



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTABILIDAD DE TALUDES EN PERMAFROST EN ZONAS TROPICALES DE ALTA MONTAÑA: CASO DE ESTUDIO, CERRO CHAJNANTOR

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN
INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA

GABRIELA DEL CARMEN MENA CAJO

PROFESOR GUÍA:

CÉSAR PASTÉN PUCHI

PROFESOR CO-GUÍA:

FELIPE OCHOA CORNEJO

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:

KENJI YOSHIKAWA

SANTIAGO DE CHILE

2020

**ESTABILIDAD DE TALUDES EN PERMAFROST EN ZONAS TROPICALES DE ALTA MONTAÑA:
CASO DE ESTUDIO, CERRO CHAJNANTOR**

Junto con la continua expansión demográfica y de infraestructura hacia la alta montaña, existe un potencial creciente de desastres naturales y sus consecuentes pérdidas sociales. El interés en la construcción de obras ingenieriles en zonas tropicales de alta montaña donde existe permafrost ha aumentado en la última década, lo cual demanda el desarrollo de conocimiento para abordar condiciones termo-mecánicas antes no estudiadas. La distribución, temperatura y espesor del permafrost son controlados por cambios ambientales naturales y perturbaciones antropogénicas que causan alteraciones en el régimen térmico y pueden provocar cambios en las propiedades de los materiales. El proyecto University of Tokyo Atacama Observatory (TAO), ubicado en la cima del cerro Chajnantor (5,640 m.s.n.m.) en el desierto de Atacama, norte de Chile, se encuentra en desarrollo y se convertirá en el observatorio astronómico más alto del mundo. Actualmente, se encuentra en ejecución el ensanchamiento del camino de acceso al observatorio, donde se han producido algunos desprendimientos de material en los taludes, lo que condiciona la seguridad general del proyecto.

Esta tesis se centra en el análisis de estabilidad de los taludes ubicados en el kilómetro 3.7 a 5.200 m.s.n.m, que se caracterizan por encontrarse en un cauce de flujo de material volcánico formado por una alternancia de lavas y depósitos piroclásticos poco consolidado conocido como ignimbrita y un alto contenido de hielo segregado e intrusivo. Se realizaron ensayos de terreno y laboratorio con el fin de obtener las propiedades térmicas y mecánicas de los materiales, las cuales se utilizan en el desarrollo de un modelo numérico térmico en el software computacional Plaxis y un modelo de equilibrio límite en SLOPE/W para analizar el efecto del permafrost en la estabilidad de los taludes en el sector más crítico del camino de acceso al observatorio TAO. Los resultados de los análisis muestran que los problemas de estabilidad en taludes con permafrost están relacionados con cambios estacionales de temperatura, las propiedades térmicas de los materiales y la pérdida de resistencia al corte cuando los materiales se descongelan, principalmente por la pérdida de cohesión aparente, efecto que es más pronunciado en taludes con alto contenido de hielo. La metodología utilizada para modelar numéricamente los cambios térmicos en el talud con permafrost sobreestima la profundidad de penetración del calor, sugiriendo un descongelamiento mayor que el observado en terreno. Debido a esto, es necesario contar con registros de temperatura en profundidad de por lo menos un año consecutivo para determinar la estabilidad del permafrost en el subsuelo. Por último, se desarrolló un modelo conceptual que muestra la progresión de la estabilidad de un talud en el tiempo cuando es sometido a ciclos de temperatura que generan degradación de las propiedades mecánicas superficiales.

*“Mi amado es mío y yo soy suya
Las grandes aguas no pueden apagar el amor, ni los ríos arrastrarlo”*

A mi esposo Gabriel

AGRADECIMIENTOS

A mi esposo Gabriel desde que nos conocimos siempre has estado a mi lado, gracias por ser mi compañero de vida y mi soporte.

A mis amados padres Fidel y Carmen, han sido y serán un pilar fundamental en mi vida. Su ejemplo de amor, valentía y perseverancia me ha ayudado en este camino. Sin ustedes no sería la mujer en la que me he convertido, todos mis logros son suyos.

A mi hermano Andrés, que entre risas y burlas siempre estamos cuidándonos y dando ánimos en todas las etapas de nuestras vidas. A mi hermana Kristina, eres una luz en mi vida, gracias por siempre escucharme y consolarme cuando más lo necesito, desde que naciste nuestros corazones están unidos y no habrá distancia que los separe. A Juanita por su cariño y hacerme sentir muy cerca de Sergio durante todo este tiempo. A mis tíos y primos que siempre me han alentado a seguir adelante.

A mis amigas de toda la vida: Lucrecia, Andrea, Solange y Gabriella, por su amistad verdadera e incondicional todos estos años. A los nuevos amigos que hice al llegar a este país: Mariale, Abrahm, Roberto, Lucho, Jaime y Pedro Pablo, gracias chicos por los momentos compartidos, los llevaré en mi corazón por siempre.

A mi profesor guía César Pastén por guiar este trabajo, ser un excelente docente siempre dispuesto a compartir sus conocimientos y su constante motivación. Al Profesor Yoshikawa por la oportunidad brindada, impartirme sus conocimientos sobre permafrost y acogerme durante mi estadía en Alaska. A Omar y Viviana que contribuyeron con sus conocimientos y hospitalidad para el desarrollo de los trabajos en laboratorio. Y a todos los profesores del programa que han aportado de alguna manera al desarrollo de este trabajo.

Un agradecimiento especial a la Facultad de Ciencias Instituto de Astronomía de la Universidad de Tokio, por el apoyo financiero para el desarrollo del presente trabajo de investigación. A los profesores Takashi Miyata y Mamoru Daio y al equipo del proyecto TAO por la ayuda brindada en el trabajo de campo e información provista.

Special thanks to the Institute of Astronomy, School of science of University of Tokio, Professors Takashi Miyata and Mamoru Doi. I strongly appreciate TAO project team for supporting field work and the information provided for the development of this thesis.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación	1
1.2	Hipótesis.....	2
1.3	Objetivo General.....	2
1.4	Objetivos Específicos	2
1.5	Estructura de la tesis	3
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Régimen térmico del suelo.....	4
2.2	Permafrost.....	4
2.2.1	Distribución espacial del permafrost	5
2.2.2	Tipos de hielo en el permafrost	7
2.2.3	Diferencias del permafrost en zonas polares y tropicales.....	8
2.2.4	Efectos de ciclos de congelamiento y descongelamiento en las propiedades mecánicas y la estabilidad de taludes.....	9
2.3	Transferencia de calor en suelo	12
2.3.1	Conductividad térmica [k].....	13
2.3.2	Difusividad Térmica [α].....	13
2.3.3	Calor específico [C_p].....	13
3	CASO DE ESTUDIO – CERRO CHAJNANTOR	14
3.1	Ubicación de la zona de estudio	14
3.2	Geología de la zona de estudio.....	15
3.3	Información geotécnica	18
3.4	Descripción de los taludes	21
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	26
4.1	Ensayos in-situ	27
4.1.1	Distribución de temperatura	27
4.1.2	Conductividad Térmica.....	28
4.1.3	Permitividad dieléctrica.....	30
4.2	Ensayos de laboratorio.....	30
4.2.1	Contenido de humedad	31
4.2.2	Granulometría y clasificación del suelo.....	31

4.2.3	Gravedad específica.....	31
4.2.4	Densidad mínima y densidad máxima	31
4.2.5	Corte Simple.....	31
4.2.6	Compresión no confinada	33
4.2.7	Conductividad térmica.....	36
4.3	Procesamiento de Datos	37
4.3.1	Propiedades térmicas a partir de datos de temperatura	37
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	39
5.1	Distribución de temperatura	39
5.2	Conductividad térmica.....	42
5.3	Contenido de agua no congelada	47
5.4	Difusividad térmica	48
5.5	Calor específico.....	49
5.6	Contenido de humedad	49
5.7	Granulometría y clasificación del suelo.....	49
5.8	Gravedad específica.....	49
5.9	Densidad mínima y densidad máxima	49
5.10	Corte simple	51
5.11	Compresión no confinada	54
5.12	Resumen de resultados del programa experimental	55
6	MODELAMIENTO NUMÉRICO	56
6.1	Modelamiento Térmico.....	56
6.1.1	Parámetros.....	57
6.1.2	Condiciones de Borde	57
6.2	Modelamiento de estabilidad de taludes.....	58
6.2.1	Geometría y Materiales	58
6.3	Modelo Conceptual.....	59
7	RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL MODELAMIENTO NUMÉRICO	61
7.1	Modelamiento térmico	61
7.2	Modelamiento de estabilidad de taludes	63
7.3	Modelo conceptual	65

8	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	68
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
9.1	Conclusiones.....	71
9.2	Recomendaciones.....	72
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXOS.....	79
	Anexo A. Registros de sondeos Asistecsa, 2018.....	79
	Anexo B. Procesamiento de datos para ensayo de laboratorio.....	94
	Anexo C. Curva de Trompeta mensual proyecto TAO desde Enero hasta Octubre 2019.....	99
	Anexo D. Bitácora visita de campo realizada en Mayo 2019.....	104
	Anexo E. Registro de ensayos de laboratorio.....	117
	Anexo F. Coeficiente de correlación cruzda.....	142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades térmicas de diferentes tipos de materiales que conforman el suelo.	13
Tabla 2. Información de ubicación y profundidad de prospecciones	18
Tabla 3. Resumen de información de los sondajes	19
Tabla 4. Especificaciones del sensor digital de temperatura	27
Tabla 5. Información sobre las muestras para los ensayos de laboratorio.	31
Tabla 6. Plan de ensayo para corte simple	33
Tabla 7. Densidades y grado de saturación de confección de probetas sometidas a compresión no confinada	34
Tabla 8. Densidad y grado de saturación para la confección de probetas.	36
Tabla 9. Información de las mediciones de conductividad térmica.....	43
Tabla 10. Comparación de resultados con referencia bibliográfica.	47
Tabla 11. Resultado de las mediciones de constante dieléctrica.	47
Tabla 12. Resumen de resultados de correlación cruzada, desfase y difusividad por mes	48
Tabla 13. Resultado de las propiedades térmicas	49
Tabla 14. Resultados de ensayos de caracterización de materiales.....	50
Tabla 15. Estimaciones de propiedades físicas in-situ de materiales	50
Tabla 16. Resultado del ángulo de fricción interna	54
Tabla 17. Resultado para ensayo compresión simple	55
Tabla 18. Propiedades de la ignimbrita.....	55
Tabla 19. Propiedades térmicas.....	55
Tabla 20. Propiedades térmicas de los materiales considerados en Plaxis	57
Tabla 21. Nuevas propiedades térmicas.....	62
Tabla 22. Factores de seguridad para diferentes métodos de análisis	63
Tabla 23. Geometría del talud.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista en planta cerro Chajnantor y su camino de acceso.....	2
Figura 2. Curva de trompeta (Elaboración Propia)	4
Figura 3. Distribución de permafrost circumpolar. Los tonos más oscuros de azul indican porcentajes más grandes de suelo con permafrost. Los azules más claros indican permafrost discontinuo donde existen porcentajes más bajos (Brown et. al.,1997)	6
Figura 4. Mapa esquemático de la distribución mundial del permafrost en alta montaña (Gorbunov, 1978)	6
Figura 5. Representación esquemática de formación de hielo segregado y sus consecuencias (Deville, 2016)	7
Figura 6. Esquema de desarrollo de cuñas de hielo: (a) fisuración anual (invierno); (b) relleno anual (primavera o verano) por agua de deshielo (c) congelación (anual) de agua de deshielo en grietas y la formación de cuñas de hielo progresivamente más anchas y profundas (Soare et. Al, 2014)	8
Figura 7. Esquema de distribución de climas por zonas latitudinales (Maulucioni, 2014).....	9
Figura 8. Disposición espacial del agua y hielo en roca (Haung et al., 2015)	9
Figura 9. Cambio de la cohesión y ángulo de fricción interna con los ciclos de congelamiento y deshielo (Chen et al., 2017).....	10
Figura 10. Diferentes estados del agua en suelos con permafrost (Nater et al., 2018).	10
Figura 11. Ángulo de fricción interna efectivo y la cohesión en función del contenido volumétrico de hielo. (Areson & Springman, 2005)	11
Figura 12. Mapa de ubicación del proyecto TAO (Elaboración propia)	14
Figura 13. Unidades morfológicas de la Hoja Calama, cuadro rojo enmarca la zona de estudio. (Adaptado de: Carta Geológica, Hoja Calama, 1984).....	15
Figura 14. Columna estratigráfica generalizada de la Precordillera y Cordillera de los Andes (Carta Geológica, Hoja Calama, 1984)	16
Figura 15. Distribución de las ignimbritas de la Hoja Calama (Adaptado de: Carta Geológica, Hoja Calama, 1984)	17
Figura 16. Distribución de las ignimbritas en la zona de estudio (Heisig, 2007)	17
Figura 17. Vista en planta camino de acceso proyecto TAO. Ubicación de sondajes (Google Earth). ..	18
Figura 18. Nivel de fracturación. Ensayo RQD. (Recuperado de Prospección geotécnica, Asistecsa, 2018)	20
Figura 19. Cara este del cerro Chajnantor.	21
Figura 20. Vista del talud ubicado en el kilómetro 3.4 del camino de acceso la cima de cerro Chajnantor. (Recuperado de: Yoshikawa, 2018)	22

Figura 21. Vista isométrica del talud ubicado en el kilómetro 3.70. La circunferencia roja muestra el cauce de flujo pirolástico donde se encuentra el talud. La línea celeste esquematiza la trayectoria del flujo del agua proveniente del derretimiento de nieve acumulada.....	22
Figura 22. Reconocimiento de problemas de estabilidad en el kilómetro 3.70 del camino de acceso. Todas las imágenes ubicadas en la izquierda fueron tomadas el 2018, las imágenes de la derecha en el 2019. (Fotografías adaptadas de Yoshikawa, 2018-2019)	23
Figura 23. Tipos de hielo dentro de los taludes en el km 3.7. a) Hielo segregado b) Hielo intrusivo (Recuperado de: Yoshikawa, 2018)	23
Figura 24. a) Vista del talud ubicado en el kilómetro 3.70 del camino de acceso, b) Esquema de geometría y la forma de falla del talud DM 3+700 a partir de información geométrica reportada en los informes. (Fotografía adaptada de: Yoshikawa, 2018)	24
Figura 25. Esquematización transversal de los taludes a partir del kilómetro 3.90	24
Figura 26. Descarga de agua subterránea en el kilómetro 5.20 (Recuperado de: Yoshikawa, 2018) ..	25
Figura 27. Vista en planta del camino de acceso al proyecto TAO, donde se muestra la ubicación de toda la información y datos adquiridos (Google Earth)	26
Figura 28. Sensor de temperatura digital. (Electronic Components 2019)	27
Figura 29. Esquema de distribución de los sensores.	28
Figura 30. Analizador de propiedades térmicas KD2 Pro (Decagon Devices)	29
Figura 31. a) Perforación con taladro para medición in situ en ignimbrita blanca en punto P1, b) Medición in situ conductividad térmica ignimbrita blanca en punto P1	29
Figura 32. Sensor utilizado para mediciones de permitividad dieléctrica (Stevens Water 2019).	30
Figura 33. a) Muestras correspondientes a perforación B3. b) Muestras correspondientes a perforación B2	30
Figura 34. Etapas para ejecución de ensayo de corte simple. a) Membrana de goma y anillos rígidos. b) Preparación de la muestra c) Montaje y ajuste del equipo. d) Muestra deformada al finalizar el ensayo	32
Figura 35. Elaboración de moldes para realizar compresión no confinada en muestras congeladas.	33
Figura 36. Ejecución del ensayo compresión no confinada.....	35
Figura 37. Molde PVC para medición de conductividad térmica	36
Figura 38. Medición de conductividad térmica.....	37
Figura 39. Temperatura vs. Tiempo mes de enero de 2019.....	39
Figura 40. Temperatura vs. Tiempo mes de julio de 2019.	40
Figura 41. Temperatura vs. Profundidad (<i>trumpet curve</i>) para el mes de enero de 2019.	41
Figura 42. Temperatura vs. Profundidad (<i>trumpet curve</i>) para el mes de julio de 2019.	41

Figura 43. Trumpet Curve de temperatura media desde enero hasta octubre del 2019.....	42
Figura 44. Conductividad vs. Temperatura para la muestra S/N (Ignimbrita Blanca)	43
Figura 45. Conductividad vs. Temperatura para la muestra S/N (Ignimbrita Blanca)	44
Figura 46. Conductividad vs. Temperatura para la muestra 19 (Ignimbrita Blanca)	44
Figura 47. Conductividad vs. Temperatura para la muestra 16 (Arena café).....	45
Figura 48. Conductividad vs. Temperatura para la muestra 17 (Arena café).....	45
Figura 49. Conductividad vs. Temperatura para la muestra 18 (Arena café).....	46
Figura 50. Correlación cruzada para el mes de enero de 2019 de los registros de temperatura a 1 y 10 cm de profundidad.....	48
Figura 51. Curva de distribución granulométrica.	49
Figura 52. Grafico esfuerzo de corte vs deformación angular para la Ignimbrita Blanca (Muestra S/N)	51
Figura 53. Grafico esfuerzo de corte vs deformación angular para la arena café (Muestra 17)	52
Figura 54. Grafico deformación vertical vs deformación angular para la Ignimbrita Blanca (Muestra S/N)	52
Figura 55. Grafico deformación vertical vs deformación angular para la arena café (Muestra 17).....	53
Figura 56. Gráfico de envolvente de falla para la Ignimbrita Blanca (Muestra S/N).....	53
Figura 57. Gráfico de envolvente de falla para la arena café (Muestra 17).....	54
Figura 58. Gráfico de esfuerzo normal vs. deformación para la ignimbrita y la arena en estado congelado.....	54
Figura 59. Geometría y asignación de materiales análisis térmico Plaxis.....	56
Figura 60. Condiciones de borde asignadas. La línea roja representa condición de borde <i>Closed</i> y la línea amarilla segmentada representa condición de borde <i>Temperature</i>	57
Figura 61. Variación de temperatura considerada como condición de borde en la superficie del modelo. La temperatura representa una condición similar al mes de enero de 2019.....	58
Figura 62. Geometría y materiales para el análisis de estabilidad Slope/W	59
Figura 63. a) Geometría ciclo 0 del modelo conceptual. b) Geometría ciclo 1 del modelo conceptual	60
Figura 64. Detalle de la distribución de temperatura del modelamiento térmico para el mes de Enero	61
Figura 65. Curvas de trompeta correspondientes al mes de enero de 2019. a) Curva resultante de los datos de temperatura b) Curva resultante del modelo numérico.....	62
Figura 66. Curvas de trompeta correspondientes al mes de enero de 2019. a) Curva medida en campo, b) curva simulada numéricamente con la difusividad efectiva.....	62

Figura 67. Resultado de análisis de estabilidad del talud conformado por ignimbrita. a) Análisis de estabilidad correspondiente a materiales congelados b) Análisis de estabilidad correspondiente a materiales descongelados donde existe pérdida total de cohesión.....	64
Figura 68. Resultado de análisis de estabilidad del talud conformado por arena. a) Análisis de estabilidad correspondiente a materiales congelados b) Análisis de estabilidad correspondiente a materiales descongelados donde existe pérdida total de cohesión.....	64
Figura 69. Variación del FS con la cohesión.....	65
Figura 70. Modelo conceptual aplicado a talud DM 3+700 para determinar el número de ciclos requeridos para alcanzar estabilidad.	66
Figura 71. Numero de ciclos vs. Altura del talud.....	67

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El interés en la construcción de obras ingenieriles en zonas tropicales de alta montaña donde existe permafrost ha ido en aumento en la última década, lo cual demanda el desarrollo de conocimiento para abordar condiciones antes no estudiadas y de esta manera evitar desastres naturales y las consecuentes pérdidas sociales.

Se estima que el permafrost ocupa entre el 20-24% de la superficie de la Tierra (principalmente en Alaska, Canadá y Rusia), donde una extensión de 1,500,000 km² se encuentra en montañas de latitudes medias y bajas, principalmente en las montañas medias y Asia Central (Himalaya, Tíbet, Karakoram, Kunlun Shan, Hindu Kush, Pamirs y Tien Shan) y en el sur de Siberia y Mongolia (Altai y Khangai). En regiones montañosas como los Andes, los Alpes, las Montañas Rocosas, los Alpes de Nueva Zelanda y las montañas de Japón se encuentra permafrost en menor proporción. En Sudamérica, el permafrost se extiende en buena parte en Cordillera de los Andes, pudiendo existir unos 270,000 km² (Ferrando et al., 2000). Específicamente al norte, en los Andes tropicales, es posible encontrar permafrost a 5,000 o 5, 300 m.s.n.m. Cuanto más al sur, es posible encontrar permafrost a altitudes más bajas, aproximadamente a 1,500 a 2,000 m.s.n.m. en el sur de Chile (Gorbunov, 1978). Sin embargo, la distribución de los glaciares rocosos en Chile, así como de la presencia de permafrost andino, aún no está completamente establecida dada la escasa investigación en este tema.

La degradación del permafrost es uno de los factores cruciales de los que depende la estabilidad de laderas en alta montaña y está fuertemente relacionada con las alteraciones y los cambios atmosféricos vinculados al cambio climático (Ahumada et al., 2015; Davies et al., 2001). La inestabilidad resulta a partir de la meteorización por ciclos de congelamiento y/o descongelamiento, provocando degradación física y de las propiedades mecánicas (Chen et al., 2017). Por lo general los efectos del permafrost y su participación en deslizamientos o flujos de detritos son subestimados o desconocidos.

Actualmente, se encuentra en ejecución el ensanchamiento del camino de acceso a la cima del University of Tokyo Atacama Observatory¹, conocido por sus siglas en inglés como TAO. Este proyecto, avaluado en más de 70 millones de dólares, pretende construir un telescopio infrarrojo de 6.5 metros de diámetro en la cima del cerro Chajnantor (5,640 m.s.n.m.), en el desierto de Atacama, al norte de Chile, convirtiéndose así en el observatorio astronómico más alto del mundo. La caracterización del cerro Chajnantor como el mejor sitio a nivel mundial para la realización de observaciones astronómicas, ha despertado un gran interés por utilizar la zona en numerosos proyectos astronómicos. El terreno es único en el mundo por la calidad de sus cielos y la atmósfera, que permite la operación eficiente y aseguran una mayor resolución.

En la Figura 1, se observa el eje vial del camino de acceso que cuenta con una longitud de 8.23 km de distancia desde la base hasta la cima del cerro. Específicamente, la zona comprendida entre el kilómetro 3.6 al 3.8, se caracteriza por su alto contenido de hielo segregado e intrusivo y presenta problemas de estabilidad, donde se han producido algunos desprendimientos de material debido a las

¹ *Link al proyecto:* <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/en/>

alteraciones térmicas provocadas por los trabajos de movimiento de tierras (corte de sección), condicionando la seguridad general del proyecto.

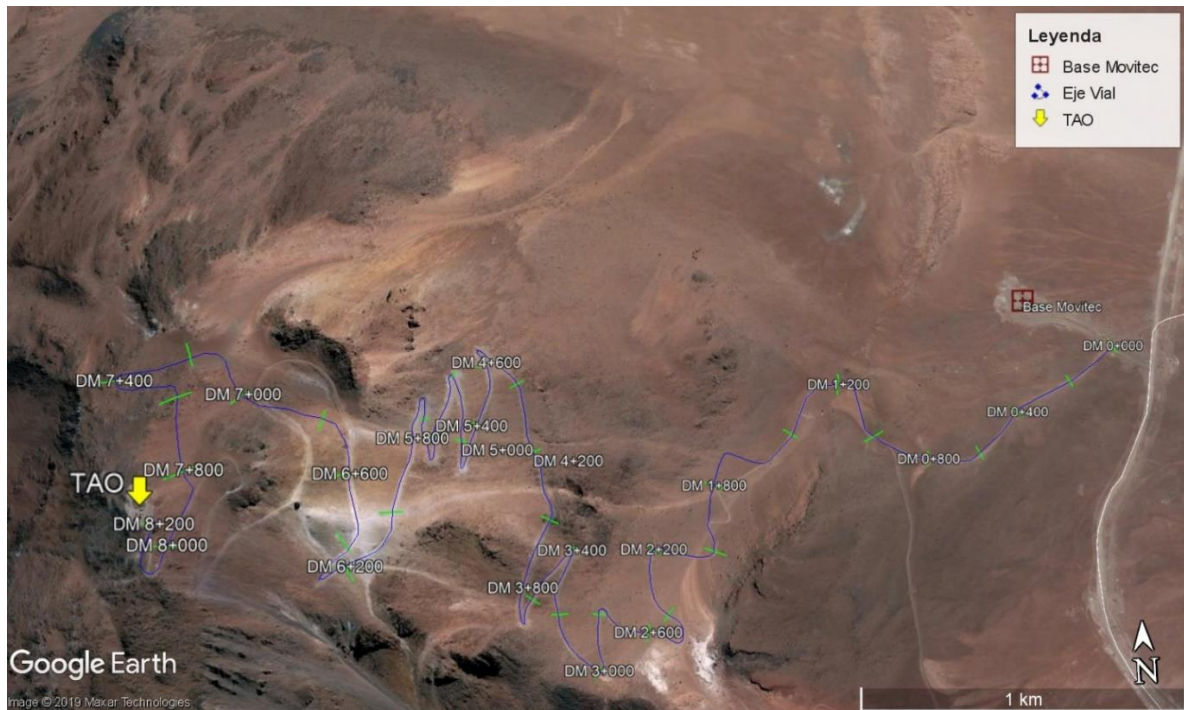


Figura 1. Vista en planta cerro Chajnantor y su camino de acceso.

Con estos antecedentes, y dado el interés creciente en los problemas de deslizamientos que han sido identificados tanto en suelo como en roca con presencia de permafrost, se llevará a cabo una investigación sobre la influencia del permafrost en la estabilidad de taludes en la zona tropical de alta montaña donde se desarrolla el proyecto TAO.

1.2 Hipótesis

La estabilidad de cortes en materiales con permafrost en zonas tropicales de alta montaña depende de la geometría del talud, las propiedades térmicas y mecánicas de los materiales y de las variaciones de temperatura ambiente.

1.3 Objetivo General

Determinar la influencia de las variaciones de temperatura sobre la estabilidad de taludes de materiales con permafrost en la zona tropical de alta montaña donde se desarrolla el proyecto TAO.

1.4 Objetivos Específicos

- Comprender el comportamiento térmico del permafrost en zonas tropicales de alta montaña.
- Identificar y comprobar mediante mediciones in-situ la presencia de permafrost y su estructura a lo largo del camino de acceso en Cerro Chajnantor.
- Obtener las propiedades mecánicas de los materiales presentes en el camino de acceso al observatorio TAO.
- Obtener las propiedades térmicas de los materiales mediante ensayos in-situ y de laboratorio.
- Generar perfiles bidimensionales de los sectores del camino al observatorio TAO que han presentado inestabilidad.

- Desarrollar una metodología de análisis de estabilidad de taludes con permafrost mediante softwares que permita el modelamiento térmico y modelamiento de estabilidad de taludes.
- Determinar el efecto de los cambios de temperatura en la estabilidad de los taludes con permafrost.

1.5 Estructura de la tesis

Esta tesis se divide en 10 capítulos, incluyendo esta introducción, cuyo contenido se describe a continuación.

El Capítulo 2 expone los conceptos básicos del permafrost, su estructura y distribución, tipo de hielo, las diferencias que existen entre el permafrost en zonas polares y el permafrost en zonas tropicales, los efectos de los ciclos de congelamiento y descongelamiento del permafrost. Además, se presenta información teórica sobre la transferencia de calor en el suelo y sus propiedades térmicas.

El Capítulo 3 presenta el caso de estudio abarcando el contexto y la importancia del proyecto y la geología del sector. Adicionalmente, se muestra el estado actual del proyecto, la geometría de los taludes, información geotécnica y los problemas de estabilidad.

El Capítulo 4 detalla el programa experimental, los equipos y el procedimiento utilizado en los ensayos in-situ y en laboratorio, para determinar las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales y presenta la memoria de cálculo y ecuaciones utilizadas para el procesamiento de datos.

El Capítulo 5 presenta los resultados del programa experimental y su análisis correspondiente.

El Capítulo 6 detalla los parámetros y condiciones de bordes para la construcción de los modelos numéricos para el análisis térmico y de estabilidad. Mediante el uso del software computacional de elementos finitos Plaxis, se realizó el modelo numérico térmico que permite analizar la transferencia de calor en el subsuelo. Para el estudio sobre el efecto en la estabilidad de taludes se usó el software Slope/W de Geoestudio, adicionalmente se desarrolló un modelo conceptual que muestra la progresión de la estabilidad de un talud en el tiempo cuando es sometido a ciclos de altas temperaturas que generan degradación de las propiedades mecánicas superficiales.

El Capítulo 7 presenta el análisis de los resultados de los modelos numéricos desarrollados, donde se determina la influencia de las alteraciones térmicas sobre la estabilidad de taludes en la zona.

El Capítulo 8 presenta un resumen de la investigación realizada y la discusión de los resultados obtenidos.

Por último, el Capítulo 9 destaca las principales conclusiones dando respuesta a los objetivos planteados y plantea recomendaciones y sugerencias para futuras líneas de trabajo.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Régimen térmico del suelo

La temperatura de la superficie de la Tierra varía a lo largo del año, dependiendo en parte de la latitud y de la altitud. Estas variaciones se relacionan principalmente con dos fuentes de energía, la solar y la geotérmica. En el caso de la energía solar, esta procede del exterior teniendo gran influencia en la superficie de la Tierra; por el contrario, la energía geotérmica calienta desde el interior y su influencia es menor (Alonso, 2017).

Las oscilaciones de temperatura del subsuelo, provocadas por las variaciones estacionales en superficie, son progresivamente atenuadas en profundidad. Con el registro de estas variaciones durante varios años, se construye el gráfico denominado “curva en trompeta”, debido a su forma como se muestra en la Figura 2, que representa la temperatura del subsuelo a cualquier profundidad.

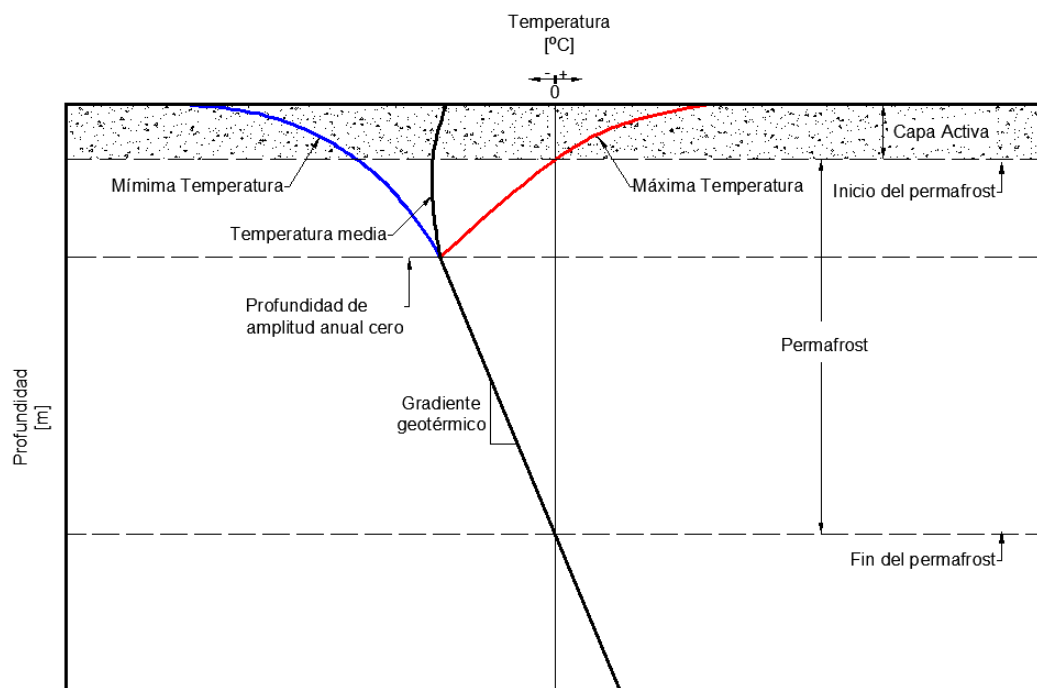


Figura 2. Curva de trompeta (Elaboración Propia)

2.2 Permafrost

El permafrost es definido como suelo o roca que permanece a una temperatura menor o igual a los 0°C, por lo menos dos años consecutivos en condiciones naturales (Van Everdingen, 2005). En general, el permafrost se suele asociar con hielo que puede presentarse de forma intersticial, ocupando poros o, de forma masiva, como lentes, cuñas y venas. Si a pesar de las bajas temperaturas, por ausencia de humedad, no se forma hielo, se denomina entonces “permafrost seco” (Dickson et al., 2016).

La Figura 2 muestra un ejemplo de distribución de temperaturas en un suelo con permafrost. La capa ubicada sobre el permafrost, conocida como “capa activa”, es aquella que está sujeta a ciclos de congelamiento y descongelamiento estacional. La profundidad del punto donde se intersectan las temperaturas máximas y mínimas se lo conoce como “profundidad de amplitud anual cero”. Por debajo de este punto, las temperaturas no están afectadas por los cambios que se producen en la superficie (variaciones no mayores a 0,1°C). A medida que se alcanza mayores profundidades, la temperatura

eventualmente comienza a aumentar debido al calor generado desde el interior de tierra que depende de gradiente geotérmico.

La formación, persistencia o desaparición del permafrost es altamente dependiente del clima. Sin embargo, la distribución espacial, temperatura y espesor del permafrost depende de la temperatura superficial del suelo, la cual puede ser afectada por diferentes factores ambientales naturales y/o disturbios antropogénicos que causen alteraciones en el régimen térmico del suelo. (Ahumada et al., 2010).

2.2.1 Distribución espacial del permafrost

Dependiendo del área cubierta por permafrost se distinguen cuatro tipos: permafrost continuo, permafrost discontinuo, permafrost esporádico y permafrost aislado.

- Permafrost continuo: Se produce en las zonas más frías (latitudes polares), se refiere a las zonas donde el suelo congelado subyace más de 90% de la superficie.
- Permafrost discontinuo: Se produce en las zonas ligeramente más cálidas, donde los suelos congelados subyacen del 50% al 90% de la superficie, mientras que ciertas características tales como ríos y laderas orientadas al sur pueden estar libres de hielo
- Permafrost esporádico: Es un tipo de permafrost discontinuo donde los suelos congelados subyacen entre el 10% a 50% de la superficie.
- Permafrost aislado: Es un tipo de permafrost discontinuo donde los suelos congelados subyacen menos del 10% de la superficie.

La Figura 3 muestra la distribución del permafrost en el hemisferio norte, encontrándose principalmente en Siberia, la meseta tibetana, Alaska, el Ártico Canadiense y otras regiones montañosas más altas, cubriendo cerca de un 25% de su superficie. En el hemisferio sur, el permafrost se encuentra en zonas elevadas, como los Andes de Sudamérica y los Alpes de Nueva Zelanda, y en zonas de la Antártida no cubiertas por el hielo glaciar. El permafrost que se encuentra en zonas montañosas se conoce como "permafrost de montaña" y su distribución mundial se muestra en la Figura 4.

En Sudamérica, el permafrost se extiende en buena parte en la Cordillera de los Andes, pudiendo existir unos 270,000 km² (Ferrando et. Al, 2000), es posible encontrar permafrost a 5,000 o 5,300 m.s.n.m, cuanto más al sur, se encuentra permafrost a altitudes más bajas, aproximadamente a 1,500 a 2,000 m.s.n.m. en el sur de Chile (Gorbunov, 1978).

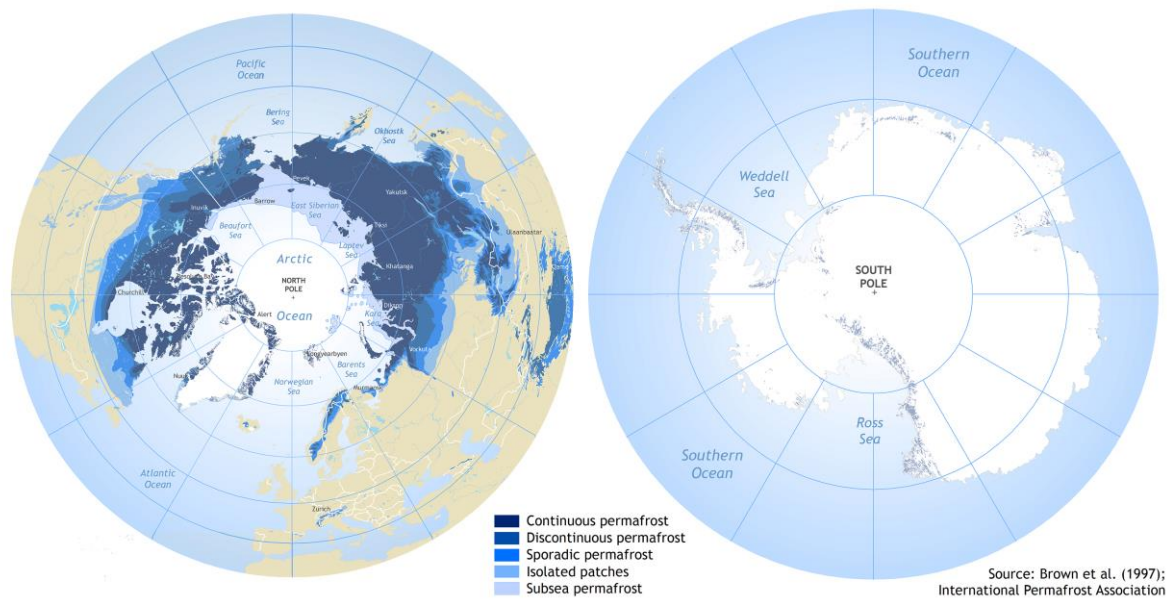


Figura 3. Distribución de permafrost circumpolar. Los tonos más oscuros de azul indican porcentajes más grandes de suelo con permafrost. Los azules más claros indican permafrost discontinuo donde existen porcentajes más bajos (Brown et. al.,1997)

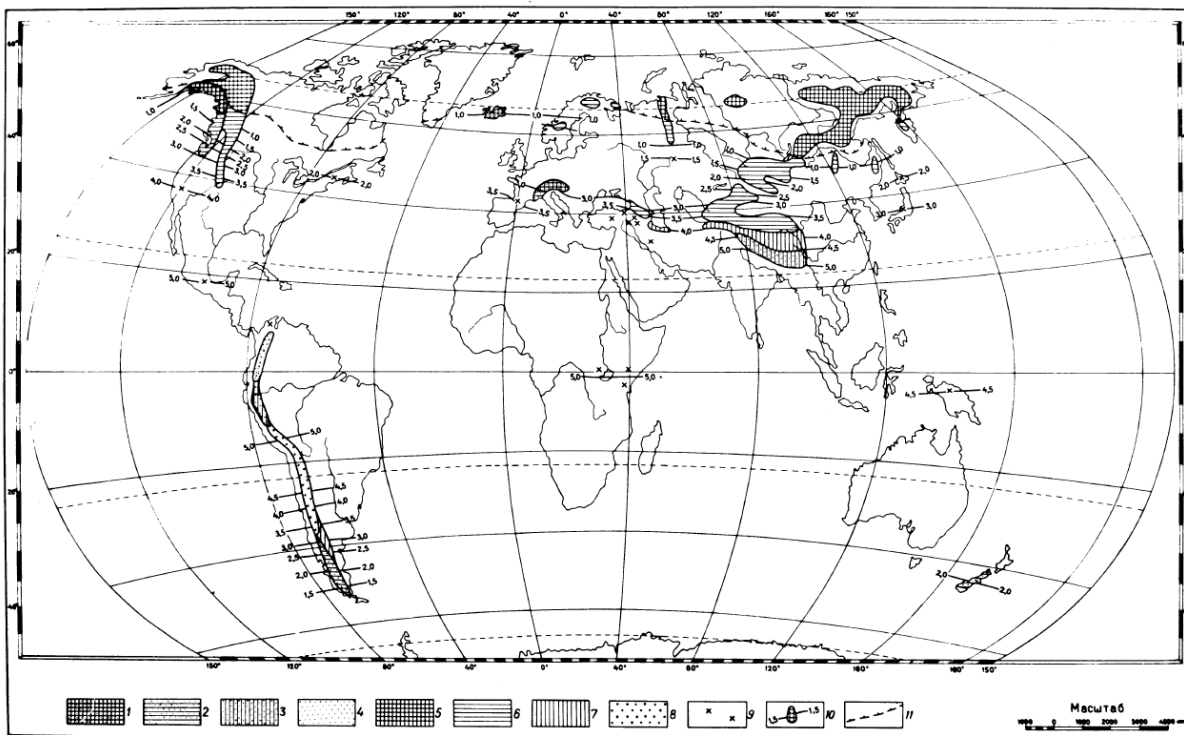


FIGURE 2. Schematic map of world distribution of mountain permafrost and geocryological types. (1) Chugach, (2) New Zealand, (3) Himalayan, (4) Ecuadorian, (5) Verkhoyansk, (6) Tien Shan, (7) Tibetan, (8) Central Andean, (9) individual summits with permafrost, (10) absolute height of permafrost boundary, (11) southern boundary of the northern latitudinal permafrost zone in the lowlands.

