existirá algún deslizamiento sobre el conjunto de estos planos. La línea de intersección se describe con 24° de echado a 67° .

Figura 23. Estereograma inestabilidad de cuña formada por discontinuidades F1 y F4.

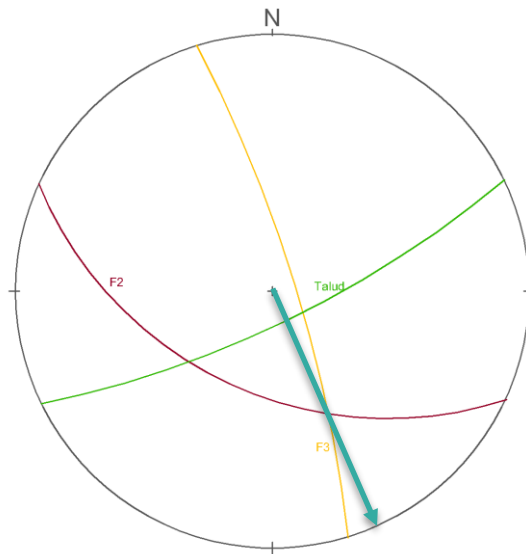


Figura 24. Estereograma inestabilidad de cuña formada por discontinuidades F2 y F3.

Las discontinuidades por la familia F2 y F3 crean una cuña directa con vector de salida casi perpendicular al talud hacia el SE, lo que representa un gran potencial de deslizamiento de la cuña. La línea de intersección está localizada en 28° con rumbo al 154° .

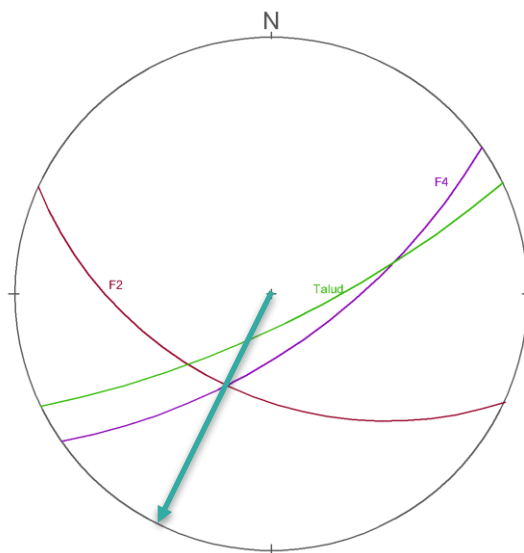
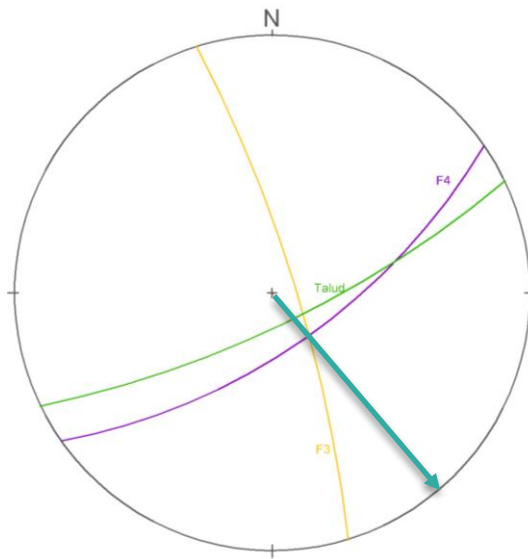


Figura 25. Estereograma inestabilidad de cuña formada por discontinuidades F2 y F4.

Las familias de discontinuidades F2 y F4, forman una cuña directa con un vector de salida al SW, el cual crea poca inestabilidad pues las paredes del macizo confinan la masa, impidiendo su salida. La línea de intersección entre dichos planos tiene rumbo y echado de $207^\circ/47^\circ$, respectivamente.



La línea de intersección tiene 64° de inclinación a 124° . La cuña es inversa por lo que la cuña generada es generalmente muy forzada, y deslizará únicamente sobre un plano, por ello, el vector generado es muy similar al vector por falla plana de la F4.

Figura 26. Estereograma inestabilidad de cuña formada por discontinuidades F3 y F4.

Considerando que el talud presenta el mismo rumbo y echado en toda su longitud, se analizarán los planos y cuñas generadas que afectarán la seguridad del mismo, siendo objeto de estudio la familia F4, y las cuñas generadas con las familias: F1-F2 (Cuña 1, C1), F2-F3 (Cuña 2, C2), F3-F4 (Cuña 3, C3), F2-F4 (Cuña 4, C4) con las siguientes orientaciones de inclinación (Tabla 14):

Tabla 14 Dip/Dip direction de familias que perjudican al talud.

Discontinuidad	Dip	Dip direction
F4	66°	144°
C1	09°	133°
C2	28°	154°
C3	64°	124°
C4	47°	207°

Considerando los ángulos de fricción, calculado en el capítulo anterior, las discontinuidades con mayor potencial a deslizar, son las estructuras F4 y C3, sin embargo, para este análisis, se evalúan las zonas geotécnicas respecto a todas las



discontinuidades, con la clasificación SRM que implica las condiciones del macizo rocoso obtenidas con el RMR y restándole las afectaciones de dip/dip direction de las discontinuidades respecto al talud. (Tabla 15 a Tabla 17).

Tabla 15 SMR para zona geotécnica 1.

Discontinuidad	SMR: ZG 1		
	Calidad	Puntuación	Estabilidad
F4	Mala	33	Inestable
C1	Buena	71	Estable
C2	Normal	51	Parcialmente estable
C3	Buena	66	Estable

Tabla 16 SMR para zona geotécnica 2.

Discontinuidad	SMR: ZG 2		
	Calidad	Puntuación	Estabilidad
F4	Mala	23	Inestable
C1	Buena	61	Estable
C2	Normal	41	Parcialmente estable
C3	Normal	56	Parcialmente estable

Tabla 17 SMR para zona geotécnica 3.

Discontinuidad	SMR: ZG 3		
	Calidad	Puntuación	Estabilidad
F4	Muy mala	14	Completamente inestable
C1	Normal	52	Parcialmente estable
C2	Mala	32	Inestable
C3	Normal	47	Parcialmente estable



Los valores más bajos de SMR los tienen de las fracturas F4, además, los ángulos de fricción de todas las zonas son menores a alguno de echado de este plano, favoreciendo al deslizamiento, por lo que los posteriores análisis se harán sobre esta familia, pues son las estructuras a las que mayor atención debe proporcionarse, asimismo, al proponer un tratamiento a ésta, se podrá dar una mejor estabilización de las demás discontinuidades y con ello al macizo.

El factor de seguridad, el volumen y el peso del cuerpo a deslizar fueron calculados con el software ROCPLANE (RocScience, 2010) para mecanismos de falla plana, analizándose 3 casos para cada zona geotécnica se considerando la aparición de diferentes factores, como la presencia de agua en la discontinuidad y condiciones sísmicas. Además, por zonificación, se realizó la variación correspondiente a la altura, peso volumétrico y presión del agua, pero, independientemente de la zona, con valores únicos de coeficiente sísmico (0.326), los valores del echado del talud y valores de echado de la discontinuidad F4. El vector de sismicidad es horizontal, oblicuo al plano del talud; y el de presión de agua es perpendicular al plano de falla. Además, las zonas están identificadas con roca formando bloques angulosos que no presentan cementante, por ello los valores de fricción son altos y los de cohesión, bajos, analizando al medio como friccionante.

Para cada caso se determina el factor de seguridad (FS), obtenido cuando los valores que caracterizan el macizo son concetos y certeros; sin embargo, siempre se contará con variaciones en los parámetros mecánicos, aún obtenidos en laboratorio tras diversos ensayos que generen una dispersión de valores, por lo que existe una desviación estándar en los datos, los cuales no son contemplados en el FS, pero son analizados mediante la probabilidad de falla (PF), descrita como la posibilidad de que un sistema no funcione correctamente. Su rango de evaluación es de 0 a 1, donde mientras el valor sea más cercano a la unidad, mayor es la probabilidad de que la estructura no cumpla con la función para la que fue diseñada. En los siguientes análisis, se contempla variación estándar en los valores de cohesión y fricción.



Zona Geotécnica 1

Para todos los casos de la ZG1, se genera una masa de deslizamiento con volumen de $9.62 \text{ m}^3/\text{m}$ y con peso máximo de 24.06 t/m , considerando el peso volumétrico 2.5 t/m .

Caso 1: Se presenta una vez finalizado el corte del talud, en temporada de estiaje y sin factores sísmicos que influyan en el medio.

El FS en este caso es de 1.09 siendo bueno, pero no suficiente para la estabilidad de talud deseada. Las fuerzas resistentes son 23.99 t/m mientras las actuantes son de 21.98 t/m . Haciendo un análisis probabilístico con variaciones de cohesión y fricción la probabilidad de falla es de 0.482, un valor alto y considerable para remediación. (Figura 27).

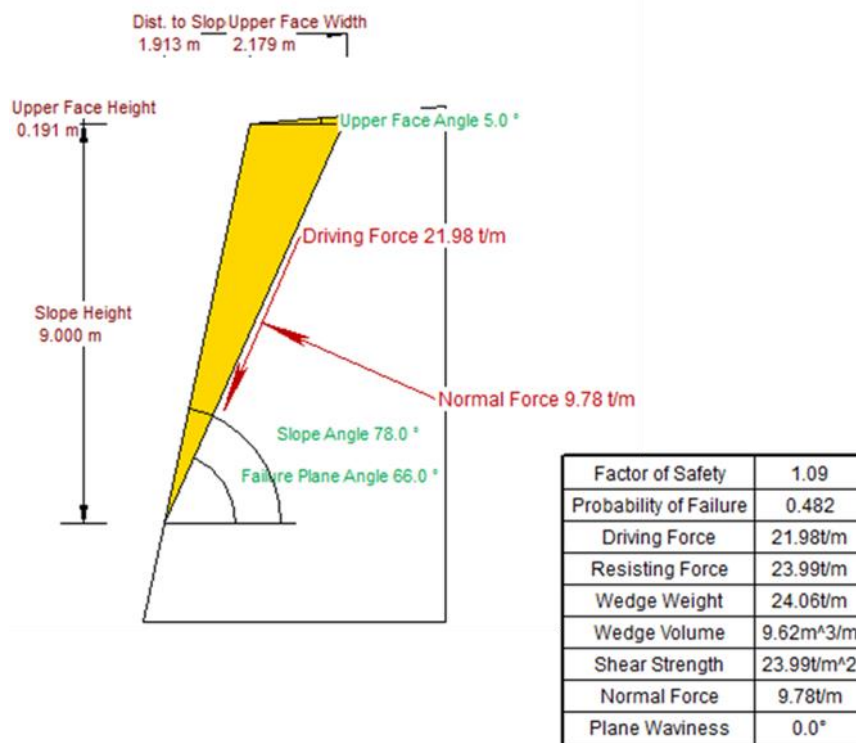


Figura 27 Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 1, caso 1: sin fuerzas sísmicas ni hidráulicas.