Figura 4. Mapa esquemático de la distribución mundial del permafrost en alta montaña (Gorbunov, 1978)

2.2.2 Tipos de hielo en el permafrost

El contenido de hielo del permafrost es una de las características más importantes. Generalmente, se forma por la presencia de agua subterránea o infiltración de agua superficial, que se mantiene en el suelo y posteriormente se congela. Existen varios tipos de hielos, se detallan los más comunes a continuación:

Hielo enterrado: Es el hielo formado o depositado en la superficie del terreno, que años más tarde fue cubierto por sedimentos. El hielo enterrado es comúnmente compuesto por hielo glaciar enterrado o bancos de nieve o avalanchas de nieve enterradas. Asimismo, pero menos comúnmente, el hielo enterrado puede provenir de hielo de lago, río, mar o icings. (Trombotto et. al, 2014)

Hielo intrusivo: También conocido como *injection ice*, es hielo formado por agua subterránea inyectada a presión en suelos o rocas. Se desarrolla usualmente en sedimentos porosos no consolidados o en juntas de rocas fracturadas, formando cuerpos de hielo tabulares, diques o pingos. (Trombotto et. al, 2014; Harris et. al, 1988)

Hielo segregado: Conocido como *ice lens*, es hielo en forma de capas o lentes discretas como se muestra en la Figura 5, formado por la migración de agua intersticial desde el suelo no congelado hacia zonas congeladas con hielo efecto conocido como criosucción. Su espesor puede variar desde fracciones de milímetros hasta metros y provoca levantamiento por congelamiento conocido como *frost heave* en inglés. Ocurre generalmente en capas alternadas de suelo y hielo. (Trombotto et. al, 2014; Harris et. al, 1988)

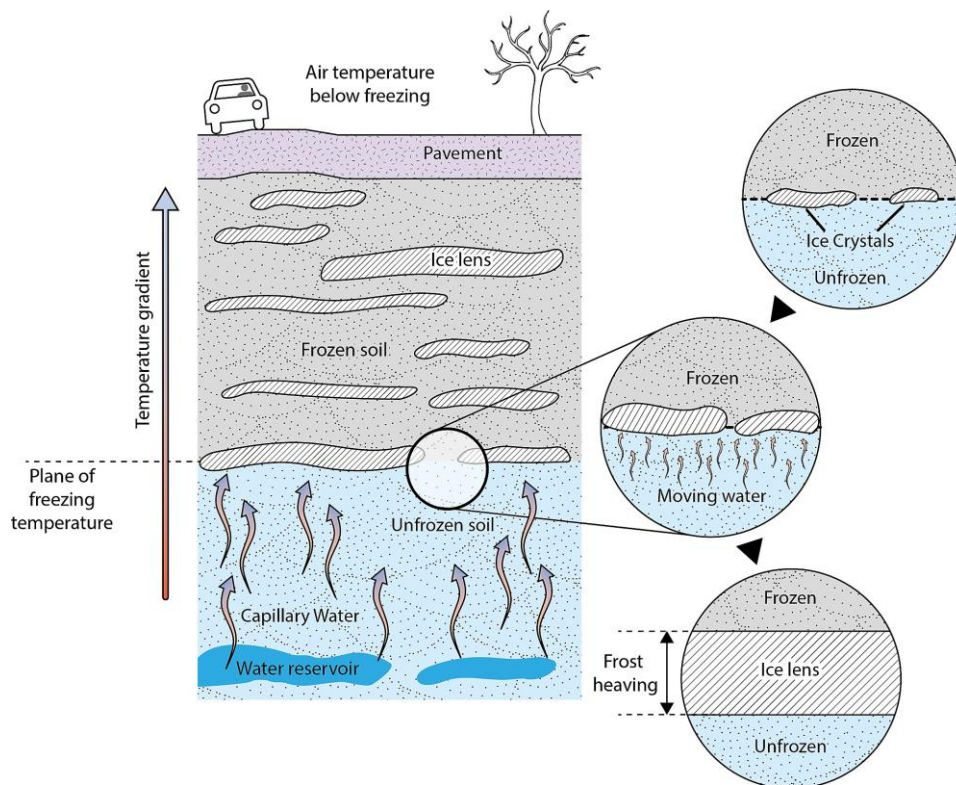


Figura 5. Representación esquemática de formación de hielo segregado y sus consecuencias (Deville, 2016)

Cuña de hielo: Es un cuerpo de hielo macizo en forma de cuña, cuyo ápice apunta hacia abajo como se muestra en la Figura 6. Está compuesta de bandas de hielo blanco distribuidas verticalmente y en forma foliada. El tamaño de las cuñas de hielo varía entre 10 cm a más de 3 m de ancho en la superficie y disminuye considerablemente hasta llegar a ser un filo de hielo a una profundidad entre 1 y 10 m. Las cuñas de hielo se forman en grietas de contracción térmica en las que se depositan nieve y se acumula agua de derretimiento durante la primavera. Posteriores ciclos de congelamiento y descongelamiento aumentan el ancho, y posiblemente la profundidad de la cuña. (Trombotto et. al, 2014)

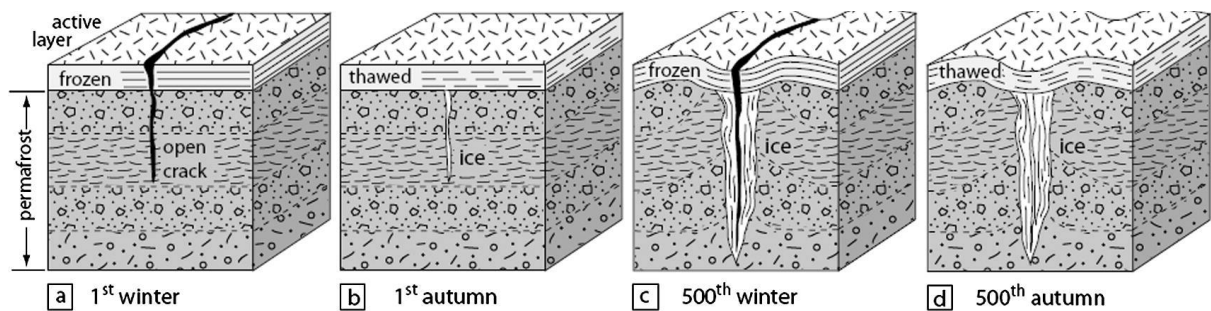


Figura 6. Esquema de desarrollo de cuñas de hielo: (a) fisuración anual (invierno); (b) relleno anual (primavera o verano) por agua de deshielo (c) congelación (anual) de agua de deshielo en grietas y la formación de cuñas de hielo progresivamente más anchas y profundas (Soare et. Al, 2014)

2.2.3 Diferencias del permafrost en zonas polares y tropicales

El permafrost es un fenómeno natural que está sujeto a la zonificación geográfica, en la Figura 7 se identifica dos áreas principales: el área circumpolar (ártico, antártico, subártico, subantártico) y áreas tropicales (trópicos, zonas subecuatoriales, y zonas ecuatoriales). Los círculos polares se encuentran a 66° 33' al Norte (Círculo Polar Ártico) y 66° 33' al Sur (Círculo Polar Antártico), donde los rayos de sol llegan de forma oblicua haciendo que los días sin sol aumenten hasta llegar a los polos, en general las zonas polares tienen siempre temperaturas muy bajas. Los Trópicos están situados a 23° 27' al Norte (Trópico de Cáncer) y 23° 27' al Sur (Trópico de Capricornio), donde los rayos del sol inciden perpendicularmente al mediodía al menos un día al año, en general la zona tropical tiene temperaturas elevadas (excepto en las regiones de mucha altitud).

En este contexto, según Yoshikawa et al. (2018), las diferencias entre el permafrost tropical y el circumpolar son las siguientes:

- En la zona tropical, las variaciones de temperatura estacional son mínimas provocando que la capa activa sea aproximadamente de 20 a 40 cm de espesor, mientras que en las zonas polares la capa activa puede llegar a espesores de hasta 100 cm.
- En zonas tropicales la variación diaria de temperatura (entre el día y la noche) en la superficie es amplia y se mantiene casi constante durante el año, mientras que en las zonas polares la temperatura se mantiene constante durante el día, y su variación estacional es pronunciada.
- En zonas tropicales la fuerte radiación solar de onda corta y capa de nieve delgada facilita la degradación del permafrost.

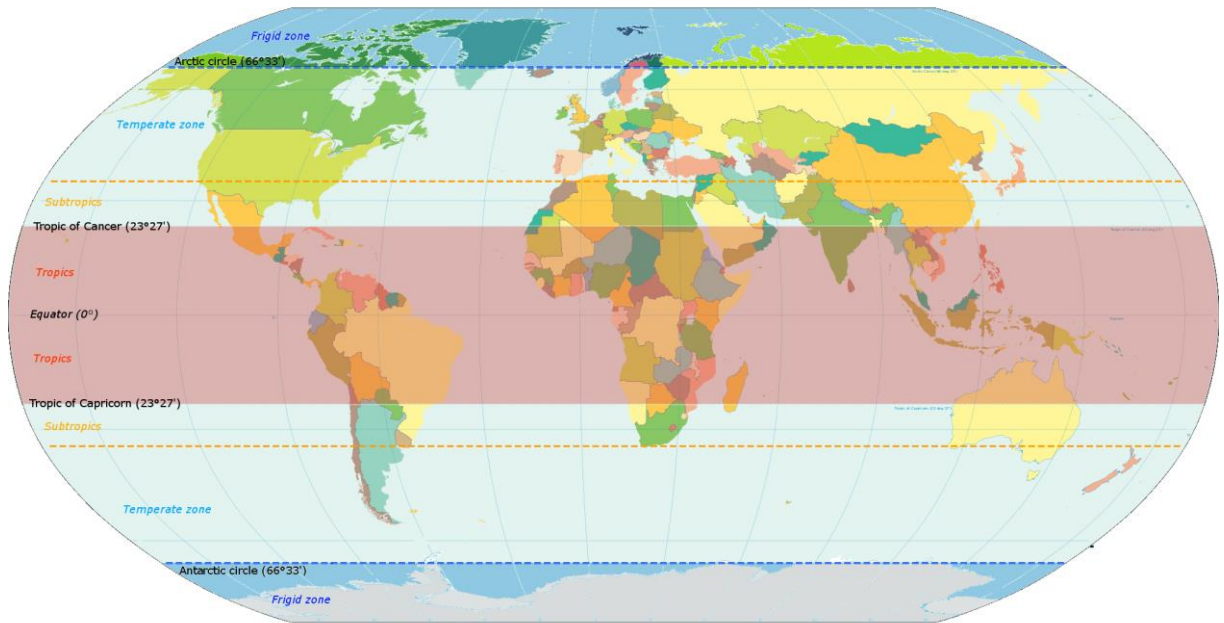


Figura 7. Esquema de distribución de climas por zonas latitudinales (Maulucioni, 2014)

2.2.4 Efectos de ciclos de congelamiento y descongelamiento en las propiedades mecánicas y la estabilidad de taludes

En el diseño de obras ingenieriles, es importante considerar que las propiedades mecánicas de los materiales pueden verse afectados por los ciclos de congelamiento y descongelamiento. De acuerdo a Chen et al. (2017), la resistencia al corte en roca está influenciada por factores externos como la temperatura, especialmente las rocas con alto contenido de humedad y baja rigidez. Los ciclos de congelamiento y descongelamiento inducen el desarrollo de fracturas (Figura 8) que degradan las propiedades físicas y mecánicas de la roca provocando la reducción de la resistencia y por ende favorecen el deslizamiento de taludes. A medida que los ciclos de congelamiento y deshielo aumentan, la cohesión y el ángulo de fricción decrecen, decayendo a un valor cuasi constante después de algunos ciclos como se muestra en la Figura 9.

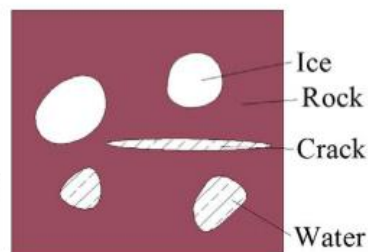


Figura 8. Disposición espacial del agua y hielo en roca (Haung et al., 2015)

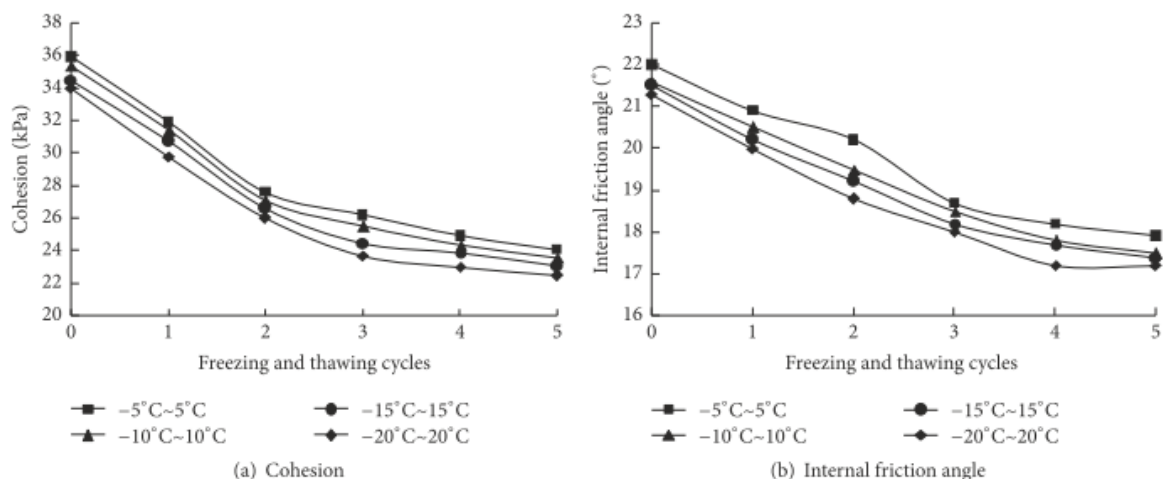


Figura 9. Cambio de la cohesión y ángulo de fricción interna con los ciclos de congelamiento y deshielo (Chen et al., 2017)

Nater et al. (2008) señalan que un constante desafío en el diseño de taludes con permafrost es asignar valores adecuados de ángulo de fricción y cohesión al suelo, donde esta última representa el efecto cementante entre el hielo y las partículas de suelo. El agua en los poros del suelo cambia de fase a medida que la temperatura alcanza el punto de congelación, distinguiéndose tres estados diferentes mostrados en la Figura 10:

Estado no congelado: los espacios vacíos esta llenos de agua en estado líquido, el suelo se comporta como cualquier suelo no congelado, drenado en caso de arena y no drenado en caso de arcillas y limos. La componente cohesiva puede ser nula (*unfrozen* en Figura 10).

Estado con presencia de hielo y agua: El efecto cementante de la cohesión está presente en algunos espacios vacíos y el contacto entre partículas es completo con aporte friccional alto (*partially frozen* en Figura 10).

Estado congelado: las partículas tienen menor contacto entre si dentro de la matriz de hielo. En este estado, el aporte friccional a la resistencia bajo, de modo que el componente activo es la cohesión (*frozen* en Figura 10).

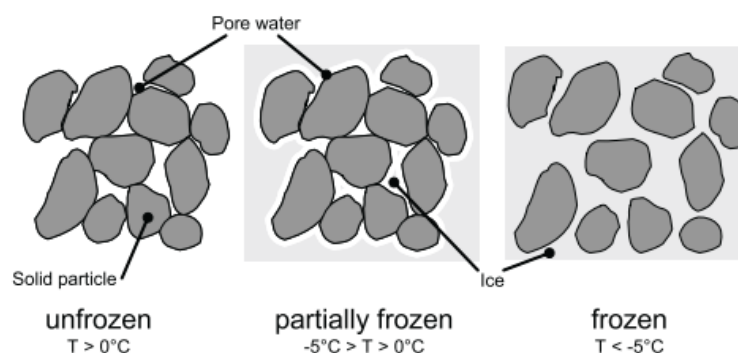


Figura 10. Diferentes estados del agua en suelos con permafrost (Nater et al., 2018).

Arenson et al. (2004) y Areson & Springman (2005) realizaron una serie de ensayos de compresión triaxial en muestras no alteradas de suelos alpinos con permafrost, es decir suelos con fragmentos de

roca y material fino, a temperatura y contenido volumétrico de hielo controlado. Los resultados presentados en la Figura 11 muestran que el ángulo efectivo de fricción interna disminuye con el contenido volumétrico de hielo, mientras que la cohesión aumenta

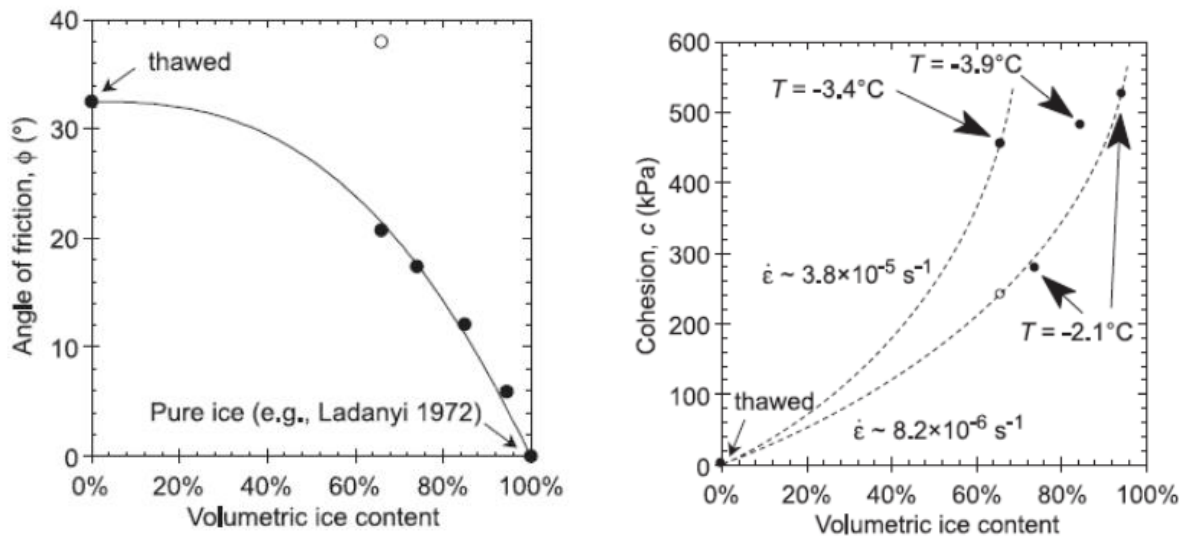


Figura 11. Ángulo de fricción interna efectivo y la cohesión en función del contenido volumétrico de hielo. (Areson & Springman, 2005)

Qi et al. (2006) y Kumar et al. (2018) mencionan que los efectos de los procesos de congelación y descongelación en las propiedades físicas y mecánicas en diferentes tipos de suelos son:

- El contenido de agua del suelo aumenta el impacto de los ciclos de congelación y descongelación de los suelos. Las propiedades como el índice de plasticidad, densidad, peso unitario, etc., se ven afectadas por los ciclos.
- La relación de vacíos en suelos densos aumenta mientras que para los suelos sueltos la relación de vacíos disminuye.
- La permeabilidad de los suelos aumenta con cambio en la relación de vacíos. Se cree que el aumento se debe al desarrollo de grietas y a los grandes espacios vacíos que quedan cuando el hielo se descongela.

De acuerdo Coltkbr (2006), en suelos arcillosos y limosos, la fusión de hielo en agua genera presiones de poro significativas que pueden ser suficientes para reducir los esfuerzos efectivos del suelo hasta cero, llevando a una completa pérdida de la resistencia durante el periodo de descongelamiento. El diseño de taludes en permafrost para estos materiales se basa en asegurar que ningún aumento en la presión de poros durante el descongelamiento sea suficiente para desestabilizar el talud o reducir el factor de seguridad estimado.

2.3 Transferencia de calor en suelo

La transferencia de calor se refiere al intercambio de energía que ocurre entre cuerpos como resultado de una diferencia de temperaturas. La transferencia de calor en los suelos involucra múltiples procesos, entre los que destacan los mecanismos de conducción, convección y radiación. La importancia de cada uno de éstos depende directamente de las fracciones de sólidos, agua o aire que haya presentes en el suelo, así como también del tamaño de partículas. De acuerdo a Alrtimi (2016), la transferencia de calor en los suelos normalmente está dominada por la conducción, con la convección desempeñando un papel importante únicamente en los suelos altamente permeables. Considerando el suelo como un medio homogéneo e isótropo, en el que el calor fluye por conducción solo en dirección vertical. La cantidad de calor que fluye por conducción obedece la ley de Fourier expresada por la ecuación (2.1):

$$q = -k \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Donde:

q	Vector flujo de calor por unidad de superficie [W/m ²]
k	Conductividad térmica [W/m/K]
ΔT	Gradiente de temperatura [K]

Tart (1996) indica que la conducción es el proceso dominante de transferencia de calor del suelo; sin embargo, el flujo de calor por conducción también debe ir acompañado de una evaluación de la liberación o adsorción de calor resultante de los cambios de fase del agua conocido como calor latente. Adicionalmente, se conoce que la ecuación (2.2) describe la difusividad tridimensional en un medio homogéneo.

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

Donde:

α	Difusividad térmica [m ² /s]
$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$	Lapaciano del campo de temperatura
$\frac{\partial T}{\partial t}$	Variación de temperatura con el tiempo [K/s]

2.3.1 Conductividad térmica [k]

La conductividad térmica o habilidad del suelo para transferir calor por conducción molecular es una propiedad intrínseca. Se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura (Çengel, 1997). La conductividad térmica global de suelos que contienen gran cantidad de minerales depende, básicamente, de las diferentes conductividades que lo componen (Rubio et al, 2011). En la Tabla 1 se presentan valores de conductividad térmica reportados en literatura para diferentes materiales.

2.3.2 Difusividad Térmica [α]

La ecuación (2.3) se la conoce como coeficiente de difusividad térmica (α), que es una medida de la velocidad de propagación del calor en el medio debido a cambios de temperatura. En la Tabla 1 se presentan valores de difusividad térmica reportados en literatura para diferentes materiales.

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.3)$$

Donde:

α Difusividad Térmica [m^2/s]

k Conductividad térmica [$W/m/K$]

ρ Densidad [kg/m^3]

C_p Calor específico del material [$J/kg/K$]

2.3.3 Calor específico [C_p]

El calor específico se define como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa (Çengel, 1997). En la Tabla 1 se presentan valores de calor específico reportados en literatura para diferentes materiales.

Tabla 1. Propiedades térmicas de diferentes tipos de materiales que conforman el suelo.

Material	K Conductividad Térmica [W/m/K]	C_p Calor específico [J/kg/K]	α Difusividad Térmica [$m^2/s \cdot 10^{-7}$]
Arena seca	0.3-0.8	920	2.3
Arena Saturada	1.7-5	1390	
Arcilla/Limo seco	0.4-1	1340	2.5
Arcilla/Limo saturado	0.9-2.3	2850	
Ignimbrita	0.28-0.90	800 - 1200	1.70 – 6.60

Referencias: Seward et al., 2013; Kuznetsova, 2017; Campbell, 1985

3 CASO DE ESTUDIO – CERRO CHAJNANTOR

The University of Tokyo Atacama Observatory, conocido por sus siglas en inglés como TAO, es un proyecto avaluado en más de 70 millones de dólares, que pretende construir un telescopio infrarrojo de 6.5 metros de diámetro en la cima del cerro Chajnantor, en el desierto de Atacama, Chile, convirtiéndose así en el observatorio astronómico más alto del mundo.

En la cumbre del cerro está instalado el Mini-TAO, telescopio de un metro de diámetro puesto en operación en el 2009, que ha permitido probar la tecnología que aplicarán en el telescopio mayor. Debido al gran tamaño de las estructuras ópticas y del espejo de 6.5 metros de diámetro, actualmente se encuentra en ejecución el ensanchamiento del camino de acceso a la cima del cerro. En la presente sección se reporta información geológica y geotécnica de la zona de estudio, así como también información general del proyecto.

3.1 Ubicación de la zona de estudio

TAO se encuentra ubicado en el Cerro Chajnantor coordenadas UTM 22°59'11.18"S, 67°44'32.03"O a 50 Km de San Pedro de Atacama, en la Región Antofagasta, Chile, como se muestra en la Figura 12. El cerro alcanza los 5,640 metros de altura sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

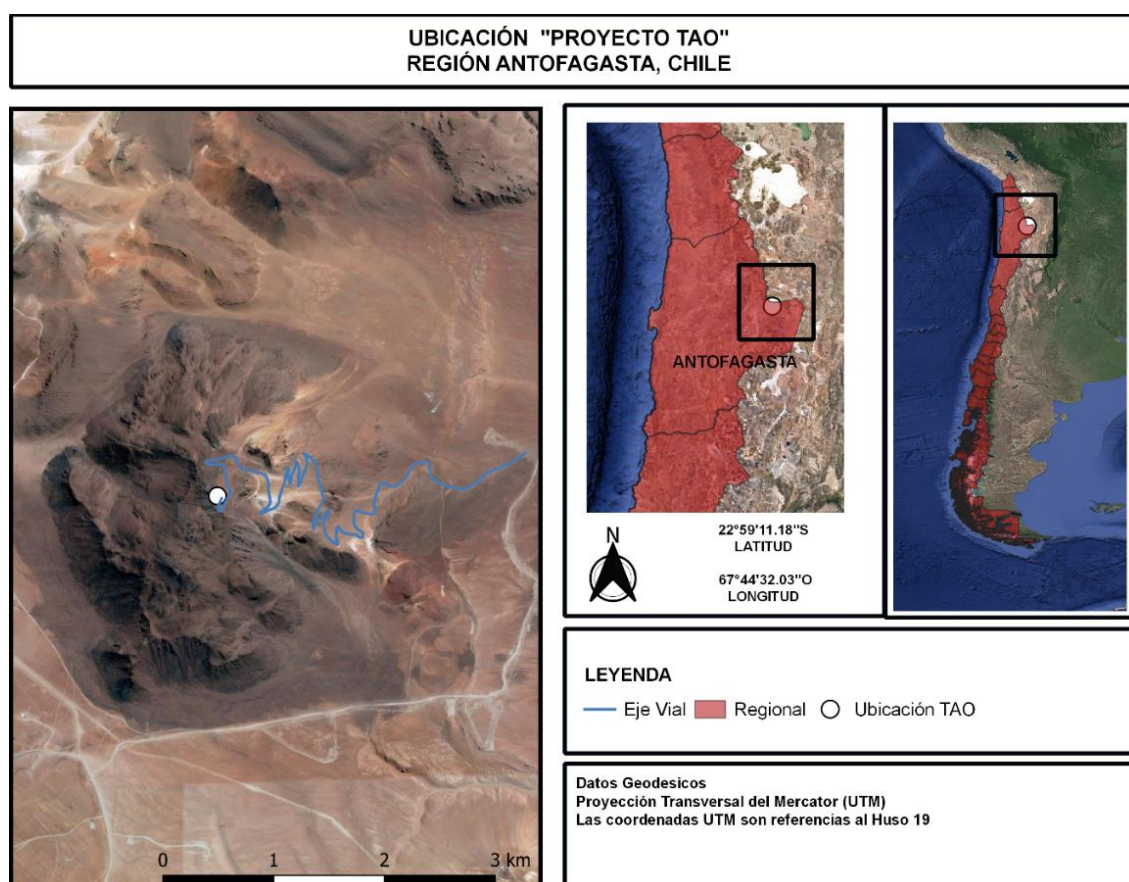


Figura 12. Mapa de ubicación del proyecto TAO (Elaboración propia)

3.2 Geología de la zona de estudio

La geología de la zona en estudio se encuentra en la carta geológica, Hoja Calama, Región Antofagasta (U.T.M., escala 1:250,000), la cual cubre un área de 13,000 km², ubicada entre los 22° y 23° latitud sur y los 69°30' longitud oeste y la frontera con Bolivia.

Las unidades morfológicas expuestas en la Figura 13 de la Hoja Calama se agrupan en formaciones cuyas edades que varían entre el Paleozoico y el Cuaternario. Estas unidades cubren el 60% del área y se distribuyen en cinco dominios morfoestructurales: Sierra del Medio – Sierra Limón Verde, Depresión del Río Loa, Cordillera de Domeyko, Cordillera de la Sal, Pre cordillera – Cordillera de los Andes. (Marovic S. & Lahsen A., 1984).

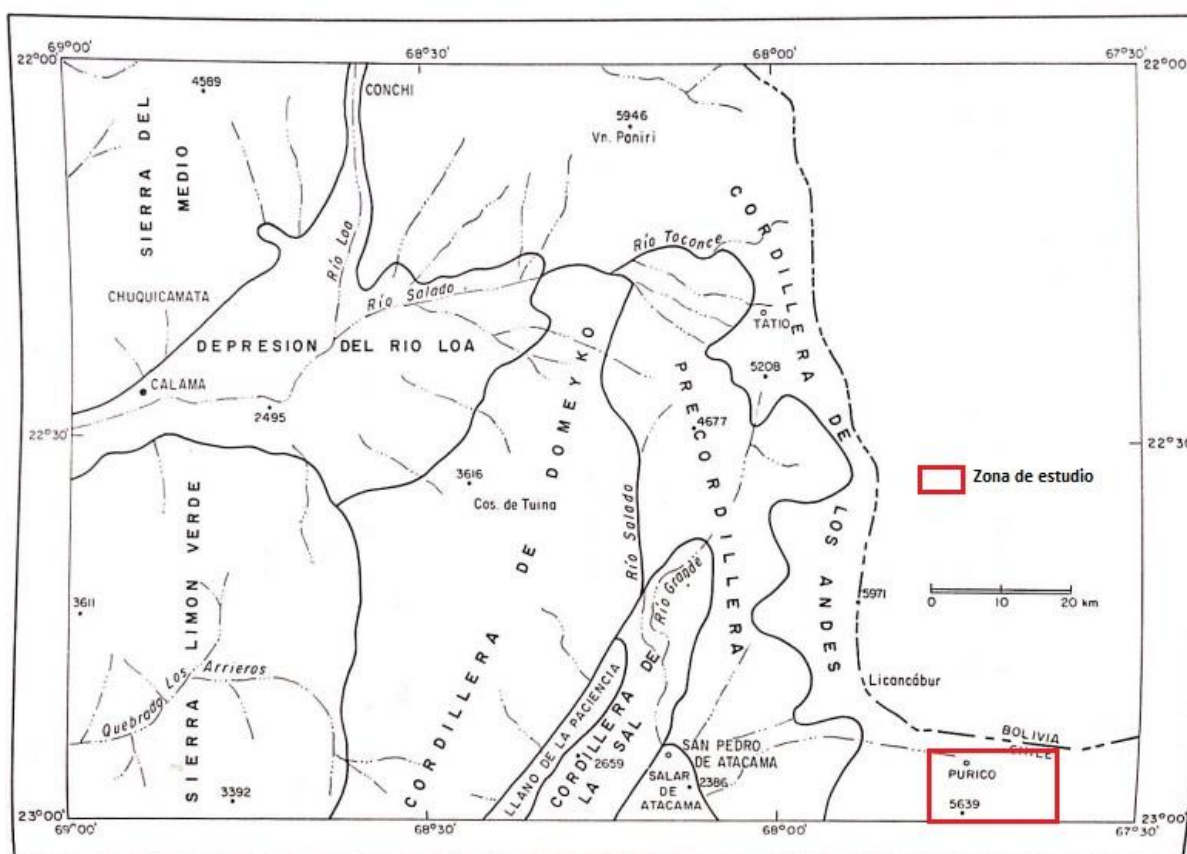


Figura 13. Unidades morfológicas de la Hoja Calama, cuadro rojo enmarca la zona de estudio. (Adaptado de: Carta Geológica, Hoja Calama, 1984)

En la Figura 13 el cuadro rojo encierra la zona del proyecto, donde se observa que pertenece a la unidad Precordillera y Cordillera de los Andes, la cual está constituida, principalmente, por rocas volcánicas del Cenozoico superior, que cubren una superficie aproximada de 3,500 km². Estas rocas volcánicas se disponen, mediante discordancia angular y de erosión, sobre secuencias mesozoicas y cenozoicas como se muestra en la Figura 14, que emergen como cerros-islas entre la cubierta de ignimbritas, o bien, afloran en el fondo de las quebradas.

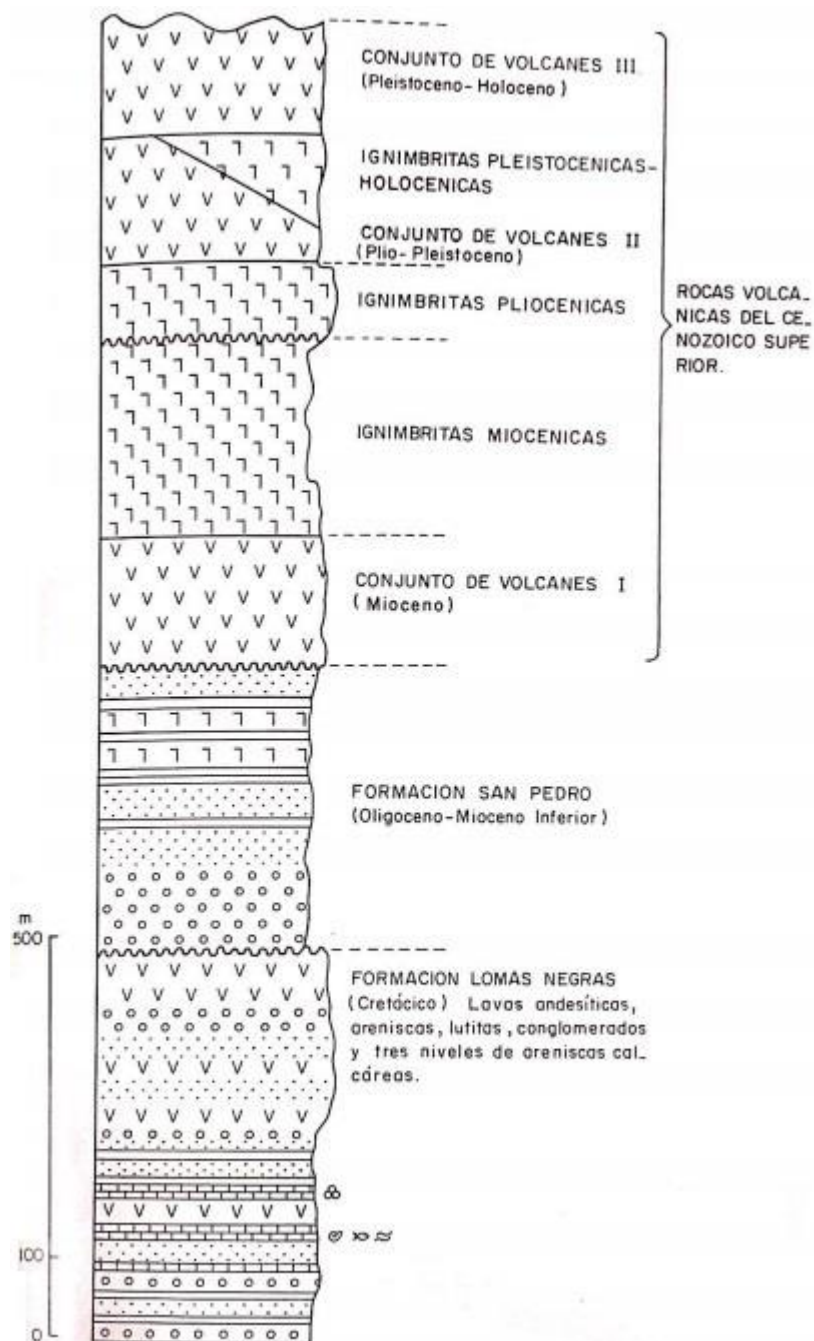


Figura 14. Columna estratigráfica generalizada de la Precordillera y Cordillera de los Andes (Carta Geológica, Hoja Calama, 1984)

Las ignimbritas de la Hoja Calama son de composición principalmente andesítica y dacítica, de colores gris, rosado y pardo claro, que se distribuyen en una superficie cercana a los 1,700 km². Algunas ignimbritas presentan patrones de diaclasamiento superficial que son característicos y aparecen cortadas por quebradas profundas, subparalelas o radiales, controladas por fallas y/o fracturas, originadas por procesos tectónicos y/o por tensiones, durante el enfriamiento de los flujos (Guest, 1969).

Sobre la base de las características petrográficas (contenido y tipo de cristales y matriz), presencia y tipo de pómez o "fiamme", grado de soldamiento, patrón de diaclasamiento, distribución areal y posición estratigráfica, se han distinguido trece unidades de ignimbritas, las que se han agrupado en tres

edades: Ignimbritas Miocénicas, Ignimbritas Pliocénicas, Ignimbritas Pleistocénicas. Estas unidades litoestratigráficas están, generalmente, integradas por varios flujos de piroclásticos, los cuales pueden constituir una o más unidades de enfriamiento, a veces, separadas por depósitos de lluvias de cenizas, o bien, por depósitos de arenas y gravas.

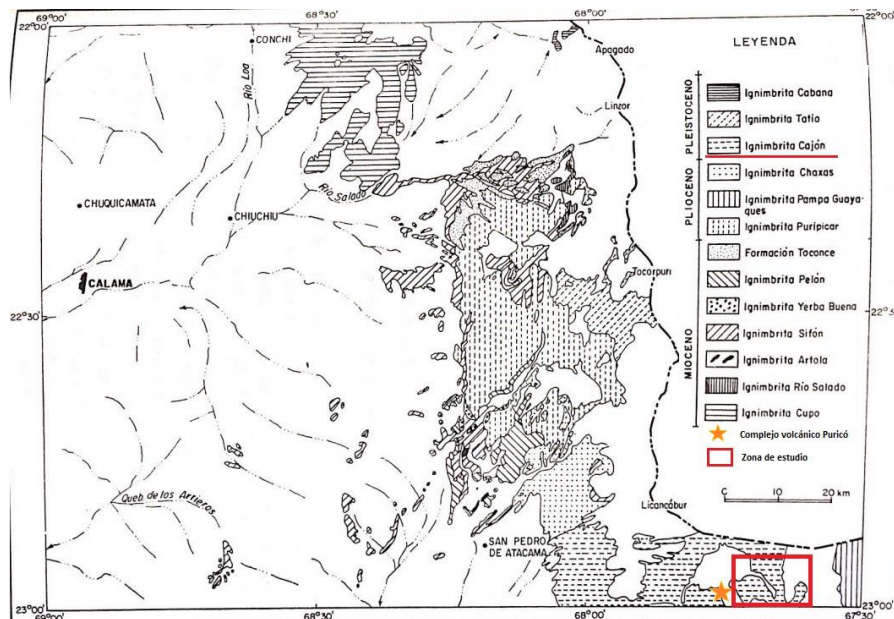


Figura 15. Distribución de las ignimbritas de la Hoja Calama (Adaptado de: Carta Geológica, Hoja Calama, 1984)

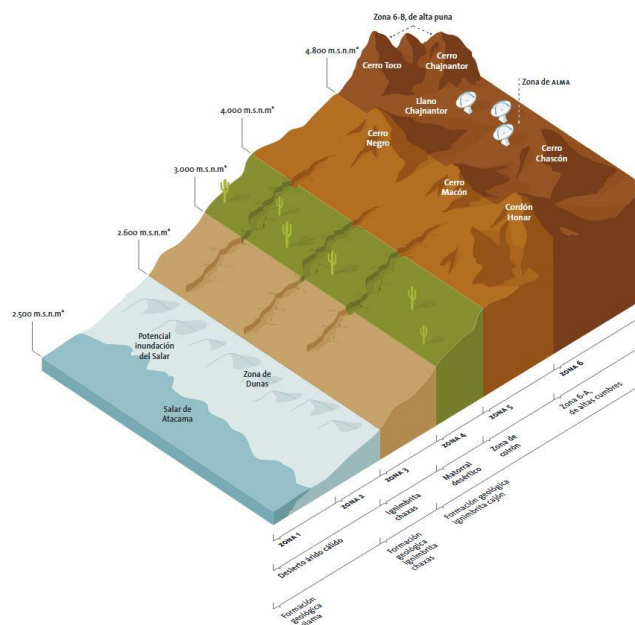


Figura 16. Distribución de las ignimbritas en la zona de estudio (Heisig, 2007)

Como se observa en la Figura 15 y la Figura 16, la conformación geológica predominante en la zona de proyecto la constituye la Ignimbrita Cajón, la cual se distribuye radialmente, a partir del complejo Volcánico de Puricó desde donde se considera fue emitida (Ramírez y Gardeweg, 1982). Litológicamente, la Ignimbrita Cajón corresponde a depósitos de flujos de cenizas, de colores pardo-amarillento y gris-blancuecino; probablemente emitidos en un corto lapso, ya que, en casi todos los afloramientos estudiados, constituye una sola unidad de enfriamiento.