Caso 2: Corresponde a una situación donde se presenta una presión hidrostática sobre las fracturas, atribuida a periodos de precipitaciones intensas e incluso, inmediatamente después de esta saturación (Figura 28).

Con un porcentaje del 50 % de presión de agua sobre el talud, el FS se reduce por debajo de la unidad, a 0.56, por lo que ya no es considerable como estable, además existe un incremento en la probabilidad de falla a 1.

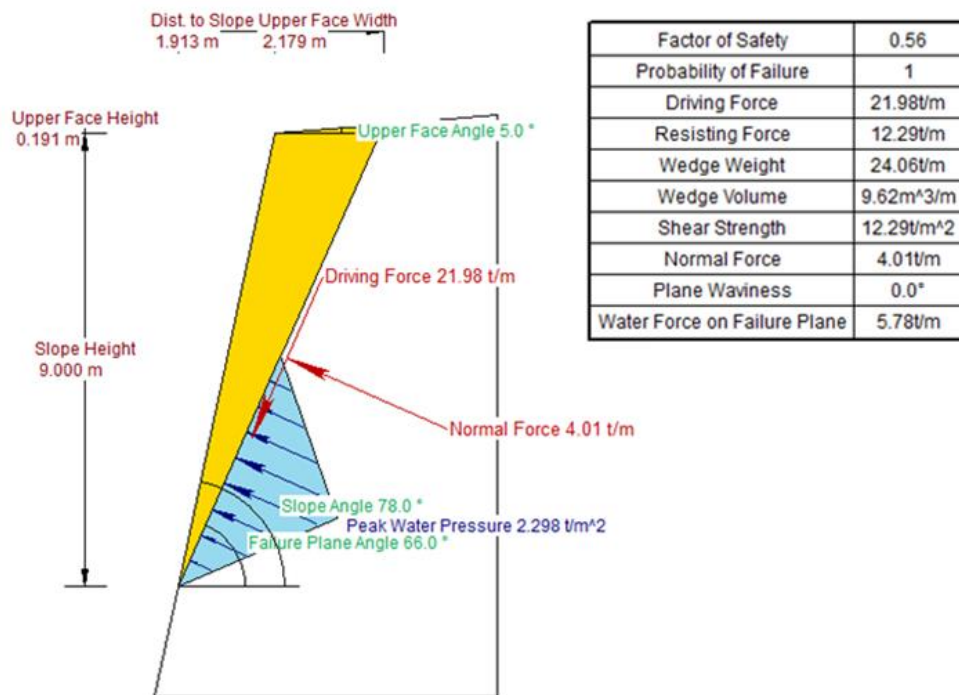


Figura 28. Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 1, caso 2: considerando fuerzas hidráulicas.

Caso 3: Se analiza el caso de condiciones sísmicas en el talud, considerando como coeficiente sísmico el asignado para zona I de la Ciudad de México, 0.326, que considera una fuerza sísmica de 7.84 toneladas. Consiguiendo un FS de 0.38, determinando insuficiente estabilidad de la estructura, y un PF de 1 (Figura 29).

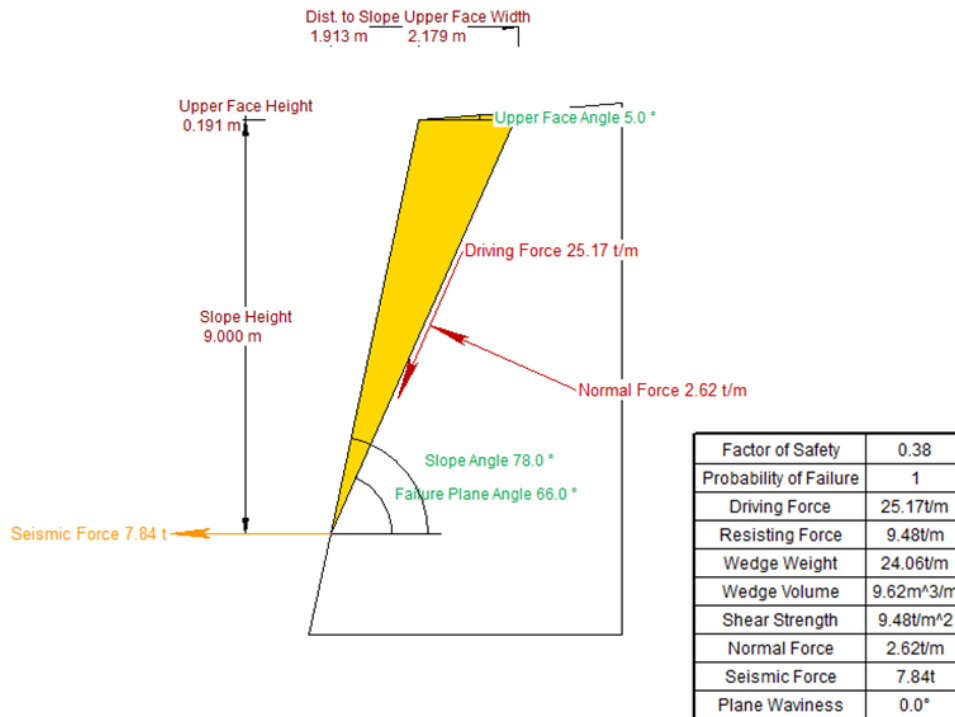


Figura 29. Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 1, caso 3: fuerza sísmica de 7.84 t.

Los FS y PF se resumen en la Tabla 18 según las condiciones de cada caso para la zona geotécnica 1.

Tabla 18. Factores de Seguridad y Factores de falla para los casos 1, 2 y 3 de zona geotécnica 1.

Zona Geotécnica 1				
Caso	Drenaje	Sismicidad	FS	PF
1	No	No	1.09	0.482
2	50 %	No	0.56	1
3	No	Cs = 0.326	0.38	1



Zona Geotécnica 2:

El talud de 6.5 m de altura promedio, podría generar bloques con volumen de $5.02 \text{ m}^3/\text{m}$ y un peso de 12.55 t/m .

Caso 1: Con las variaciones en altura, cohesión y ángulo de fricción característicos de la zona, se obtiene un factor de seguridad de 0.96, siendo insuficiente para la estabilidad y relacionando una semejanza entre las fuerzas resistentes y las actuantes, que son 10.98 t/m y 11.46 t/m respectivamente. Estas condiciones son idealizadas para un talud que recién acaba su construcción y fuera de temporada de lluvias (Figura 30).

Modificando la distribución estándar de la cohesión y fricción, la probabilidad de falla 0.559, siendo un valor considerable.

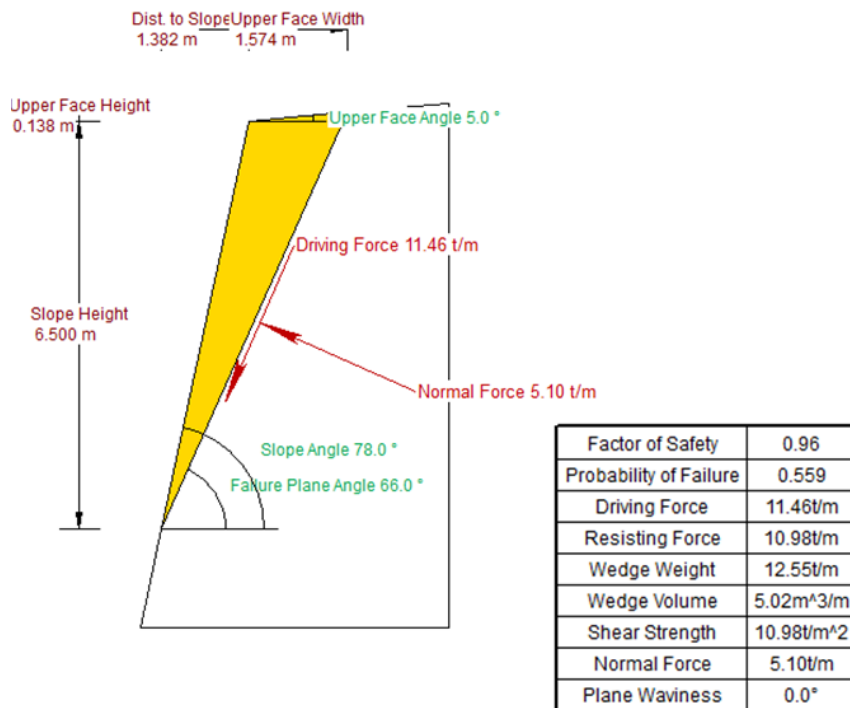


Figura 30 Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 2, caso 1: sin fuerzas sísmicas ni hidráulicas.



Caso 2: En condiciones estáticas y considerando un 60 % presión hidrostática sobre las paredes la discontinuidad generando una fuerza de 4.30 t/m en ellas, el FS es de 0.25 con una PF de 1, las fuerzas actuantes involucradas son de 11.46 t/m, mientras las fuerzas resistentes se reducen a 2.86 t/m por la presencia de agua en las fracturas. Se considera un porcentaje mayor a la presión de la zona 1, debido a la permeabilidad secundaria que permite la infiltración de mayor cantidad de agua en temporadas de alta precipitación. (Figura 31)

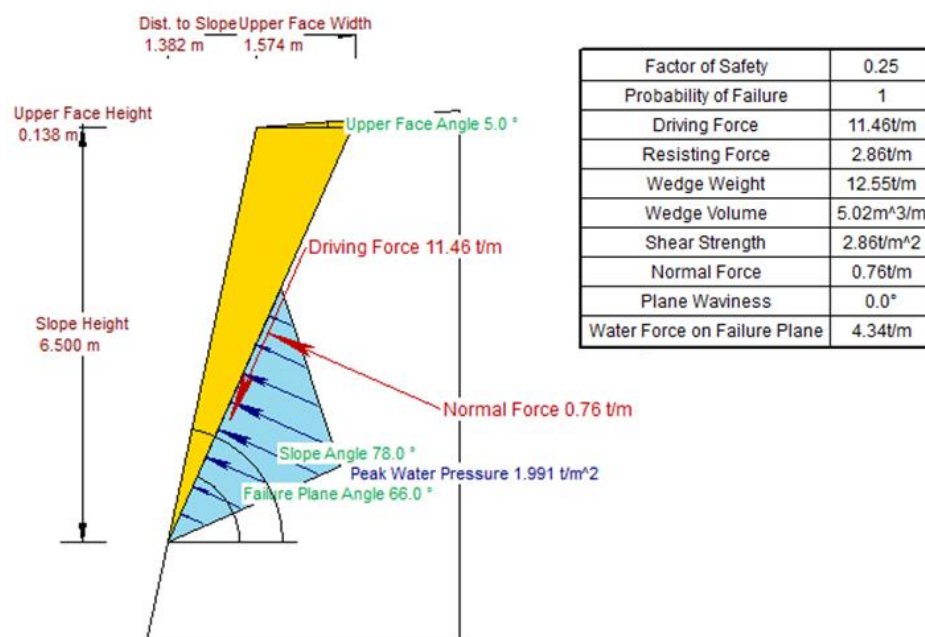


Figura 31. Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 2, caso 2: considerando fuerzas hidráulicas.

Caso 3: Con las condiciones desfavorables de un sismo de fuerza horizontal, y coeficiente sísmico de 0.326, el FS es 0.30, siendo de poca estabilidad y generando una probabilidad de falla de 1. Por lo que tiene grandes posibilidades a deslizar, siendo un talud inestable (Figura 32).

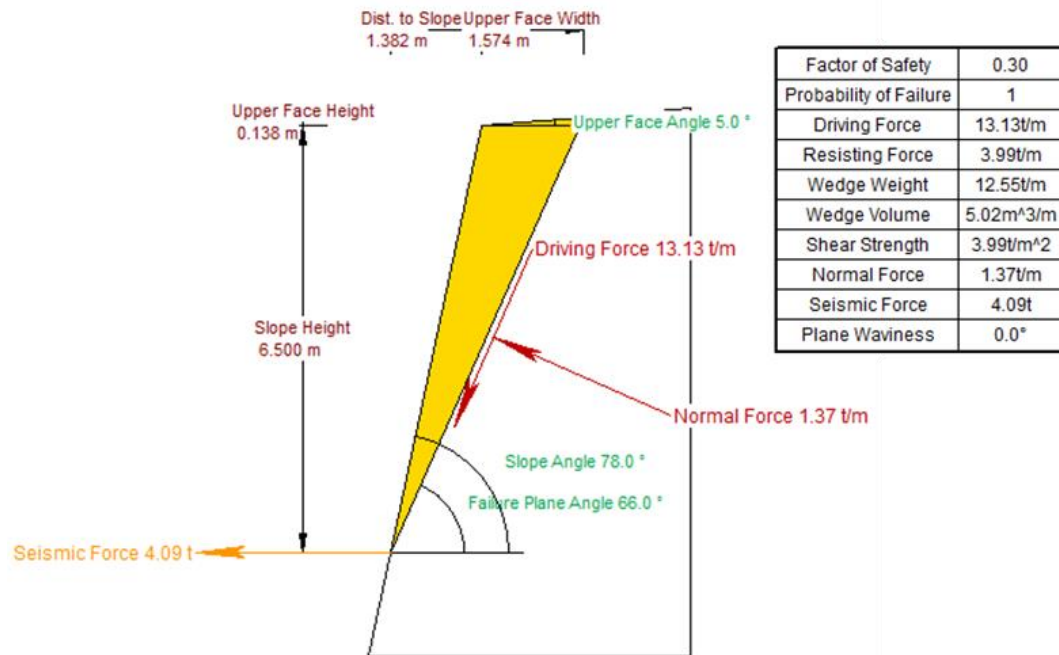


Figura 32. Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 2, caso 3: fuerza sísmica de 3.10t

Tabla 19. Factores de Seguridad y Factores de falla para los casos 1, 2 y 3 de zona geotécnica 2.

Zona Geotécnica 2				
Caso	Drenaje	Sismicidad	FS	PF
1	No	No	0.96	0.559
2	60 %	No	0.25	1.0
3	No	Cs = 0.326	0.30	1.0

Zona Geotécnica 3:

La zona con el talud de altura más pequeña lograría deslizamientos de bloques de 1.46 m³/m y un peso de 3.35 t/m.

Caso 1: Análisis estático del talud, sin consideraciones de presión de agua ni sismos, por lo que el factor de seguridad tiende a ser mayor que en los demás casos de la zona. De esta manera, el FS es de 0.88 con PF de 0.809. Ambos factores demuestran inestabilidad en el talud. Las fuerzas actuantes son de 3.06 t/m mientras las resistentes de 2.70 t/m (Figura 33).

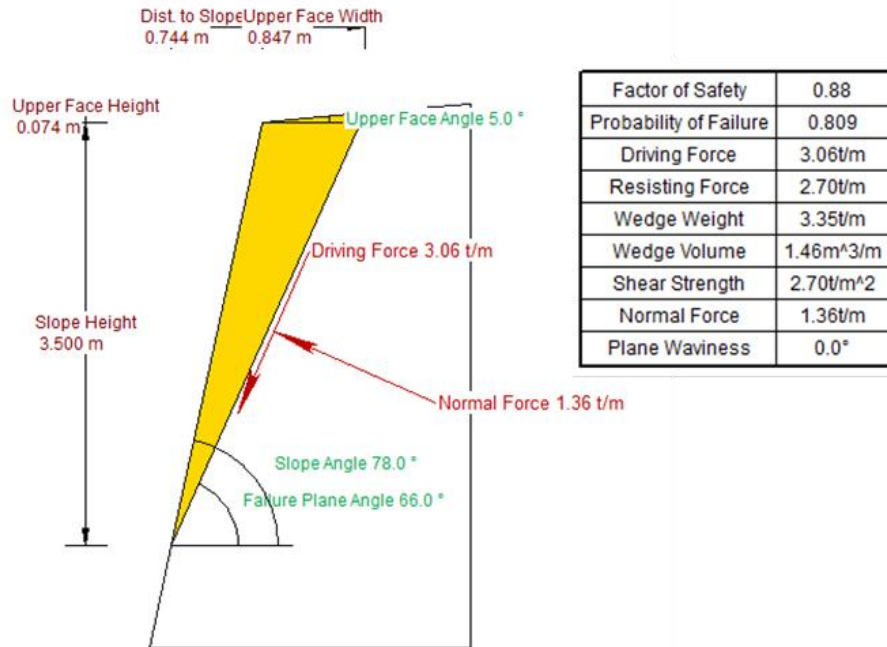


Figura 33. Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 3, caso 1: sin fuerzas sísmicas ni hidráulicas.

Caso 2: Condiciones establecidas para temporadas de lluvias intensas con gran infiltración de agua en las discontinuidades, considerándose un valor de llenado de 70 %, teniéndose una presión ejercida perpendicular a las paredes de la discontinuidad de 1.7 t/m, debido a ello, el FS se reduce a cero, con una probabilidad de falla de 1. El talud es totalmente inestable en estas circunstancias. Las fuerzas resistentes son nulas y las actuantes de 3.06 t/m (Figura 34).

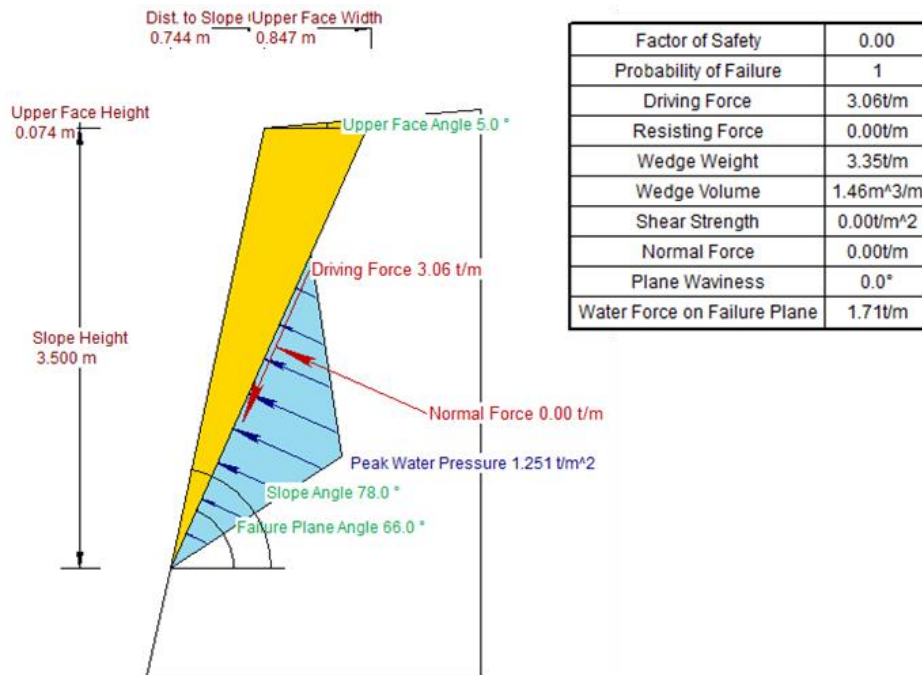


Figura 34. Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 3, caso 2: considerando fuerzas hidráulicas

Caso 3: En caso de máximo coeficiente sísmico, ejercido de manera horizontal, el FS es de 0.26 con probabilidad de falla de 1, siendo totalmente inestable y con una fuerza sísmica de 1.09 t (Figura 35).

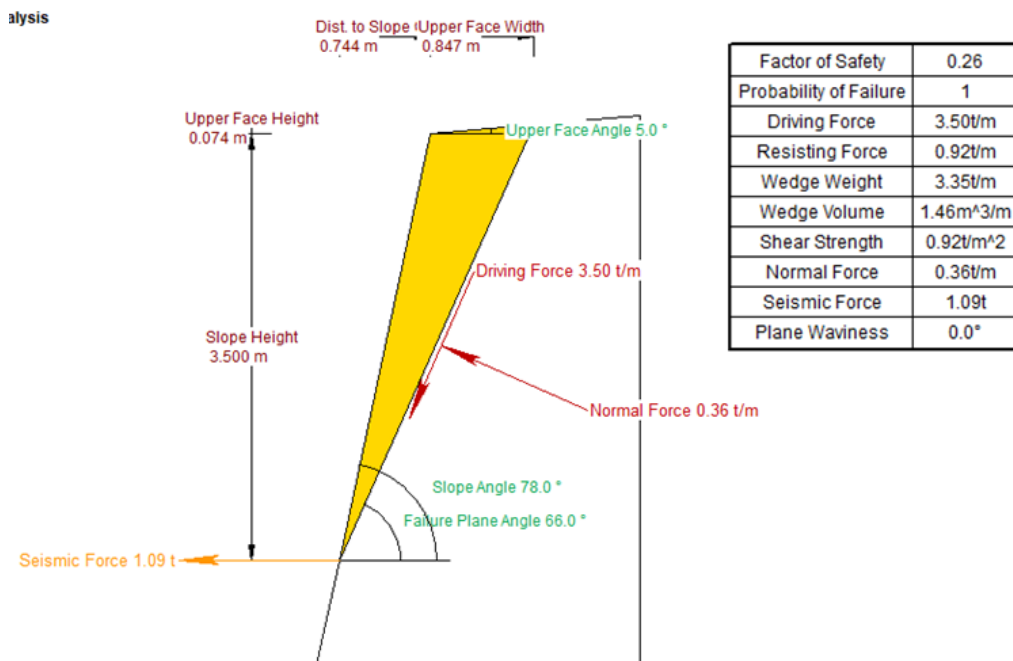


Figura 35. Diagrama de fuerzas en zona geotécnica 3, caso 3: fuerza sísmica de 1.09 t.



Tabla 20. Factores de Seguridad y Factores de falla para los casos 1, 2 y 3 de zona geotécnica 3.

Zona Geotécnica 3				
Caso	Drenaje	Sismicidad	FS	PF
1	No	No	0.88	0.809
2	70%	No	0.0	1.0
3	No	Cs = 0.326	0.26	1.0

Se observa que ninguna zona expone condiciones estables en todos los casos manejados, además de tener probabilidades de falla grandes y que propician a buscar un tratamiento o forma de estabilización, haciendo notar que la presencia de agua crea el estado de menor estabilidad.