3.3 Información geotécnica

El camino de acceso al cerro Chajnantor tiene una longitud de 8.23 Km de distancia desde la base hasta la cima del cerro, como se muestra en la Figura 17. Para el reconocimiento del material que compone los taludes de corte del camino de acceso a la cima del cerro Chajnantor, se cuenta con un informe de prospección geotécnica, realizado por Asistecsa (2018), donde se detalla apreciaciones geotécnicas y geomecánicas preliminares realizadas a partir de una visita de inspección en septiembre del 2017 y de una campaña de exploración geotécnica realizada durante el año 2018. En la campaña se planeó realizar sondajes ubicados en diferentes puntos y cotas del trazado de la vía, como se muestra en la Figura 17. En la Tabla 2 se detalla las coordenadas, altitud y profundidad de las prospecciones.



Figura 17. Vista en planta camino de acceso proyecto TAO. Ubicación de sondajes (Google Earth)

Tabla 2. Información de ubicación y profundidad de prospecciones

Sondaje	Distancia acumulada [m]	Elevación [m.s.n.m]	Profundidad [m]
ST-1	3,700	5,200	2.0
ST-2	4,550	5,300	10.5
ST-3	4,900	5,325	10.1
ST-4	5,200	5,342	10.3
ST-5	5,500	5,387	6.0
ST-6	5,700	5,390	9.0*
ST-7	6,300	5,440	-**

* Sondaje no culminado hasta la fecha de elaboración del informe Asistecsa 2018
 ** Sondaje aun no realizado hasta la fecha de elaboración del informe Asistecsa 2018

De los 7 sondajes planificados, se cuenta con información del registro estratigráfico, ensayo RQD y resistencia a la compresión, únicamente de los sondajes ST2, ST-3, ST4 y ST-5, información resumida en la Tabla 3 y Figura 18.

Tabla 3. Resumen de información de los sondajes

Sondaje	Profundidad [m]		R ¹ [%]	RQD ² [%]	RCS ³ [MPa]	Densidad [kg/m ³]
	ST-2	0.00	0.60	93	-	-
0.60		3.00	62	20	9.8	2.21
3.00		4.50	100	66	14.7	2.25
4.50		6.10	91	74	23.0	2.25
6.10		7.60	83	63	16.8	2.20
7.60		9.00	101	89	-	-
9.00		10.05	88	78	5.7	2.13
ST-3	0.00	1.30	92	18	-	-
	1.30	3.20	63	37	-	-
	3.20	3.87	90	69	-	-
	3.87	5.37	60	0	-	-
	5.37	6.84	100	0	-	-
	6.84	8.20	88	10	-	-
	8.20	10.10	100	67	17.3	2.33
ST-4	0.00	0.60	100	0	-	-
	0.60	1.50	52	0	-	-
	1.50	2.00	60	0	-	-
	2.00	3.20	67	0	1.3	1.94
	3.50	4.50	42	11	-	-
	4.50	5.70	100	33	-	-
	5.70	7.35	82	71	11.5	1.94
	7.35	8.45	-	60	-	-
	8.45	10.30	-	10	-	-
ST-5	0.00	1.20	100	80	-	-
	1.20	2.50	92	80	-	-
	2.50	4.00	87	90	-	-
	4.00	6.00	100	80	-	-

¹ R [%]: Porcentaje de recuperación de la muestra

² RQD [%]: Rock Quality Designation.

³ RCS: Resistencia a la compresión axial.

Referencia: Asistecsa, 2018

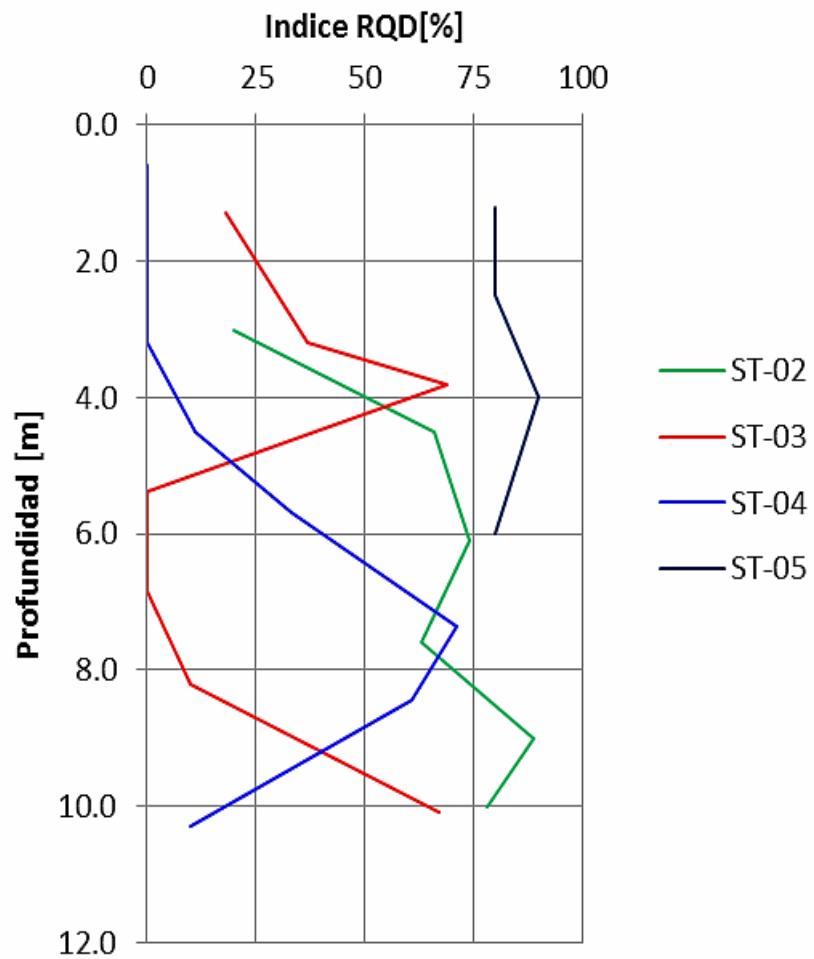


Figura 18. Nivel de fracturación. Ensayo RQD. (Recuperado de Prospección geotécnica, Asistecsa, 2018)

Todos los registros estratigráficos y fotográficos detallados se presentan en el Anexo A. Registros de sondajes Asistecsa, 2018

3.4 Descripción de los taludes

Para la descripción de los materiales que conforman los taludes, su distribución espacial, geometría e inestabilidades presentes a lo largo del camino de acceso, se cuenta con registros fotográficos obtenidos en la visita de campo realizada el 5 de marzo del 2019 y los siguientes informes:

- TAO permafrost project report, Kenji Yoshikawa, 2018
- Visita técnica cerro Chajnantor, Asistecsa, 2018
- Análisis de estabilidad de taludes, Asistecsa, 2018
- TAO project curve report, Kenji Yoshikawa, 2019
- Análisis de estabilidad de taludes (Modifica taludes), Asistecsa, 2019
- TAO permafrost project report, Kenji Yoshikawa, 2019

Se reporta que la geometría general de los taludes de corte es 3V:1H, con bancos de 3 m de ancho cada 10 m de altura de corte. En la Figura 19, tomada desde la base (kilómetro 0), se puede apreciar la cara este del cerro Chajnantor, donde el material característico corresponde a roca volcánica en general ignimbrita y toba volcánica.



Figura 19. Cara este del cerro Chajnantor.

Desde el kilómetro vial 1.2 a 4,950 m.s.n.m aproximadamente, hasta llegar el kilómetro 2.9 a 5,084 m.s.n.m, se evidencia suelo coluvial conformado por gravas y arenas, con clastos y fragmentos de roca de tamaños variables. No presenta plasticidad, de muy baja a nula cohesión y con una condición seca a poca humedad. El talud en esta zona es de baja altura (< 10 m), razón 3V:2H, y no existe indicios de inestabilidad.

A partir del kilómetro 3.42 a 5,165 m.s.n.m, el material está compuesto por material rocoso altamente meteorizado, en la Figura 20 se observa bloques angulosos de roca alterada, de tamaño variable así como también arena y gravas de baja cohesión y humedad moderada. En el kilómetro 3.42 el talud alcanza la altura máxima de 20 m, el cual se reduce hasta los 10 m de altura, conforme se avanza hasta el kilómetro 3.66. No existen reportes de inestabilidad.



Figura 20. Vista del talud ubicado en el kilómetro 3.4 del camino de acceso la cima de cerro Chajnantor. (Recuperado de: Yoshikawa, 2018)

En la Figura 21 se muestra una vista isométrica del talud ubicado en el kilómetro 3.70 a 5,200 m.s.n.m, donde se observa que este se encuentra en un cause de lavas y depósitos piroclásticos emitidos por las erupciones volcánicas (circunferencia roja). En los informes se reporta que los taludes en esta zona presentan problemas de estabilidad, correspondientes a desprendimientos, de bloques de roca y suelo, de manera local en la parte superior e intermedia del talud, lo cual genera socavones y cornisas como se muestra en la Figura 22. La zona se caracteriza por poseer alto contenido de hielo segregado e intrusivo como se muestra en la Figura 23.

En la Figura 24a se observa la disposición espacial de los materiales que conforma el talud ubicado en el kilómetro 3.7, que se encuentra conformado por bloques angulosos de roca alterada, de tamaño variable así como también material granular como ignimbrita de color blanco, arena y gravas de baja cohesión y humedad moderada a alta debido a la presencia de hielo, mostrando que los materiales varían tanto vertical como lateralmente. La geometría y materiales reportados en los informes previamente mencionados se encuentran representados en la Figura 24b.

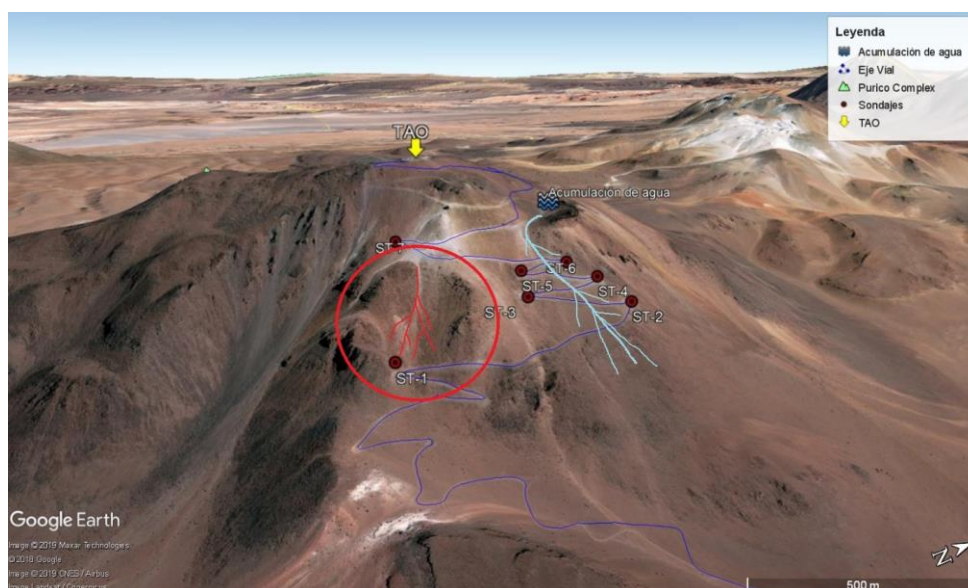


Figura 21. Vista isométrica del talud ubicado en el kilómetro 3.70. La circunferencia roja muestra el cauce de flujo piroplástico donde se encuentra el talud. La línea celeste esquematiza la trayectoria del flujo del agua proveniente del derretimiento de nieve acumulada.



Figura 22. Reconocimiento de problemas de estabilidad en el kilómetro 3.70 del camino de acceso. Todas las imágenes ubicadas en la izquierda fueron tomadas el 2018, las imágenes de la derecha en el 2019. (Fotografías adaptadas de Yoshikawa, 2018-2019)



Figura 23. Tipos de hielo dentro de los taludes en el km 3.7. a) Hielo segregado b) Hielo intrusivo (Recuperado de: Yoshikawa, 2018)

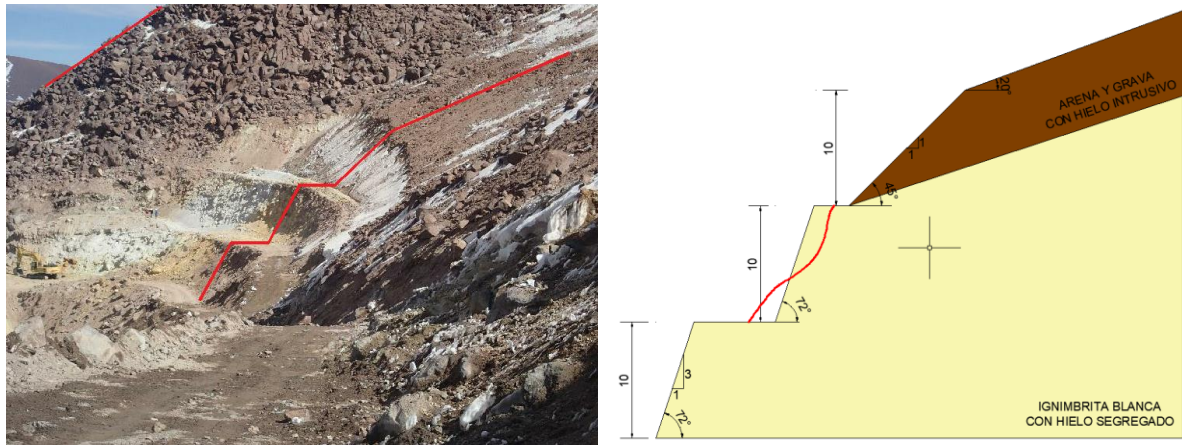


Figura 24. a) Vista del talud ubicado en el kilómetro 3.70 del camino de acceso, b) Esquema de geometría y la forma de falla del talud DM 3+700 a partir de información geométrica reportada en los informes. (Fotografía adaptada de: Yoshikawa, 2018)

A partir del kilómetro 3.9 la cobertura de suelo granular es menor y se presenta expuesta la roca volcánica que superficialmente está altamente meteorizada con juntas muy abiertas, la geometría y distribución de materiales reportados se encuentra representado en la Figura 25.

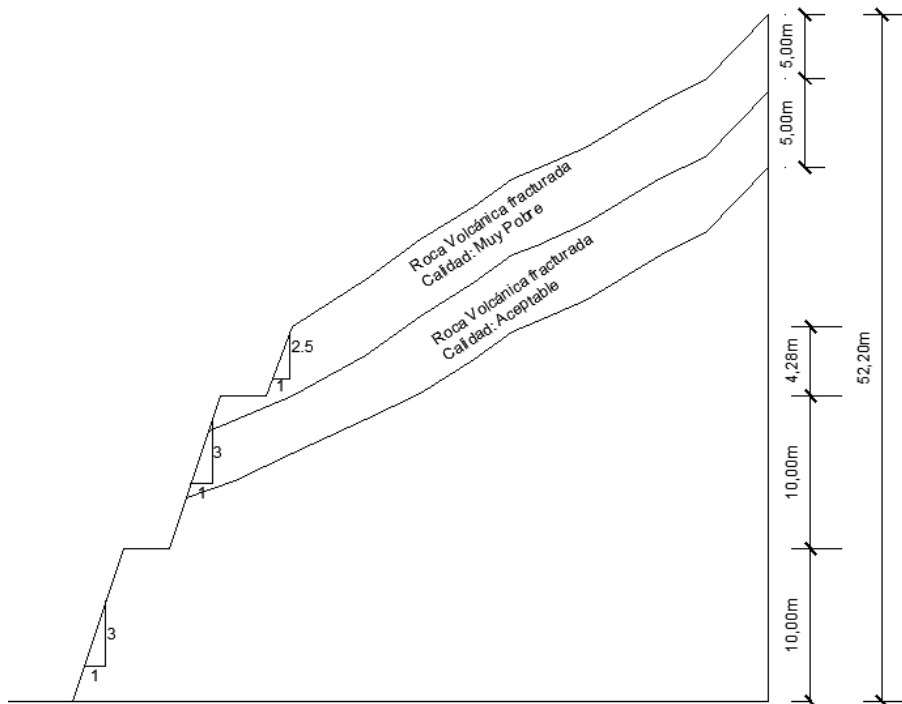


Figura 25. Esquematización transversal de los taludes a partir del kilómetro 3.90

En el talud correspondiente al kilómetro 5.2, ubicado a 5,350 m.s.n.m, se reporta descarga de agua superficial proveniente del derretimiento de nieve acumulada y de agua subterránea que llega a la parte superior de la pendiente, que posteriormente se congela en la superficie como se muestra en la Figura 26, provocando el fenómeno conocido como "icing ice", aunque este fenómeno no afecta actualmente a la estabilidad de los taludes, podría comprometerla a futuro por procesos erosivos que provoquen la meteorización de los materiales, adicionalmente existe la posibilidad de que el agua llegue hasta el eje vial y se forme una película de hielo.



Figura 26. Descarga de agua subterránea en el kilómetro 5.20 (Recuperado de: Yoshikawa, 2018)

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Se llevaron a cabo pruebas in-situ y en laboratorio para determinar las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales. En la Figura 27, se muestran las ubicaciones de:

- Las mediciones in-situ realizadas en la visita de campo el 08/05/2019 (P1 hasta P5).
- El sensor de temperatura (ST) (sensor digital en DM 2+500 a 5,080 m.s.n.m).
- El lugar desde donde se obtuvo material para realizar los ensayos de caracterización (B2 y B3).

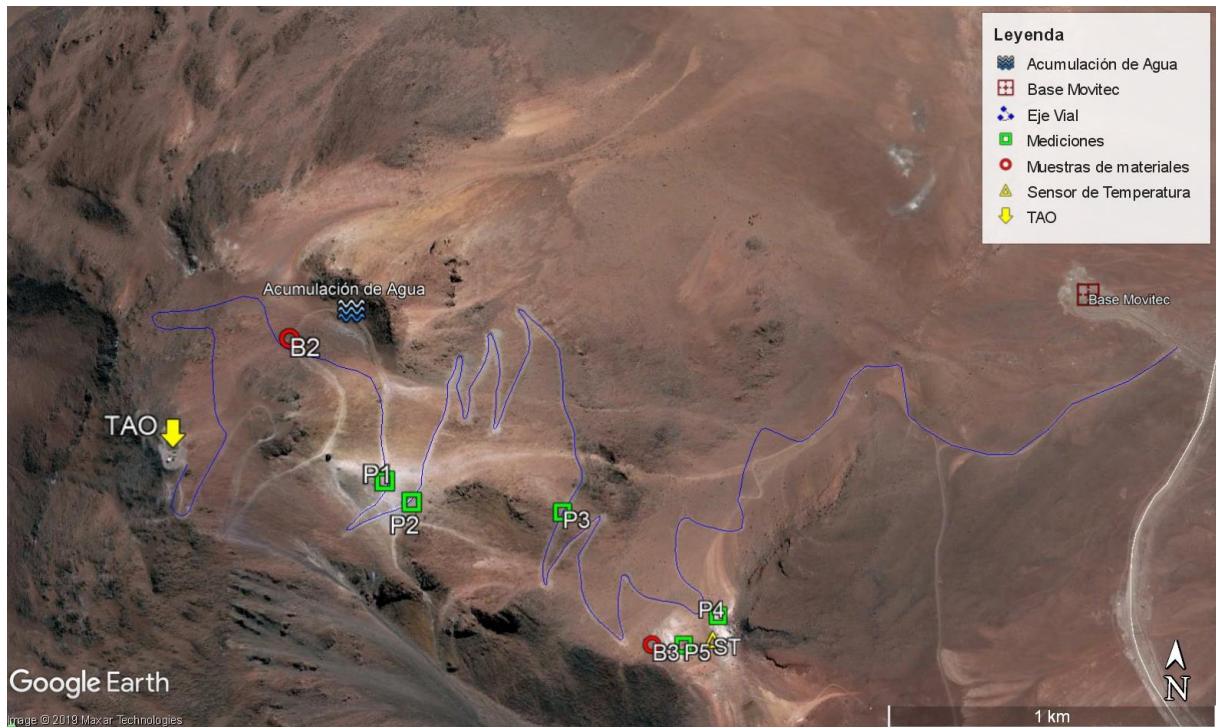


Figura 27. Vista en planta del camino de acceso al proyecto TAO, donde se muestra la ubicación de toda la información y datos adquiridos (Google Earth)

4.1 Ensayos in-situ

Las mediciones in-situ realizadas en la presente tesis fueron: temperatura, conductividad térmica y constante dieléctrica.

4.1.1 Distribución de temperatura

Para conocer la distribución de temperaturas del suelo en profundidad, en enero de 2019 se instaló un arreglo de sensores de temperatura digital, cuyos datos se almacenan en un data logger. Los sensores y el data logger fueron fabricados a la medida por la Universidad de Hokkaido y diseñados por el Dr. T. Sone. Las especificaciones técnicas del sensor de temperatura se muestran en la Tabla 4 y en la Figura 28.

Tabla 4. Especificaciones del sensor digital de temperatura

Modelo	DS18B20+
Rango de medición	-55 – 125 °C
Precisión	± 0.5°C
Resolución	9 a 12 bit



Figura 28. Sensor de temperatura digital. (Electronic Components 2019)

Para su instalación, se realizó una perforación superficial ubicada en el DM 2+500 a una elevación de 5,080 m.s.n.m. Los sensores fueron colocados dentro de tubería PVC para evitar el ingreso de agua y/o aire. El arreglo alcanza una profundidad total de 40 cm separados cada 1cm como se presenta en la Figura 29.

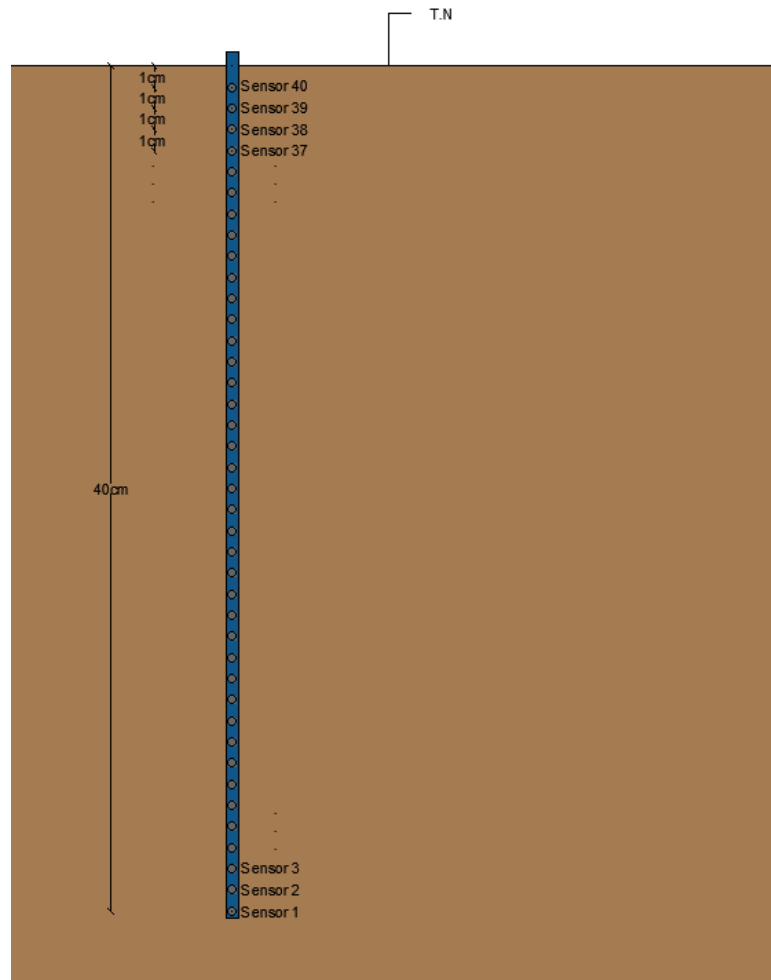


Figura 29. Esquema de distribución de los sensores.

La frecuencia de medición es de 48 veces al día, es decir mediciones diarias de temperatura cada 30 minutos. Para el desarrollo de la presente investigación se cuenta con datos desde enero hasta octubre del 2019.

4.1.2 Conductividad Térmica

Las mediciones se realizaron con un analizador de propiedades térmicas de campo y laboratorio portátil KD2 Pro mostrado en la Figura 30, cuyo principio de medición se basa en el método de la fuente de calor transitoria. El instrumento consiste en un controlador de mano y sensores. Los sensores de aguja única miden la conductividad térmica y la resistividad; mientras que el sensor de aguja dual mide la conductividad térmica, la resistividad, la capacidad calorífica específica volumétrica y la difusividad. El sensor utilizado fue el sensor KS-1 de aguja única de 6 cm de largo y 1,3 mm de diámetro.

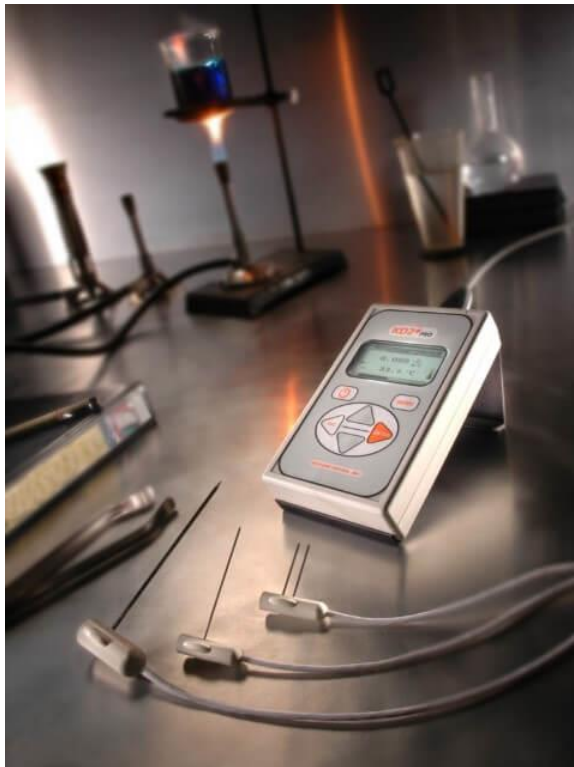


Figura 30. Analizador de propiedades térmicas KD2 Pro (Decagon Devices)

Los 4 puntos donde se realizaron las mediciones, fueron escogidos de forma de obtener datos a alta, mediana y baja altura en los materiales predominantes a lo largo del camino de acceso como se muestra en la Figura 27. Para realizar las mediciones in-situ es necesario hacer una perforación del diámetro de la aguja con ayuda de un taladro para poder introducirla como se muestra en la Figura 31.



(a)



(b)

Figura 31. a) Perforación con taladro para medición in situ en ignimbrita blanca en punto P1, b) Medición in situ conductividad térmica ignimbrita blanca en punto P1

4.1.3 Permitividad dieléctrica

Las mediciones de permitividad dieléctricas fueron realizadas con un reflectómetro en el Dominio de la Frecuencia (FDR) marca Stevens Vitel mostrado en la Figura 32. El instrumento opera a una frecuencia constante de 50 MHz y está compuesto por cuatro agujas, tres exteriores y una interior. Los valores que se obtienen resultan del promedio de las propiedades dentro del volumen de medición. Este volumen está delimitado en forma lateral por las agujas exteriores de aproximadamente 2.5 cm de diámetro y 6 cm de longitud.



Figura 32. Sensor utilizado para mediciones de permitividad dieléctrica (Stevens Water 2019). La ubicación de los puntos donde se realizaron las mediciones de permitividad dieléctrica fueron los mismos donde se tomó la conductividad térmica, representados el símbolo de color verde mostrado en la Figura 27.

4.2 Ensayos de laboratorio

El material utilizado para realizar los ensayos de laboratorio fue obtenido de las perforaciones B2 y B3, su ubicación se muestra en la Figura 27. La Figura 33 muestra el material con el que se realizaron los ensayos de laboratorio y la Tabla 5 detalla la información de las 5 muestras recolectadas.



Figura 33. a) Muestras correspondientes a perforación B3. b) Muestras correspondientes a perforación B2

Tabla 5. Información sobre las muestras para los ensayos de laboratorio.

Perforación	Profundidad perforación [m]	Distancia acumulada [m]	Elevación [m.s.n.m]	Nombre de la muestra [-]	Profundidad de muestra [m]
B3	14.00	2,500	5,080	S/N	0-2
				19	4-6
B2	14.50	6,950	5,500	16	0-2
				17	8-9
				18	11-13

4.2.1 Contenido de humedad

El contenido de humedad se determinó de acuerdo a la norma ASTM D2216-10. Este método de ensayo determina el porcentaje de humedad en una muestra de agregado mediante el método de secado al horno. El secado fue realizado en horno a una temperatura menor a los 80 °C, para evitar daño de los minerales de los materiales de origen volcánico.

4.2.2 Granulometría y clasificación del suelo

La granulometría se determinó de acuerdo a la norma ASTM D6913. Este método determina la distribución de partículas mediante el tamizado de la muestra por mallas diferentes tamaños. Posteriormente, se realizó la clasificación del suelo de acuerdo a la norma ASTM D2487 – 17.

4.2.3 Gravedad específica

La gravedad específica de los sólidos se determinó de acuerdo a la norma ASTM D854-14. Este método de ensayo determina la gravedad específica de los sólidos del suelo que pasan la malla de 4.75 mm (tamiz no. 4), por medio de un picnómetro con agua.

4.2.4 Densidad mínima y densidad máxima

Las densidades mínima y máxima se determinaron mediante el método japonés de acuerdo a la norma JGS 0161).

4.2.5 Corte Simple

Debido a la cantidad limitada de muestra, se optó por realizar el ensayo de corte simple acuerdo a la norma ASTM D6528–17, el cual consiste en someter a una muestra de suelo confinada lateralmente por medio de anillos de bronce rígidos a una tasa de deformación horizontal constante. Durante el ensayo se mide la deformación vertical y la carga horizontal.

4.2.5.1 Confección de probeta

La ejecución del ensayo consta de 3 etapas, preparación y montaje de la muestra, consolidación inicial y aplicación de la deformación de corte, descritas detalladamente a continuación:

- Preparación de muestra: La muestra fue preparada al 70% de densidad relativa, con el material pasante de la malla N°4 en estado seco. El material es colocado en una sola capa dentro de una membrana de goma que se encuentra rodeada por un conjunto de anillos rígidos que deslizan unos encima de los otros (Figura 34a y Figura 34b). Con la muestra preparada se procede al montaje y ajuste del equipo (Figura 34c).
- Con el dial vertical en cero se procede a aplicar la carga vertical deseada. El cambio vertical

producido corresponde a la consolidación inicial.

- Finalmente, una vez aplicada la carga se fija el dial vertical y horizontal en cero, en el transductor digital se verifica que la carga vertical se mantenga constante durante todo el ensayo y se obtiene la carga horizontal.



a)



b)



c)



d)

Figura 34. Etapas para ejecución de ensayo de corte simple. a) Membrana de goma y anillos rígidos. b) Preparación de la muestra c) Montaje y ajuste del equipo. d) Muestra deformada al finalizar el ensayo

En la Tabla 6 se detalla la el material ensayado, la densidad de confección de la probeta para cada material y las cargas verticales a las que se realizó los ensayos.

Tabla 6. Plan de ensayo para corte simple

Etiqueta de muestra	Material	Densidad Relativa DR [%]	Densidad seca ρ_d [g/cm ³]	Carga vertical σ_v [kgf/cm ²]
S/N	Ignimbrita Blanca	70	1.10	0.5, 1.0, 2.5 y 5.0
17	Arena café		1.62	0.5, 1.0 y 2.0

4.2.6 Compresión no confinada

Se llevó a cabo el ensayo de compresión no confinada según ASTM D2166/D2166M-16. El ensayo tiene por finalidad determinar la resistencia a la compresión simple de una probeta cilíndrica de suelo, obteniendo de forma indirecta la resistencia al corte de la muestra. La probeta se somete a un esfuerzo vertical con deformación controlada y se mide la máxima carga que esta soporta.

4.2.6.1 Confección de Probeta

Para el presente estudio se realizaron ensayos en probetas de suelo previamente congeladas, con el fin de determinar el esfuerzo último del suelo en este estado y así poder determinar la cohesión aparente que los materiales desarrollan. Para llevar a cabo el ensayo, se elaboraron moldes desarmables de 50 mm diámetro y 1000 mm de altura usando tubería de policloruro de vinilo (PVC), como se muestra en la Figura 35.

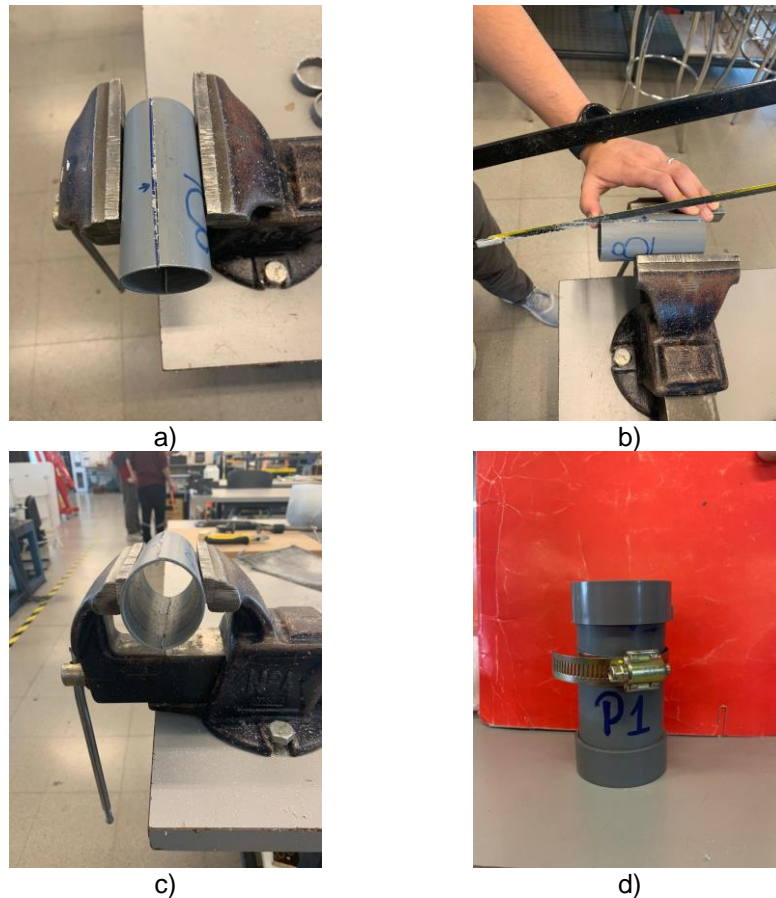


Figura 35. Elaboración de moldes para realizar compresión no confinada en muestras congeladas.

Las probetas se confeccionaron al 70% de la densidad relativa seca y al 40% del grado de saturación detallado en la Tabla 7. Para la confección de las probetas congeladas se siguieron los siguientes pasos:

1. Colocar la tapa inferior del molde PVC y asegurar las abrazaderas metálicas para mantener unidas las dos piezas del molde como se muestra en la Figura 35d.
2. Colocar una lámina acetato en las paredes del molde para impedir que el material se pegue al molde y facilitar el desmolde.
3. Armar la probeta en 5 capas compactadas con el fin de garantizar la uniformidad de la densidad a lo largo de la misma.
4. Guardar las probetas en un congelador doméstico por lo menos durante 8 horas consecutivas.

Tabla 7. Densidades y grado de saturación de confección de probetas sometidas a compresión no confinada

Etiqueta Muestra	70% DR [g/cm³]	Sr [%]
S/N	1.12	40
19	1.10	
16	1.64	
17	1.62	
18	1.68	

Para proceder a realizar el ensayo, la prensa debe estar lista para recibir la probeta, desmoldar con agilidad y comenzar el ensayo lo más rápido posible debido a que la probeta es susceptible al descongelamiento y por ende pérdida de cohesión, la cual se pretende determinar. En la Figura 36 se muestra el procedimiento desde el desmolde hasta la culminación del ensayo una vez que la probeta alcanza la falla.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)



i)

Figura 36. Ejecución del ensayo compresión no confinada.

4.2.7 Conductividad térmica

De acuerdo al ASTM D5334, es posible la determinación de la conductividad térmica del suelo y/o la roca blanda utilizando un método de calor transitorio, mediante una sonda tipo aguja, aplicable para muestras de suelo tanto intactas como reconstituidas y especímenes de roca blanda. Los ensayos se realizaron en muestras congeladas y no congeladas a diferentes porcentajes de saturación para determinar la influencia sobre la conductividad térmica.

4.2.7.1 Confección de Probeta

Para llevar a cabo el ensayo, se elaboraron moldes de 50 mm diámetro y 1000 mm de altura usando tubería de policloruro de vinilo (PVC), como se muestra en la Figura 37.



Figura 37. Molde PVC para medición de conductividad térmica

Se confeccionaron todas las probetas al 70% de la densidad relativa seca, variando su grado de saturación como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Densidad y grado de saturación para la confección de probetas.

Etiqueta Muestra	70% DR [g/cm ³]	Relación de vacíos (eo)	Sr [%]
S/N	1.12	0.88	40, 70
19	1.10	0.98	40, 70, 90
16	1.64	0.54	40,70
17	1.62	0.58	40,70,90
18	1.68	0.53	40,70

Posteriormente, las probetas son guardadas en un congelador domestico durante al menos 8 horas consecutivas. Antes de congelar la muestra, es importante colocar una guía de igual longitud y diámetro ligeramente menor al sensor, pues una vez congelada la muestra se endurece y el sensor no puede ser enterrado y forzarlo puede comprometer la integridad del mismo.

El sensor debe quedar ligeramente ajustado y en total contacto con la muestra, pues el principio del sensor es conducir calor alrededor del material; caso contrario, podría medir aire y obtener valores erróneos. Adicionalmente, los datos obtenidos dentro del rango comprendido entre -2 °C a 2°C deberán ser despreciados, pues el calor emitido por el sensor no será conducido, este aporta al descongelamiento del material provocando que el resultado de las mediciones sea erróneo.

Una vez retirada la muestra del congelador e introducir el sensor correctamente como se muestra en la Figura 38, se procede a realizar mediciones de manera consecutiva (15 segundos máximo), asegurando así tener un registro de la variación de la conductividad térmica con la temperatura.



Figura 38. Medición de conductividad térmica

4.3 Procesamiento de Datos

4.3.1 Propiedades térmicas a partir de datos de temperatura

4.3.1.1 Difusividad térmica

Min-Ho Koo et al. (2008), basados en la ecuación de transferencia de calor unidimensional para un medio homogéneo, estiman la difusividad térmica mediante series de datos de temperatura del subsuelo en el tiempo. Si bien la transferencia de calor ocurre por procesos conductivos y no conductivos, tales como la convección por presencia de agua y gas en el medio, se reconoce que la transferencia de calor ocurre principalmente por conducción, la cual se expresa mediante la ecuación 2.2.

Para obtener una solución analítica de la ecuación 2.2, la oscilación periódica de la temperatura de la superficie del suelo expresada como una serie de Fourier, puede ser usada como una condición de borde como se muestra en la ecuación (4.1

$$T_s(t) = T_0 + \sum_{n=1}^M A_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (4.1)$$

Donde:

T_0 Temperatura ambiente media [°C]

ω Frecuencia angular fundamental [rad/s]

A_n Amplitud de temperatura [°C]

ϕ Fase [rad]

Teniendo en cuenta que la amplitud máxima de la onda decae en profundidad (z), $A_n e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}}$, se obtiene la ecuación (4.2 que relaciona la temperatura a distintas profundidades en cualquier instante de tiempo:

$$T(z, t) = T_0 + \sum_{n=1}^M A_n e^{-z\sqrt{\frac{n\omega}{2\alpha}}} \sin(n\omega t + \phi_n - z\sqrt{n\omega/2\alpha}) \quad (4.2)$$

Bajo el supuesto de una oscilación periódica de la temperatura superficial con frecuencia angular fundamental M=1, se obtiene la ecuación en función de la fase de la onda para determinar la difusividad térmica aparente como se muestra en la ecuación (4.3)

$$\alpha = \frac{1}{2\omega} \left[\frac{z_2 - z_1}{\delta t} \right]^2 \quad (4.3)$$

Donde:

Z_1, Z_2 Profundidades [m]

δt Diferencia de fase de la temperatura a profundidades z_1 y z_2 [s]

Existen diferentes métodos para calcular la diferencia de fase entre dos series de tiempo a diferentes profundidades; sin embargo, en el presente estudio se usó la correlación cruzada. Para realizar la correlación cruzada, a partir de los registros de temperatura, se analizaron series de tiempo acotadas a una semana, las cuales se consideran representativas de las variaciones de temperatura para cada uno de los meses (enero a octubre de 2019).