6. PROYECTO DE ESTABILIZACIÓN DEL TALUD

La estabilidad de un talud depende de distintos factores que en su conjunto también determinan la probabilidad de falla, estas características muchas veces pueden ser remediadas o mejoradas parcialmente, y al hacerlo con cada una de ellas, se tendrá una mejora en la solidez del talud. Sin embargo, no todas las características son económica e ingenierilmente viables de remediar, pues puede considerarse mucha inversión de tiempo y dinero para minimizar muy poco el riesgo. Por lo cual, es recomendable hacer un análisis de mejoras en el factor de seguridad haciendo modificación en la geometría del talud, en condiciones con drenes, además de mejorar con sostenimiento.

Conociendo que es talud de dimensiones pequeñas pero que estará creado para que ser una obra permanente y de riesgos de afectación en caso de falla, moderadamente serios, debe de cumplir con un factor de seguridad mínimo de 1.6 (Priest & Brown, 1983) en condiciones estáticas y de 1.2 en combinación de actividad sísmica (Alonso, E. et al, 2013). En el capítulo anterior, se demuestra que ninguna zona presenta condiciones estables o con factor de seguridad mayor al estipulado. Como es de suponerse y es observado en el capítulo anterior, el FS disminuye considerablemente cuando el factor dinámico y el agua intervienen en la ecuación, por lo cual debe de considerarse estos factores para asegurar un comportamiento estable del talud en toda situación.

Zona Geotécnica 1

Geotécnicamente, es viable su estabilidad haciendo un ligero cambio en la pendiente o en la altura del talud (Figura 36) pues con 68° , es decir una reducción de apenas 10° en la pendiente, generando un FS estático de 1.97 y al realizar esta modificación, incluso podría realizarse un ligero cambio de la altura a 8.5 m, que igualmente generaría mayor estabilidad. Únicamente haciendo las modificaciones anteriormente mencionadas, el F.S. dinámico es de 1.2 (Figura 37) y estático de 2.04. Además de generar una cuña más pequeña con peso de 3.74 t/m y reducir las fuerzas que intervienen en el equilibrio.

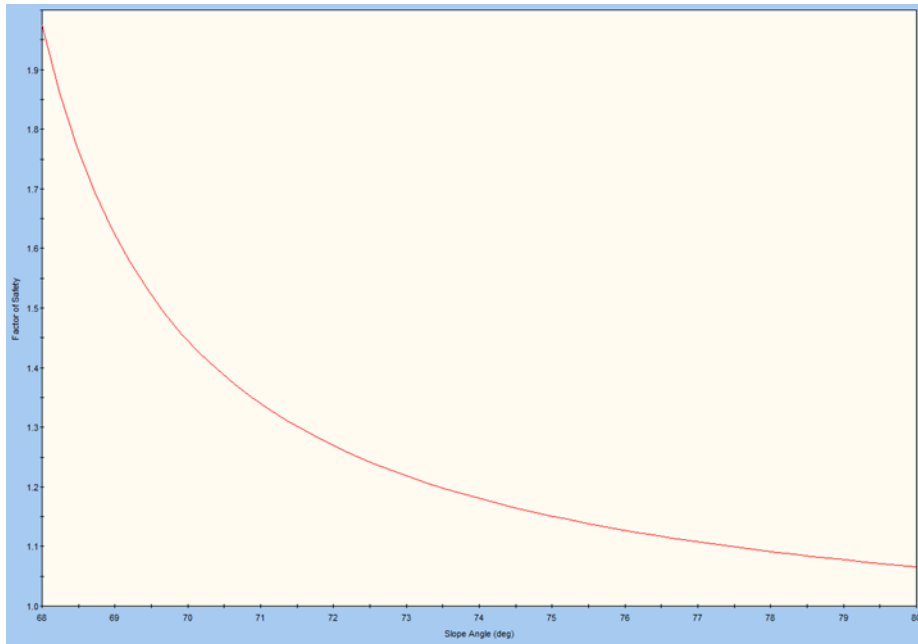


Figura 36. Graficas de factor de seguridad conforme variación del ángulo del talud en condiciones estáticas.

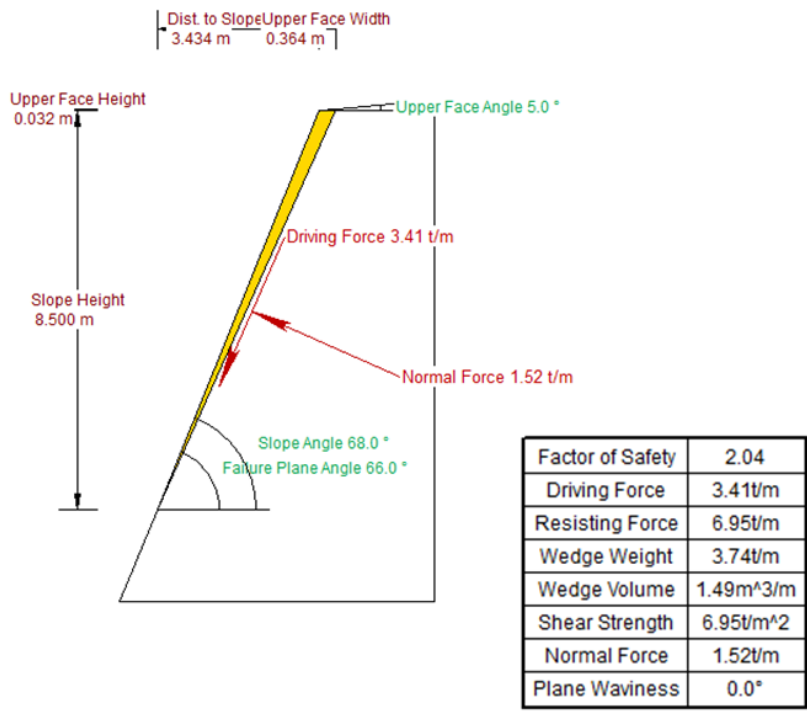


Figura 37. Diagrama de fuerzas en talud de zona geotécnica 1 con modificación de pendiente y altura.



Sin embargo, en la parte superior de esta zona hay una construcción (Figura 38) que impediría estas modificaciones. Considerando que la opción de cambio de geometría es inviable y con el fin de incrementar el factor de seguridad, su estabilización deberá ser realizada por sostenimiento, con más realizaron más análisis en los que, debido al peso máximo de masa a deslizar del talud sin modificaciones, se determina el uso de anclas pasivas con varillas corrugadas del número 8 (diámetro de 1"), considerando un largo de 4.5 m debido a la geometría de la estructura, y un $f'c$ de mortero de 200 kg/cm^2 ; y con un factor de seguridad de 1.5 en el peso de la masa de roca a deslizar, calculando que se requieren 51 anclas en acomodo de retícula, que estabilicen la masa máxima de esta zona. Sin embargo, el agua sigue siendo un factor primordial a tratar, por lo que, para evitar el daño ocasionado por el escurrimiento e infiltración, es recomendable la implementación de drenes de 2" de diámetro y 4.5 metros de longitud que atraviesen de manera perpendicular a la cara del talud con un ángulo ascendente de 15° , entre 2 anclas y colocándose entre cada segunda y tercer ancla, distribuidas de manera horizontal, lo cual ayudará a la disminución de presión de poro (Figura 39).



Figura 38. Zona 1 con muralla en la berma superior del talud.



Con los cambios generados con el anclaje y, de mejorar el F.S., disminuye la probabilidad de falla. Según los casos y las condiciones mostradas en la Tabla 18, se realiza nuevamente el análisis con la aplicación de anclaje y abatimiento mínimo del talud (Tabla 21).

Se requiere que para obtener estos factores de seguridad cada ancla, tenga por lo menos una capacidad de 12.07 t/m.

Tabla 21 Factores de Seguridad y Factores de falla para los casos 1, 2 y 3 de zona geotécnica 1 con anclaje para mejoramiento de estabilidad.

Zona Geotécnica 1						
Caso	Drenaje	Sismicidad	Anclaje	Abatimiento	FS	PF
1	No	No	Pasivo, 5 líneas 4.5m, 15.96 ton	No	2.22	0
2	15 %	No	Pasivo, 5 líneas 4.5m, 15.96 ton	No	2.17	0
3	No	C _s = 0.326	Pasivo, 5 líneas 4.5m, 15.96 ton	No	1.31	0

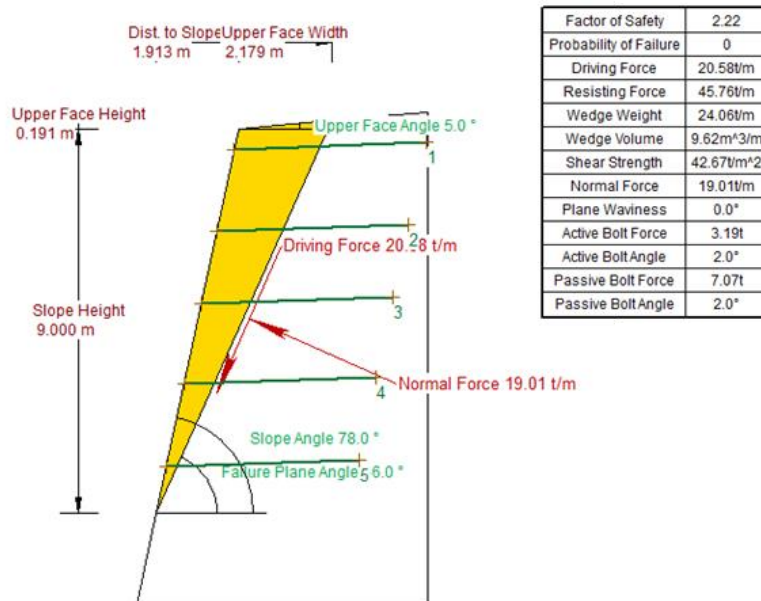


Figura 39. Diagrama de fuerzas en talud de zona geotécnica 1, en condiciones estáticas, con anclaje en 5 líneas.



En dado caso de realizar un abatimiento al talud, será necesario calcular el nuevo tipo de anclaje que proporcione una seguridad adecuada, considerando que existirá una reducción de masa a sostener, que los esfuerzos serán diferentes y que el propio abatimiento genera mayor factor de seguridad por lo que habría disminución de anclas en la zona.

Zona Geotécnica 2

Una reducción ligeramente mayor de 10° en el buzamiento del talud, llegando a un talud de 67° , generaría un cambio en el F.S. dinámico a 1.42 (Figura 40), además, el factor estático es de 2.23. Sobre esta zona no hay alguna obra, por lo cual su realización es viable, dejando una distancia considerable de los cimientos de la obra que sobreyace a ZG1. Con estas modificaciones, el análisis determina un F.S. estático y dinámico superior al límite inferior de estabilidad deseada (Figura 41).