4.3.1.2 Calor específico

Para la estimación del calor específico se conoce que la difusividad térmica viene expresada por la ecuación 2.3

4.3.1.3 Contenido de agua no congelada

El contenido de agua no congelada en el suelo se puede determinar a partir de la medición de la constante dieléctrica, también conocida como permitividad. En un material compuesto como el suelo, el valor de la constante dieléctrica depende de la contribución relativa de los minerales, aire y agua; sin embargo, dado que la permitividad del agua ($K_{\text{agua}}=81$) es mucho mayor que la permitividad del aire ($K_{\text{aire}}=1$) y del suelo ($K_{\text{suelo}}=2-5$), la permitividad total se rige principalmente por la presencia de agua líquida. Topp et al. (1980) establecieron una relación entre la permitividad y el contenido volumétrico de agua no congelada (θ) mediante la ecuación (4.4

$$\theta = 4.3 \cdot 10^{-6} (k_a)^3 - 5.5 \cdot 10^{-4} (k_a)^2 + 2.92 \cdot 10^{-2} (k_a) - 5.3 \cdot 10^{-2} \quad (4.4)$$

El procedimiento de datos detallado para los ensayos de laboratorio se encuentran adjuntos en el Anexo B

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 Distribución de temperatura

En la Figura 39 y Figura 40 se muestra la variación de temperatura en el tiempo para profundidades de 1, 10, 20, 30 y 40 cm durante una semana para los meses de enero y julio de 2019, que corresponden a los meses de mayores y menores temperaturas promedio respectivamente. Se observa que la temperatura se atenúa en profundidad hasta llegar a un valor cuasi constante después de los 20 cm de profundidad.

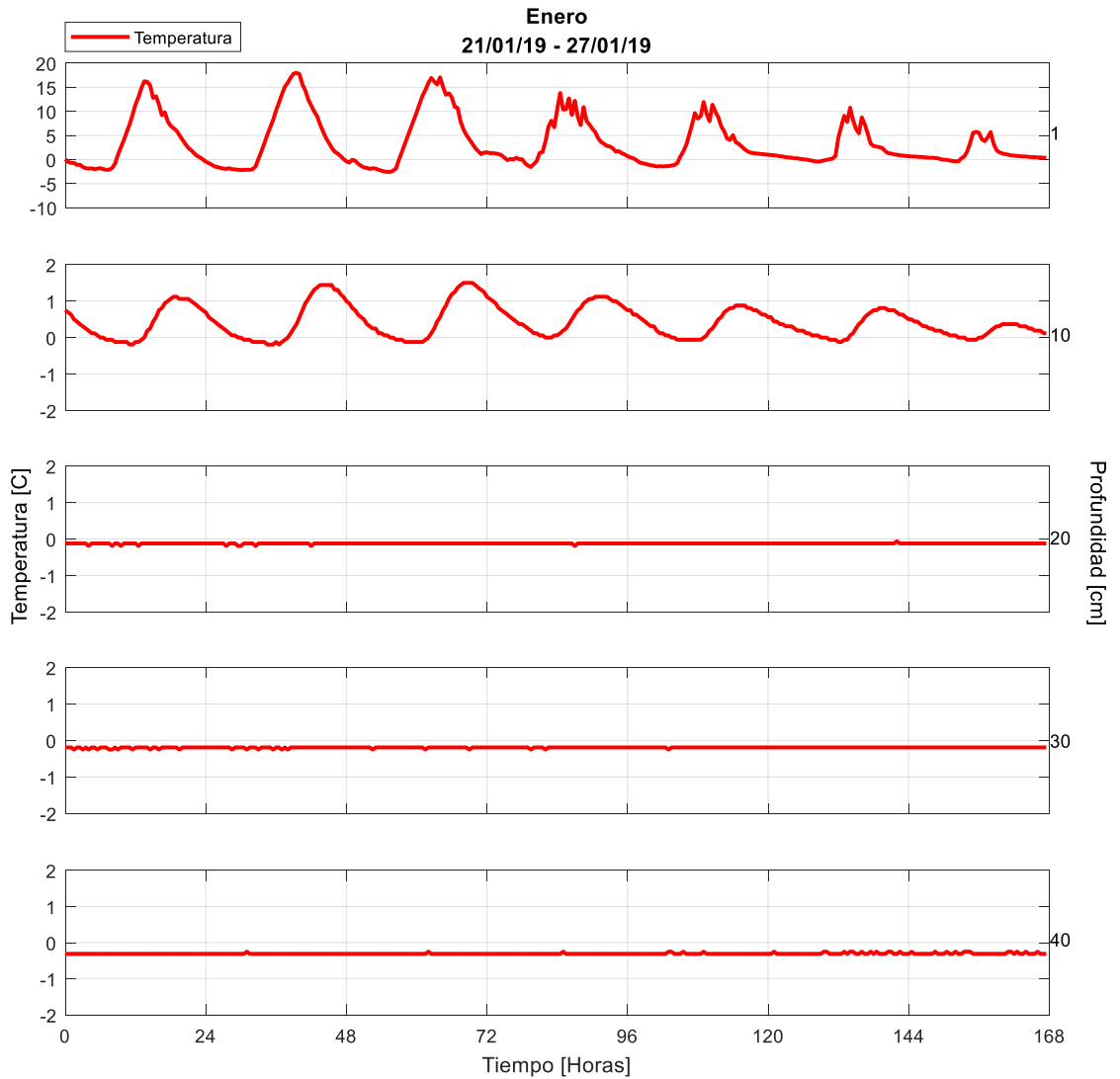


Figura 39. Temperatura vs. Tiempo mes de enero de 2019.

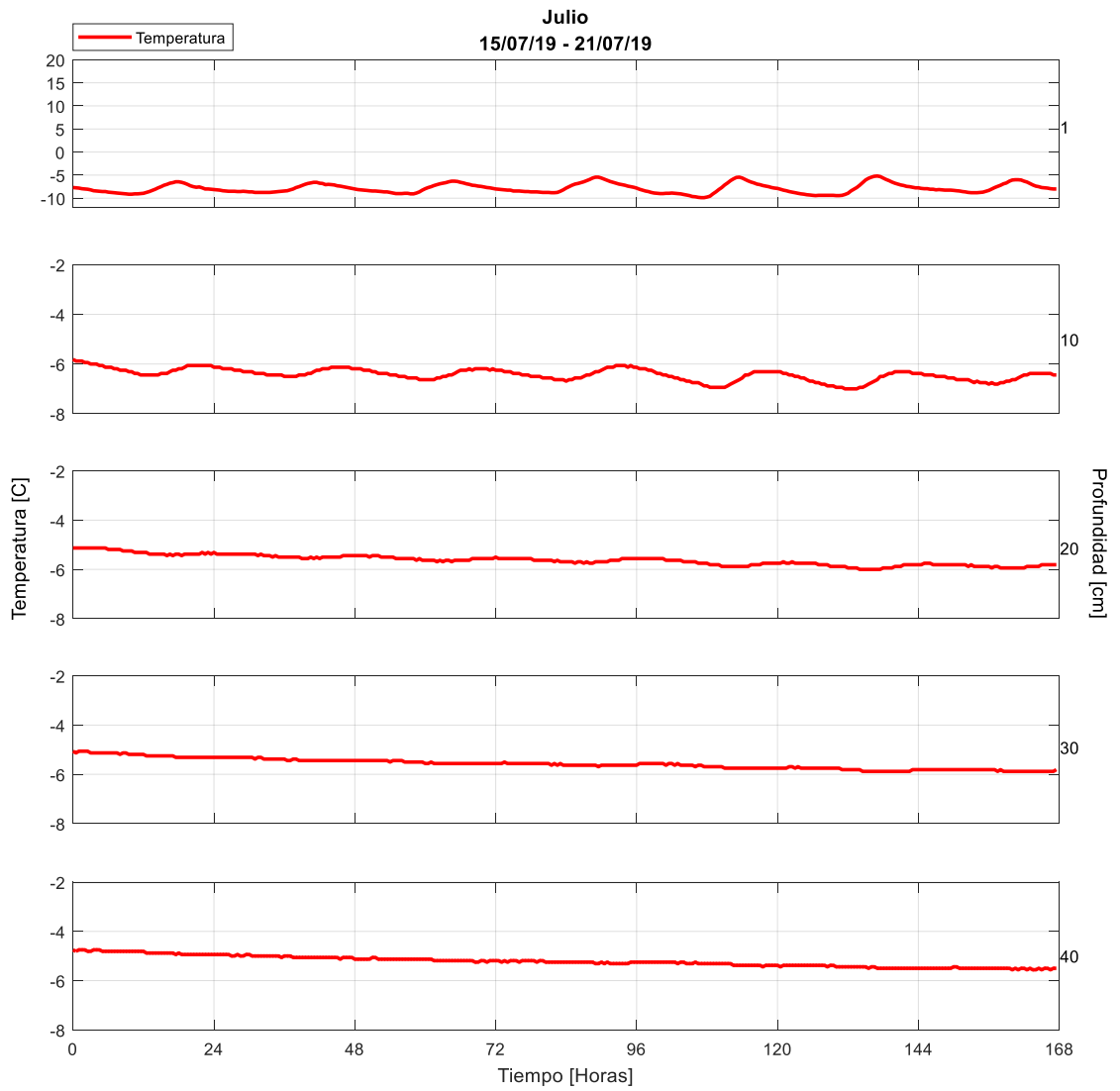


Figura 40. Temperatura vs. Tiempo mes de julio de 2019.

La Figura 41 y Figura 42 muestra la variación de temperatura en profundidad (*Trumpet Curve*), donde se puede identificar los valores máximos y mínimos de temperatura en el mes correspondiente, así como también la media con su respectiva desviación estándar. En el Anexo C se encuentran las curvas correspondientes a los meses restantes.

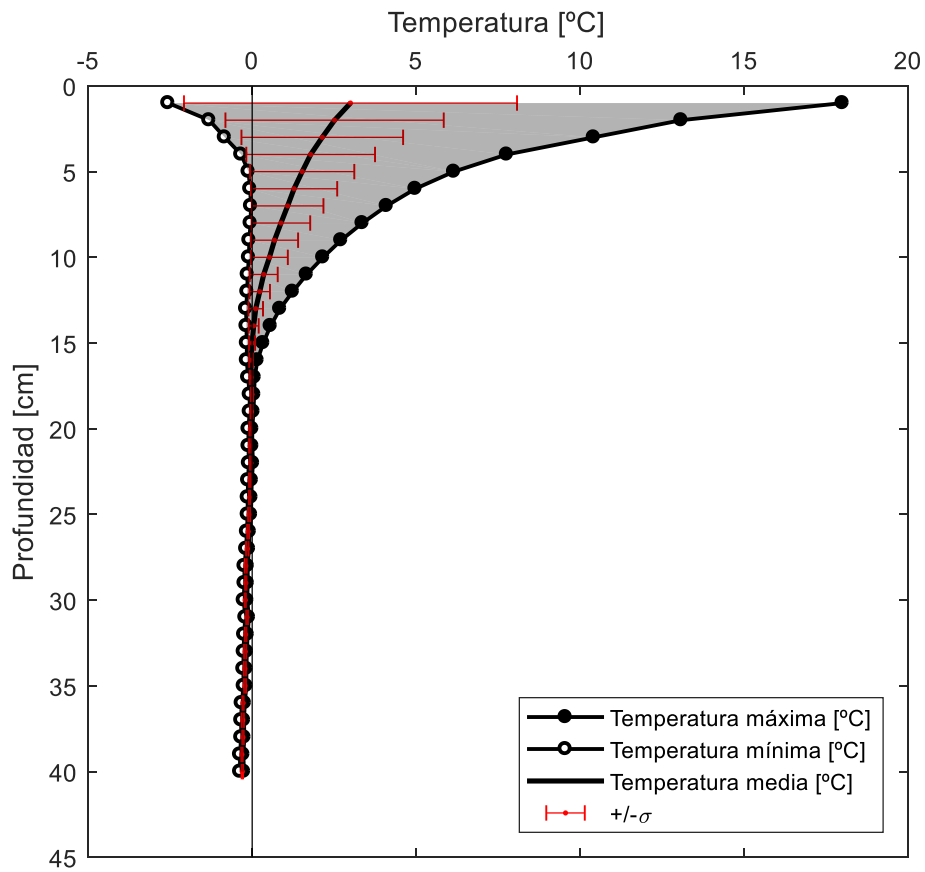


Figura 41. Temperatura vs. Profundidad (*trumpet curve*) para el mes de enero de 2019.

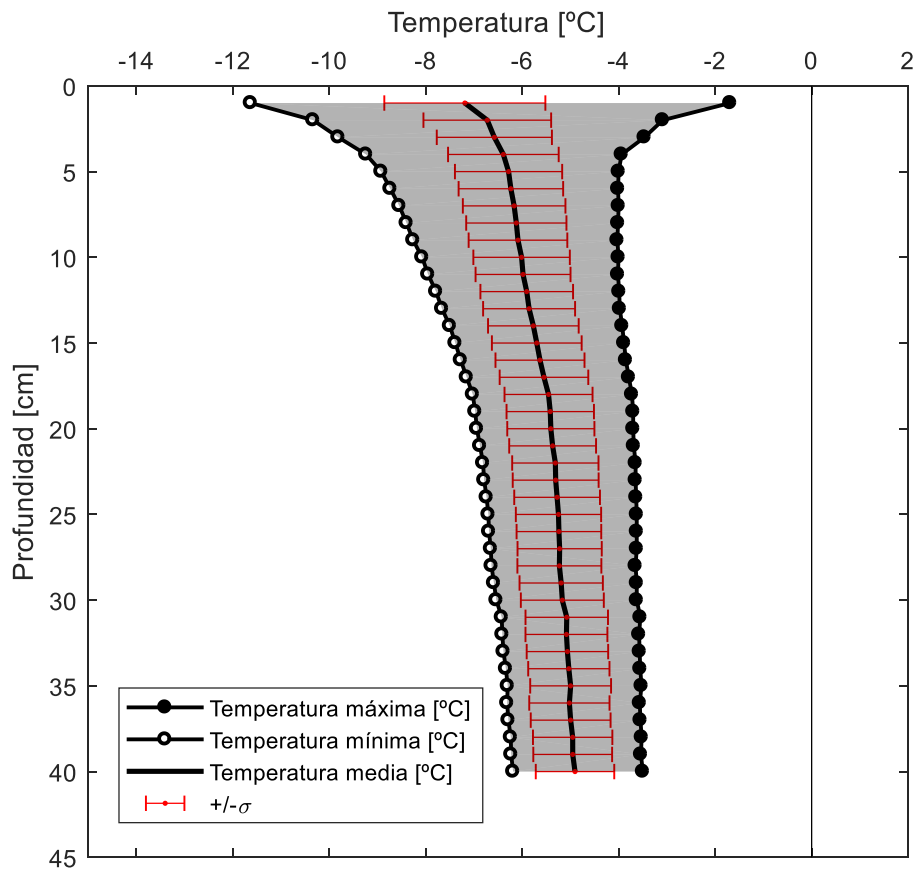


Figura 42. Temperatura vs. Profundidad (*trumpet curve*) para el mes de julio de 2019.

La Figura 43 muestra los valores promedio de temperatura en profundidad para cada uno de los meses de medición, con el fin de poder determinar el espesor de la capa activa. Se observa en la Figura 43 que la capa activa tiene un espesor de 20 cm (línea negra segmentada), y el permafrost subyace a partir de los 20 cm de profundidad. La profundidad de la amplitud anual cero (ZAA) no puede ser determinada pues se observa que a 40 cm de profundidad aún existen diferencias de temperatura mayores a 0.1°C a una misma profundidad, por lo que se requiere de un arreglo de sensores que alcance una mayor profundidad para ser determinada.

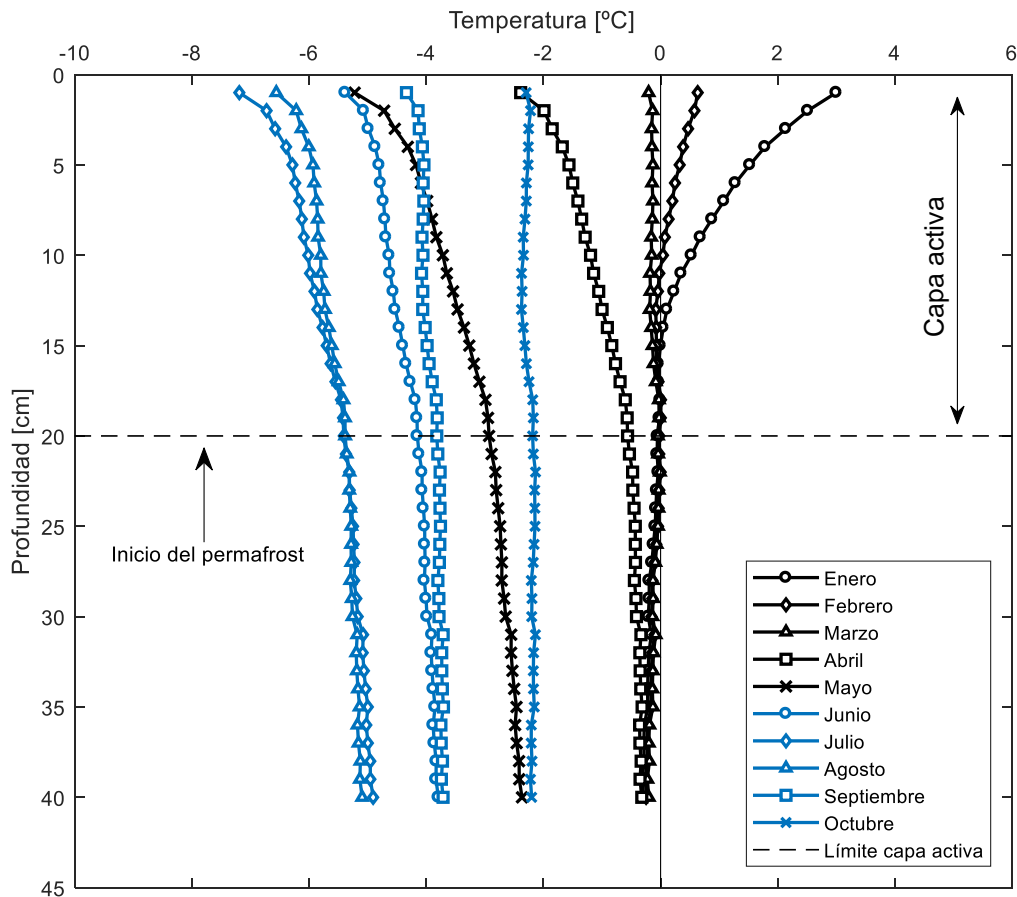


Figura 43. Trumpet Curve de temperatura media desde enero hasta octubre del 2019

5.2 Conductividad térmica

En la Tabla 9 se resumen los datos obtenidos de las mediciones con su respectiva información. Se incluye dentro del Anexo D, la bitácora de la visita a terreno donde se podrá encontrar información más detallada y el registro fotográfico de cada uno de los puntos medidos.

Tabla 9. Información de las mediciones de conductividad térmica.

Nombre	Descripción	Conductividad Térmica [W/m/K]	Distancia acumulada [m]	Elevación [m.n.s.m]
P1	Ignimbrita Blanca. Dificultad de perforación baja-media	0.120	6,400	5450
P2	Roca dura color amarillento. Dificultad de perforación alta. No se pudo enterrar por completo el sensor.	0.619	6,100	5410
P3	Material Café Claro húmedo. Dificultad de perforación media	0.287	3,900	5220
P4	Ignimbrita Blanca. Dificultad de perforación baja	0.630	2,500	5080
		0.787		
P5	Material café claro. Dificultad de perforación baja	0.499	2,500	5080
		0.167		
		0.132		

A continuación, los gráficos contenidos desde la Figura 44 hasta la Figura 49 muestran las curvas resultantes de la medición de la conductividad térmica en probetas confeccionadas en laboratorio en estado congelado y no congelado a diferentes porcentajes de saturación.

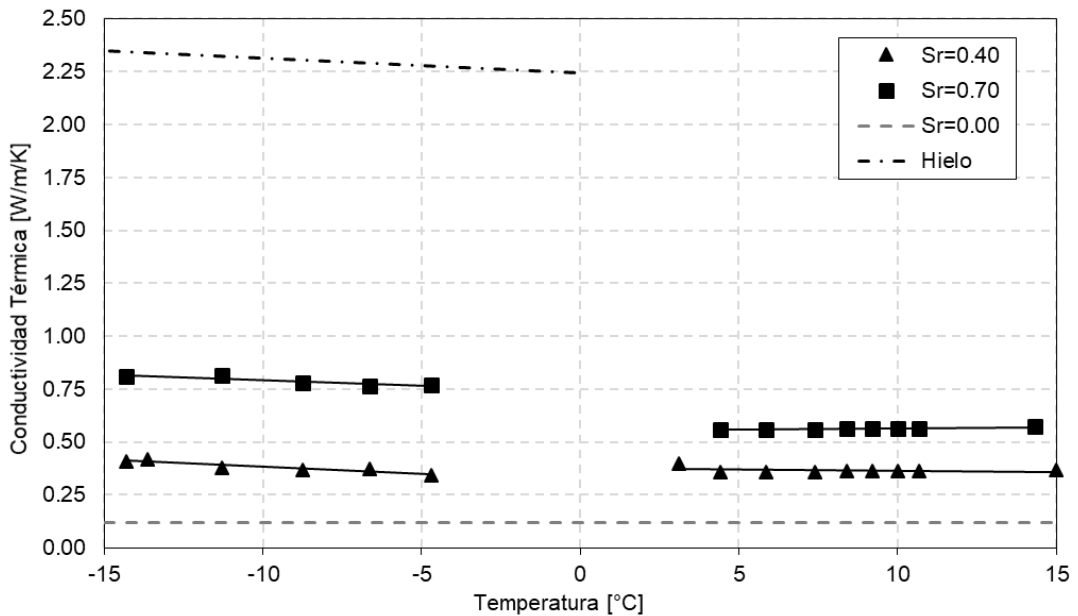


Figura 44. Conductividad vs. Temperatura para la muestra S/N (Ignimbrita Blanca)

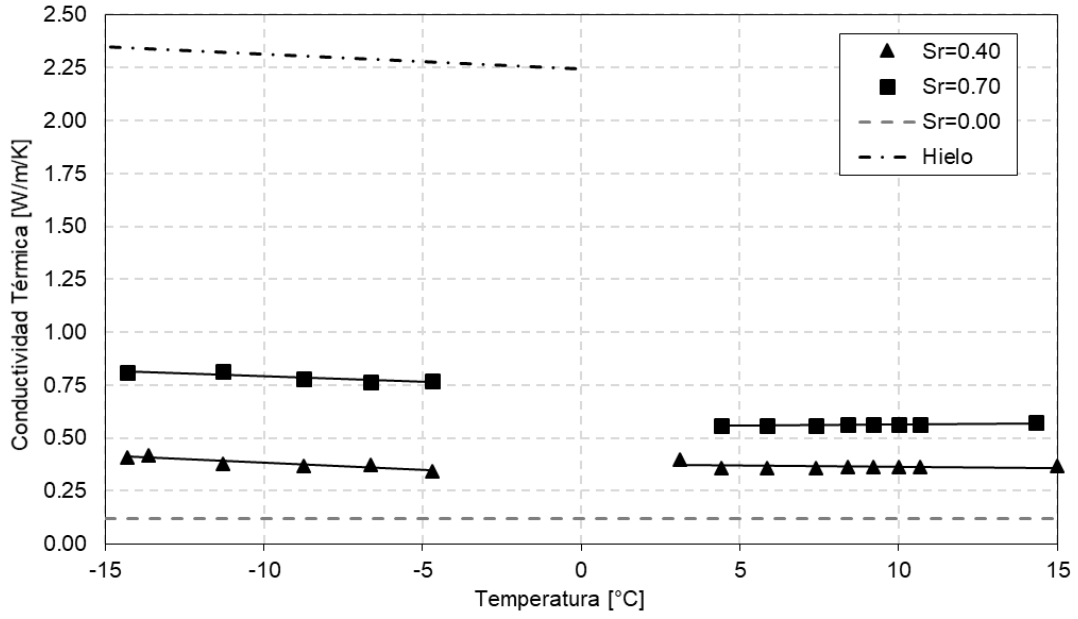


Figura 45. Conductividad vs. Temperatura para la muestra S/N (Ignimbrita Blanca)

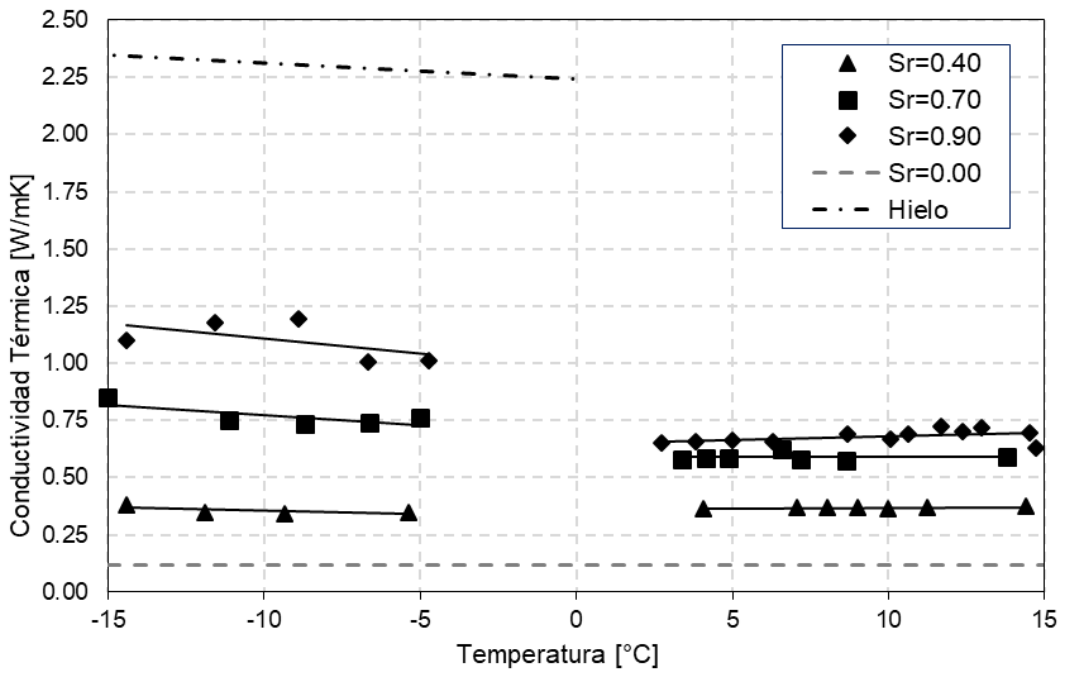


Figura 46. Conductividad vs. Temperatura para la muestra 19 (Ignimbrita Blanca)

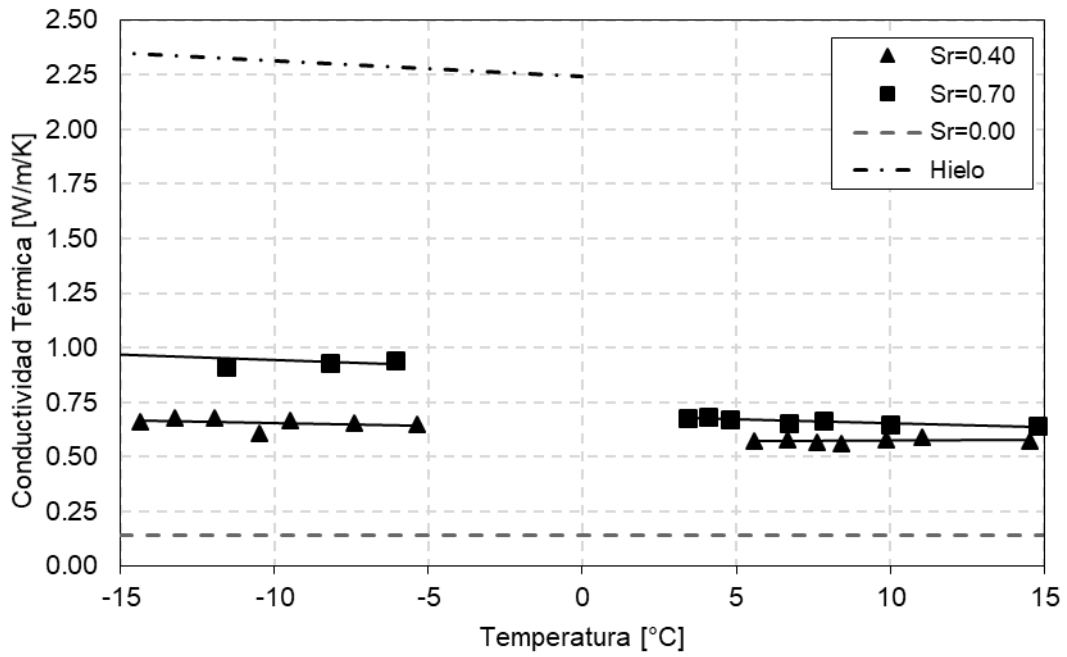


Figura 47. Conductividad vs. Temperatura para la muestra 16 (Arena café)

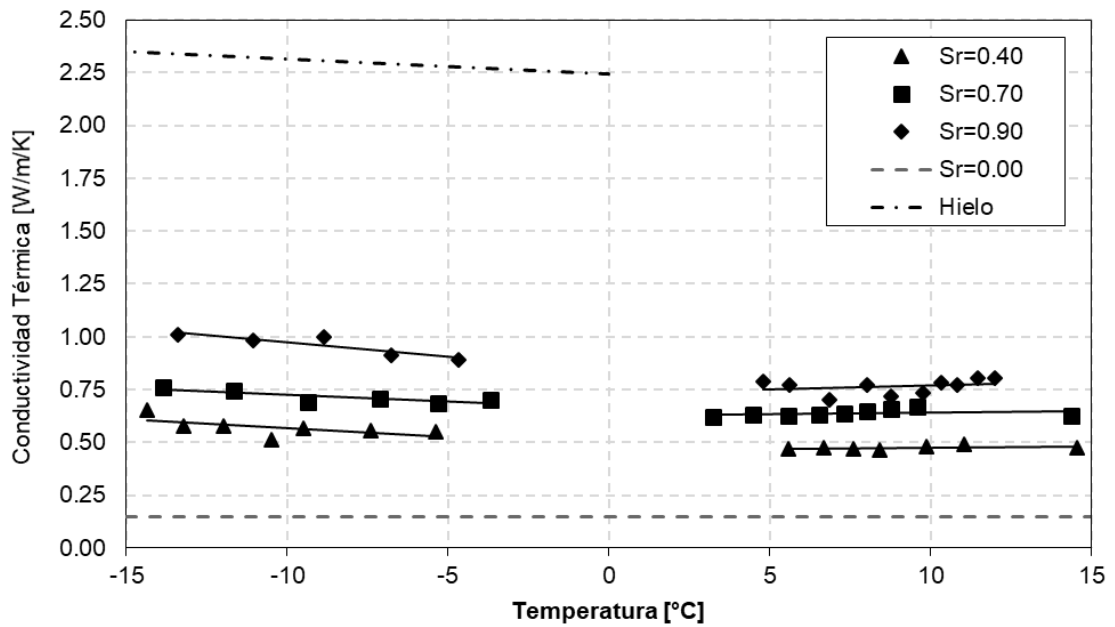


Figura 48. Conductividad vs. Temperatura para la muestra 17 (Arena café)

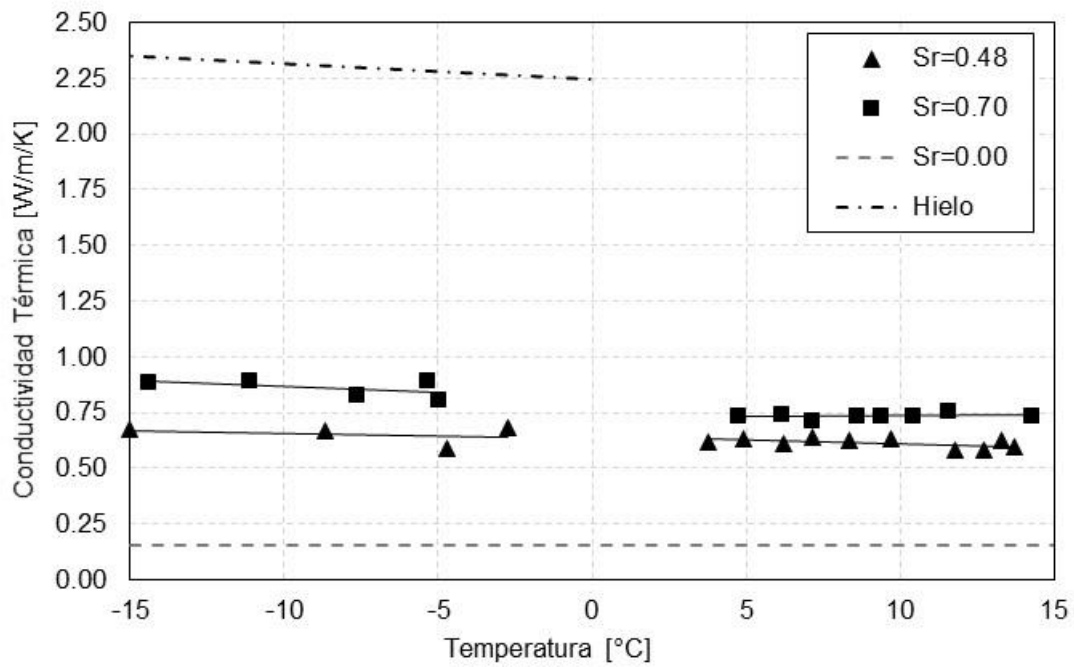


Figura 49. Conductividad vs. Temperatura para la muestra 18 (Arena café)

Se evidencia que la conductividad térmica aumenta con el contenido de agua y que la conductividad en estado congelado es mayor que la conductividad cuando la muestra no está congelada, lo cual se debe a que los espacios vacíos que contienen aire, que posee una baja conductividad ($k_{\text{aire}}=0.02$ W/m/K), son reemplazados por agua o hielo intersticial cuya conductividad es mucho más alta. Los resultados obtenidos en laboratorio se comparan con el trabajo de Kuznetsova et al. (2013) en la Tabla 12 se puede apreciar que los resultados obtenidos son similares.

Tabla 10. Comparación de resultados con referencia bibliográfica.

Material	Etiqueta de Muestra	$\rho_{70\% DR}$ [g/cm ³]	Humedad [%]	S_r Grado de Saturación	Laboratorio		Kuznetsova et al. (2013)	
					K_d No congelado [W/m/K]	K_c Congelado [W/m/K]	K_d [W/m/K]	K_c [W/m/K]
Ignimbrita Blanca	S/N	1.12	19.28	0.46	0.35	0.40	0.45	0.50
	19	1.10	29.66	0.66	0.58	0.80	0.55	0.80
Arena Café	16	1.64	35.92	1.00*	-	-	0.80	1.10
	17	1.62	17.22	0.76	0.63	0.75	0.70	1.00
	18	1.68	9.23	0.45	0.58	0.68	0.60	0.90

* La muestra recolectada tenía hielo intersticial

5.3 Contenido de agua no congelada

En la Tabla 11 se muestran los valores de las mediciones y el valor del contenido volumétrico de agua no congelada.

Tabla 11. Resultado de las mediciones de constante dieléctrica.

Nombre	Descripción	Distancia acumulada [m]	Elevación [m.s.n.m]	Constante Dieléctrica [-]	Θ_v [-]
P1	Ignimbrita Blanca. Dificultad de perforación baja-media	6,400	5,450	2.52	0.017
P2	Roca dura color amarillento. Dificultad de perforación alta. No se pudo enterrar por completo el sensor.	6,200	5,410	3.78	0.050
P3	Material Café Claro húmedo. Dificultad de perforación media	5,500	5,225	2.52	0.017
P4	Ignimbrita Blanca. Dificultad de perforación baja	2,500	5,010	3.33	0.039
				3.10	0.032
P5	Material café claro. Dificultad de perforación baja	2,500	5,010	4.25	0.061
				4.66	0.071

5.4 Difusividad térmica

En la Figura 50 se muestra el gráfico de coeficiente de correlación para el mes de enero y en la Tabla 12 se resume los resultados obtenidos para los demás meses, en el Anexo F se encuentra los gráficos de correlación cruzada correspondientes a cada mes.

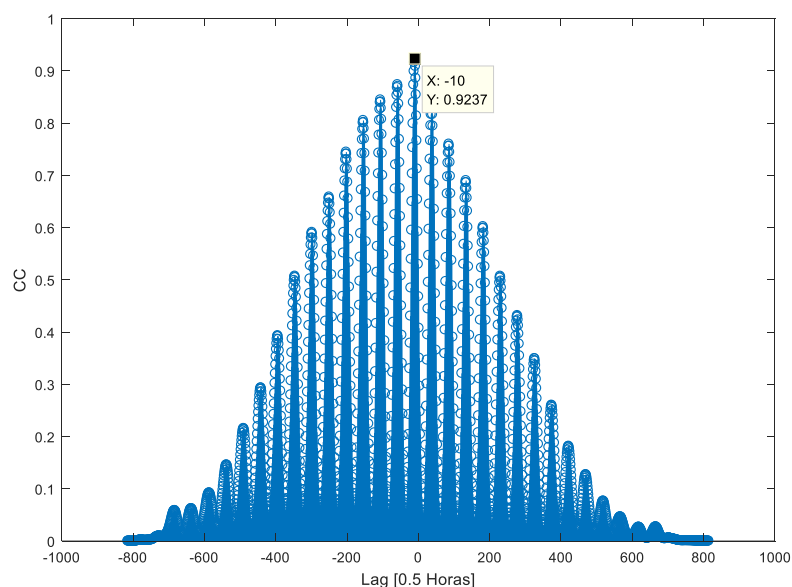


Figura 50. Correlación cruzada para el mes de enero de 2019 de los registros de temperatura a 1 y 10 cm de profundidad

Tabla 12. Resumen de resultados de correlación cruzada, desfase y difusividad por mes

Mes	CC	Diferencia de fase [Horas]	Difusividad [m ² /s]
Enero	0.9237	5.00	$1.719 \cdot 10^{-7}$
Febrero	0.7981	5.00	$1.719 \cdot 10^{-7}$
Marzo	0.7389	5.50	$1.719 \cdot 10^{-7}$
Abril	0.8622	5.00	$1.719 \cdot 10^{-7}$
Mayo	0.9622	4.00	$2.686 \cdot 10^{-7}$
Junio	0.9764	3.00	$4.775 \cdot 10^{-7}$
Julio	0.9880	2.50	$6.875 \cdot 10^{-7}$
Agosto	0.9545	3.50	$3.508 \cdot 10^{-7}$
Septiembre	0.9281	4.50	$2.122 \cdot 10^{-7}$
Octubre	0.6846	5.00	$1.719 \cdot 10^{-7}$

Los resultados muestran que la difusividad varía cada mes, lo cual puede estar asociado a variaciones estacionales del contenido de humedad del suelo, debido a la precipitación y/o evapotranspiración. Según García et al. (2013), la difusividad térmica tiene una tendencia creciente con el aumento de humedad.

5.5 Calor específico

Se realizó un promedio de todos los valores de difusividad con el objetivo de obtener un solo valor representativo y así obtener un único valor para determinar el calor específico del material en estudio, los resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultado de las propiedades térmicas

Material	ρ 70% DR [g/cm ³]	K Conductividad Térmica [W/mK]	α Difusividad Térmica [m ² /s · 10 ⁻⁷]	C _p Calor específico [J/kg K]
Ignimbrita	1.11	0.70	2.98	2114.52
Arena café*	1.65	0.40	2.98	812.86

* La difusividad para la arena café fue estimada a partir de la Ec 5.5, considerando un valor de calor específico reportado en literatura

5.6 Contenido de humedad

Los resultados del contenido de humedad de las muestras se presentan en la Tabla 14.

5.7 Granulometría y clasificación del suelo

Los resultados de la granulometría y la clasificación de las muestras se presentan en la Tabla 14 . La Figura 51 muestra la curva de distribución granulométrica resultante.

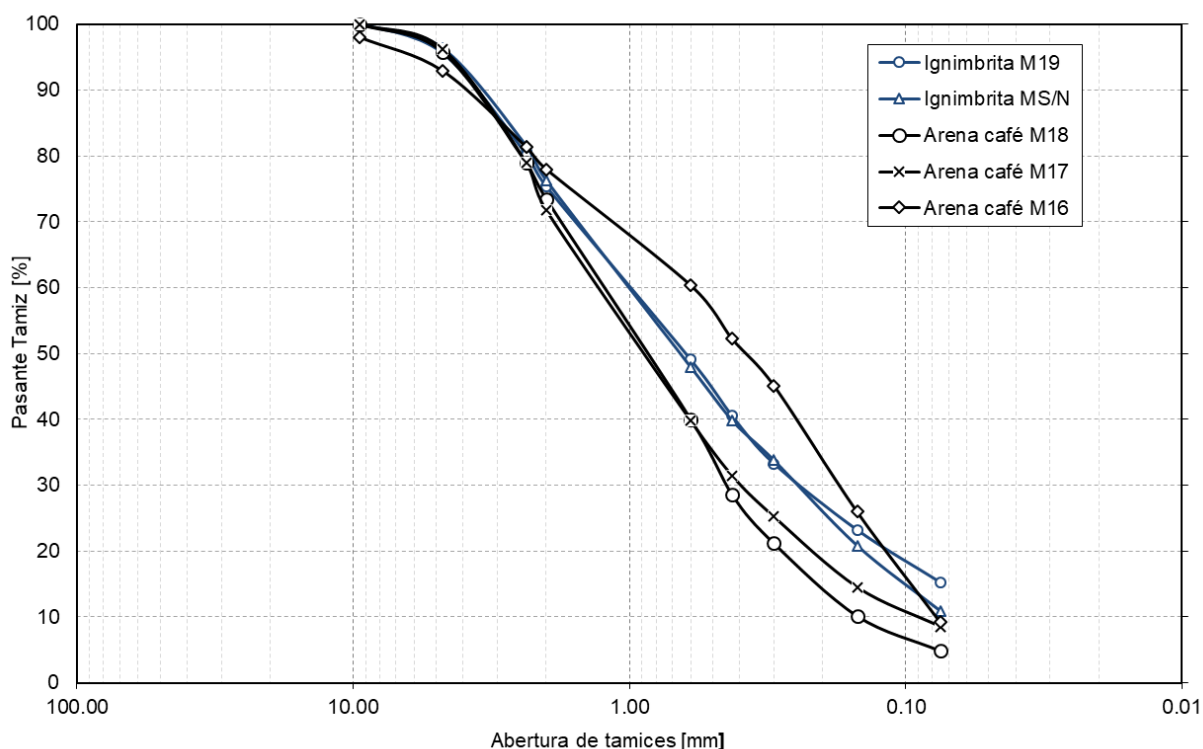


Figura 51. Curva de distribución granulométrica.

5.8 Gravedad específica

Los resultados del ensayo de gravedad específica se presentan en la Tabla 14.

5.9 Densidad mínima y densidad máxima

Los resultados del ensayo de densidad mínima y densidad máxima se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados de ensayos de caracterización de materiales

Etiqueta de Muestra	Material	Sondaje	Distancia acumulada [m]	Elevación [m.s.n.m]	Profundidad de muestra [m]	Humedad [%]	Clasificación UCSS	Contenido de Fino [%]	G _s [-]	Densidad Mínima [g/cm ³]	Densidad Máxima [g/cm ³]
S/N	Ignimbrita Blanca	B3	2,500	5,080	-	19.28	SP-SM	10.92	2.10	0.94	1.22
19					4-6	29.66	SM	15.27	2.18	0.91	1.22
16	Arena Cafè	B2	6,950	5,500	0-2	21.25	SP-SM	9.17	2.52	1.43	1.75
17					8-9	17.22	SW-SM	8.55	2.57	1.38	1.75
18					11-13	9.23	SP	4.83	2.57	1.43	1.82

La Tabla 15 muestra los resultados de los valores de densidad in-situ e índice de vacíos estimados a partir del supuesto que la densidad en terreno es el 70% de la densidad relativa.

Tabla 15. Estimaciones de propiedades físicas in-situ de materiales

Etiqueta de Muestra	Material	Sondaje	Distancia acumulada [m]	Elevación [m.s.n.m]	70% DR γ_d [g/cm ³]	e_{max} [-]	e_{min} [-]	Saturación S_r [-]	Índice de vacíos (e_o)
S/N	Ignimbrita Blanca	B3	2,500	5,080	1.12	1.24	0.73	0.46	0.88
19					1.10	1.41	0.80	0.66	0.98
16	Arena Cafè	B2	6,950	5,500	1.64	0.75	0.44	1.00	0.54
17					1.62	0.86	0.47	0.76	0.58
18					1.68	0.80	0.41	0.45	0.53

5.10 Corte simple

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de corte simple realizados:

- La Figura 52 y Figura 53 muestran las gráficas de esfuerzo de corte vs. deformación angular para la ignimbrita blanca y para la arena café respectivamente.
- La Figura 54 y Figura 55 muestran las gráficas de deformación vertical vs. Deformación angular para la ignimbrita blanca y para la arena café respectivamente.
- La Figura 56 y Figura 57 muestra de línea de estado último (LEU) y la Tabla 16 ángulo de fricción resultante.

Se observa que ambos materiales presentan un comportamiento contractivo, siendo este más pronunciado para la ignimbrita blanca (S/N) debido a la fragilidad del material, donde a mayor carga vertical la contracción es mucho más pronunciada, probablemente producida por la rotura de partículas. Por esta razón, la LEU tiene un comportamiento bilineal, donde a mayor esfuerzo normal el ángulo de fricción decrece.

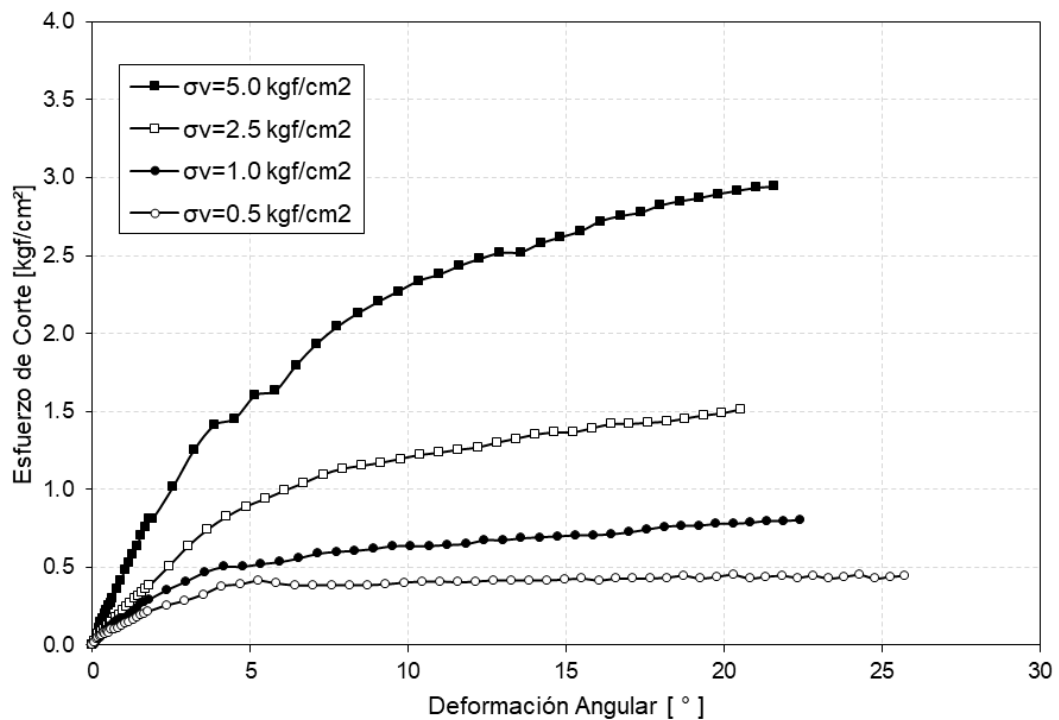


Figura 52. Gráfico esfuerzo de corte vs deformación angular para la Ignimbrita Blanca (Muestra S/N)

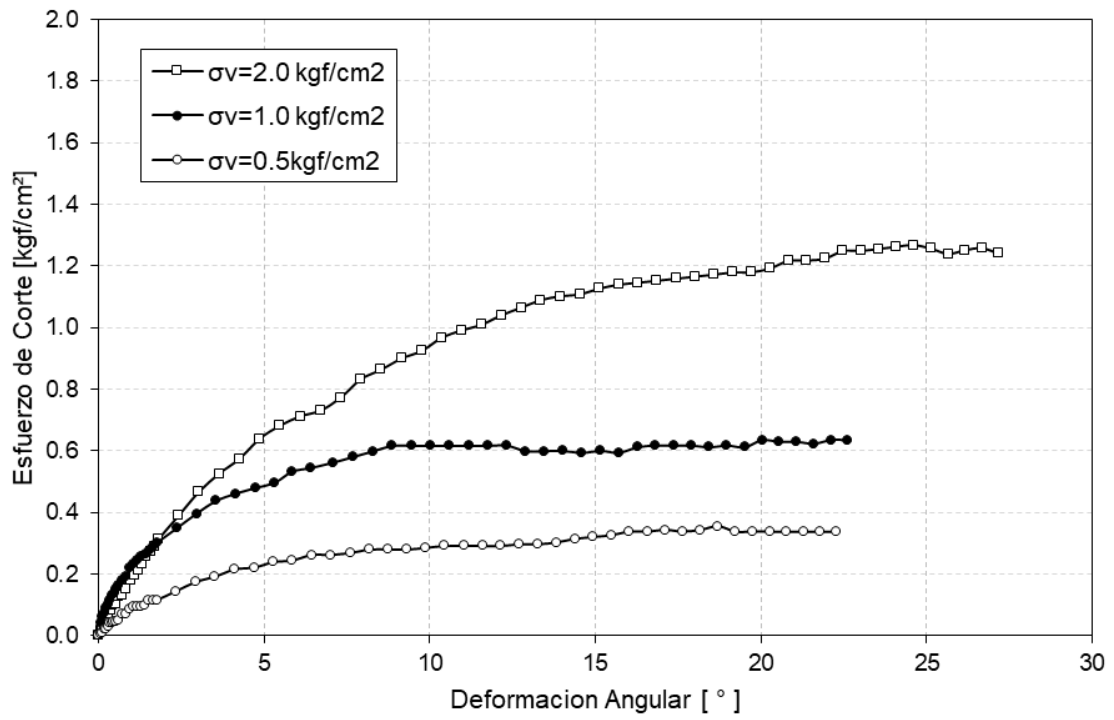


Figura 53. Gráfico esfuerzo de corte vs deformación angular para la arena café (Muestra 17)

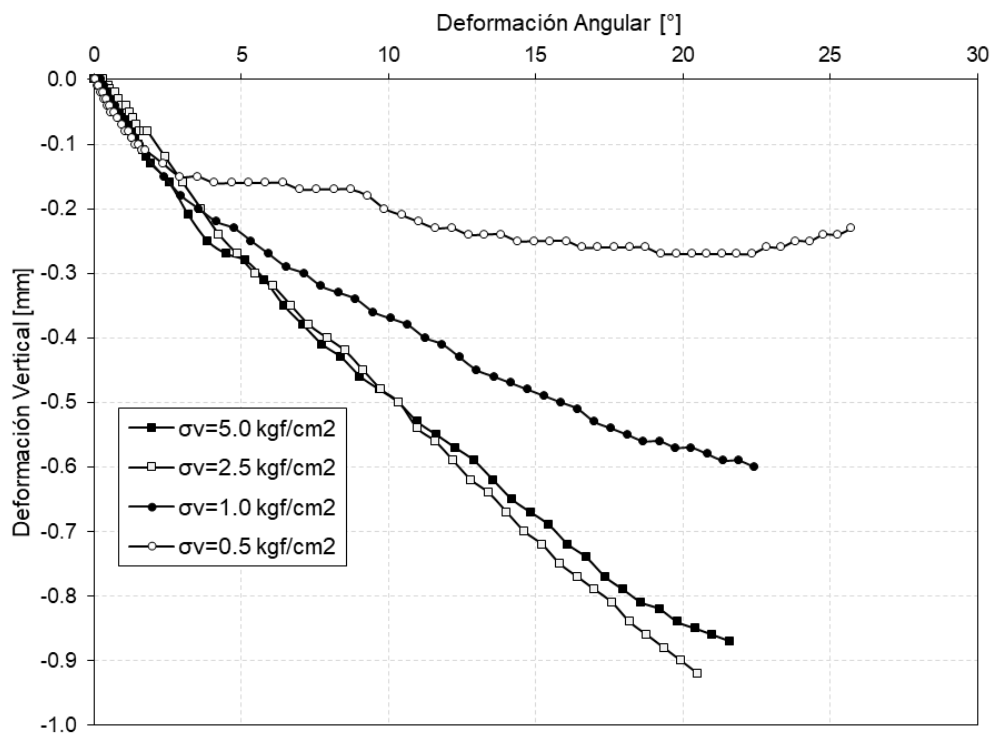


Figura 54. Gráfico deformación vertical vs deformación angular para la Ignimbrita Blanca (Muestra S/N)

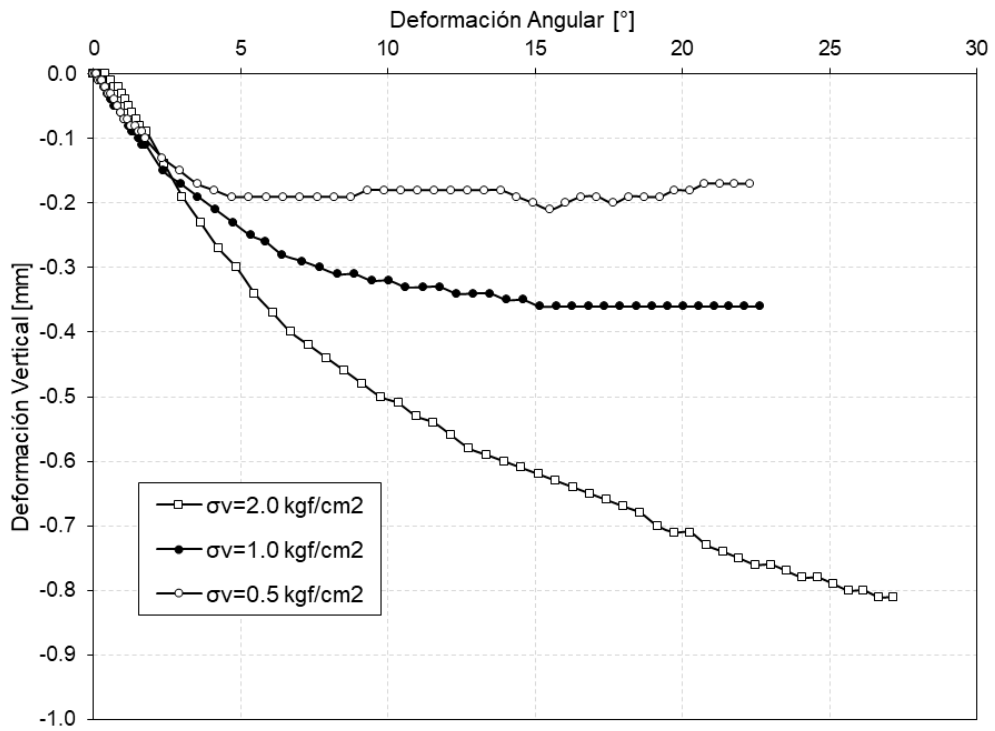


Figura 55. Gráfico deformación vertical vs deformación angular para la arena café (Muestra 17)

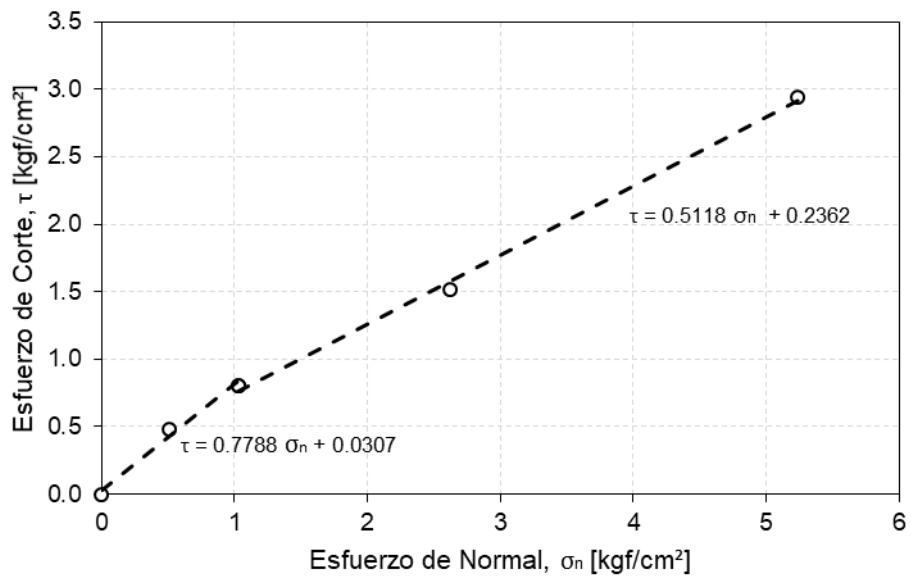


Figura 56. Gráfico de envolvente de falla para la Ignimbrita Blanca (Muestra S/N)

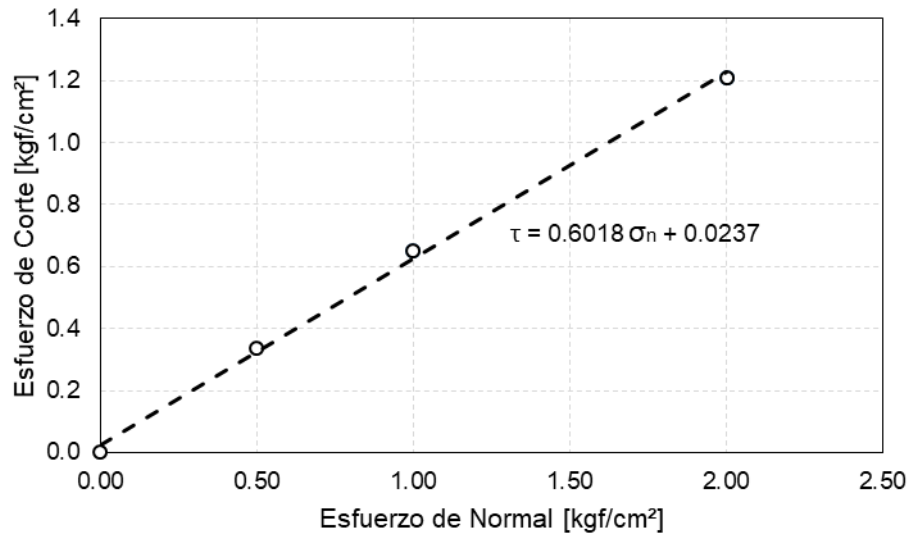


Figura 57. Gráfico de envolvente de falla para la arena café (Muestra 17)

Tabla 16. Resultado del ángulo de fricción interna

Etiqueta de Muestra	Material	ϕ [°]
S/N	Ignimbrita Blanca	38° $\sigma_v \leq 1 \text{ kgf/cm}^2$
		27° $\sigma_v > 1 \text{ kgf/cm}^2$
17	Arena Café	31°

5.11 Compresión no confinada

La Figura 58 muestran curvas de Esfuerzo vs. Deformación resultante del ensayo de compresión no confinada. La Tabla 17 muestra los resultados del cálculo de la cohesión aparente.

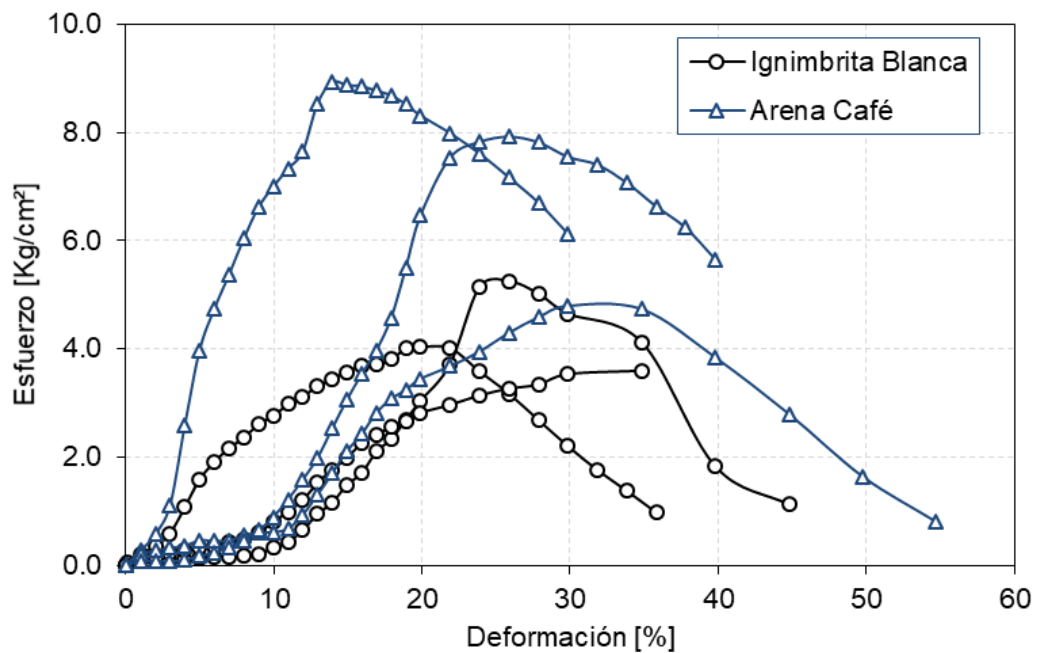


Figura 58. Gráfico de esfuerzo normal vs. deformación para la ignimbrita y la arena en estado congelado.

Tabla 17. Resultado para ensayo compresión simple

Etiqueta de Muestra	Material	Angulo de fricción [°]	Esfuerzo máximo [Kgf/cm ²]	Cohesión [Kgf/cm ²]
S/N	Ignimbrita Blanca	38	5.26	1.28
			4.04	0.98
			3.60	0.88
17	Arena Café	31	8.94	2.53
			4.80	1.36
			7.92	2.24

5.12 Resumen de resultados del programa experimental

Los resultados del programa experimental se resumen a continuación:

- La Tabla 18 resume los resultados obtenidos para la ignimbrita y son comparados con valores reportados en la literatura.
- La Tabla 19 resume los resultados de las propiedades térmicas de los materiales estudiados.

Todos los resultados serán posteriormente usados en el modelo numérico el cual se detallará en el Capítulo 6.

Tabla 18. Propiedades de la ignimbrita

Propiedades	Unidades	Lab.	Ref.
Densidad mínima	[g/cm ³]	0.92	0.77
Densidad máxima	[g/cm ³]	1.22	0.96
Índice de vacíos mínimo	[-]	0.76	0.85
Índice de vacíos máximo	[-]	1.32	1.31
Gravedad específica de los sólidos	[-]	2.14	0.50 - 2.50
Angulo de fricción	[°]	38	41 - 48

Referencia: Pender et al. (2006)

Tabla 19. Propiedades térmicas

Material	ρ 70% DR [g/cm ³]	K Conductividad Térmica [W/m/K]	α Difusividad Térmica [m ² /s · 10 ⁻⁷]	C _p Calor específico [J/kg/K]
Ignimbrita	1.11	0.70	2.98	2114.52
Arena café*	1.65	0.40	2.98	812.86

* La difusividad para la arena café fue estimada a partir de la Ec 5.5, considerando un valor de calor específico reportado en literatura

6 MODELAMIENTO NUMÉRICO

6.1 Modelamiento Térmico

Para el análisis de transferencia de calor en el suelo se utilizó el software de elementos finitos Plaxis 2D versión 2019, Bentley Systems, Inc (2006). Se escogió analizar el talud ubicado en el DM 3+700, por exhibir problemas de estabilidad, dicho talud posee una pendiente 3V:1H y la distribución de los materiales se presenta en la Figura 59.

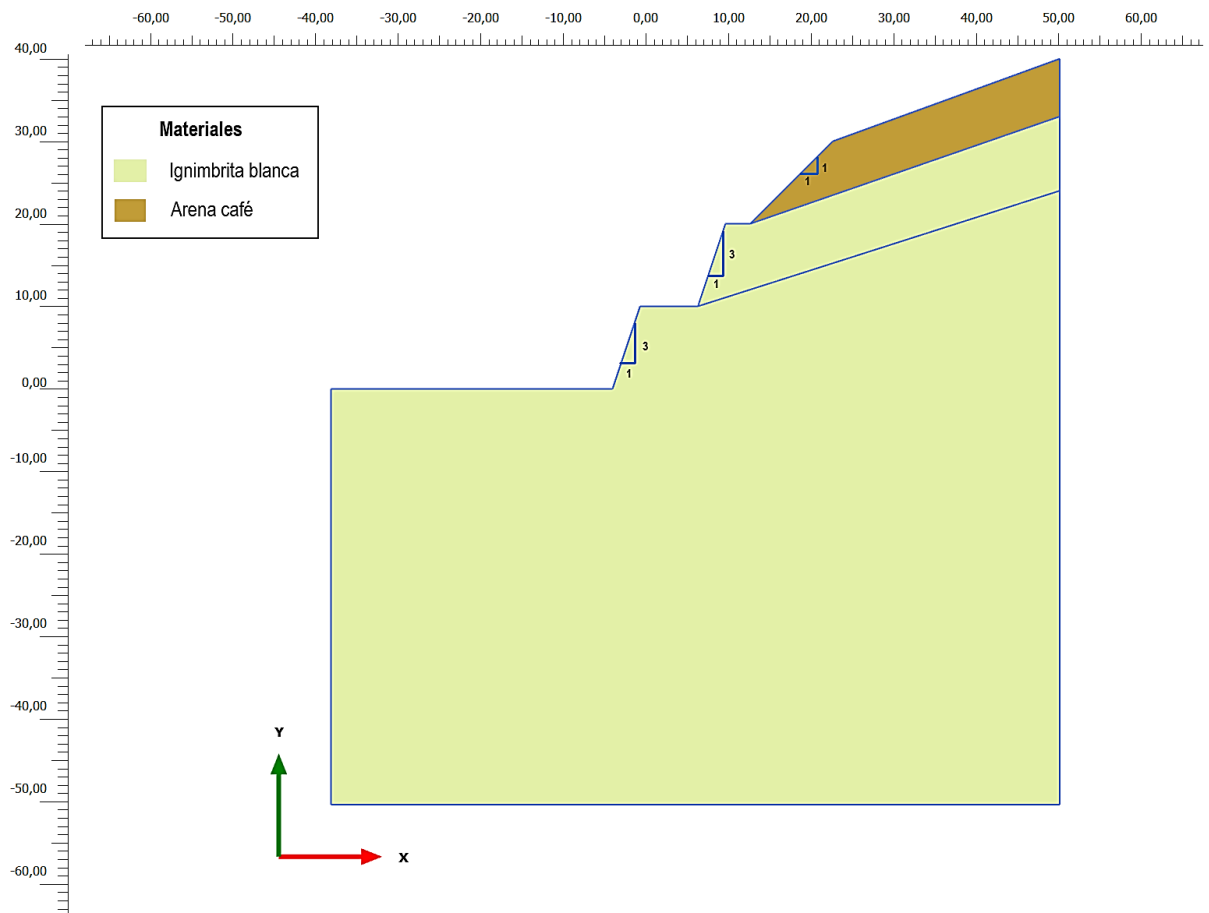


Figura 59. Geometría y asignación de materiales análisis térmico Plaxis

El modelo consta con 2 fases, donde la fase inicial corresponde a la inicialización de temperatura a -0.5°C en toda la geometría, las fase 1 representa las variaciones de temperatura del mes de enero, simulados mediante una señal sinusoidal de amplitud $A=10^{\circ}\text{C}$, periodo $T=1$ día, durante un lapso de 30 días como se muestra en la Figura 61.

Debido a que el interés está centrado exclusivamente en modelar la distribución de temperatura en el subsuelo, el tipo de cálculo elegido en esta etapa será solo flujo (*Flow Only*), el cual permite ignorar cualquier deformación o tensiones del suelo en todas las fases de cálculo. Para esto es únicamente necesario ingresar los parámetros térmicos de los materiales que constituyen la geometría.

6.1.1 Parámetros

Los parámetros térmicos de los materiales fueron obtenidos de las mediciones in-situ y de los ensayos realizados en laboratorio, explicados detalladamente en el Capítulo 4 del presente estudio. La Tabla 20 muestra las propiedades térmicas solicitadas y valores adoptados para los dos materiales que conforman el talud.

Tabla 20. Propiedades térmicas de los materiales considerados en Plaxis

Material	ρ Densidad DR 70% [g/cm ³]	K Conductividad Térmica [W/m-K]	C_p Calor específico [J/kg-K]
Ignimbrita Blanca	1.11	0.70	2114.52
Arena café	1.65	0.40	812.86

6.1.2 Condiciones de Borde

Se impusieron condiciones de borde en el perímetro del talud (Figura 60), donde en los extremos laterales y el fondo (línea roja continua) se asignó la opción *Closed*, indicando que no puede producirse flujo de calor a través del borde, es decir, el límite está perfectamente aislado.

Para el borde superior (línea amarilla segmentada) se asignó la condición de borde *Temperature*, donde se debe especificar la temperatura referencial $T_{ref}=7.75\text{ }^{\circ}\text{C}$, adicionalmente se impone una distribución de temperatura dependiente del tiempo ingresando una señal sinusoidal homogénea como se muestra en la Figura 61, la cual representa de forma simplificada lo observado en los registros de temperatura del mes de Enero obtenido de las mediciones en campo.

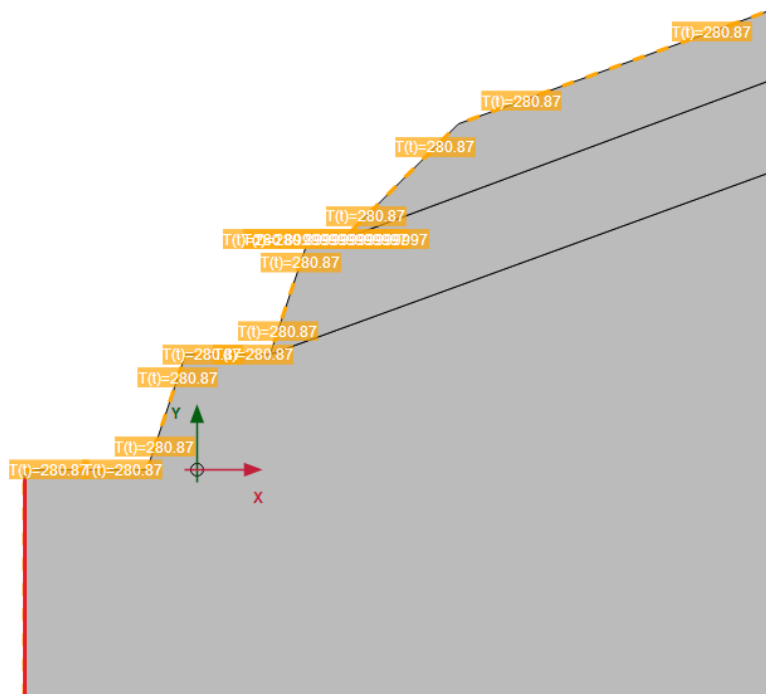


Figura 60. Condiciones de borde asignadas. La línea roja representa condición de borde *Closed* y la línea amarilla segmentada representa condición de borde *Temperature*

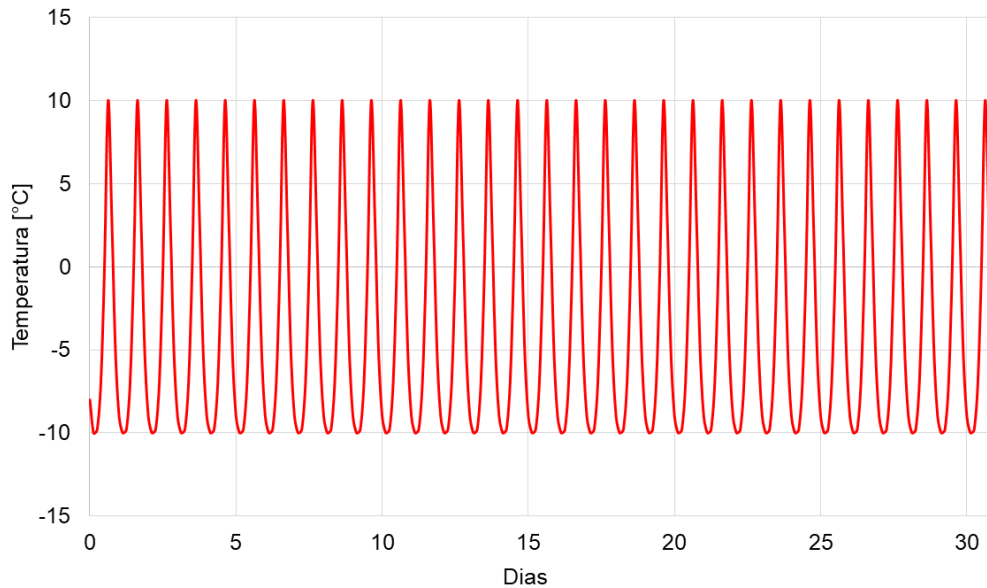


Figura 61. Variación de temperatura considerada como condición de borde en la superficie del modelo. La temperatura representa una condición similar al mes de enero de 2019

6.2 Modelamiento de estabilidad de taludes

Para determinar la estabilidad de los taludes se realizaron análisis de equilibrio límite con el software Slope/W de Geostudio, donde se calcula el FS mediante el método de Janbu.

A pesar de que Janbu no es uno de los métodos más avanzados para la determinación del factor de seguridad, se utilizó debido a que sus resultados coinciden con el método del talud infinito. La metodología del talud infinito representa apropiadamente los taludes estudiados pues su análisis se basa en un talud uniforme y extenso, donde mecanismo de falla es somero y paralelo a la superficie. El factor de seguridad para suelos secos no cohesivos viene dado por la ecuación(6.1

$$FS = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} \quad (6.1)$$

Donde:

φ Angulo de fricción interna [°]

α Angulo del talud [°]

6.2.1 Geometría y Materiales

La Figura 62 muestra la definición de la geometría y los materiales considerados para el análisis de estabilidad. Se estableció una zona de espesor 40 cm, la cual corresponde a la capa activa, donde se degrada la cohesión y se observa el efecto que esta tiene sobre la estabilidad. Para los materiales se utilizó el modelo constitutivo Mohr Coulomb con las propiedades mecánicas obtenidas mediante los ensayos de laboratorio detallados en el Capítulo 4 del presente trabajo.

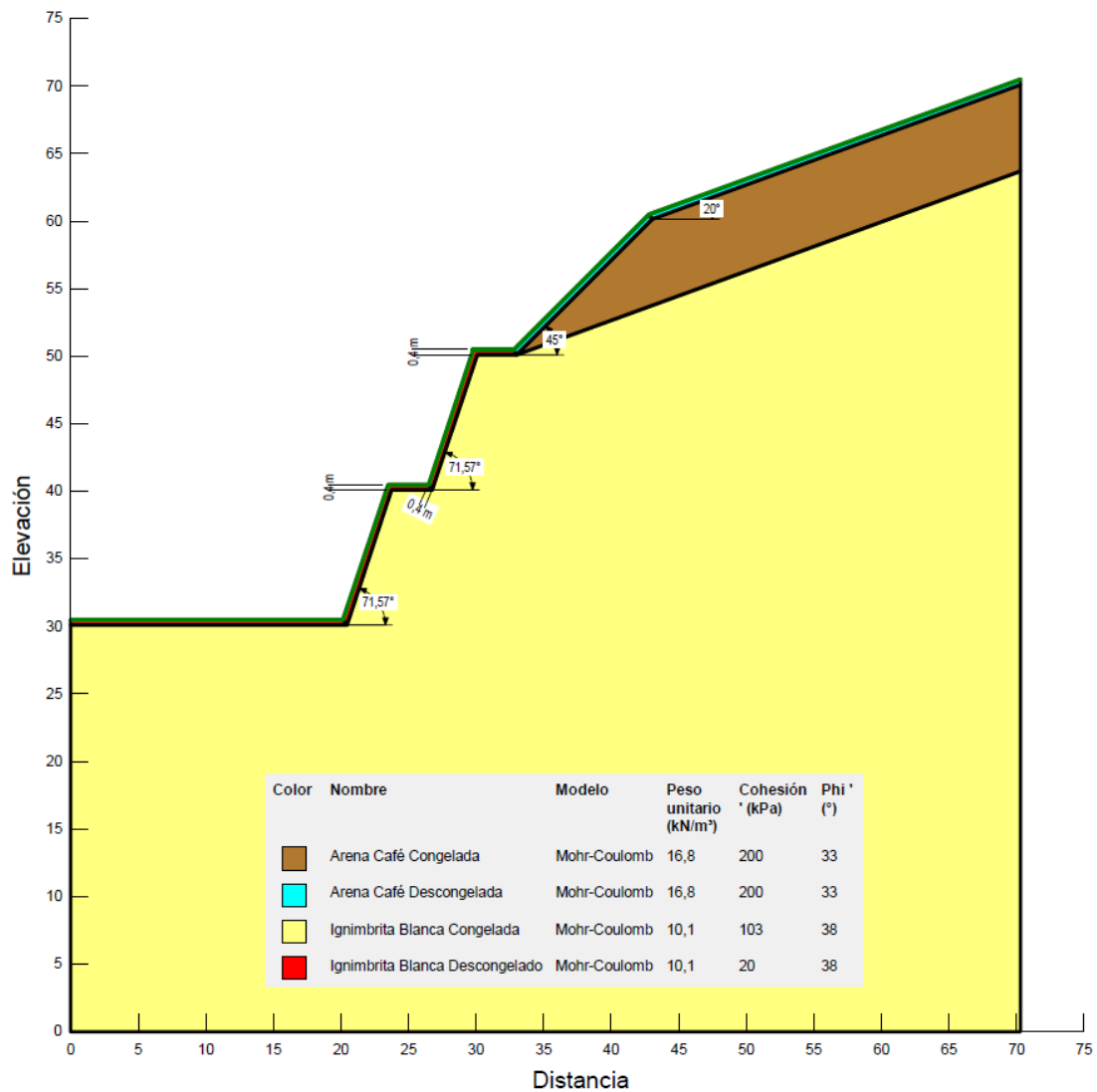
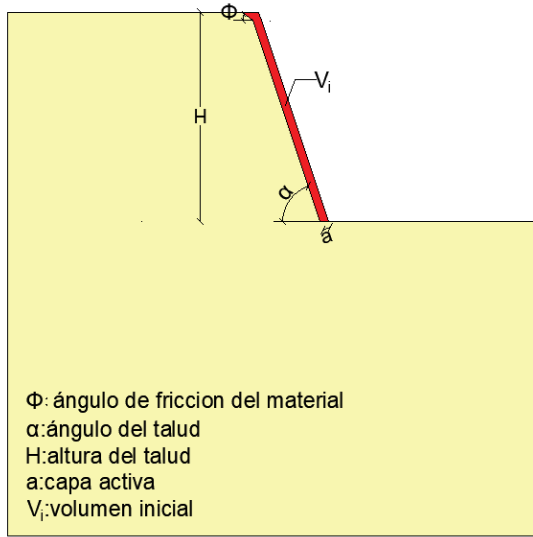


Figura 62. Geometría y materiales para el análisis de estabilidad Slope/W

6.3 Modelo Conceptual

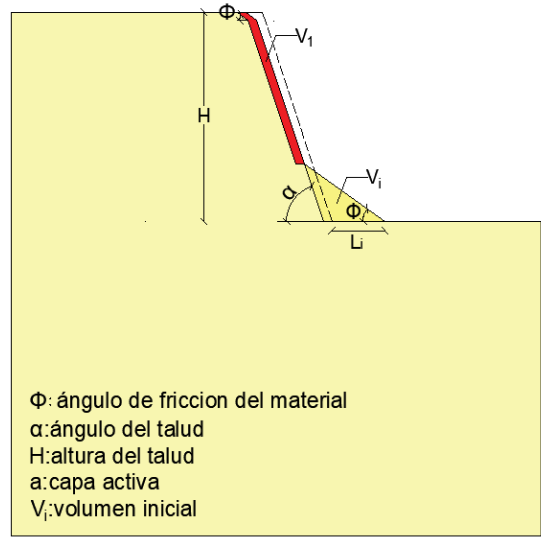
La pérdida de cohesión aparente del permafrost genera deslizamientos locales que son acumulativos en el tiempo. Para observar la progresión de la estabilidad, se desarrolla un modelo conceptual que represente de manera simplificada el cambio de la geometría del talud en el tiempo y el número de ciclos (años) necesarios para alcanzar la estabilidad, bajo el supuesto que el deslizamiento ocurrirá una vez concluido los meses donde se alcanzan las temperaturas máximas, es decir al año ocurrirá un solo deslizamiento del espesor de la capa activa.