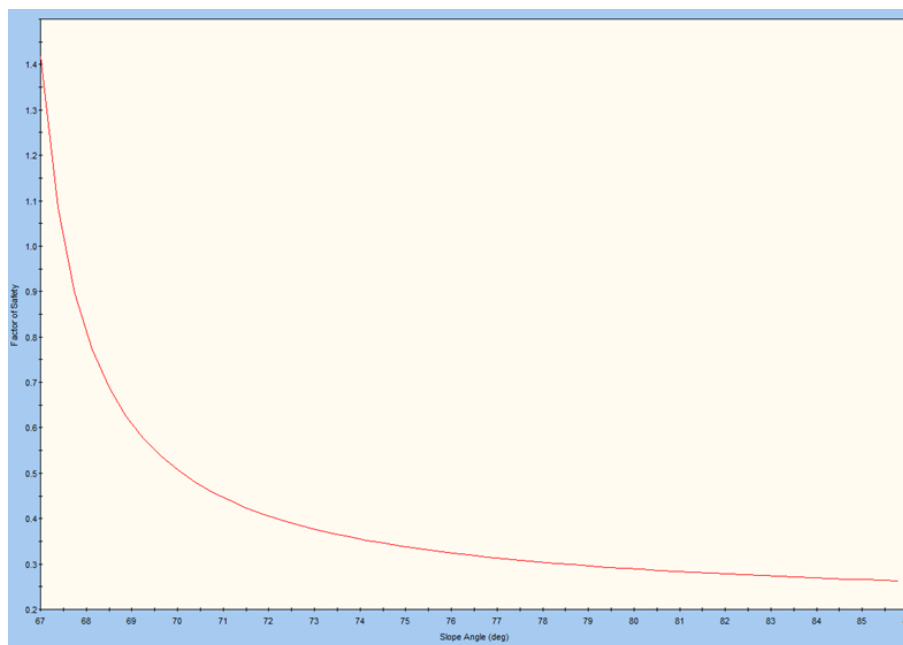


Figura 40. Grafica de modificación de ángulo del talud y modificación en factor de seguridad dinámico.

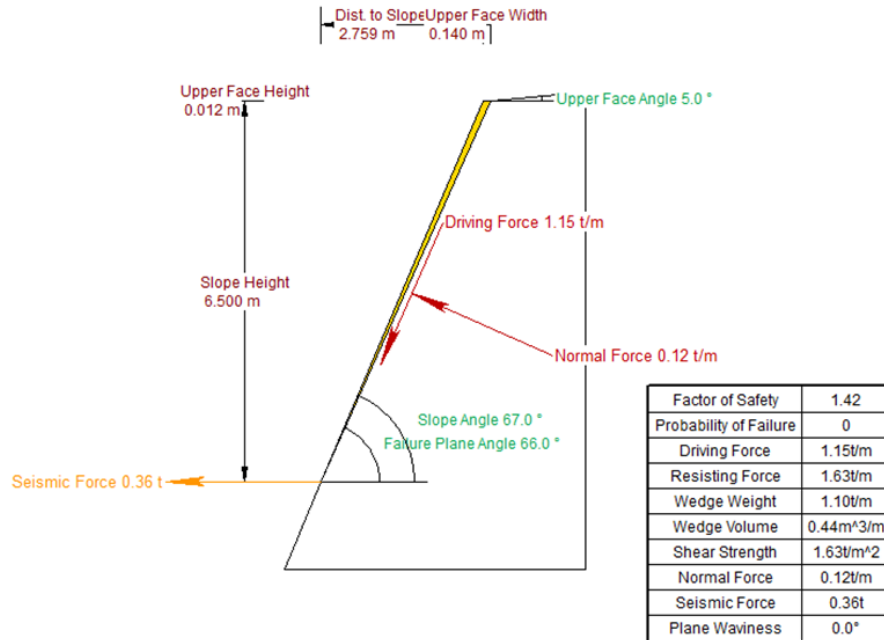


Figura 41. Diagrama de fuerzas en talud abatido a 67° de zona geotécnica 2 en condiciones dinámicas.

Con los factores anteriores, se observa que hay gran estabilidad en las condiciones analizadas, sin embargo, deben de considerarse los factores externos, como lo es el agua de infiltración. Por lo que únicamente es necesario reducir la presión de poro de la zona para evitar la saturación de las discontinuidades, por ello es necesario colocar 7 drenes con rumbo perpendicular al talud, habilitados con tubos de 2" de diámetro y 3 metros de largo, serán perforados con 12° de inclinación, su acomodo será en tresbolillo de dos líneas, y distribución de 3 metros en horizontal por 3 metros vertical, con este arreglo, se busca reducir la presión a menos del 18 %, consiguiendo un factor de seguridad de 1.53 (Figura 42). Aunado a ello es conveniente la construcción de cunetas y contracunetas de drenaje

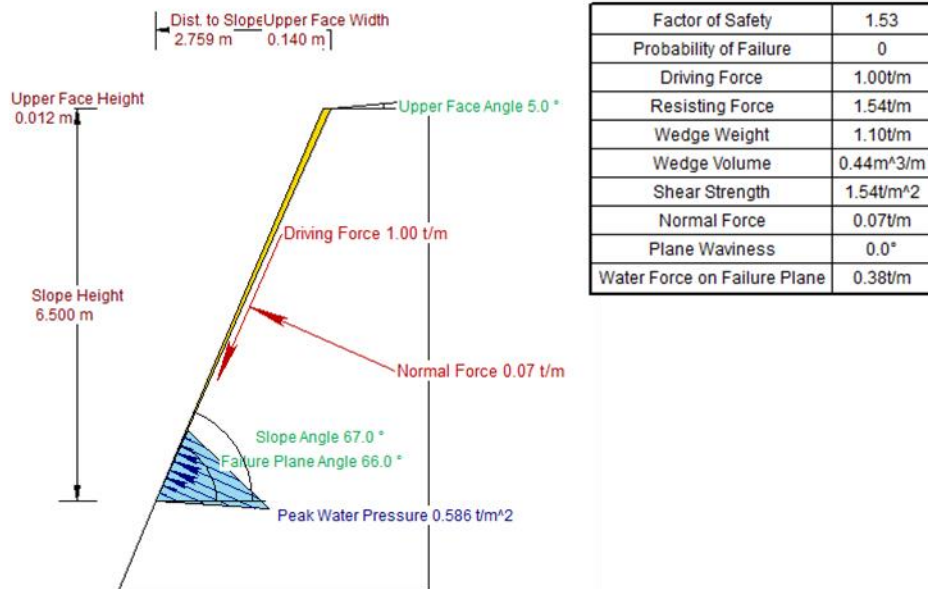


Figura 42. Diagrama de fuerzas en talud de zona geotécnica 2 en condiciones estáticas, presión hidrostática del 18 %, y abatimiento de talud-

Los nuevos valores para los factores de seguridad y falla según los casos antes descritos se muestran en Tabla 22.

Tabla 22. Factores de Seguridad y Factores de falla para los casos 1, 2 y 3 de zona geotécnica 2 con anclaje y abatimientos del talud para mejoramiento de estabilidad.

Zona Geotécnica 2						
Caso	Drenaje	Sismicidad	Anclaje	Abatimiento	FS	PF
1	No	No	No	67°	2.23	0
2	18 %	No	No	67°	1.53	0
3	No	Cs = 0.326	No	67°	1.42	0

En caso de no considerar el abatimiento como viable por diversas condiciones, se requerirá hacer un análisis de sostenimiento con el echado del talud de 78°.



Zona Geotécnica 3

La reducción de 11° al talud mejora el factor de seguridad a 1.29 en condiciones estáticas (Figura 43) y si, aunado a ello, se realiza una disminución de altura a 3 m el FS de 1.93 estático y 1.18 dinámico; el primero está dentro de los valores permisibles, sin embargo, no ocurre lo mismo con el factor dinámico, además, ocurre la misma situación que en la zona geotécnica 1, pues existen vestigios de una muralla, que, de no ser derrumbada, impide las modificaciones al talud (Figura 44). Por lo cual, su estabilidad será mediante sostenimiento y el uso de drenes y cunetas, pues en temporada de lluvia tiende a existir grandes infiltraciones que se observan en goteos en la cara del talud. Los tubos para drenaje deberán de ser de 2" de diámetro con 3 metros de largo.

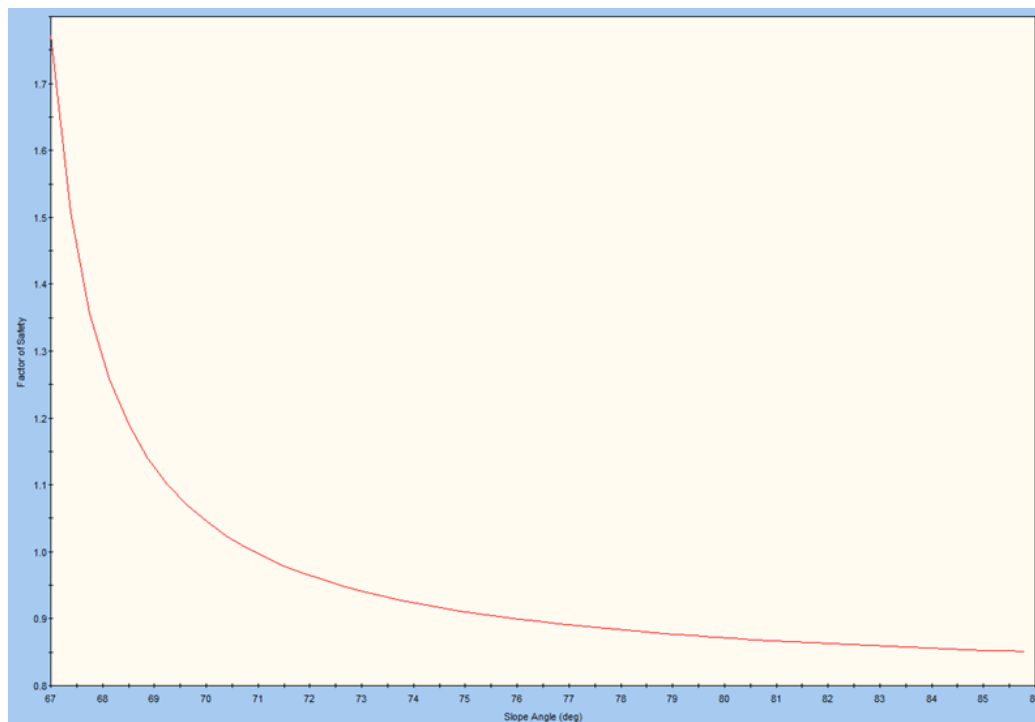


Figura 43. Variación de factor de seguridad dinámico por cambio de pendiente zona 3.



Figura 44. Muralla sobre ZG3.

Al ser un talud más pequeño, la masa a desplazar se calcula más pequeña comparada con las demás zonas, 78.89 toneladas implementando un factor de seguridad de 1.5, por lo que las anclas utilizadas para la estabilización de falla plana son 5, de 3 metros de largo y 1" de diámetro con capacidad de trabajo de 15.96 toneladas (Figura 45).

Cada ancla deberá tener una capacidad mínima de 2 t/m.