La geometría inicial (ciclo 0) del modelo conceptual se muestra en la Figura 63a, donde el volumen sombreado en rojo corresponde a la zona que deslizaría debido al descongelamiento del permafrost, el cual se distribuirá al pie del talud en el siguiente ciclo (ciclo 1) como se muestra en la Figura 63b. Este procedimiento se realizó sucesivamente de forma paramétrica de manera que el modelo pueda ser utilizado de forma general para cualquier geometría, material y espesor de capa activa.



Ciclo 0

(a)



Ciclo 1

(b)

Figura 63. a) Geometría ciclo 0 del modelo conceptual. b) Geometría ciclo 1 del modelo conceptual

7 RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL MODELAMIENTO NUMÉRICO

7.1 Modelamiento térmico

La distribución de temperatura resultante de la aplicación de ciclos de temperatura similares al mes de enero por un lapso de 30 días se muestra en la Figura 64. Se procesan los resultados del modelo de igual manera que los datos de temperatura adquiridos en campo (sensores), donde a través de la curva de trompeta se determina el espesor de la capa activa. En la Figura 65 se contrasta la curva de trompeta calculada numéricamente con la curva de trompeta resultante de los registros en terreno del mes de enero. Se observa que la capa activa de acuerdo al modelo numérico alcanza 280 cm de profundidad, cuando de acuerdo a las mediciones de terreno ésta es de 20 cm, exhibiendo que el modelo numérico sobreestima en un orden de magnitud la profundidad de la capa activa.

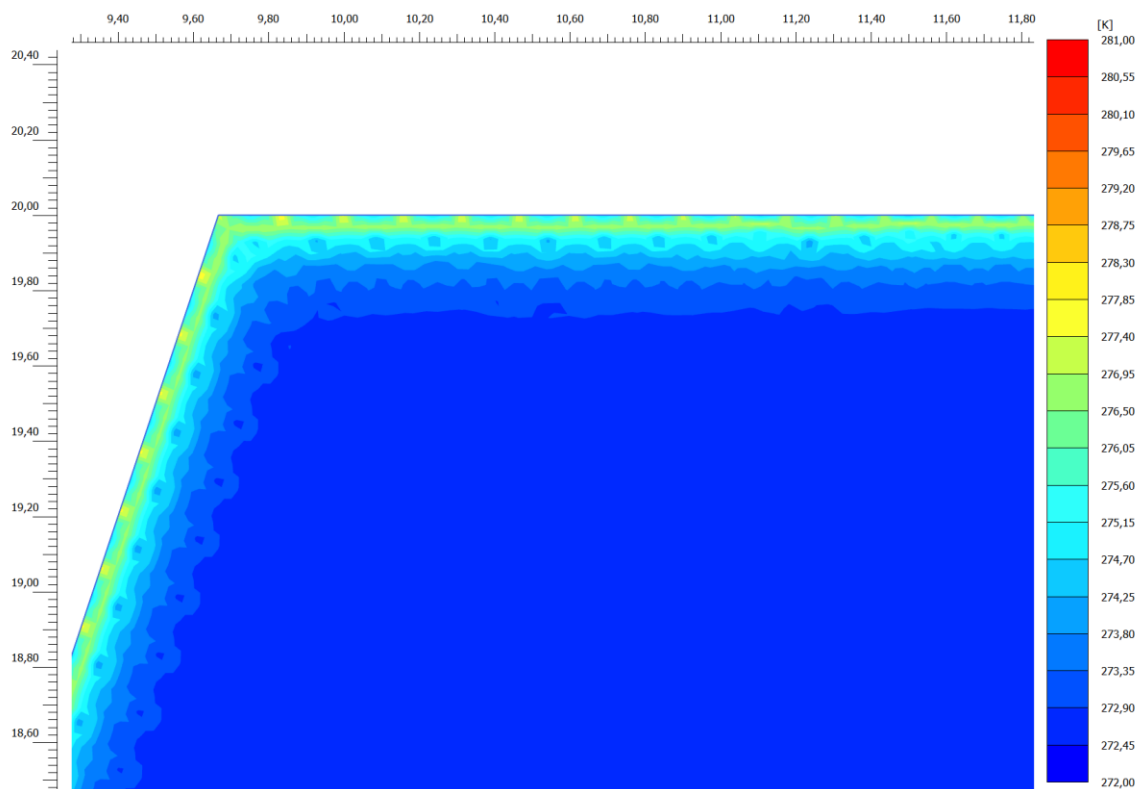


Figura 64. Detalle de la distribución de temperatura del modelamiento térmico para el mes de Enero

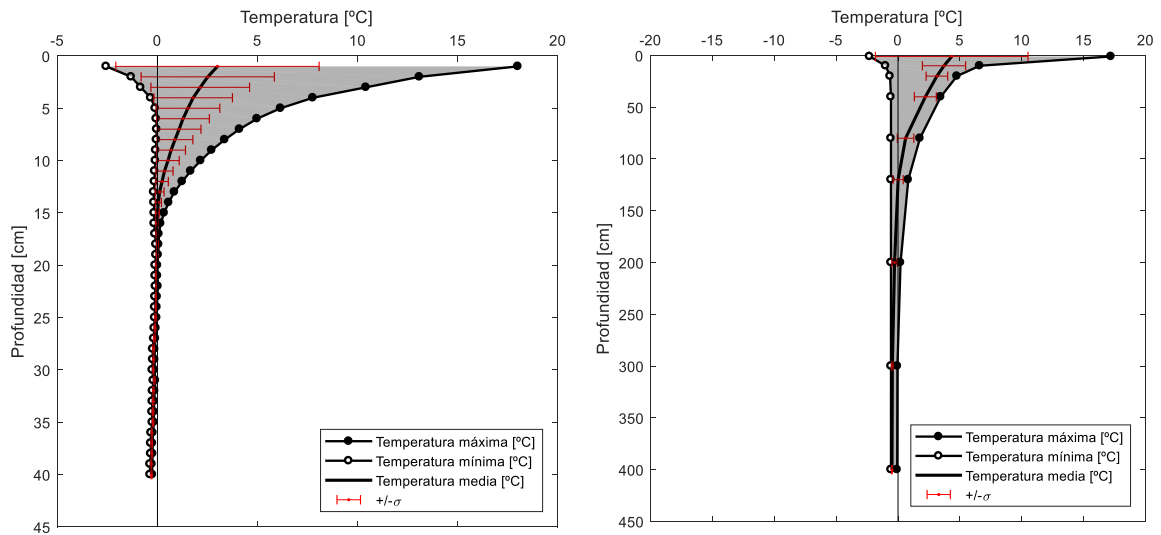


Figura 65. Curvas de trompeta correspondientes al mes de enero de 2019. a) Curva resultante de los datos de temperatura b) Curva resultante del modelo numérico

Difusividad efectiva

Para ajustar las mediciones de temperatura en terreno, se procede a variar las propiedades térmicas de los materiales en el modelo numérico, la Tabla 21 muestra los nuevos valores adoptados y la difusividad efectiva resultante. Cabe recalcar que los valores del calor específico y de la difusividad efectiva se encuentran fuera del rango de valores reportados en literatura. La Figura 66b muestra la curva de trompeta recalculada con una difusividad efectiva que es 112 veces menor a la difusividad estimada a partir de los datos de campo como muestra la ecuación (7.1

Tabla 21. Nuevas propiedades térmicas

Material	ρ 70% DR [g/cm ³]	K Conductividad Térmica [W/mK]	C_p Calor específico [J/kg K]	α Difusividad Térmica [m ² /s · 10 ⁻⁹]
Ignimbrita Blanca	1.11	0.40	135000*	2.67

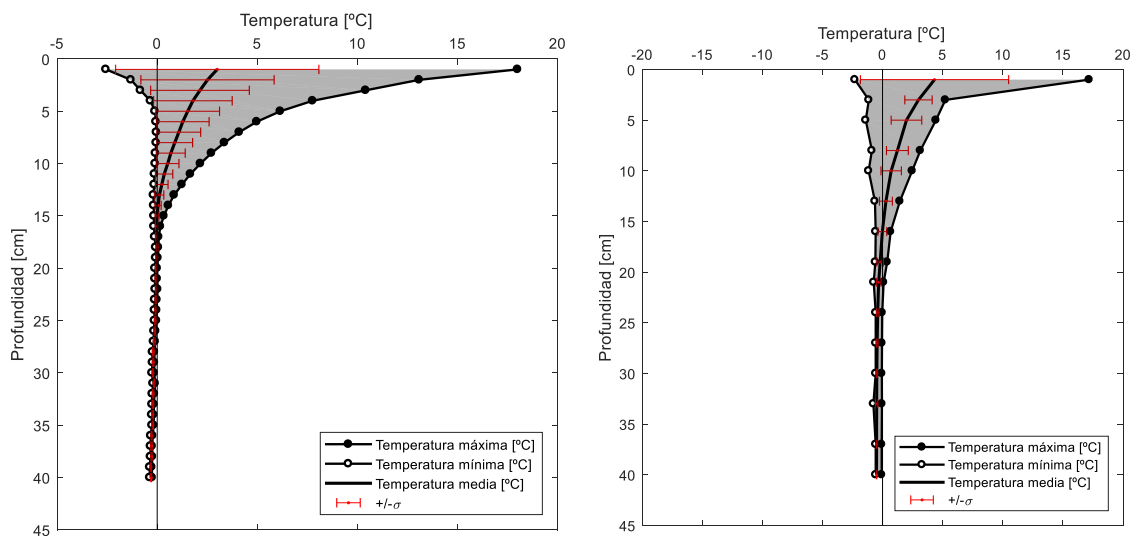


Figura 66. Curvas de trompeta correspondientes al mes de enero de 2019. a) Curva medida en campo, b) curva simulada numéricamente con la difusividad efectiva.

$$\frac{\alpha_{estimado}}{\alpha^*_{efectivo}} = \frac{2.98 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}}{2.67 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}} = 112 \quad (7.1)$$

Se contrasta nuevamente las curvas de trompeta, donde en la Figura 66a se muestra curva de trompeta resultante de los registros de temperatura en terreno del mes de enero, mientras que la Figura 66b muestra la curva de trompeta obtenida con la difusividad efectiva aplicando ciclos de temperatura diarias, similares al mes de enero por 30 días. Se observa que con el ajuste realizado el espesor de la capa activa para ambos casos es de 20 cm, sin embargo a pesar de que en la superficie ambas curvas muestran los mismos valores extremos, la distribución de temperaturas en profundidad no es la misma. Se aprecia que la tendencia de las temperaturas mínimas del modelo en profundidad se encuentra más alejada de los 0°C como consecuencia de imponer una señal de ciclos de temperatura diarios homogéneos.

Cuando se alcanzan las máximas temperaturas, el permafrost se encuentra más susceptible al descongelamiento y por ende a generar deslizamientos debido a la pérdida de cohesión aparente que experimentan los materiales. Este fenómeno sucede durante 3 meses en un año, donde los ciclos diarios de temperatura pueden alcanzar hasta los 15°C, específicamente los meses estivales comprendidos entre Enero a Marzo. Utilizando el modelo numérico con la difusividad efectiva, se determinó que la máxima profundidad que la capa activa puede alcanzar es de 40 cm, es decir una capa de espesor de 40 cm en el perímetro del talud se verá afectado por las variaciones térmicas y una pérdida de cohesión aparente como se muestra en la Figura 62, dato que será usado para el modelamiento de estabilidad de taludes.

7.2 Modelamiento de estabilidad de taludes

La Tabla 22 muestra los resultados del factor de seguridad por distintos métodos para el caso cuando los materiales han perdido totalmente su cohesión. Donde se evidencia que el FS estimado por método de Janbu coincide con el método de talud infinito, motivo por el cual para los análisis se usó el método de Janbu.

Tabla 22. Factores de seguridad para diferentes métodos de análisis

Material	Método de talud infinito	Metodo Janbu	Método Morgenstern-Price	Método Spencer
Ignimbrita	0.26	0.27	0.52	0.45
Arena café	0.65	0.66	0.80	0.73

Las superficies de deslizamiento fueron analizadas mediante la opción grilla y radio donde se define una grilla de búsqueda de los posibles centros de la falla circular, y una grilla de posibles radios de superficies de falla. La Figura 67 presenta los resultados del análisis de estabilidad para el caso del talud conformado por ignimbrita, en la Figura 67a se muestra que el factor de seguridad asociado al caso más desfavorable es FS=13.2 cuando el material se encuentra congelado, mientras que en la Figura 67b muestra el efecto de la pérdida total de la cohesión aparente cuando el material se descongela reduciendo el factor de seguridad a FS=0.3. La degradación total de la cohesión ocasiona que el factor de seguridad disminuya 38 veces lo que explica la ocurrencia de deslizamientos.

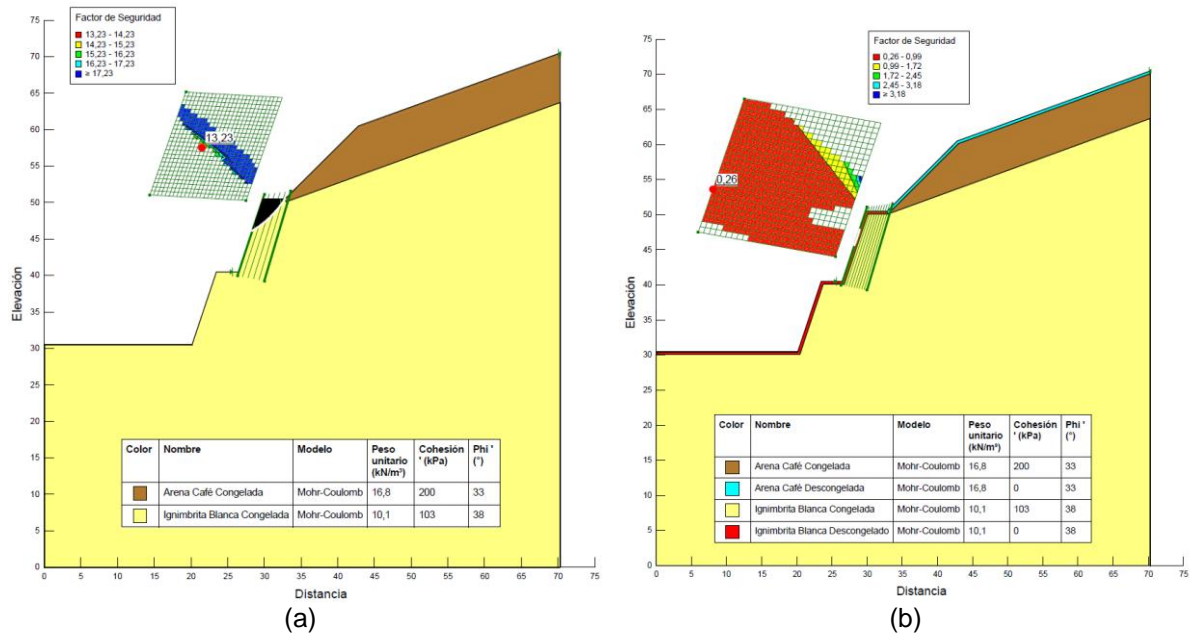


Figura 67. Resultado de análisis de estabilidad del talud conformado por ignimbrita. a) Análisis de estabilidad correspondiente a materiales congelados b) Análisis de estabilidad correspondiente a materiales descongelados donde existe pérdida total de cohesión.

La Figura 68 presenta los resultados del análisis de estabilidad para el caso del talud conformado por arena donde se observa en la Figura 68a que el factor de seguridad cuando el material se encuentra congelado es FS=9.26, mientras que en la Figura 68b cuando el material se descongela y pierde totalmente su cohesión aparente el factor de seguridad es FS=0.66, es decir que la degradación de la cohesión aparente ocasiona que el factor de seguridad disminuya 14 veces.

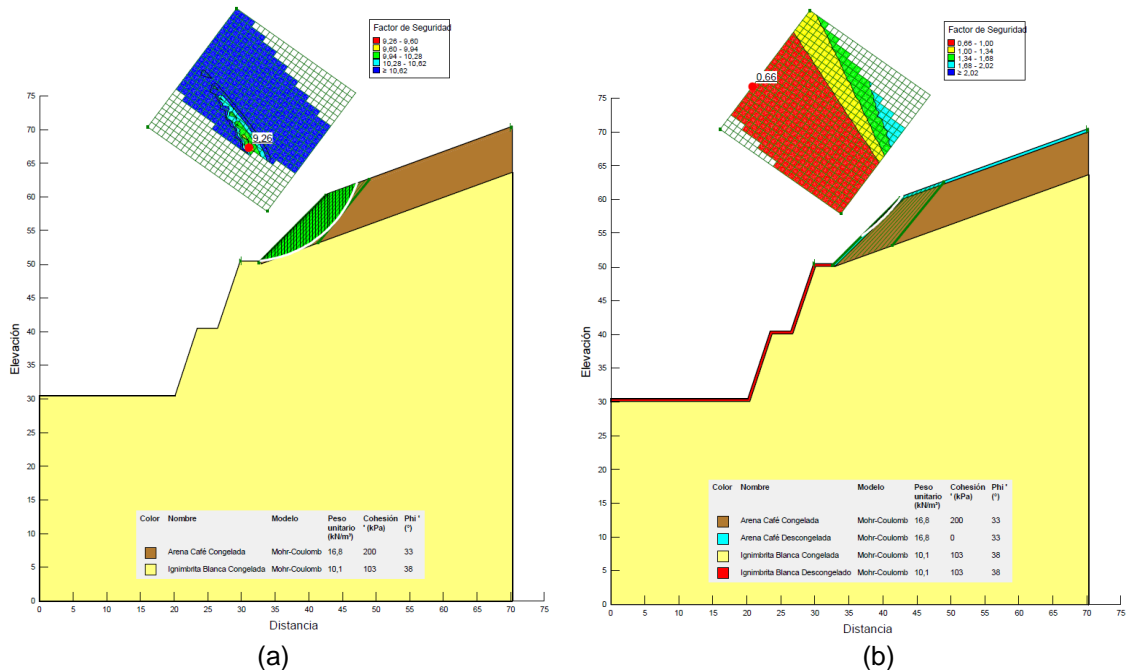


Figura 68. Resultado de análisis de estabilidad del talud conformado por arena. a) Análisis de estabilidad correspondiente a materiales congelados b) Análisis de estabilidad correspondiente a materiales descongelados donde existe pérdida total de cohesión.

Se realizaron los análisis bajo el supuesto que la pérdida de cohesión aparente fuese total e inmediata con el fin de observar el efecto que provoca en la estabilidad, sin embargo su degradación está relacionada con el calentamiento del sistema en el tiempo, es decir la pérdida de cohesión aparente sucede de manera progresiva y podría existir una cohesión residual, la Figura 69 muestra la variación del FS con la cohesión para cada uno de los materiales que conforma el talud, donde se observa que para el caso de la ignimbrita basta con que la cohesión sea 1.5 KPa para que el FS=1 y para el caso de la arena café la cohesión debe ser 1 KPa para que el FS=1.

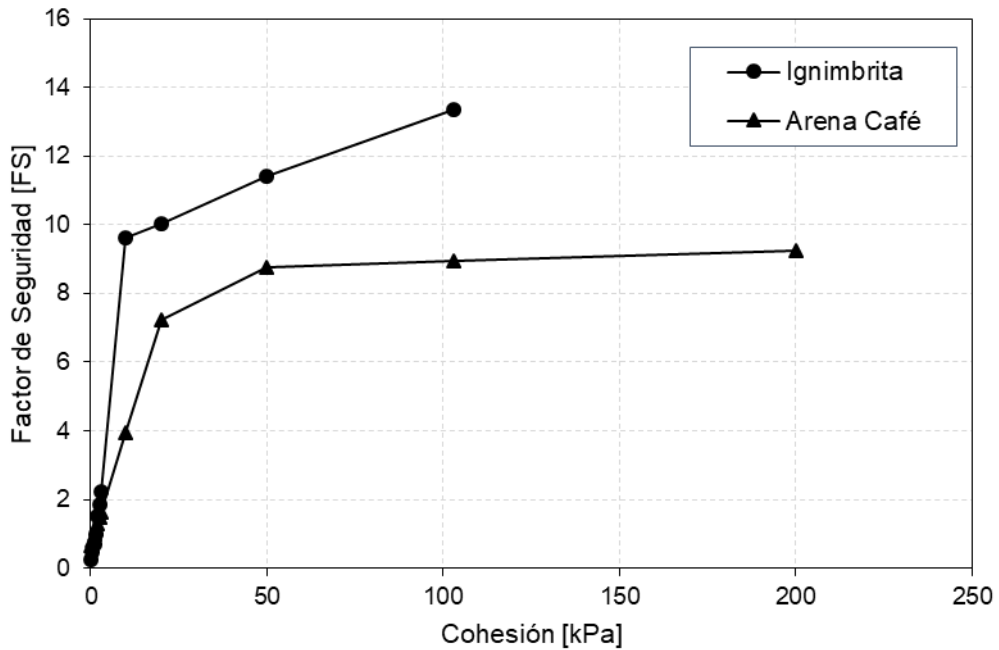


Figura 69. Variación del FS con la cohesión

7.3 Modelo conceptual

Se conoce que los ciclos donde se alcanza la máxima temperatura diaria, ocurren durante 3 meses en un año provocando una penetración total de 40 cm al final del tercer mes. Utilizando el modelo teórico desarrollado se analizó una geometría similar a la del talud (Tabla 23) del caso de estudio donde se han presentado problemas de estabilidad para determinar el número de ciclos necesarios para alcanzar una condición estable frente a los cambios de temperatura. Se encontró que el talud en estudio alcanzara la estabilidad en el ciclo 11, es decir luego de transcurrir 11 años el talud será estable y su geometría final se muestra en la Figura 70.

Tabla 23. Geometría del talud

Altura Talud [H]	10.00	m
Espesor afectado [a]	0.40	m
Largo pie de Talud [Lp]	10.00	m
Largo cabeza Talud [Lc]	7.00	m
ángulo del talud [α]	71.57	°
ángulo de fricción de material [ϕ]	38	°

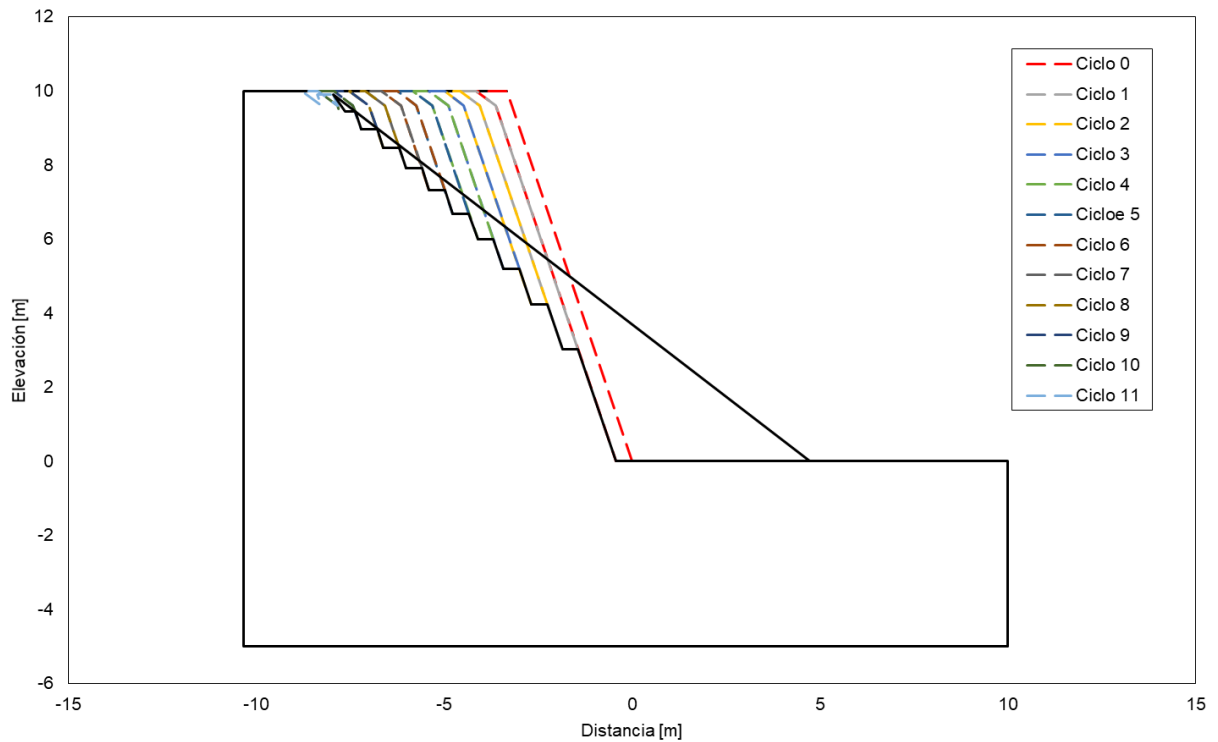


Figura 70. Modelo conceptual aplicado a talud DM 3+700 para determinar el número de ciclos requeridos para alcanzar estabilidad.

Se conoce que la capa activa en zonas polares es de aproximadamente 1.0 m de espesor. Utilizando el modelo conceptual se determina que un talud de iguales características, pero ubicado en una zona polar donde el espesor afectado es $a=1.0$ m, requiere de 4 años para alcanzar la estabilidad. Siendo aproximadamente tres veces menor al tiempo que demora en alcanzar la estabilidad en una zona tropical como se muestra en la ecuación (7.2).

$$\frac{NC_{Zona Tropical}}{NC_{Zona Polar}} = \frac{11}{4} = 2.75 \quad (7.2)$$

La Figura 71 muestra que a mayor altura de talud, se requiere mayor número de ciclos para alcanzar la estabilidad y que el aumento del espesor de la capa activa disminuye el número de ciclos necesarios para alcanzar la estabilidad.

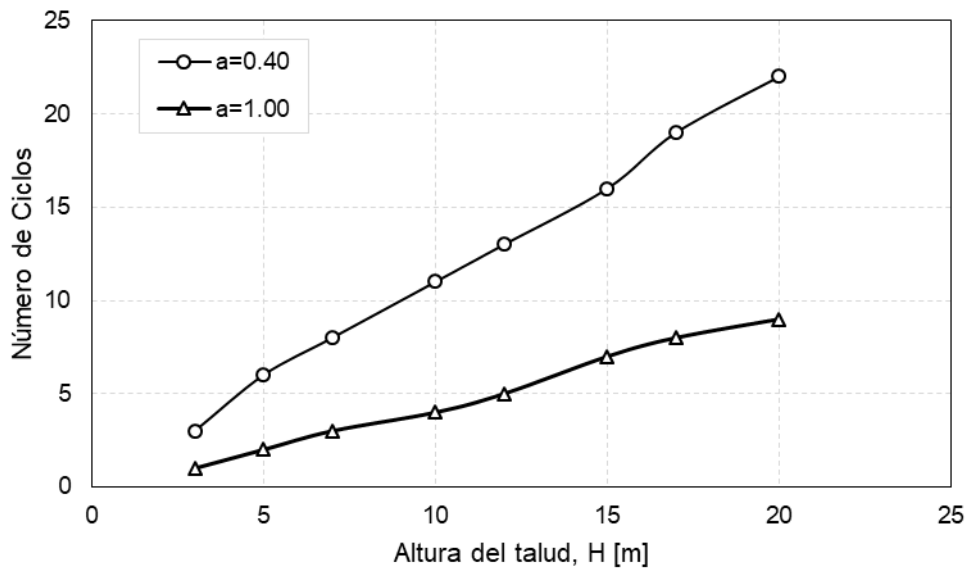


Figura 71. Numero de ciclos vs. Altura del talud.

8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El cerro Chajnantor es un estrato volcán formado por una alternancia de lavas y depósitos piroclásticos poco consolidados conocido como ignimbrita, donde existe permafrost a partir de los 5,200 m.s.n.m. En el camino de acceso a la cima del cerro, el talud ubicado en el kilómetro 3.70 a 5,200 m.s.n.m presenta problemas de estabilidad, correspondientes a desprendimientos de bloques de roca y suelo, de manera local en la parte superior e intermedia del talud. La zona se caracteriza por encontrarse en un cauce de flujo de material volcánico que posee un alto contenido de hielo segregado e intrusivo.

Debido a las condiciones adversas en campo, no fue posible determinar la densidad in situ de los materiales, dado esta falta de información se realizó el supuesto que la densidad in situ corresponde al 70% de la densidad relativa. Bajo este supuesto se desarrolló la presente investigación por lo que se debe considerar que los resultados son susceptibles a cambios.

El suelo es un sistema multifase con un complejo mecanismo de intercambio de calor; sin embargo para la presente investigación se consideró que la transferencia de calor ocurre principalmente por conducción. Basado en este principio, haciendo uso de los datos de temperatura del subsuelo y las mediciones de las propiedades térmicas de los materiales realizadas in-situ y en laboratorio se determinó que:

- El espesor de la capa activa que está sometida a ciclos de congelación y descongelación periódicos es de 20 cm, donde inmediatamente por debajo de ella yace el permafrost. Los meses en que la capa activa está descongelada y alcanza las máximas temperaturas corresponden a los meses estivales de enero a marzo, mientras que de abril a octubre esta capa se encuentra congelada.
- La conductividad térmica aumenta con el contenido de agua y aumenta cuando los materiales están congelados, lo cual se debe a que los espacios vacíos que contienen aire, que posee una baja conductividad térmica ($k_{\text{aire}} = 0.02 \text{ W/m/K}$), son reemplazados por agua o hielo intersticial cuya conductividad es mucho más alta ($k_{\text{hielo}} > 2.25 \text{ W/m/K}$).
- La conductividad térmica medida en campo de la ignimbrita es de 0.70 W/m/K y la de la arena es de 0.40 W/m/K
- La difusividad térmica de los materiales no es constante, lo cual puede estar asociado a variaciones estacionales del contenido de humedad del suelo, donde a mayor contenido de humedad la difusividad térmica también aumenta.
- La difusividad térmica estimada de los materiales que conforma el talud (ignimbrita y arena) es de $2.98 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
- El calor específico estimado de la ignimbrita es de $2115 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ y de la arena $813 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

Se construyó un modelo térmico del talud en Plaxis, utilizando las propiedades térmicas medidas y estimadas, con el fin de verificar la distribución de temperaturas del subsuelo medidas a partir de un arreglo de sensores de temperatura que alcanza una profundidad de 40 cm. El resultado del modelamiento indica que la capa activa alcanza 280 cm de profundidad, en lugar de los 24 cm medidos en terreno. Este resultado exhibe que la metodología utilizada para modelar numéricamente los cambios térmicos en el talud con permafrost sobreestima la profundidad de penetración del calor, sugiriendo un descongelamiento mayor que el observado en terreno, lo cual puede deberse a que por

simplicidad el único mecanismo de transferencia de calor usado en el modelo fue la conducción, despreciando completamente la convección la cual podría tener incidencia en los resultados.

La difusividad efectiva que permite ajustar el modelo a las mediciones de temperatura es $2.67 \cdot 10^{-9}$ m²/s, 112 veces menor a la difusividad térmica estimada a partir de los datos. Con la difusividad efectiva y conociendo que el sistema se encuentra sometido a ciclos diarios con altas temperaturas por un periodo de tres meses, se determinó que los ciclos pueden causar degradación del permafrost hasta una profundidad máxima de 40 cm. Sin embargo los valores de difusividad efectiva y calor específico utilizados para ajustar el modelo se encuentran fuera del rango de valores reportados en literatura. Por esta razón, es necesario contar con registros de temperatura en profundidad de por lo menos un año consecutivo para determinar los efectos de la temperatura en el subsuelo.

La capa activa de los taludes se ha visto afectada debido al movimiento de tierras, dejando expuesto el permafrost y permitiendo la degradación de los materiales congelados. Desde el punto de vista ingenieril, el permafrost favorece la estabilidad de taludes, pues el hielo en los materiales actúa como cementante, brindando una cohesión aparente y mayor resistencia al corte. En los meses estivales entre enero y marzo, los materiales son susceptibles a descongelamiento debido a las altas temperaturas, provocando la pérdida de la cohesión aparente, y por ende la reducción de la resistencia al corte, lo que puede desencadenar la ocurrencia de deslizamientos. Dada la importancia y la falta de información del contenido de hielo que poseen los taludes se consideró que el grado de saturación de los materiales es el del 40% y que toda el agua se congela, además de considerar que la densidad es el 70% de la densidad relativa. Basado en estos supuestos y de acuerdo a los ensayos de corte simple en laboratorio realizados en los materiales que conforman el talud en estudio, se determinó que:

- La ignimbrita tiene un ángulo de fricción interna de 38° para esfuerzos verticales menores a 1 kgf/cm² y de 27° para esfuerzos verticales mayores. Se especula que esta reducción se debe a la rotura de las partículas más frágiles del material.
- Los valores del ángulo de fricción para los materiales pueden ser diferentes a los obtenidos en el estudio, en caso que la densidad in situ sea menor a la considerada, provocara que el ángulo de fricción decrezca.
- La cohesión aparente de la ignimbrita en estado congelado con un grado de saturación del 40% se estimó en 1.05 kgf/cm².
- La arena tiene un ángulo de fricción interna de 31° y la cohesión aparente en estado congelado con un 40% de saturación se estimó en 2.00 kgf/cm².
- Es importante considerar que los valores de la cohesión aparente son susceptible a cambios debido a los supuestos considerados, donde en caso de que la saturación del suelo sea menor, implica que el contenido de hielo será menor y por ende un menor efecto cementante.

Considerando el análisis térmico y las propiedades geomecánicas de los materiales, se realizó un análisis de equilibrio límite con el software Slope/W de Geostudio estableciendo una zona de espesor 40 cm, donde se degrada la cohesión y se observa su efecto sobre la estabilidad:

- Se utilizó el método de Janbu para los análisis, pues el FS estimado a partir de Janbu coincide con el FS estimado por el método del talud infinito.

- El factor de seguridad del talud conformado por ignimbrita asociado al caso más desfavorable es $FS= 13.2$ cuando el material se encuentra congelado, mientras que el factor de seguridad es $FS= 0.3$ cuando el material se descongela y existe pérdida total de la cohesión aparente. La degradación total de la cohesión ocasiona que el factor de seguridad sea menor que 1, lo que puede explicar la ocurrencia de deslizamientos.
- El factor de seguridad del talud conformado por arena asociado al caso más desfavorable es $FS=9.3$ cuando el material se encuentra congelado, mientras que el factor de seguridad es $FS=0.7$ cuando el material se descongela y existe pérdida total de la cohesión aparente. La degradación total de la cohesión ocasiona que el factor de seguridad disminuya y sea menor que 1.
- Mediante el análisis de estabilidad se observó que la degradación de la cohesión provoca que la reducción del factor sea menor a uno, lo que explica los problemas de estabilidad y deslizamientos de material en los taludes del proyecto TAO, específicamente el talud ubicado en el kilómetro 3.8.

Los análisis de estabilidad fueron realizados bajo el supuesto que la pérdida de cohesión aparente fuese inmediata y total con el fin de observar el efecto que provoca en la estabilidad; sin embargo su degradación está relacionada con el calentamiento del sistema en el tiempo, es decir, la pérdida de cohesión aparente y la disminución del FS suceden de manera gradual, además de existir la posibilidad de que a pesar de que los materiales se descongelan exista una cohesión residual. Se observó que para el caso de la ignimbrita basta con que la cohesión sea 1.5 kPa para que el $FS=1$ y para el caso de la arena café la cohesión debe ser 1 kPa para que el $FS=1$.

Para observar la progresión de la estabilidad en el tiempo, se desarrolló un modelo conceptual de forma paramétrica de manera que el modelo pueda ser utilizado de forma general para cualquier geometría, material y espesor de capa activa. Se analizó una geometría similar a la del talud del caso de estudio donde se han presentado problemas de estabilidad donde se determinó que:

- Bajo el supuesto que el deslizamiento ocurrirá una vez concluido los tres meses estivales de altas temperaturas, es decir, cada ciclo representa un año durante el cual ocurre un deslizamiento de 40 cm de profundidad en el talud, se necesitan 11 años para que el talud pueda alcanzar la estabilidad.
- Un talud de iguales características, pero ubicado en una zona polar donde el espesor afectado es $a=1.0$ m, requiere de 4 años para alcanzar la estabilidad. Siendo aproximadamente tres veces menor al tiempo que demora en alcanzar la estabilidad en una zona tropical
- A mayor altura de talud, se requiere mayor número de ciclos para alcanzar la estabilidad y el aumento del espesor de la capa activa disminuye el número de ciclos necesarios para alcanzar la estabilidad

Construir taludes más tendidos garantizaría la estabilidad de los mismos a pesar de la pérdida de cohesión aparente por la degradación del permafrost; sin embargo, esto provoca un aumento en el costo del proyecto por el aumento del trabajo de movimiento de tierras. Por esta razón, se debe buscar un balance adecuado entre el costo de la obra y la estabilidad de los taludes con permafrost que mejore la seguridad de obras relevantes como la del observatorio TAO.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 Conclusiones

A partir de los resultados y análisis del programa experimental in-situ y en laboratorio se puede concluir que:

- El espesor de la capa activa que está sometida a ciclos de congelación y descongelación periódicos es de 20 cm, donde inmediatamente por debajo de ella yace el permafrost. Sin embargo se debe considerar que se cuenta con registros de temperatura de menos de un año, por lo que el espesor podría ser diferente.
- Los meses en que la capa activa está descongelada y alcanza las máximas temperaturas corresponden a los meses estivales de enero a marzo, mientras que de abril a octubre esta capa se encuentra congelada.
- La conductividad térmica de los materiales aumenta con el contenido de agua y la conductividad térmica de los materiales en estado congelado es mayor debido a que los espacios vacíos antes ocupado por aire, son reemplazados por agua o hielo intersticial cuya conductividad es mucho más alta.
- La conductividad térmica medida en campo de la ignimbrita es de 0.70 W/m/K y la de la arena es de 0.40 W/m/K.
- La difusividad térmica de los materiales no es constante, lo cual puede estar asociado a variaciones estacionales del contenido de humedad del suelo, donde a mayor contenido de humedad la difusividad térmica también aumenta.
- La difusividad térmica estimada de los materiales que conforma el talud (ignimbrita y arena) es de $2.98 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
- El calor específico estimado de la ignimbrita es de 2115 J/kg/K y de la arena 813 J/kg/K
- La ignimbrita tiene un ángulo de fricción interna de 38° para esfuerzos verticales menores a 1 kgf/cm² y de 27° para esfuerzos verticales mayores. Se especula que esta reducción se debe a la rotura de las partículas más frágiles del material. La cohesión aparente de la ignimbrita en estado congelado con un grado de saturación del 40% se estimó en 1.05 kgf/cm².
- La arena tiene un ángulo de fricción interna de 31° y la cohesión aparente en estado congelado con un 40% de saturación se estimó en 2.00 kgf/cm².

En cuanto a los resultados del modelo térmico se concluye que:

- La metodología utilizada para modelar numéricamente los cambios térmicos en el talud con permafrost sobreestima la profundidad de penetración del calor, sugiriendo un descongelamiento mayor que el observado en terreno, lo cual puede deberse a que por simplicidad el único mecanismo de transferencia de calor usado en el modelo fue la conducción, despreciando completamente la convección la cual podría tener incidencia en los resultados.
- La difusividad efectiva que permite ajustar el modelo a las mediciones de temperatura es 112 veces menor a la difusividad térmica estimada a partir de los datos
- Luego de ajustar el modelo, se sometió el sistema a ciclos diarios con altas temperaturas por un periodo de tres meses, donde se observa que la degradación del permafrost puede llegar hasta una profundidad máxima de 40 cm.

Con respecto a los resultados del modelo de estabilidad se concluye que:

- El factor de seguridad del talud conformado por ignimbrita asociado al caso más desfavorable es $FS= 13.2$ cuando el material se encuentra congelado, mientras que el factor de seguridad es $FS= 0.3$ cuando el material se descongela y existe pérdida total de la cohesión aparente.
- El factor de seguridad del talud conformado por arena asociado al caso más desfavorable es $FS=9.3$ cuando el material se encuentra congelado, mientras que el factor de seguridad es $FS=0.7$ cuando el material se descongela y existe pérdida total de la cohesión aparente.
- Mediante el análisis de estabilidad se observó que la degradación de la cohesión provoca que la reducción del factor sea menor a uno, lo que explica los problemas de estabilidad y deslizamientos de material en los taludes del proyecto TAO, específicamente el talud ubicado en el kilómetro 3.8.

A partir del modelo conceptual se concluye que:

- El talud ubicado en el kilómetro 3.8, alcanzará la estabilidad luego de 11 años aproximadamente.
- Un talud de iguales características, pero ubicado en una zona polar donde el espesor afectado es $a=1.00$ m, requiere de 4 años para alcanzar la estabilidad. Siendo aproximadamente tres veces menor al tiempo que demora en alcanzar la estabilidad en una zona tropical
- A mayor altura de talud, se requiere mayor número de ciclos para alcanzar la estabilidad y el aumento del espesor de la capa activa disminuye el número de ciclos necesarios para alcanzar la estabilidad.

Se valida la hipótesis planteada que afirma que la estabilidad de cortes en materiales con permafrost en alta montaña dependen de la geometría del talud, propiedades térmicas y mecánicas de los materiales y de las condiciones ambientales.

9.2 Recomendaciones

Se recomienda construir un modelo térmico más robusto modificando las condiciones de borde con particular enfoque en las condiciones de borde en superficie y en el fondo, que permita considerar transferencia de calor por conducción y convección para obtener tener mejores resultados y a su vez considerar el gradiente geotérmico para estimar el espesor del permafrost. El cual podría ser acoplado a la respuesta mecánica para comprender los efectos térmicos en el comportamiento tensión-deformación de los taludes.

Se recomienda estudiar la cohesión residual que podría existir a pesar de que los materiales se descongelan

Se recomienda medir la difusividad térmica y el calor específico de los materiales con un sensor de aguja doble con el instrumento KD2Pro con el fin de comparar los resultados de las mediciones con los valores estimados de difusividad térmica y calor específico a partir del método teórico.

Para la medición de propiedades térmicas en laboratorio, el sensor requiere de un tiempo de 15 minutos entre mediciones para que el gradiente térmico aplicado por medición se disipe, motivo por el cual se recomienda contar con mayor número de sensores para evitar lecturas erróneas.

Se recomienda medir la densidad in-situ de los materiales, y el contenido de hielo intersticial en los taludes, pues estos parámetros podrían modificar los resultados de laboratorio y de los modelos térmicos y de estabilidad de taludes.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahumada, A. L., Ibañez, G. P., & Páez, S. V. (2010). Reconocimiento de Permafrost Andino en las Andean Permafrost Survey in the High Santa Maria River ., *Ciencia*, 5(1), 95–110.
- Ahumada, A. L., Ibañez Palacios, G. P., Carilla, J., Toledo, M. A., & Paez, S. V. (2015). Observaciones geomorfológicas en glaciares de escombros de los Andes tropicales de Argentina. *Acta geológica lilloana*, 27(2), 63–76.
- Allen, S., Frey, H., Huggel, C., GAPHAZ, IACS, & IPA. (2017). *Evaluación de peligros por glaciares y permafrost en regiones de montaña - Documento técnico de orientación*.
- Alrtimi, A., Rouainia, M., & Haigh, S. (2016). Alrtimi A, Rouainia M, Haigh S. Thermal conductivity of a sandy soil. Applied Thermal Engineering 2016, 106, 551-560. *Applied Thermal Engineering*, 106, 551–560.
- Azócar, G. F., & Brenning, A. (2010). Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°-33°s). *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(1), 42–53. <https://doi.org/10.1002/ppp.669>
- Azócar, Guillermo F., Brenning, A., & Bodin, X. Permafrost distribution modelling in the semi-arid Chilean Andes. , 11 Cryosphere § (2017).
- Bayandor, S., Noorzad, A., Ardakani, A., & Azari, M. (2014). Numerical analysis of thermo-mechanical behavior of energy pile foundations. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 978, 953–958. <https://doi.org/10.1201/b17017-170>
- Blanco, J. J., Hidalgo, M. Á., Ramos, M., & Vieira, G. (s. f.). *Determinación de la difusividad térmica en suelos helados en la Isla Livingston Resumen Introducción Fundamento teórico*.
- Bolt, G. . (1983). 7 Heat Transport in Soil. En P. Koorevaar, G. Menelik, & C. Dirksen (Eds.), *Developments in Soil Science* (Vol. 13, pp. 193–207). [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70054-0](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70054-0)
- Cengel, Y. A. (1997). Ecuación de la conducción de calor. En McGraw-Hill Companies (Ed.), *Tranferencia de calor y masa. Un enfoque práctico* (3ª ed., pp. 217–300).
- Chen, Y., Wu, P., Yu, Q., & Xu, G. (2017). Effects of freezing and thawing cycle on mechanical properties and stability of soft rock slope. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3173659>
- Cochran, P. H., Boersma, L., & Youngberg, C. T. (1967). Thermal Properties of a Pumice Soil. *Soil Science Society of America Journal Abstract*, 454–459. <https://doi.org/10.2136/sssaj1967.03615995003100040013x>
- Coltkbr. (2006). *Slope Design Methodology Report – Preliminary Engineering Design for Mackenzie Gas Project*.
- Comegna, L., Tommasi, P., Picarelli, L., Bucchignani, E., & Mercogliano, P. (2013). The impact of climatic changes on the behaviour of active landslides in clay. *Landslide Science and Practice: Global Environmental Change*, 4(May), 59–67. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31337-0-7>
- Davies, M., Hamza, O., & Harris, C. (2001). The Effect of Rise in Mean Annual Temperature on the Stability of Rock Slopes Containing Ice-Filled Discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes*, 136(January), 137–144. <https://doi.org/10.1002/ppp>
- Draebing, D., Krautblatter, M., & Dikau, R. (2014). Interaction of thermal and mechanical processes in steep permafrost rock walls: A conceptual approach. *Geomorphology*, 226, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.08.009>
- Dyke, L. (2004). Stability of Frozen and Thawing Slopes in the Mackenzie Valley, Northwest Territories. *57th Canadian Geotechnical Conference*, (February), 31–38.
- Eberhardt, E., Preisig, G., & Gischtig, V. (2016). Progressive failure in deep-seated rockslides due to seasonal fluctuations in pore pressures and rock mass fatigue. *Associazione Geotecnica Italiana*, 1(2014), 121–136. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84987657408&partnerID=40&md5=d1024347f43f367848aefbb03c52a23f>
- Esposito, L., & Guadagno, F. (1998). Some special geotechnical properties of pumice deposits. *Bull*

Eng Geol Env, 57, 41–50.

- Etzel Müller, B. (2013). Recent advances in mountain permafrost research. *Permafrost and Periglacial Processes*, 24(2), 99–107. <https://doi.org/10.1002/ppp.1772>
- Ferrando A, F. J., Soto Bäuerle, M. V., Vieira, R., Lange, H., Quinteros Mira, J., & Araos, J. (2000). Permafrost En Los Andes Del Sur: Glaciares Rocosos En La Región Semiárida De Chile Y Su Importancia Como Recurso Hídrico. *Observatorio Geografico America Latina*, 1–20. Recuperado de <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal9/Procesosambientales/Hidrologia/02.pdf>
- Ferrando, F. (2017). Sobre la distribución de Glaciares Rocosos en Chile, análisis de la situación y reconocimiento de nuevas localizaciones. *Investigaciones Geográficas*, 4(54), 127. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2017.48045>
- Ferrians, O. J. J., Kachadoorian, R., & Greene, G. W. (1969). *Permafrost And Related Engineering Problems In Alaska*. Recuperado de <c:%5CTIN%5Ce-books%5C00-Articles%5CPermafrost general%5CPermafrost and related engineering problems.pdf>
- Forouki, O. (1981). The thermal properties of soils in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 5, 67–75.
- Gambino, G. F., & Harrison, J. P. (2017). Rock Engineering Design in Frozen and Thawing Rock: Current Approaches and Future Directions. *Procedia Engineering*, 191, 656–665. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.229>
- García, S., Rey, M., & Alonso, T. (2013). *Determinación de la difusividad térmica del subsuelo mediante medidas de temperaturas*.
- Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227–252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
- Gómez Ortiz, A., Palacios Estremera, D., Luengo Nicolau, E., Tanarro García, L., Schulte, L., Ramos Sanz, M., & Salvador Franch, F. (2002). Inestabilidad de taludes y cubierta nival en áreas marginales de permafrost. El caso de la pared norte del picacho del Veleta (Sierra Nevada. España). *Revista de Geografía*, Vol. 1, pp. 35–56.
- Gorbunov, A. P. (1978). Permafrost Investigations in High-Mountain Regions. *Arctic and Alpine Research*, 10(2), 283. <https://doi.org/10.2307/1550761>
- Grosjean, M., & Veit, H. (2005). Water resources in the arid mountains of the Atacama Desert (N Chile): past climate changes and modern conflicts . Keywords : Quaternary , Holocene , climate change , arid zone , Andes , Chile. *Global Change and Mountain Regions*, 93–104.
- Gruber, S. (2000). *Slope Instability and Permafrost. A Spatial Analysis in the Matter Valley, Switzerland*. Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Gruber, S., & Haeberli, W. (2007). Permafrost in steep bedrock slopes and its temperatures-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(2), 1–10. <https://doi.org/10.1029/2006JF000547>
- Guodong, C., & Dramis, F. (1992). Distribution of mountain permafrost and climate. *Permafrost and Periglacial Processes*, 3(2), 83–91. <https://doi.org/10.1002/ppp.3430030205>
- Guy, J. (2010). Experimentation of mitigation techniques to reduce the effects of permafrost degradation on transportation infrastructures at Beaver Creek experimental road site (Alaska Highway, Yukon). *63rd Canadian Geotechnical Conference & 6th Canadian Permafrost Conference*, (September), 526–533. <https://doi.org/10.13140/2.1.1058.2722>
- Haeberli, W. (2005). Investigating glacier-permafrost relationships in high-mountain areas: historical background, selected examples and research needs. *Geological Society, London, Special Publications*, 242(1), 29–37. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2005.242.01.03>
- Haeberli, W., Hallet, B., Arenson, L., Elconin, R., Humlum, O., Käab, A., ... Mühl, D. V. (2006). Permafrost creep and rock glacier dynamics. *Permafrost and Periglacial Processes*, 17(3), 189–214. <https://doi.org/10.1002/ppp.561>
- Hamza, O. (2017). *The effect of climate change on rock slope stability in permafrost regions By A thesis*

presented in fulfilment of the requirements. University Of Dundee.

- Harris, C. (2005). Climate Change, Mountain Permafrost Degradation and Geotechnical Hazard. *Global Change and Mountain Regions*, 215–224. https://doi.org/10.1007/1-4020-3508-X_22
- Harris, S., French, H., Heginbottom, J., Johnston, G., Ladanyi, B., Sego, D., & Everdingen, R. (1988). *Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms*.
- Haug, H. (2018). *An Experimental Study of Thermal Properties of Permafrost Soils*. Norwegian University of Science and Technology.
- Haxaire, Aukenthaler, M., & Brinkgreve, R. B. J. (2017). Application of a Thermo-hydro-mechanical Model for Freezing and Thawing. *Procedia Engineering*, 191, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.156>
- Hermansson, Å., Charlier, R., Erlingsson, S., Laloui, L., & Srsen, M. (2009). Heat Transfer in Soils °. *Water in Road Structures. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 5, 69–79. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8>
- Hinkel, K. (1997). Estimating seasonal values of thermal diffusivity in thawed and frozen soils using temperature time series. *Cold Regions Science and Technology*, 26, 1–15.
- Huang, S., Liu, Q., Cheng, A., Liu, Y., & Liu, G. (2018). A fully coupled thermo-hydro-mechanical model including the determination of coupling parameters for freezing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 103(November 2017), 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.01.029>
- Huscroft, C. a, Lipovsky, P. S., & Bond, J. D. (2004). Permafrost and landslide activity: Case studies from southwestern Yukon Territory. *Yukon Exploration and Geology 2003*, (March), 107–119.
- Iribarren Anaconda, P., Mackintosh, A., & Norton, K. P. (2015). Hazardous processes and events from glacier and permafrost areas: Lessons from the Chilean and Argentinean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(1), 2–21. <https://doi.org/10.1002/esp.3524>
- Jiao, Y. Y., Zhang, X. L., Zhang, H. Q., Li, H. B., Yang, S. Q., & Li, J. C. (2015). A coupled thermo-mechanical discontinuum model for simulating rock cracking induced by temperature stresses. *Computers and Geotechnics*, 67, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.03.009>
- Koo, M., & Song, Y. (2008). Estimating apparent thermal diffusivity using temperature time series : A comparison of temperature data measured in KMA boreholes and NGMN wells Estimating apparent thermal diffusivity using temperature time series : A com- parison of temperature data me. *Geosciences Journal*, 12, 255–264. <https://doi.org/10.1007/s12303-008-0026-5>
- Korshunov, A. A., Doroshenko, S. P., & Nevzorov, A. L. (2016). The Impact of Freezing-thawing Process on Slope Stability of Earth Structure in Cold Climate. *Procedia Engineering*, 143(Ictg), 682–688. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.100>
- Krautblatter, M., Funk, D., & Günzel, F. K. (2013a). Why permafrost rocks become unstable: A rock-ice-mechanical model in time and space. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(8), 876–887. <https://doi.org/10.1002/esp.3374>
- Krautblatter, M., Funk, D., & Günzel, F. K. (2013b). Why permafrost rocks become unstable: A rock-ice-mechanical model in time and space. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(8), 876–887. <https://doi.org/10.1002/esp.3374>
- Kumar, A., & Soni, D. K. (2018). A Review on Freeze and Thaw Effects on Geotechnical Parameters. *International Conference on Sustainable Waste Management through Design*, 148–159. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02707-0>
- Kurz, D., Alfaro, M., Graham, J. J., Kurz, D., Alfaro, M., & Graham, J. J. (2017). Thermal conductivities of frozen and unfrozen soils at three project sites in northern Manitoba Cold Regions Science and Technology Thermal conductivities of frozen and unfrozen soils at three project sites in northern Manitoba. *Cold Regions Science and Technology*, 140(April), 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.04.007>
- Kuznetsova, E. (2017). Thermal Conductivity and the Unfrozen Water Contents of Volcanic Ash Deposits in Cold Climate Conditions: A Review. *Clays and Clay Minerals*, 65, 168–183. <https://doi.org/https://doi.org/10.1346/CCMN.2017.064057>

- Kuznetsova, E., & Danielsen, S. W. (2013). Thermal properties of volcanic ash and pumice. *12TH Biennial Meeting 2013*, (May 2015), 1806–1809. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1916.8165>
- Li, M., Song, Y., & Chen, F. (2016). Analysis on stability of slope in a typical cold region based on thermo-mechanical coupling. *Bulgarian Chemical Communications*, *48*, 96–103.
- Machan, G. (2007). Analysis & Mitigation of a Landslide in Discontinuous Permafrost. *1st North American Landslide Conference*, *23*, 1572–1581.
- Marovic S., N., & Lahsen A., A. (1984). Hoja Calama, Región Antofagasta, mapa geológico 1:250.000. En *Servicio Nacional de Geología y Minería*.
- Mayco Consultores. (2013). *Levantamiento información hidrogeológica. Región Antofagasta*.
- McRoberts, E. ., & Morgenstern, N. . (1974). Canadian Geotechnical Revue canadienne de geotechnique. *Canadian Geotechnical Journal*, *11*, 447–468.
- Muñoz, R. (2012). Field Devices For Monitoring Soil Water Content. En *University of Florida Institute of Food and Agricultural Sciences*.
- Nater, P., Arenson, L. U., & Springman, S. M. (2008). Choosing Geotechnical Parameters for Slope Stability Assessments in Alpine Permafrost Soils. *Ninth International Conference on Permafrost*, (January 2008), 1261–1266.
- Neaupane, K. M., & Yamabe, T. (2001). A fully coupled thermo-hydro-mechanical nonlinear model for a frozen medium. *Computers and Geotechnics*, *28*(8), 613–637. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(01\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(01)00015-5)
- Niu, F., Luo, J., Lin, Z., Fang, J., & Liu, M. (2016). Thaw-induced slope failures and stability analyses in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Landslides*, *13*(1), 55–65. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0545-2>
- Pavon, G. J. (2018). *Evaluating the Thermal Properties of Soils Based on Measured Ground Temperatures*. Universidad de Manitob.
- Pei, W., Zhang, M., Li, S., Lai, Y., & Jin, L. (2017). Thermo-mechanical stability analysis of cooling embankment with crushed-rock interlayer on a sloping ground in permafrost regions. *Applied Thermal Engineering*, *125*, 1200–1208. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.105>
- Pei, W., Zhang, M., Li, S., Lai, Y., Jin, L., Gorbunov, A. P., ... Yoshikawa, K. (2017). Why permafrost rocks become unstable: A rock-ice-mechanical model in time and space. *Permafrost and Periglacial Processes*, *191*(1), 876–887. <https://doi.org/10.1002/esp.3374>
- Pender, M. ., & Wesley, L. . (2006). Geotechnical Properties of a Pumice Sand. *Japanese Geotechnical Society*, *46*(Soils and Foundations), 69–81.
- Phukan, A. (1980). *Design consideration for roadways on permafrost*. <https://doi.org/10.1360/zd-2013-43-6-1064>
- Qi, J., Vermeer, P. A., & Cheng, G. (2006). A Review of the Influence of Freeze-thaw Cycles on Soil Geotechnical Properties. *Permafrost and Periglac. Process*, *17*, 245–252. <https://doi.org/10.1002/ppp>
- Rangecroft, S., Harrison, S., Anderson, K., Magrath, J., Castel, A. P., & Pacheco, P. (2013). Climate change and water resources in arid mountains: An example from the Bolivian Andes. *Ambio*, *42*(7), 852–863. <https://doi.org/10.1007/s13280-013-0430-6>
- Rangecroft, S., Suggitt, A. J., Anderson, K., & Harrison, S. (2016). Future climate warming and changes to mountain permafrost in the Bolivian Andes. *Climatic Change*, *137*(1–2), 231–243. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1655-8>
- Rees, S. W., Adjali, M. H., Zhou, Z., Davies, M., & Thomas, H. R. (2000). Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *4*, 213–265.
- Schleier, M. T. (2016). *Rock-slope failures in Innerdalen and Innfjorddalen, western Norway: rock-slope instabilities and rock avalanches in a changing landscape following the melt down of the Scandinavian ice sheet Hangversagen von Festgesteinen in Innerdalen und Innfjorddale*. Friedrich Alexander University Erlangen-Nuremberg.

- Seward, A., Brakenrig, T., & Lor, S. (2013). *Determination of Thermal Properties of New Zealand 's soils and investigations of external factors influencing the near surface low-temperature geothermal resources* .
- Seward, A., Prieto, A., & Climo, M. (2013). Thermal Properties Of New Zealand's Rocks And Soils Thermal Properties Of New Zealand's Rocks And Soils. *New Zealand Geothermal Workshop 2013*, 1–20.
- Silva, O., Andaverde, J., Beatris, E., & Artemio, B. (2018). Determining the In Situ Apparent Thermal Diffusivity of a Sandy Soil. *Rev Bras Cienc Solo*, 42, 1–13.
- Subramanian, S. S. (2017). *Numerical modelling and geomechanical analyses of soil slope stability evaluation in seasonal cold regions* (Universidad de Hokkaido). <https://doi.org/10.14943/doctoral.k12903>
- Susha Lekshmi, S. U., Singh, D. N., & Shojaei Baghini, M. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 54, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
- Tart, R. (1996). Chapter 25: Permafrost. En National Academies Press (Ed.), *Landslide: Investigation and Mitigation* (pp. 620–645). Recuperado de <http://worldcat.org/isbn/030906208X>
- Trombotto, D., Wainstein, P., & Arenson, L. (2014). *Guía Terminológica de la Geociología Sudamericana* (1ª ed.; Vazquez Mazzini, Ed.). Buenos Aires.
- Tsygankova, Y. S., & Dmitrienko, M. A. (2015). The Problem of Thawing Permafrost and Methods for its Solution. *MATEC Web of Conferences*, 37, 01060. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153701060>
- Vinson, T., & McHattie, R. (2009). *Research & Technology Transfer Documenting Best Management Practices for Cutslopes in Ice-rich Permafrost*.
- Wesley, L. D. (2001). Determination of Specific Gravity and Void Ratio of Pumice Materials. *Geotechnical Testing Journal*, 24, 418–422.
- Williams, P. J., & Smith, M. W. (1989). *The Frozen Earth: Fundamentals of geocryology (Studies in Polar Research)*. <https://doi.org/10.1017>
- Xu, S.-H., Wu, Z.-J., & Zhang, L.-X. (2017). The Solutions and Practical Results for Permafrost Engineering Problems of Qinghai -Tibet Railway. *Advances in Engineering Research*, 115, 325–332. <https://doi.org/10.2991/eesed-16.2017.44>
- Yaling, C., Gongqi, Y., & Baoan, L. (2015). 2D Coupled Thermal-Mechanical Analysis on Embankment Longitudinal Cracks in Permafrost Regions. *Electronical journal of geotechnical engineering*, 20, 273–286.
- Yamamoto, Y. (2013). *Inestabilities in alpine permafrost: strenght and stiffness in warming regime* (Tokyo Institute of Technology). <https://doi.org/10.3218/3641-1>
- Yoshikawa, K. (2013). *Permafrost in our time : community-based permafrost temperature archive* (1ª ed.; K. Yoshikawa, Ed.). University of Alaska Fairbanks Permafrost Outreach Program.
- Young, K. R. (1979). *The tropical Andes as a morphoclimatic zone*. Boulder.
- Zhang, X., Li, L., McHattie, R., & Oswell, J. (2017). Experimental Study of Ice-Rich Permafrost Cut Slope Protection. *Journal of Cold Regions Engineering*, 32(1), 04017018. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cr.1943-5495.0000149](https://doi.org/10.1061/(asce)cr.1943-5495.0000149)
- Zhang, Y., & Michalowski, R. L. (2013). Thermal-Mechanical Constitutive Modeling for Freezing and Thawing Soils. *Planning for Sustainable Cold Regions*, (August), 256–267. <https://doi.org/10.1061/9780784412978.025>

ANEXOS

Anexo A. Registros de sondajes Asistecsa, 2018

Asistecsa INGENIEROS CONSULTORES		INFORME ÁREA GEOTÉCNIA N° A.11.18.05 ESTRATIGRAFÍA SONDAJE			
Proyecto / Obra		: Camino de acceso cerro Chajnantor			
Localización		: Comuna San Pedro de Atacama			
Cliente		: Movimientos de tierra y Construcciones S.A.			
Coordenadas Geográficas:		Norte:		-	Este:
Profundidad de la Napa de Agua [m]:		-		Kilómetro:	-
Fecha de Inicio / Término del Sondaje:		05-06-2018		Sondaje N°:	ST-2 Paso Jama
Correlativo o Lab. N°	Muestra	Profundidad [m]	Espesor [m]	Descripción del Material	
-	1	0.00	0.60	Gravas de la descomposición de bloques y bolones, con matriz arenosa y fundamentalmente procedente de fragmentos rocosos de 2½" tamaño máximo de cantos angulares, color gris, humedad baja,	
-	-	-			
-	2	0.60	2.40	Roca fracturada de origen volcánica de 14½" tamaño máximo y oxidaciones, color gris.	
-	-	-			
-	3	3.00	1.50	Roca fracturada de origen volcánica con fracturas de 12" tamaño máximo de largo y oxidaciones.	
-	-	-			
-	4	4.50	1.60	Roca fracturada de origen volcánica de 22" tamaño máximo de largo, con oxidaciones, color gris.	
-	-	-			
-	5	6.10	1.50	Roca fracturada de origen volcánico de 26" tamaño máximo de largo, color gris	
-	-	-			
-	6	7.60	1.40	Roca fracturada de origen volcánico de 23" tamaño máximo de largo, color gris	
-	-	-			
-	7	9.00	-	Roca fracturada de origen volcánico de 14" tamaño máximo, color gris	
-	-	-			
-	8	10.05	-	-	
-	-	-			
-	-	-	-	-	
-	-	-			
-	-	-	-	-	
-	-	-			
Observaciones:					
Rodrigo Chávez S. Gerente Técnico LABORATORIO ASISTECSA INGENIEROS CONSULTORES					

INFORME ÁREA GEOTÉCNIA N° A.11.18.05
PENETRACIÓN CON CUCHARA NORMAL
Camino de acceso cerro Chajnantor

Proyecto / Obra : Camino acceso cerro Chajnantor
Localización : Comuna San Pedro de Atacama
Cliente : Movimientos de tierra y Construcciones S.A.

Sondaje N°: ST-02 Pasarela Paredes Central

Correlativo Lab. N°	Entre Cotas [m]		N 1 ¹	N 2 ²	R ³	Correlativo Lab. N°	Entre Cotas [m]		N 1 ¹	N 2 ²	R ³
					RQD ⁴						RQD ⁴
	0.00	0.60	NQ	NQ	93						
	0.60	3.00	NQ	NQ	62						
	3.00	4.50	NQ	NQ	20						
	4.50	6.10	NQ	NQ	100						
	6.10	7.60	NQ	NQ	66						
	7.60	9.00	NQ	NQ	91						
	9.00	10.05	NQ	NQ	74						
					83						
					63						
					101						
					89						
					88						
					78						

Cuchara Normal : SPT [Standard Penetration Test]. Es un tubo muestreador de 2" de f ext., que se hince 45 cm en el fondo de una perforación hecha, golpeando para ello con un martinete de 63.5 kg de peso que cae libremente desde 75 cm de altura.

⁽¹⁾ **N1 :** Número de golpes necesarios para que la Cuchara Normal avance 15 cm

⁽²⁾ **N2 :** Número de golpes necesarios para que la Cuchara Normal avance los 30 cm finales.

Si en N1 ó N2 aparece una expresión del tipo 7/52, debe entenderse que la cuchara Normal avanzó 7 cm al aplicarse 52 golpes.

⁽³⁾ **R [%] :** Porcentaje de recuperación de la muestra.

⁽⁴⁾ **RQD [%] :** Rock Quality Designation.

⁽⁵⁾ **Shelby :** Muestra inalterada tomada con tubo de pared delgada.

Observaciones :

Sin observaciones.

Rodrigo Chávez S.
Gerente Técnico
LABORATORIO ASISTECSA
INGENIEROS CONSULTORES



Fotografía N° : 1
Sondaje N° : ST.02 Camino de acceso cerro Chajnantor
Descripción: : Caja N° 1



Fotografía N° : 2
Sondaje N° : ST.02 Camino de acceso cerro Chajnantor
Descripción: : Caja N° 2



Fotografía N° : 3
Sondaje N° : ST.02 Camino de acceso cerro Chajnantor
Descripción: : Caja N° 3



Fotografía N° : 4
Sondaje N° : ST.02 Camino de acceso cerro Chajnantor
Descripción: : Caja N° 4

Proyecto / Obra : Camino de acceso cerro Chajnantor
Localización : Comuna San Pedro de Atacama
Cliente : Movimientos de tierra y Construcciones S.A.

Coordenadas Geográficas:	Norte:	-	Este:	-
Profundidad de la Napa de Agua [m]:		-	Kilómetro:	-
Fecha de Inicio / Término del Sondaje:	03-07-2018	10-07-2018	Sondaje N°:	ST-3 Paso Jama

Correlativo Lab. N°	Muestra	Profundidad [m]	Espesor [m]	Descripción del Material
-	1	0.00	1.30	Roca de origen Volcanica muy fracturada de 5" tamaño maximo de largo, color gris.
		-		
		1.30		
-	2	-	1.90	Roca de origen Volcanica fracturada de 9" tamaño maximo de largo, color gris.
		3.20		
		-		
-	3	-	0.67	Roca origen volcanico fracturada de 10" tamaño maximo de largo, color gris.
		3.87		
		-		
-	4	-	1.50	Roca origen volcanico de 2½" tamaño maximo, fracturada y meteorizada por la accion del congelamiento, presencia de oxidacion, color gris claro
		5.37		
		-		
-	5	-	1.47	Roca de origen volcanico, muy fracturada de 4" tamaño maximo, color gris.
		6.84		
		-		
-	6	-	1.36	Roca de origen volcanico, muy fracturada y meteorizada con oxidaciones, presencia de hielo en su estructura de 3" tamaño maximo, color gris claro.
		8.20		
		-		
-	7	-	1.90	Roca de origen volcanico fracturada de 17" tamaño maximo, color gris
		10.10		
		-		
-	8	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

Observaciones:

Rodrigo Chávez S.
Gerente Técnico
LABORATORIO ASISTECSA
INGENIEROS CONSULTORES

INFORME ÁREA GEOTÉCNIA N° A.11.18.05
PENETRACIÓN CON CUCHARA NORMAL
Camino de acceso cerro Chajnantor

Proyecto / Obra : Camino acceso cerro Chajnantor
Localización : Comuna San Pedro de Atacama
Cliente : Movimientos de tierra y Construcciones S.A.

Sondaje N°: ST-03

Correlativo o Lab. N°	Entre Cotas [m]		N 1 ¹	N 2 ²	R ³	Correlativo o Lab. N°	Entre Cotas [m]		N 1 ¹	N 2 ²	R ³
					RQD ⁴						RQD ⁴
	0.00	1.30	NQ	NQ	92						
					18						
	1.30	3.20	NQ	NQ	63						
					37						
	3.20	3.87	NQ	NQ	90						
					69						
	3.87	5.37	NQ	NQ	60						
					0						
	5.37	6.84	NQ	NQ	100						
					0						
	6.84	8.20	NQ	NQ	88						
					10						
	8.20	10.10	NQ	NQ	100						
					67						

Cuchara Normal : SPT [Standard Penetration Test]. Es un tubo muestreador de 2" de f ext., que se hince 45 cm en el fondo de una perforación hecha, golpeando para ello con un martinete de 63.5 kg de peso que cae libremente desde 75 cm de altura.

Normal avance 15 cm

⁽¹⁾ **N1** : Número de golpes necesarios para que la Cuchara

⁽²⁾ **N2** : Número de golpes necesarios para que la Cuchara Normal avance los 30 cm finales.

Si en N1 ó N2 aparece una expresión del tipo 7/52, debe entenderse que la cuchara Normal avanzó 7 cm al aplicarse 52 golpes.

⁽³⁾ **R [%]** : Porcentaje de recuperación de la muestra.

⁽⁴⁾ **RQD [%]** : Rock Quality Designation.

⁽⁵⁾ **Shelby** : Muestra inalterada tomada con tubo de pared delgada.

Observaciones :

Sin observaciones.

Rodrigo Chávez S.
Gerente Técnico
LABORATORIO ASISTECSA
INGENIEROS CONSULTORES



Fotografía N° : 1
Sondaje N° : ST.03 Camino de acceso cerro Chajnantor
Descripción: : Caja N° 1



Fotografía N° : 2
Sondaje N° : ST.03 Camino de acceso cerro Chajnantor
Descripción: : Caja N° 2



Fotografía N° : 3
Sondaje N° : ST.03 Camino de acceso cerro Chajnantor
Descripción: : Caja N° 3

**INFORME ÁREA GEOTÉCNIA N° A.11.18.05
ESTRATIGRAFÍA SONDAJE**

Proyecto / Obra : Camino de acceso cerro Chajnantor
Localización : Comuna San Pedro de Atacama
Cliente : Movimientos de tierra y Construcciones S.A.

Coordenadas Geográficas:	Norte:	-	Este:	-
Profundidad de la Napa de Agua [m]:	-		Kilómetro:	-
Fecha de Inicio / Término del Sondaje:	18-08-2018	18-08-2018	Sondaje N°:	ST-4 Paso Jama

Correlativo Lab. N°	Muestra	Profundidad [m]	Espesor [m]	Descripción del Material
-	1	0.00	0.60	Roca descompuesta de origen volcanico, color gris
-	-	-		
-	-	0.60		
-	2	-	0.90	Roca descompuesta de origen volcanico de 2" tamaño maximo de largo, color gris
-	-	1.50		
-	3	-	0.50	Roca descompuesta de origen volcanico de 3" tamaño maximo de largo, color gris
-	-	2.00		
-	4	-	1.20	Roca de origen volcanico de 14" de largo, color gris.
-	-	3.20		
-	5	-	1.30	Roca fracturada de origen volcanico de 6" tamaño maximo de largo, color gris.
-	-	4.50		
-	6	-	1.20	Roca fracturada de origen volcanico de 8" tamaño maximo de largo, color gris.
-	-	5.70		
-	7	-	1.65	Roca poco fracturada de origen volcanico, 23" tamaño maximo de largo, color gris.
-	-	7.35		
-	8	-	1.10	Roca fracturada de origen volcanico, tamaño maximo 9", color gris.
-	-	8.45		
-	9	-	1.85	Roca fracturada de origen volcanico de 8" tamaño maximo de largo, color gris.
-	-	10.30		
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

Observaciones:

De los 8,45 a los 10,30 metros se produjo un cambio considerable que lleva a recuperar 65 centímetros de 1,85 metros.-

Juan Melendez
Jefe de Geotecnia
LABORATORIO ASISTECSA
INGENIEROS CONSULTORES

INFORME ÁREA GEOTÉCNIA N° A.11.18.05
PENETRACIÓN CON CUCHARA NORMAL
Camino de acceso cerro Chajnantor

Proyecto / Obra : Camino acceso cerro Chajnantor
Localizaci3n : Comuna San Pedro de Atacama
Cliente : Movimientos de tierra y Construcciones S.A.

Sondaje N°: ST-04

Correlativo o Lab. N°	Entre Cotas [m]		N 1 ¹	N 2 ²	R ³	Correlativo o Lab. N°	Entre Cotas [m]		N 1 ¹	N 2 ²	R ³
					RQD ⁴						RQD ⁴
	0.00	0.60	NQ	NQ	100		7.35	8.45	NQ	NQ	86
					0						61
	0.60	1.50	NQ	NQ	52		8.45	10.30	NQ	NQ	35
					0						10
	1.50	2.00	NQ	NQ	60						-
					0						
	2.00	3.20	NQ	NQ	67						
					0						
	3.20	4.50	NQ	NQ	42						
					11						
	4.50	5.70	NQ	NQ	100						
					33						
	5.70	7.35	NQ	NQ	82						
					71						

Cuchara Normal : SPT [Standard Penetration Test]. Es un tubo muestreador de 2" de f ext., que se hinca 45 cm en el fondo de una perforaci3n hecha, golpeando para ello con un martinete de 63.5 kg de peso que cae libremente desde 75 cm de altura.

⁽¹⁾ **N1 :** N3mero de golpes necesarios para que la Cuchara Normal avance 15 cm.

⁽²⁾ **N2 :** N3mero de golpes necesarios para que la Cuchara Normal avance los 30 cm finales.

Si en N1 3 N2 aparece una expresi3n del tipo 7/52, debe entenderse que la cuchara Normal avanz3 7 cm al aplicarse 52 golpes.

⁽³⁾ **R [%] :** Porcentaje de recuperaci3n de la muestra.

⁽⁴⁾ **RQD [%] :** Rock Quality Designation.

⁽⁶⁾ **Shelby :** Muestra inalterada tomada con tubo de pared delgada.

Observaciones :

Sin observaciones.

Juan melendez
Jefe de Geotecnia
LABORATORIO ASISTECSA
INGENIEROS CONSULTORES



Fotografía N° : 1
Sondaje N° : ST.04 Camino de acceso cerro Chajnantor
Descripción: : Ubicación de Sondaje a 5.342 metros de altura



Fotografía N° : 2
Sondaje N° : ST.04 Camino de acceso cerro Chajnantor
Descripción: : Caja N° 1



Fotografía N° : 3
Sondaje N° : ST.04 Camino de acceso cerro Chajnantor
Descripción: : Caja N° 2



Fotografía N° : 4
Sondaje N° : ST.04 Camino de acceso cerro Chajnantor
Descripción: : Caja N° 3

**INFORME ÁREA GEOTÉCNIA N° A.11.18.05
ESTRATIGRAFÍA SONDAJE**

Proyecto / Obra : Camino de acceso cerro Chajnantor
Localización : Comuna San Pedro de Atacama
Cliente : Movimientos de tierra y Construcciones S.A.

Coordenadas Geográficas:	Norte:	-	Este:	-
Profundidad de la Napa de Agua [m]:	-		Kilómetro:	-
Fecha de Inicio / Término del Sondaje:	19-08-2018	22-08-2018	Sondaje N°:	ST-5 Paso Jama

Correlativo Lab. N°	Muestra	Profundidad [m]	Espesor [m]	Descripción del Material
-	1	0.00	1.20	Roca fracturada de origen volcánico de 7" tamaño máximo, color gris.
		-		
		1.20		
-	2	-	1.30	Roca fracturada de origen volcánico de 13" tamaño máximo, color gris.
		2.50		
		-		
-	3	-	1.50	Roca fracturada de origen volcánico de 20" tamaño máximo, color gris.
		4.00		
		-		
-	4	-	2.00	Roca fracturada de origen volcánico de 15" tamaño máximo, color gris.
		6.00		
		-		
-	5	-	-	-
		-		
-	6	-	-	-
		-		
-	7	-	-	-
		-		
-	8	-	-	-
		-		
-	9	-	-	-
		-		
-	-	-	-	-
		-		

Observaciones:

De los 8,45 a los 10,30 metros se produjo un cambio considerable que lleva a recuperar 65 centímetros de 1,85 metros.-

Juan Melendez
Jefe de Geotecnia
LABORATORIO ASISTECSA
INGENIEROS CONSULTORES



Fotografía N° : 1
Sondaje N° : ST.05 Camino de acceso cerro Chajnantor
Descripción: : Caja 1



Fotografía N° : 2
Sondaje N° : ST.05 Camino de acceso cerro Chajnantor
Descripción: : Caja 2

Anexo B. Procesamiento de datos para ensayo de laboratorio

GRANULOMETRÍA Y CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Mediante los datos de los pesos retenidos por cada tamiz, se determinan los porcentajes retenidos mediante la ecuación B.1 y los porcentajes pasantes mediante la ecuación B.2.

$$R_i = \frac{M_i}{M_{total}} \cdot 100 [\%] \quad (B.1)$$

$$P_i = 100\% - \sum_{j=0}^i R_j \quad (B.2)$$

Para graficar las curvas granulométricas de cada ensayo, se consideran los tamices y el porcentaje que pasa por cada uno de ellos, el gráfico se realiza semi-log, con escala logarítmica en el eje de las abscisas.

A partir del gráfico se puede calcular los coeficientes de uniformidad mediante la ecuación B.3 y de curvatura a partir de la ecuación B.4

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (B.3)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (B.4)$$

A partir de los porcentajes retenidos y los coeficientes se realiza la clasificación de los materiales de acuerdo al sistema unificados de clasificación de los suelos.

DENSIDAD MÍNIMA Y DENSIDAD MÁXIMA

Por medio de este ensayo es posible obtener la densidad relativa del suelo en estudio, definida mediante la ecuación B.5

$$DR = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (B.5)$$

Donde:

e_{max} Relación de vacíos máxima [-]

e_{min} Relación de vacíos mínima [-]

e Relación de vacíos in-situ [-]

Otra forma de expresar la densidad relativa es haciendo uso de los pesos unitarios secos en estado natural, en estado suelto, y en estado de máxima densidad, como se indica en la ecuación B.6

$$DR = \frac{\frac{1}{\gamma_{dmin}} - \frac{1}{\gamma_d}}{\frac{1}{\gamma_{dmax}} - \frac{1}{\gamma_{dmin}}} \times 100 \quad (B.6)$$

Donde:

γ_{max} Peso unitario máximo [g/cm³]

γ_{min} Peso unitario mínimo [g/cm³]

γ_d Peso unitario seco in-situ [g/cm³]

Cabe recalcar que debido a las condiciones adversas en campo, no se pudo determinar la densidad in-situ, motivo por el cual se considera que una buena estimación de la densidad in-situ los materiales observados en los taludes es el 70% de la densidad relativa.

Adicionalmente, se puede determinar el índice de vacíos a partir de relaciones entre peso unitario y gravedad específica, como se muestra en la ecuación B.7

$$e = \frac{\gamma_w}{\gamma_d} G_s - 1 \quad (B.7)$$

Donde:

γ_w Peso unitario agua [g/cm³]

γ_d Peso unitario in-situ [g/cm³]

G_s Gravedad específica [-]

CORTE SIMPLE

A continuación, se presenta el procedimiento matemático y las ecuaciones utilizadas para obtener los resultados y curvas de comportamiento.