Tabla 23. Factores de Seguridad y Factores de falla para los casos 1, 2 y 3 de zona geotécnica 3 con anclaje para mejoramiento de estabilidad

Zona Geotécnica 3						
Caso	Drenaje	Sismicidad	Anclaje	Abatimiento	FS	PF
1	No	No	Pasivo, 2 líneas 3m, 15.96 ton	No	2.22	0
2	18 %	No	Pasivo, 2 líneas 3m, 15.96 ton	No	2.16	0
3	No	Cs = 0.326	Pasivo, 2 líneas 3m, 15.96 ton	No	1.43	0

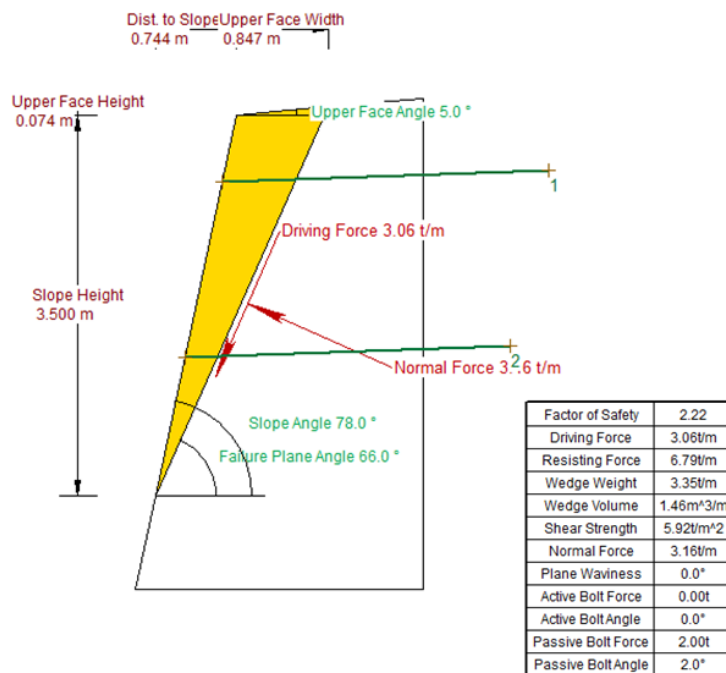


Figura 45. Diagrama de fuerzas en talud de zona geotécnica 3, en condiciones estáticas, con anclaje en 2 líneas.

Además, a lo largo del talud es recomendable la colocación de cunetas y contracunetas para captación y encauce del agua, además de lavaderos cada 50 metros, requiriéndose 2, según la SCT (2000) los lavaderos se ubicarán en tramos con pendientes longitudinales, de tal manera que capten el escurrimiento desde el punto superior y lo conduzcan hasta la parte inferior del corte, descargándolo a una caja amortiguadora ubicada al pie del lavadero.

Propuesta de diseño general de tratamientos

Con los análisis realizados en el apartado anterior, se definieron los tratamientos para de cada zona geotécnica del talud. El resumen los tratamientos y recomendaciones se describe en la Tabla 24.



Tabla 24. Resumen de propuestas para estabilización del talud en sus diferentes zonas geotécnicas.

PROPUESTA DE TRATAMIENTO	ZONA GEOTÉCNICA
Amacice energético de la superficie del talud.	ZG1 ZG2 ZG3
Protección superficial mediante concreto lanzado de 10 cm, resistencia de 200 kg/cm ² . Opcional en zonas desfavorables.	Áreas más desfavorables de ZG2 y ZG3
Reforzamiento con malla electrosoldada o fibra metálica. Opcional para áreas más desfavorables.	ZG2 ZG3
Anclas horizontales de 1" de diámetro y 4.5 m de largo inyectadas con mortero de 200 kg/cm ² en arreglo de 2m v x 1.7m h con un total de 5 líneas.	ZG1
Abatimiento del talud a 67° respecto a la horizontal, excavación mecánica.	ZG2
Anclas horizontales de 1" de diámetro y 3.0 m de largo inyectadas con mortero de 200 kg/cm ² en dos líneas con arreglo de 2 m v x 5 m h.	ZG3
Dren de PVC hidráulico de 2" de diámetro y 4.5 metros de longitud. El acomodo será en tresbolillo de 2 m v y 3.5 m h. Con inclinación de 12 ° y en línea con anclas.	ZG1
Dren de PVC hidráulico de 2" de diámetro y 3 metros de longitud. En acomodo de 3 m v y 3 m h, en acomodo tresbolillo y con 12 ° de inclinación ascendente.	ZG2
Dren de PVC hidráulico de 2" de diámetro y 3 metros de longitud. En acomodo de retícula de 2 m v y 5 m h y con desfase de 1 m v y 2.5 m h respecto a las anclas. Con inclinación de 12° ascendente y en línea con anclas.	ZG3
Lavaderos de concreto simple o mampostería para la descarga de escurrimientos superficiales sobre el talud cada 50 metros.	ZG1 ZG2 ZG3
Cunetas y contracunetas de captación y encause de agua.	Sobre el hombro del talud que redirija el agua e impida su infiltración al talud.



6. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

1. El talud de estudio se encuentra en la Sierra de Guadalupe, formada por domos y estratovolcanes, esta sierra a su vez está localizada, fisiográficamente, en la porción sur de Faja Volcánica Transmexicana (FVTM); y en la porción norte del Valle de México. Las rocas que afloran sobre el área son del Cenozoico, todas ellas de origen ígneo extrusivo.
2. En la zona existen grandes precipitaciones gran parte del año, de abril a octubre, con valores normales de hasta 164.4 mm de precipitación, además, las precipitaciones también se desarrollan en los meses restantes, aunque son escasas, por ello, se considera una zona húmeda con lluvias todo el año.
3. Regionalmente se observan linealidades en dirección NE-SW atribuidos a procesos tectónicos, además de tener grandes linealidades de escorrentías sin un rumbo específico, pero con preferencia de escurrimiento hacia el Valle de México. Existen otros lineamientos alejados de la zona de estudio y con mayor espaciamiento con dirección NW-SE. Estos lineamientos pueden verse
4. De manera regional, la zona está ubicada en un área sísmica con grado alto de sismicidad, sin embargo, por encontrarse en zona de roca la vibración es más rápida con periodos más pequeños. Además, las Normas de Construcción establecen un coeficiente sísmico determinado por SASID, siendo para zona de lomas, de 0.326, modificado en el 2017.
5. El macizo rocoso del talud de estudio localizado en el Panteón Jardines del Recuerdo, Tlalnepantla de Baz, en el Estado de México, se conforma de roca ígnea de composición dacítica – riolítica, con alteración por vegetación hacia el hombro del talud, sin embargo, exhiben distintas condiciones de intemperismo y fracturamiento, subdividiéndolo en 3 unidades litológicas de acuerdo con estas características y también delimitar una falla. RI-I presenta buenas condiciones como roca intacta y las familias de fracturas se encuentran más espaciadas, generando bloques más grandes; RI-II, la roca tiene poca alteración, sin embargo, el fracturamiento presenta menor espaciamiento, por lo que existen zonas de con fragmentos roca pequeños; RI-III la roca tiene gran alteración y fracturamiento por lo que muestra permeabilidad media; una Falla se visualizan sus paredes, y un relleno de arenas finas a medias y de material reciente.



6. Existen, principalmente, 4 familias de discontinuidades producidas por propia génesis de la roca y por tectonismo, además de aparecer con mayor espaciamiento discontinuidades asociadas a la falla. Se nombran de acuerdo con su persistencia en el talud.

La familia de discontinuidades F1 corresponde a fracturas con dirección de inclinación 64° e inclinación de 24° ; la familia F2 corresponde a fracturas con dirección de inclinación de 205° y 47° de echado; la familia F3 asociada a la pseudo estratificación tiene una dirección de echado de 73° y 80° de echado; la familia F4 exhibe una dirección casi paralela al talud con 66° de echado y 145° de dirección; por último, la familia Falla, presenta pocas estructuras en dirección 218° con echado de 82° .

7. Mediante características obtenidas en campo y bibliografía, se determinaron los valores de peso específico, resistencia a la compresión simple y el módulo de elasticidad de la roca intacta, con estos valores y observaciones en campo se realizan análisis RMR y GSI para cada una de las unidades geológicas. Obteniendo para RI-I puntuación RMR de 64 y de GSI de 56 a 59, clasificando a la roca con calidad buena en sus discontinuidades, aunque muy fracturada; Para RI-II el macizo está muy fracturado, pero con buenas condiciones en las discontinuidades, obteniendo un puntaje de GSI de 48 a 51 y RMR de 54; para RI-III, los puntajes de GSI son de 38 a 41, y de RMR de 43, reduciéndose debido a las condiciones hidráulicas y de alteración en el macizo.
8. Se realizó la zonificación de acuerdo con las características mecánicas, y geológicas observadas en campo. Generando 3 zonas que coinciden con las unidades litológicas, la zona de falla es integrada a la zona geotécnica 2. Los parámetros de la roca intacta corresponden a los obtenidos previamente, y para la obtención de los valores que caracterizan al macizo rocoso de cada zona, con el software RocLab fueron obtenidos los valores de ángulo de fricción, cohesión y módulo de elasticidad correspondientes al macizo rocoso. Los valores más altos corresponden a la ZG1 con 63.72° de ángulo de fricción y cohesión de 0.415 MPa; continua la ZG2 tiene un ángulo de fricción de 61.88° y cohesión de 0.197 MPa, y por último la cohesión de la ZG3 es de 0.068 MPa y tiene un ángulo de fricción de 60.79° .



9. Haciendo análisis cinemáticos para los diferentes planos de falla tanto de las discontinuidades como de las cuñas, y considerando que el talud tiene 78° de echado con rumbo $N64^\circ E$, se determina que las únicas familias con viabilidad de salida son la F4, y las cuñas C1 (formadas por las familias F1 y F2), C2 (F1-F3) y la cuña C3 (F3-F4), pues aun considerando el ángulo de fricción, éstas podían deslizar.
10. Para determinar la familia que mayores riesgos puede ocasionar a la obra, fue realizada la clasificación SRM para cada zona geotécnica, en todas ellas, la F4 es de inestable a completamente inestable, por lo que los análisis posteriores se realizaron estabilizando esta discontinuidad y con ello, generar una mayor estabilidad a todo el talud. En el valor SRM de la F4, en ZG1 es de 33, en ZG2 es de 23 y en ZG3 es de 14 puntos. El cálculo fue realizado considerando que la falla es plana en todos los casos, utilizando el software ROCPLANE para su estudio.
11. Procesando la información y considerando 3 casos (estático, hidrostático y dinámico) se obtiene el factor de seguridad y la probabilidad de falla de cada zona. El coeficiente sísmico es 0.326 y las condiciones de presión de agua variaron desde 50 % de presión de agua sobre las paredes de la discontinuidad en ZG1, 60% en ZG2 y 70 % en ZG3. En la que ninguna de las condiciones presentadas se tienen valores que garanticen la estabilidad del medio.
12. Para las zonas más desfavorables, especialmente ZG3, puede considerarse su reforzamiento mediante la colocación de malla electrosoldada o fibra metálica y la colocación local de concreto lanzado. Aunado a ello se considera la construcción de cunetas y contracunetas en el talud que canalicen y redirijan el agua, además de colocar en lavaderos que encaminen el agua al talón del talud, para reducir la infiltración y con ello, la posible presión de poro generada ante lluvias. De manera específica se considera:

Para la ZG1 es inviable la estabilización mediante abatimiento del talud, pues le sobreyace una obra, por lo cual la estabilización será mediante anclas pasivas en arreglo sistemático de 4.5 m de longitud y 1" de diámetro con arreglo de 2 m h x 1.7 m v, a este acomodo, se le intercalarán en arreglo tresbolillo, drenes hidráulicos de 4.5 m de largo y 2" de diámetro con una inclinación de 12° y con un desfase a las anclas de 1.0 m h y 3.4 m v.



En la ZG2 la reducción en 11° de la inclinación del talud se garantiza la estabilidad del mismo. Para reducir la presión de poro se colocarán drenes de 3 metros de longitud con 2" de diámetro e inclinación ascendente de 12° , en disposición de tresbolillo.

Para la ZG3, existe una obra en el hombro del talud, no siendo viable la modificación de la geometría del mismo, por lo que, para su estabilización se consideran anclas de 1" de diámetro y 3 m de largo de manera sistemática en retícula de 5 m h x 2 m v sobre el talud, en dos líneas; además, requiere de la colocación de drenes hidráulicos de 2" de diámetro y 3 m de largo con 12° de inclinación e intercalados con las anclas con desfase de 1.0 m v x 2.5 m h.

El talud se representa en tres zonas geotécnicas respecto al eje longitudinal (Figura 46), el tratamiento de cada una de ellas es representada en sección en la Figura 47 donde de manera esquemática se ilustra las secciones que se deben incluir en el plano geotécnico, acompañada de una planta geológica del área e incluir las indicaciones de cada tratamiento.

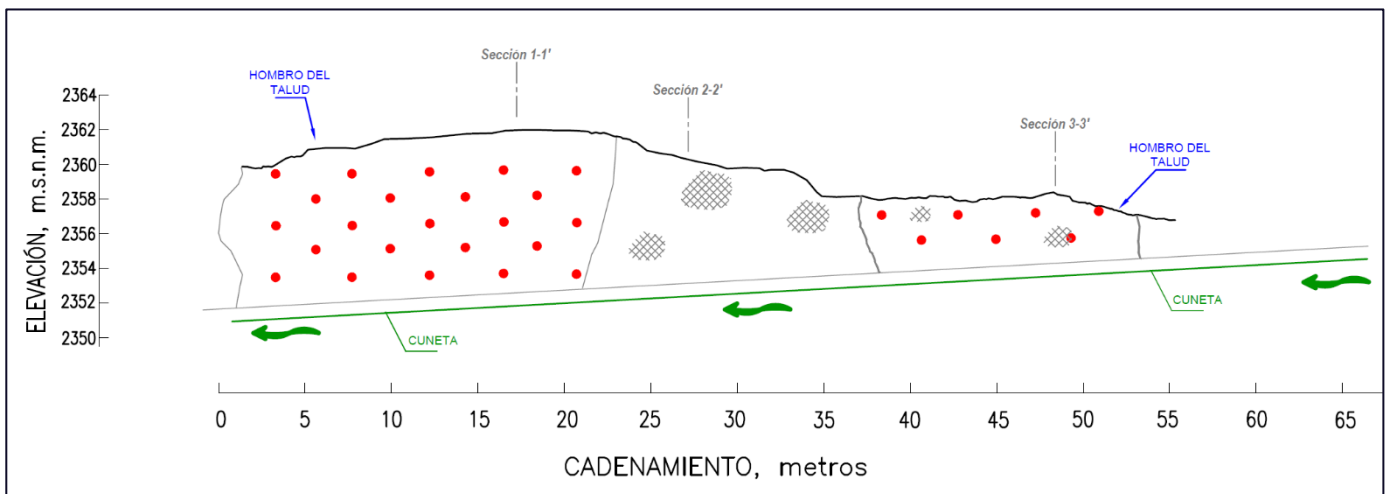
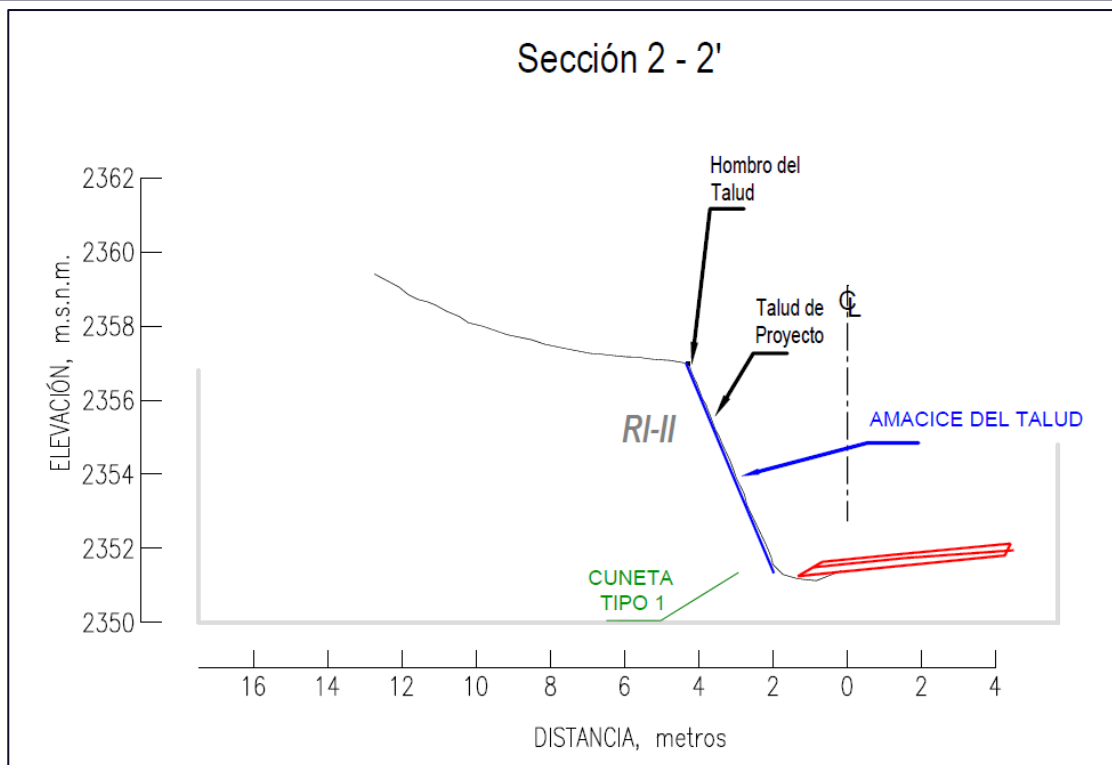
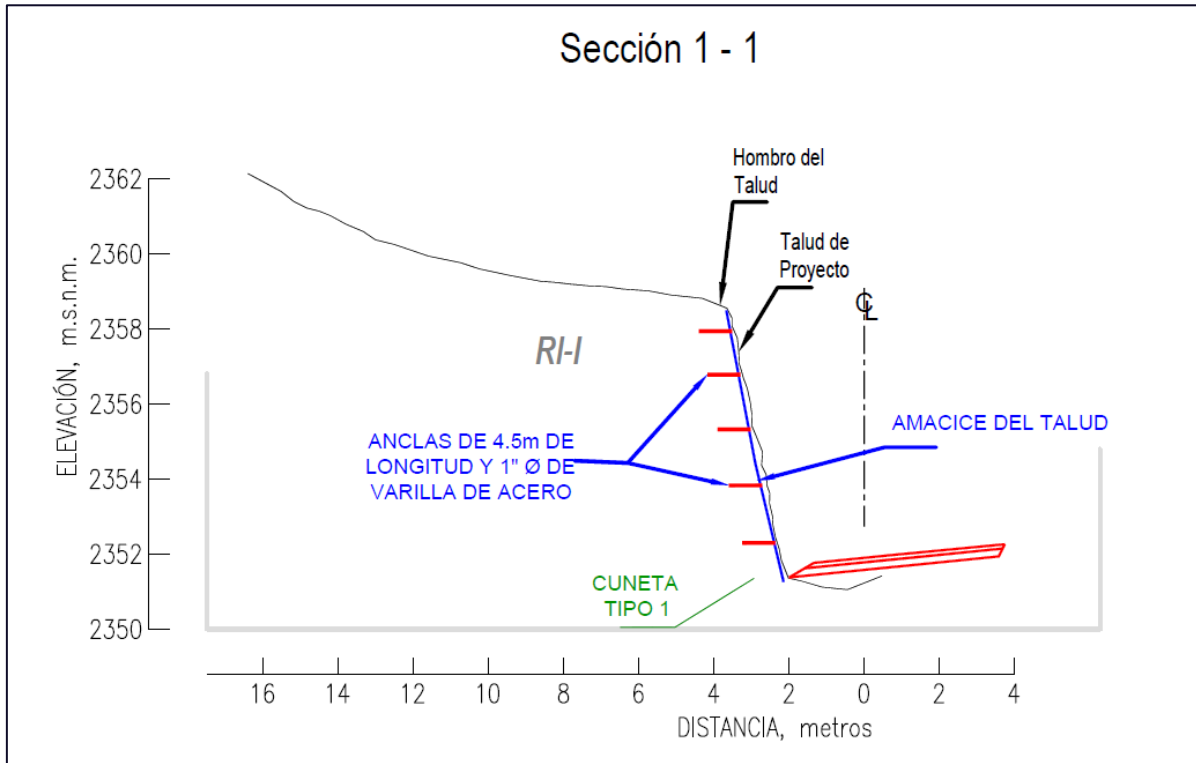


Figura 46. Sección longitudinal del talud



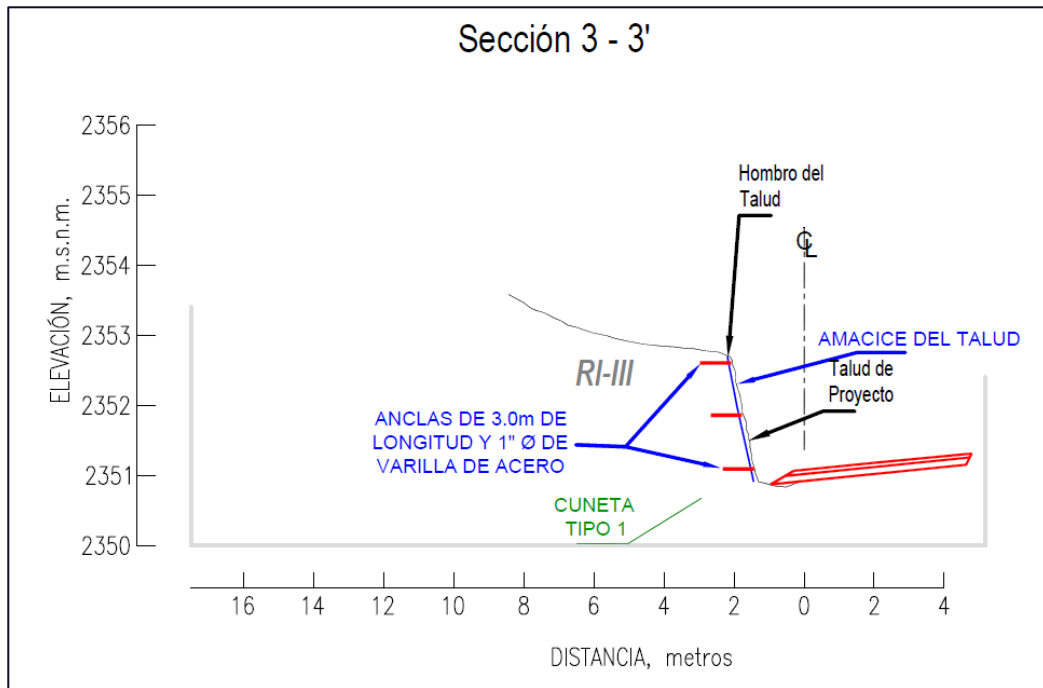


Figura 47. Secciones transversales al eje de talud señaladas en la sección longitudinal, indicando tratamientos correspondientes a cada zona geotécnica.

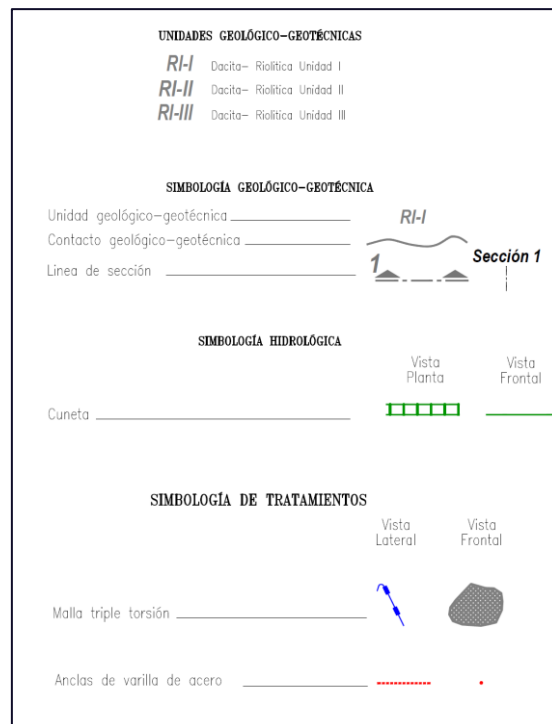


Figura 48. Simbología de planta y secciones.



7. REFERENCIAS

- Aguayo, J., Trápaga, R. (1996), Cinturón Volcánico Transmexicano en geodinámica de México y minerales del mar, Fondo de Cultura Económica. México, D.F. Recuperado de http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/141/htm/sec_7.htm
- Carcedo, A., y Posse, A. (2006) Manual de Ingeniería de taludes. (1ra edición), Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España.
- Diccionario geológico: <http://biblioteca.ismm.edu.cu/wp-content/uploads/2017/06/Diccionario-geologico.pdf>
- Estaire, J., Olivenza, G. (junio 2013), Factores de seguridad en la estabilidad de taludes de acuerdo con el eurocódigo EC-7 y el anejo nacional español. en VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Conferencia llevada a cabo en congreso CIMNE, Barcelona, España.
- García-Palomo, A., Carlos-Valerio, V., López-Miguel, C., Galván-García, A., Concha-Dimas, A. (2006), Landslide inventory map of Guadalupe Range, north of the México Basin: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Número Especial de Geología Urbana, 58(2), 195-204.
- Mena, U., Pérez, L., Aviles, J. (2006) Espectros de diseño sísmico para el territorio mexicano en XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Conferencia llevada a cabo en congreso SMIE, Jalisco, México.
- Navarro, S.J. (2008) Estabilidad de taludes. Distrito Federal, México.
- PRODISIS [Software]. (2015). Morelos, México: Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Obtenido de <https://www2.ineel.mx/prodisis/es/prodisis.php#mod>
- Ramírez, P., Alejano, Leandro R. (2004). Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes. Red DESIR, Madrid, España.



Rivas, L., (2019), Estudio geológico-geotécnico y análisis de estabilidad del talud km 41+100, Libramiento Sur de Guadalajara (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

SASID A v04.0.2 [software] (2017), Ciudad de México, México. Gobierno de la Ciudad de México Obtenido de <https://www.isc.cdmx.gob.mx/servicios/servicio/normas-tecnicas-complementarias-y-sasid>

Secretaria de Comunicaciones y Transporte (2000), Normativa para la Infraestructura del Transporte (N·CTR·CAR·1). Recuperado de: <https://normas.imt.mx/>

Secretaria de Desarrollo Urbano y Vivienda y Secretaría de Obras y Servicios (2017) Normas Técnicas complementarias para diseño por sismo en Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Recuperado de: <<<http://www.smie.org.mx/archivos/informacion-tecnica/normas-tecnicas-complementarias/normas-tecnicas-complementarias-diseno-sismo-2017.pdf>>>

Unidad de microrregiones, (2005) 170230001 TLALNEPANTLA, Dirección General Adjunta de Planeación Microrregional. Edo de México, México. Recuperado de <<http://www.microrregiones.gob.mx/>>

Universidad de Granada (2007) Restauración: Propiedades de las rocas. Granada, España. Recuperado de: https://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/0_restauracion.htm



GLOSARIO y ABREVIATURAS

C1: Cuña 1, formada por discontinuidades de la familia 1 y familia 2. Su dip/dip direction es $09^{\circ}/133^{\circ}$.

C2: Cuña 2, formada por discontinuidades de la familia 2 y familia 3, presenta echado y dirección de echado de 28° y 154° , respectivamente.

C3: Cuña 3, generada por la intersección de los planos de discontinuidad de la familia 3 y familia 4, con buzamiento y dirección de buzamiento de $124^{\circ}/64^{\circ}$, respectivamente.

Cuña directa: La cuña está formada por planos de discontinuidad que se inclinan en sentido diferente.

Cuña inversa: Los planos que generan la cuña se inclinan hacia el mismo sentido.

CVTM: Cinturón Volcánico Transversal Mexicano.

Estratovolcanes: Volcanes generados por la acumulación de estratos de lava producidos en diferentes eventos magmáticos. El magma tiende a ser viscoso por lo que su avance es poco antes de endurecerse.

E.C.: Estaciones climatológicas

F1: Familia 1 de discontinuidades con echado y dirección de echado $24^{\circ}/64^{\circ}$.

F2: Familia de discontinuidades 2. Dip/dip direction $47^{\circ}/205^{\circ}$.

F3: Familia 3 de discontinuidades con 80° de echado y dirección de 73° .

F4: Familia 4 de discontinuidades con 66° a 145° .

FVTM: Faja Volcánica Transversal Mexicana.

GSI: Índice de Resistencia Geológica (Geological Strength Index). Fue realizada por Hoek (1994) para evaluar las propiedades geomecánicas del macizo rocoso.

Macizo rocoso: Conjunto de roca intacta y de discontinuidades. Medios mecánicamente heterogéneos, anisotrópicos y discontinuos.

Material piroclástico: Flujos compuestos por material sólido, cenizas y fragmentos de roca de distintos tamaños, que circular por la flotación generada por vapores o presión.



Rift: Hundimiento de la corteza terrestre entre dos fallas paralelas.

RMR: Rock Mass Rating. Clasificación de Bieniawski para clasificar de manera geomecánica un macizo rocoso.

Roca ígnea: Rocas formadas a partir del enfriamiento del magma.

Extrusiva: El enfriamiento del magma se da en superficie y de manera rápida, por lo que no se pueden generar cristales grandes.

RI-I: Unidad geológica de composición riolítica poco alterada.

RI-II: Unidad geológica 2 de composición riolítica con gran cantidad de fracturas y poco a medianamente alterada.

RI-III: Unidad geológica 3 de composición riolíticas con alto grado de alteración.

SMR: Slope Mass Rating, Clasificación del macizo rocoso para taludes de roca.

Subducción: Es un término utilizado en la teoría de la tectónica de placas para señalar la penetración de la masa rocosa de una placa, dentro de la otra, en el encuentro de ambas por acercamiento, se produce un hundimiento en la zona de Benioff. Así como la formación de nuevas rocas (volcánicas) y un levantamiento de la zona de arco o cordillera.

ZG1: Zona geotécnica conformada por la unidad geológica RI-I

ZG2: Zona geotécnica que integra la unidad geológica RI-II y la zona de falla.

ZG3: Zona geotécnica que se conforma por la unidad geológica RI-III



ANEXO A:

Calidad del macizo rocoso



RI-I

Rock Mass Rating (RMR, Bieniawski 1989)

A) Parámetros de clasificación

1. Resistencia de la matriz rocosa

	Descripción	Puntuación
Compresión simple (Ma)	100-200	12

2. Calidad de la Roca

RQD(%)	70%	6
--------	-----	----------

3. Separación entre discontinuidades

Separación (m)	0.6-2	15
----------------	-------	-----------

4. Estado de las discontinuidades

Longitud (m)	3-10	2
Apertura (mm)	0.1-1mm	3
Rugosidad	Rugosa	5
Relleno	Ninguno	6
Alteración	Ligeramente alterada	5
		21

5. Aguas freáticas

Estado General	Ligeramente seco	10
----------------	------------------	-----------

Puntuación	64
Clase	III
Calidad	Media



RI-II

Rock Mass Rating (RMR, Bieniawski 1989)

A) Parámetros de clasificación

1. Resistencia de la matriz rocosa

	Rango	Puntuación
Compresión simple (Ma)	100-200	12

2. Calidad de la Roca

RQD(%)	50%	6
--------	-----	----------

3. Separación entre discontinuidades

Separación (m)	0.2 - 0.6 m	10
----------------	-------------	-----------

4. Estado de las discontinuidades

Longitud (m)	3-10 m	2
Apertura (mm)	1-5mm	1
Rugosidad	Rugosa	5
Relleno	Blando	6
Alteración	Ligeramente alterada	5
		19

5. Aguas freáticas

Estado General	Húmedo	7
----------------	--------	----------

Puntuación	54
Clase	III
Calidad	Media



RI-III	Rock Mass Rating (RMR, Bieniawski 1989)
---------------	---

A) Parámetros de clasificación

1. Resistencia de la matriz rocosa

	Rango	Puntuación
Compresión simple (Ma)	50-100	12

2. Calidad de la Roca

RQD(%)	30%	6
--------	-----	---

3. Espaciamiento entre discontinuidades

Separación (m)	<0.06 m	5
----------------	---------	---

4. Condición de las discontinuidades

Longitud (m)	1-3 m	4
Abertura (mm)	<0.1 mm	5
Rugosidad	Ligeramente rugosa	3
Relleno	Ninguno	6
Alteración	Alterada	3
		21

5. Aguas freáticas

Estado General	Goteando	4
----------------	----------	---

Puntuación	48
Clase	III
Calidad	Media