Consolidación

Para cada ensayo, una vez aplicada la carga vertical se registra como dato inicial la consolidación y se determina la altura post consolidación mediante la ecuación B.8

$$h_c = h_o - \delta_{vcons} \quad (B.8)$$

Donde:

h_c Altura corregida [mm]

h_o Altura inicial [mm]

δ_{vcons} Deformación vertical por consolidación [mm]

Área corregida

Se calcula el área de la probeta afectada por los cambios axiales mediante la ecuación B.9, para cada punto del ensayo.

$$A_c = \frac{A_o}{1 - \frac{\delta_v}{h_c}} \quad (B.9)$$

Donde:

A_c Área corregida [mm²]

A_o Área inicial [mm²]

δ_v Deformación vertical [mm]

Carga horizontal

A la lectura de carga, se le aplican los coeficientes de calibraciones del equipo, y se obtiene la carga horizontal en kgf.

Deformación vertical

Se determina el porcentaje de deformación unitaria, como la deformación vertical en cada punto dividida en la altura post consolidación de la probeta mediante la ecuación B.10

$$\varepsilon_a = \frac{\delta_v}{h_c} \cdot 100 [\%] \quad (B.10)$$

Donde:

ε_a Deformación unitaria [%]

Esfuerzo de corte

Se determina el esfuerzo de corte mediante la ecuación B.11

$$\tau = \frac{F_h}{A_c} \quad (B.11)$$

Donde:

τ Esfuerzo de corte [kgf/cm²]

F_h Carga horizontal [kgf]

Deformación angular

La deformación angular se calcula mediante la ecuación B.12

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\delta_h}{h_c - \delta_v}\right) \quad (\text{B.12})$$

Donde:

γ Deformación angular [°]

δ_h Deformación horizontal [mm]

Se grafican las curvas de esfuerzo de corte vs deformación angular y de deformación vertical vs deformación angular de cada muestra ensayada. Utilizando el valor del esfuerzo de corte ultimo y la tensión normal correspondiente, se grafica la envolvente de falla representada por la ecuación B.13.

$$\tau = \tan \varphi \sigma + c \quad (\text{B.13})$$

Mediante una regresión lineal es posible determinar la ecuación de la envolvente de falla y calcular el ángulo de fricción interna de los materiales.

COMPRESIÓN NO CONFINADA

Deformación vertical

Se determina el porcentaje de deformación unitaria, como la deformación vertical en cada punto dividida en la altura inicial de la probeta mediante la ecuación B.14

$$\varepsilon_a = \frac{\delta_v}{h_o} \cdot 100 [\%] \quad (\text{B.14})$$

Donde:

ε_a Deformación unitaria [%]

h_o Altura inicial de la probeta [mm]

Carga vertical

A la lectura de carga, se le aplican los coeficientes de calibraciones del equipo, y se obtiene la carga vertical en kgf.

Esfuerzo Normal

El esfuerzo normal sobre la probeta se calcula mediante la ecuación B.15

$$\sigma = \frac{F_v}{A_c} \quad (\text{B.15})$$

Donde:

σ Esfuerzo Normal [kgf/cm²]

F_v Carga vertical [kgf]

Se gráfica de esfuerzo normal vs deformación vertical, donde se obtiene el esfuerzo vertical máximo σ_{max} .

Cohesión

Mediante la ecuación B.16, se determinó la cohesión aparente de las probetas en estado congelado.

$$c = \frac{\sigma_{max} \cdot \cos \varphi}{2} - \frac{\sigma_{max}}{2} (1 - \sin \varphi) \tan \varphi \quad (\text{B.16})$$

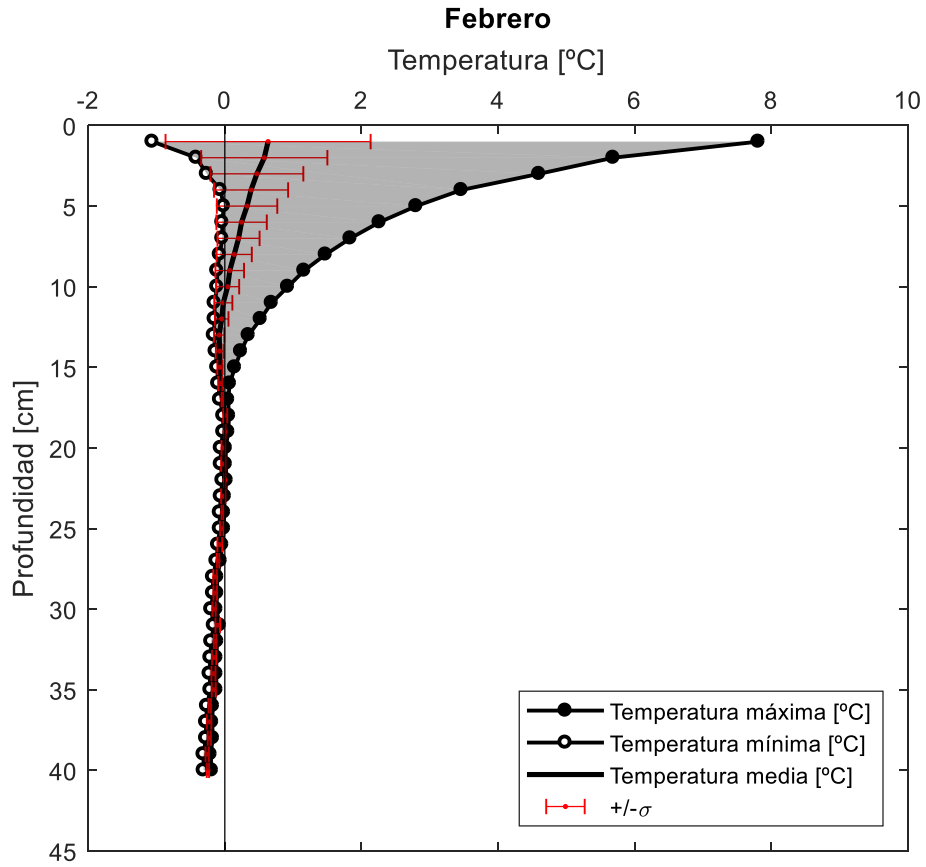
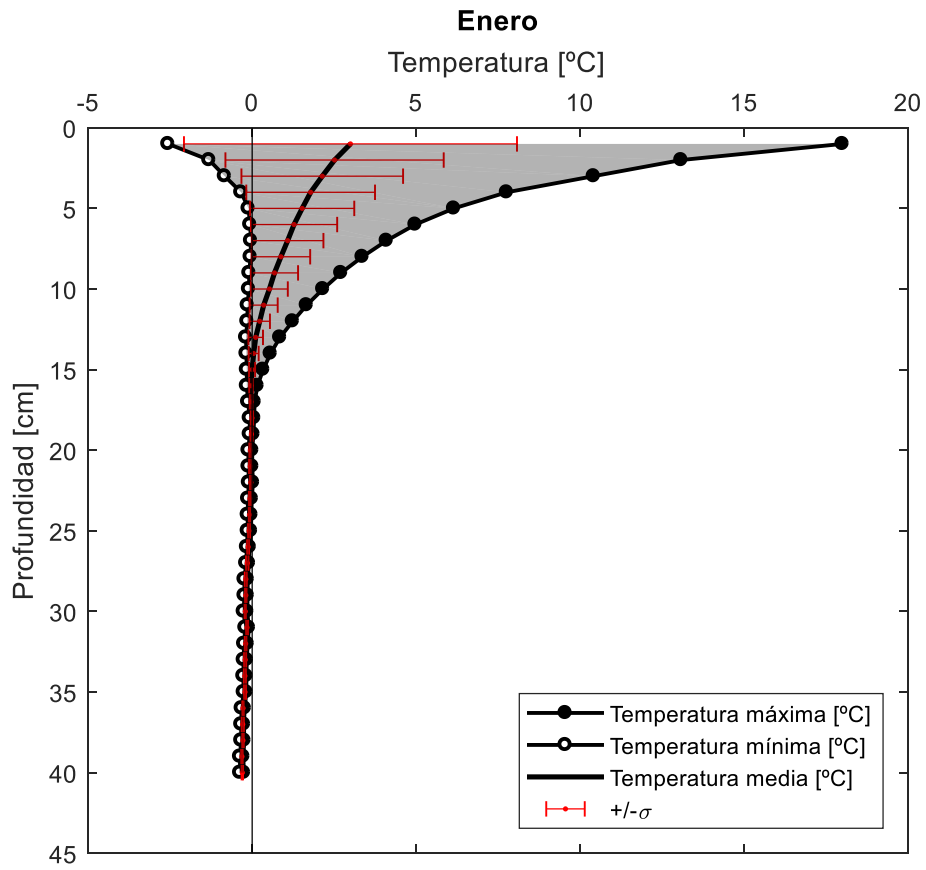
Donde:

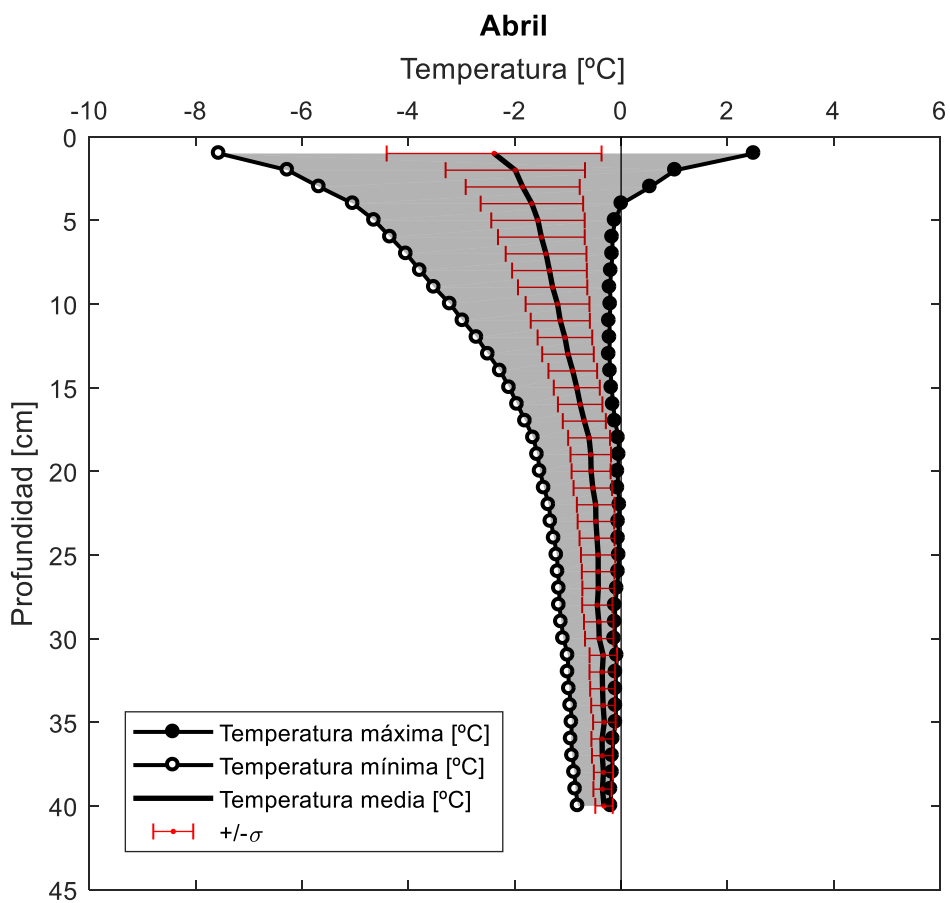
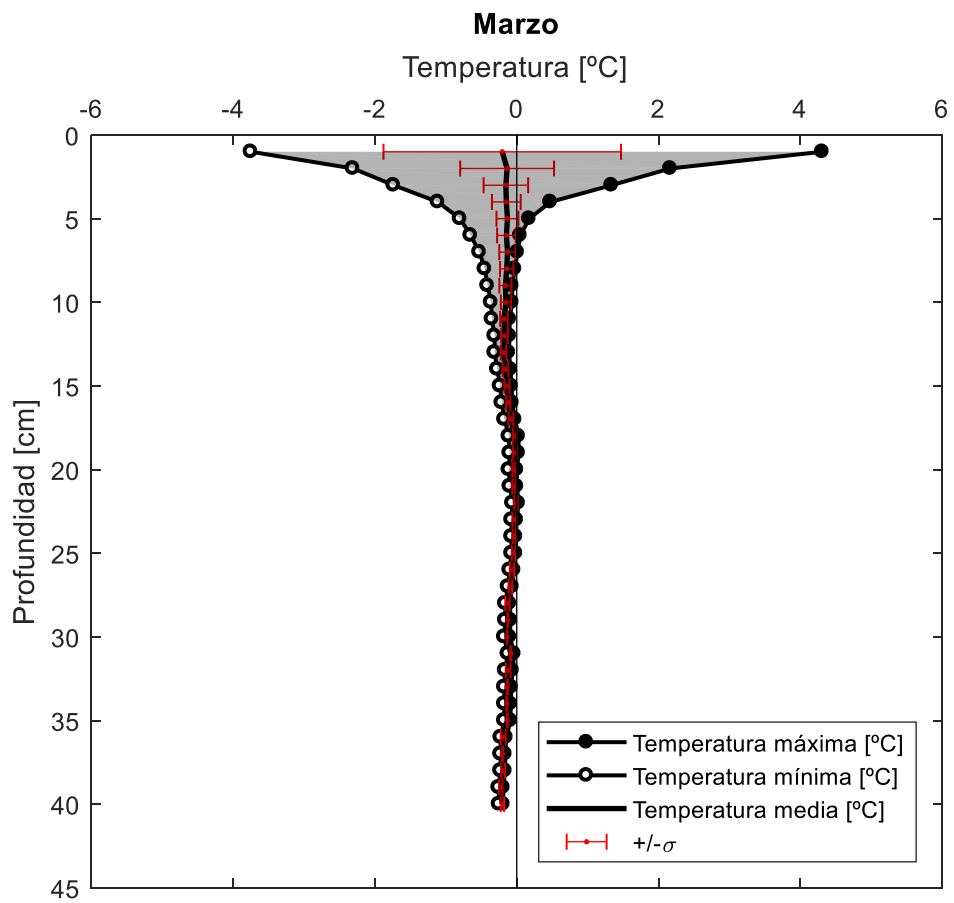
σ_{max} Esfuerzo normal máximo [kgf/cm²]

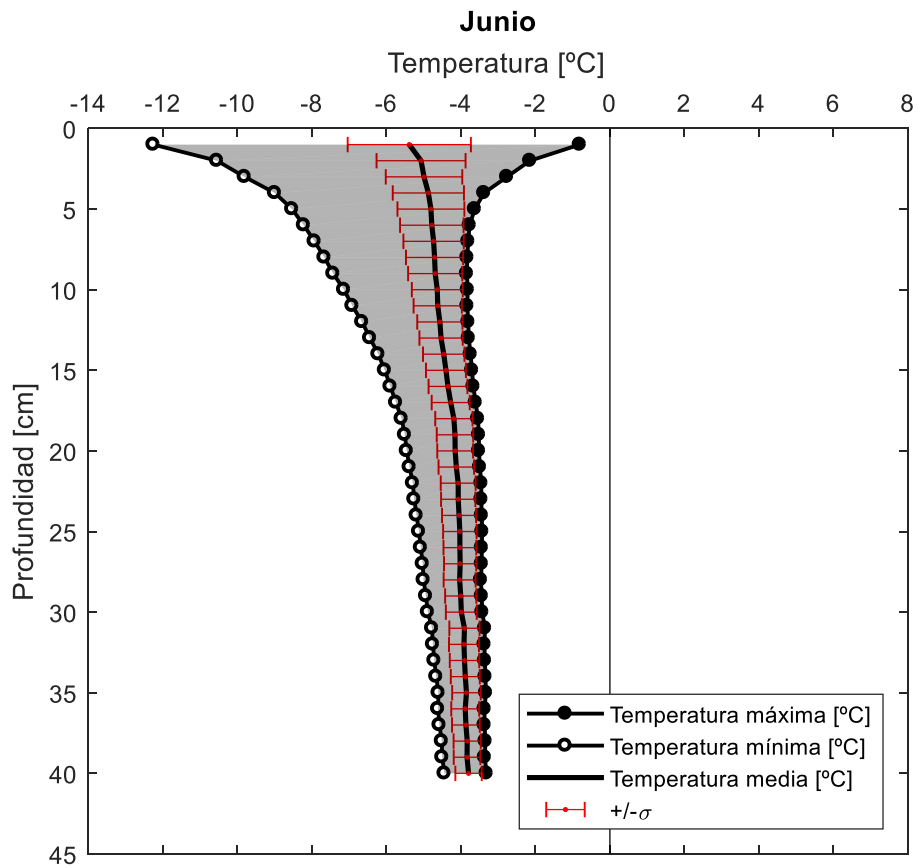
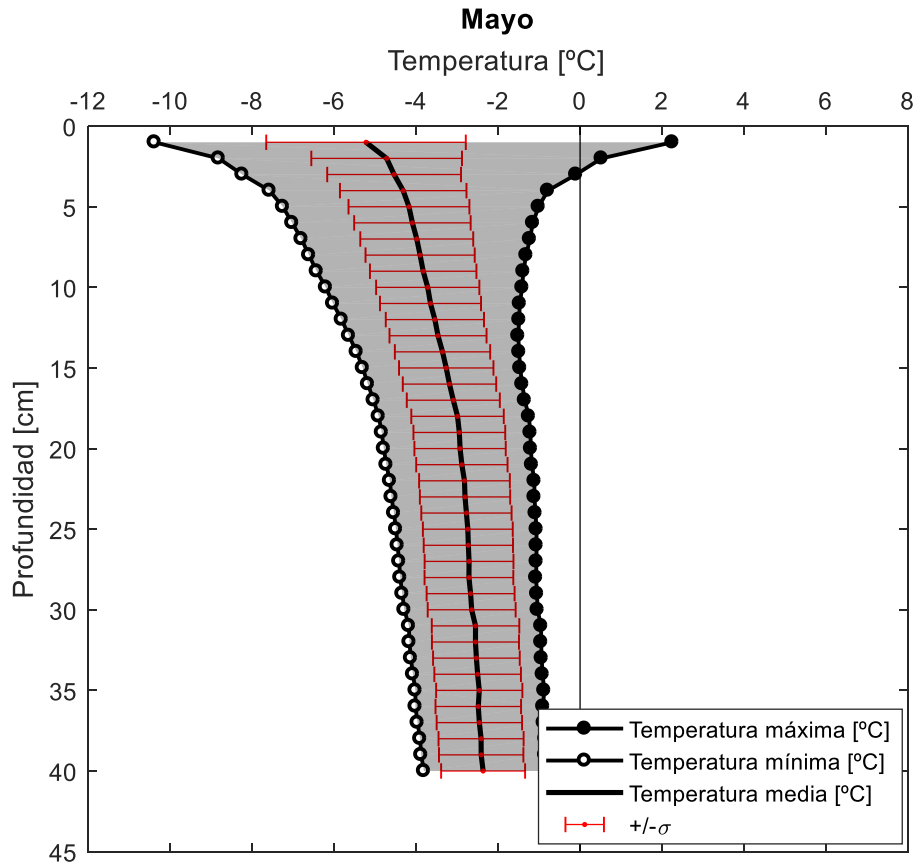
φ Ángulo de fricción interna [°]

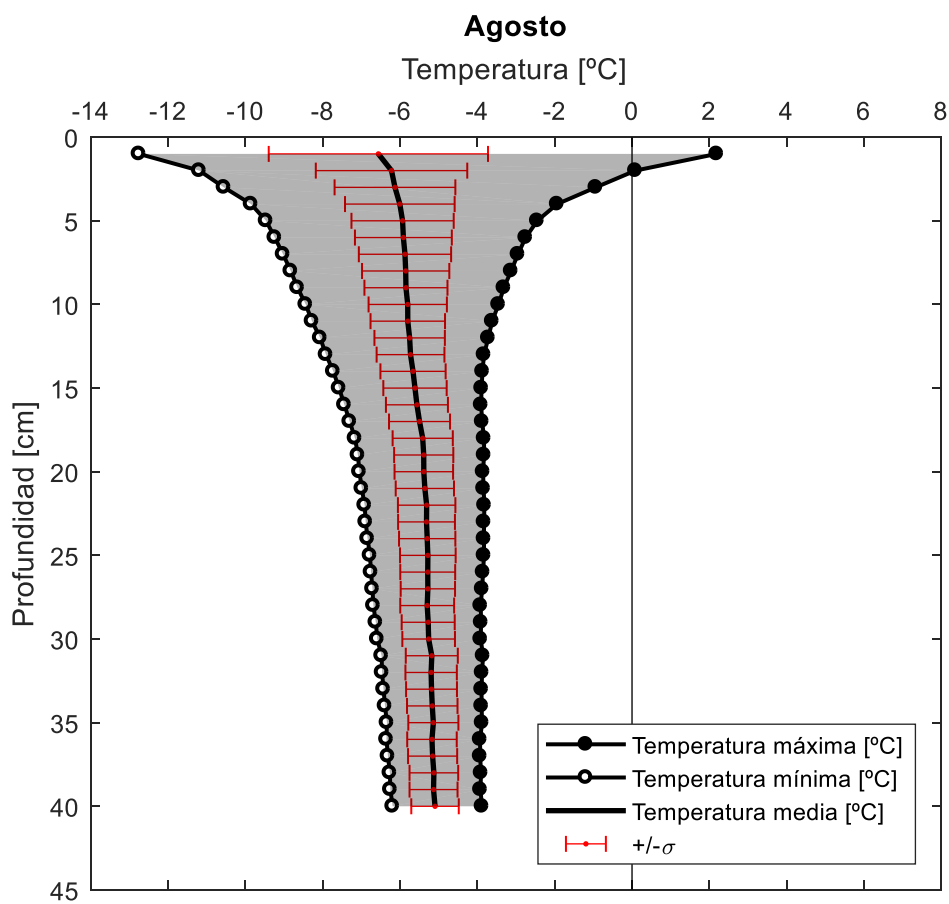
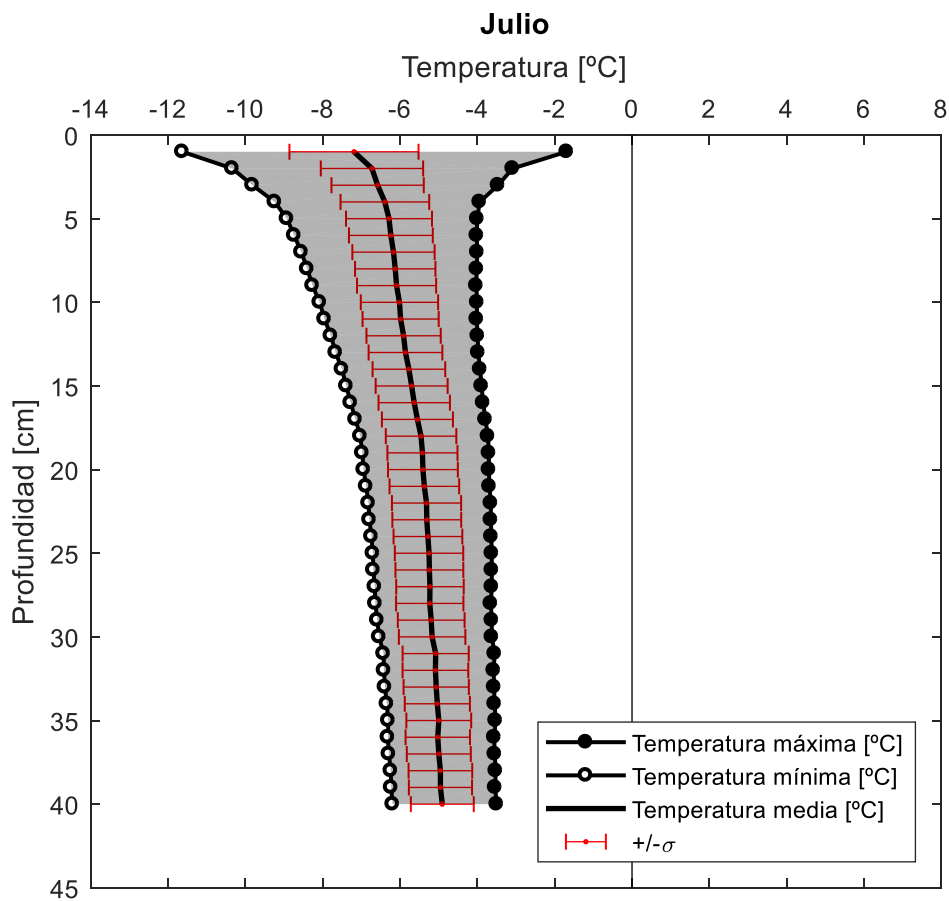
c Cohesión [kg/cm²]

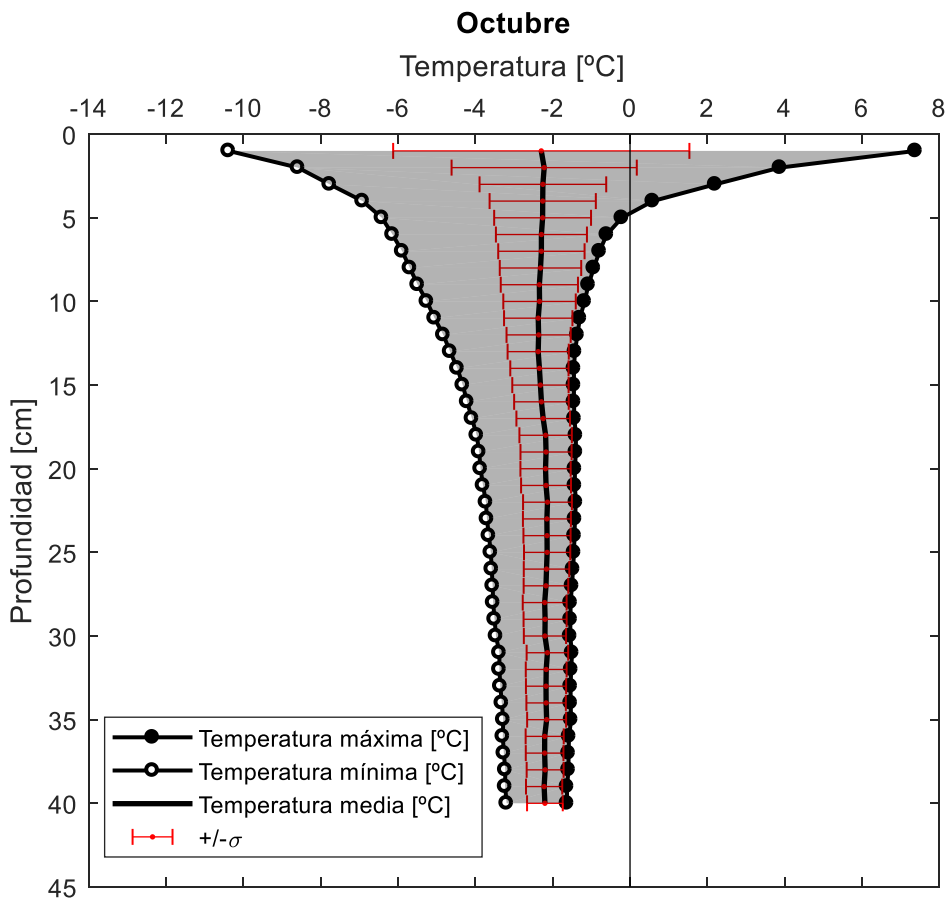
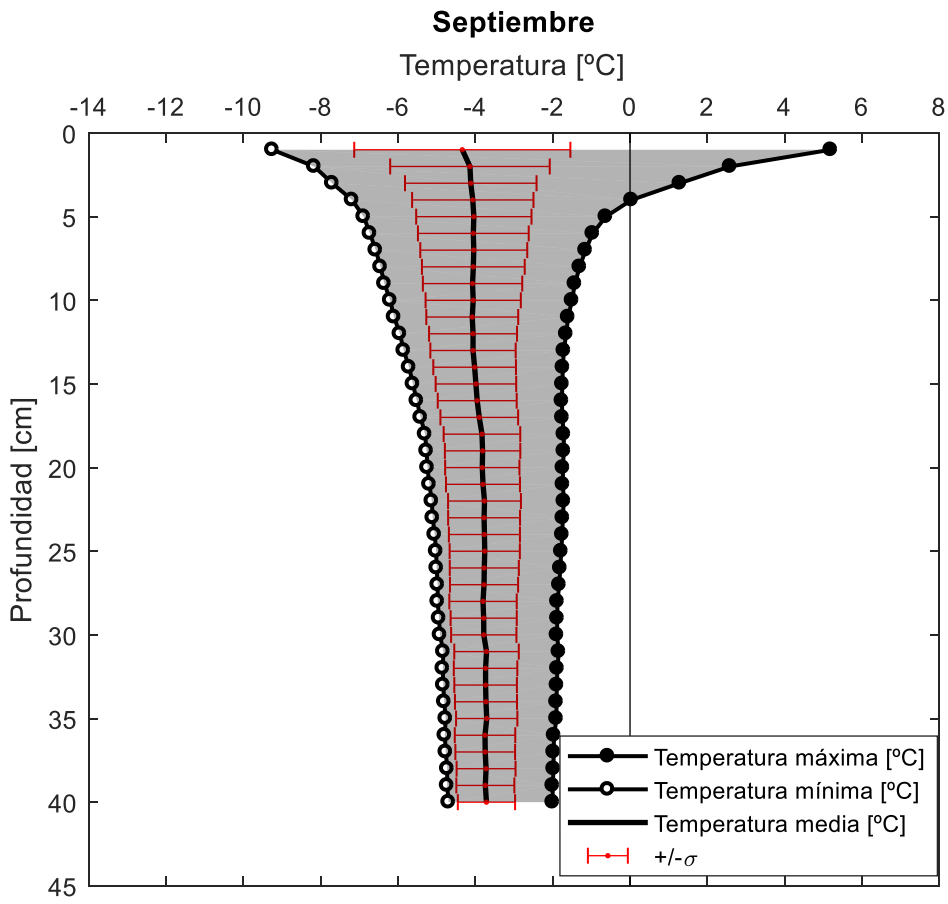
Anexo C. Curva de Trompeta mensual proyecto TAO desde Enero hasta Octubre 2019











Anexo D. Bitácora visita de campo realizada en Mayo 2019

Bitácora de visita cerro Chajnantor

Los días 8 y 9 de mayo del 2019 se realizó la visita a terreno al Cerro Chajnantor.

En la Figura 1 se muestra el eje del camino de acceso en planta, donde se muestra la ubicación de las mediciones realizadas, así como también el sensor de temperatura y las muestras recolectadas.

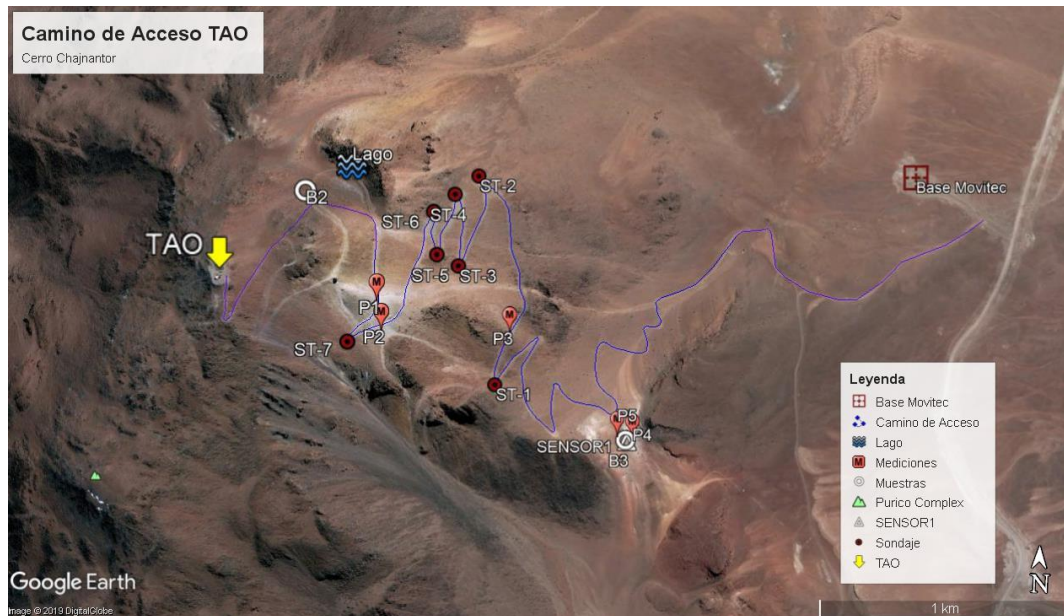


Figura 1. Vista en planta del camino de acceso a la cima del cerro Chajnantor

En la Figura 2 se muestra una vista isométrica del camino del acceso, donde se puede apreciar de mejor manera la distribución altitudinal de la información.

Los 4 puntos donde se realizaron las mediciones, etiquetados con la letra M, fueron lugares donde se encuentra el material predominante a lo largo del camino de acceso escogidos de forma de obtener datos a alta, mediana y baja altura.



Figura 2. Vista Isométrica del camino de acceso a la cima del cerro Chajnantor

En la Fotografía 1 se muestra la vista isométrica del cerro Chajnantor la cual puede ser comparada con la imagen satelital, Figura 2.



Fotografía 1. Vista Isométrica del camino de acceso a la cima del cerro Chajnantor
En la Fotografía 2 se muestra el camino de acceso en la parte inferior del cerro, DM 1+200



Fotografía 2. Vista isométrica del camino DM 1+200.

Toma de mediciones

A continuación, se muestran fotografías y tablas con la información de las mediciones realizadas en la visita.

Medición de conductividad Térmica y contenido de agua Punto 1 en DM 6+400 se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Mediciones en Punto 1

Nombre	Descripción	Conductividad Térmica [W/m*K]	Resistividad Térmica [(m*K)/W]	Constante Dieléctrica
P1	Pumita Blanca. Dificultad de perforación baja-media	0.120	8.336	2.5119



Fotografía 3. Perforación con taladro para medición in situ en pumita blanca en punto P1



Fotografía 4. Medición de contenido de agua con sonda en punto P1

Medición de conductividad Térmica y contenido de agua correspondiente al punto 2 en el DM 6+200, se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Mediciones en Punto 2

Nombre	Descripción	Conductividad Térmica [W/m*K]	Resistividad Térmica [(m*K)/W]	Constante Dieléctrica
P2	Roca dura color amarillento. Dificultad de perforación alta. No se pudo enterrar por completo el sensor.	0.619	1.615	3.7789



Fotografía 5. Medición de contenido de agua con sonda en el punto P2.



Fotografía 6. Medición de conductividad térmica en roca dura en punto P2.



Fotografía 7. Vista del talud donde se realizaron las mediciones en punto P2.

La Tabla 3 muestra las mediciones de conductividad térmica y contenido de agua en el Punto 3 ubicado en el DM 5+500

Tabla 3. Mediciones en Punto 3

Nombre	Descripción	Conductividad Térmica [W/m*K]	Resistividad Térmica [(m*K)/W]	Constante Dieléctrica
P3	Material Café Claro húmedo. Dificultad de perforación media	0.287	3.480	2.5162



Fotografía 8. Vista del talud donde se realizaron mediciones en punto P3.

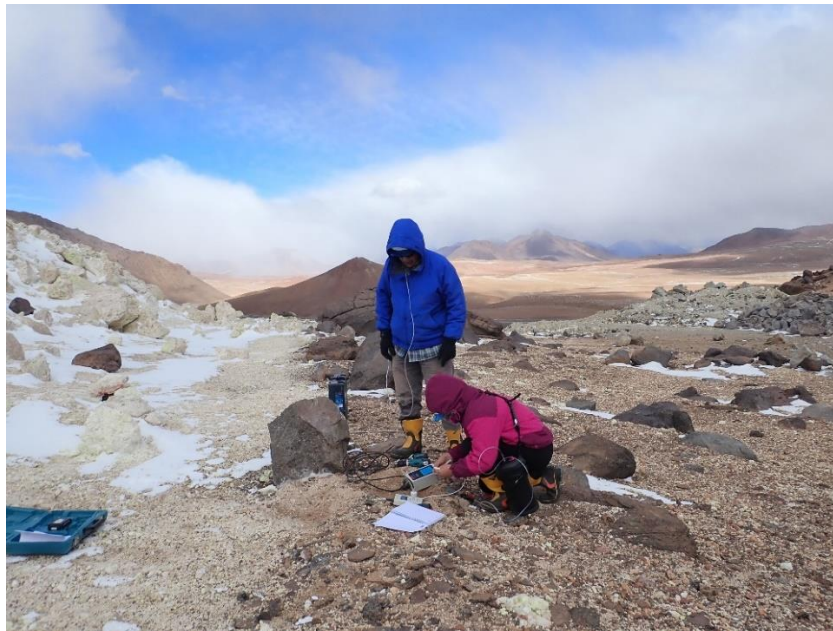


Fotografía 9. Vista panorámica del talud de las mediciones correspondientes al punto P3.

Medición de conductividad Térmica y contenido de agua Punto 4 y 5 ubicado en el Dm 2+500, se muestra en la Tabla 4

Tabla 4. Mediciones en Punto 4 y Punto 5

Nombre	Descripción	Conductividad Térmica [W/m*K]	Resistividad Térmica [(m*K)/W]	Constante Dieléctrica
P4	Pumita Blanca. Dificultad de perforación baja	0.630	1.587	3.3601
		0.787	1.271	3.1031
P5	Material café claro. Dificultad de perforación baja	0.167	5.998	4.2490
		0.132	7.561	4.6557



Fotografía 10. Medición de conductividad térmica y contenido de agua en material granular café claro en punto P5.



Fotografía 11. Acercamiento de los instrumentos en punto P5.

Toma de muestras

Se tomaron muestra del material alterado, obtenidos de la perforación realizada en los puntos B3 y B2. En la Tabla 5 se resume la información correspondiente a los sitios y las muestras

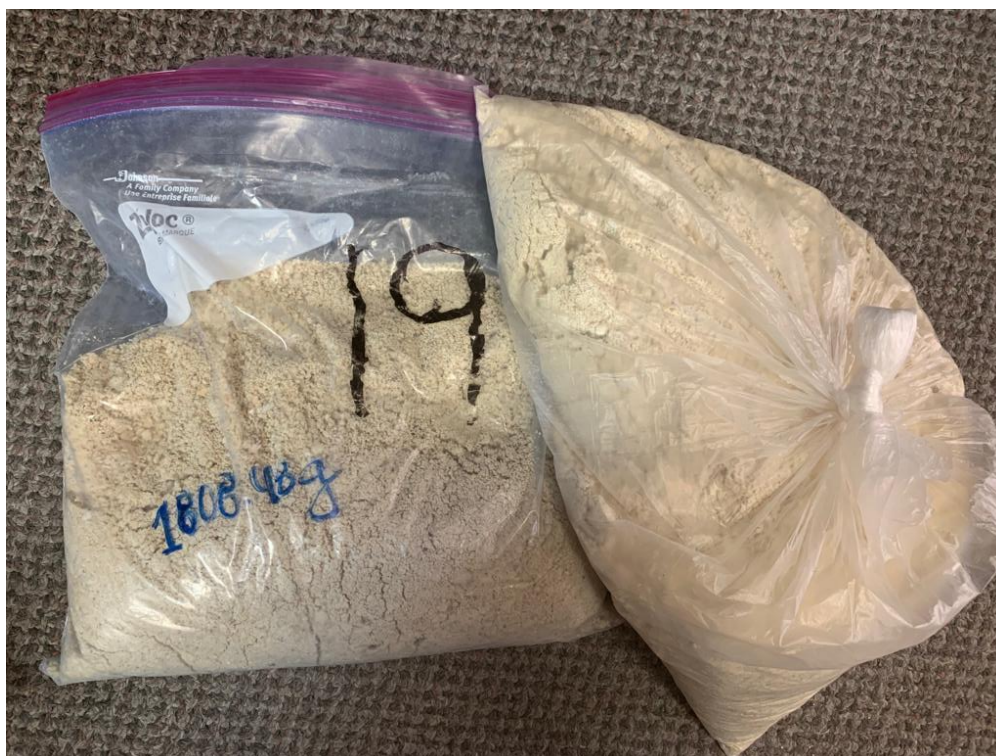
Tabla 5. Información sobre perforación y muestras.

Perforación	Profundidad Perforación (m)	Dm (m)	Elevación (m)	Muestra	Profundidad de muestra (m)
B2	14.50	6950	5485	S/N	0-2
				19	4-6
B3	14.00	2500	5079	16	0-2
				17	8-9
				18	11-13

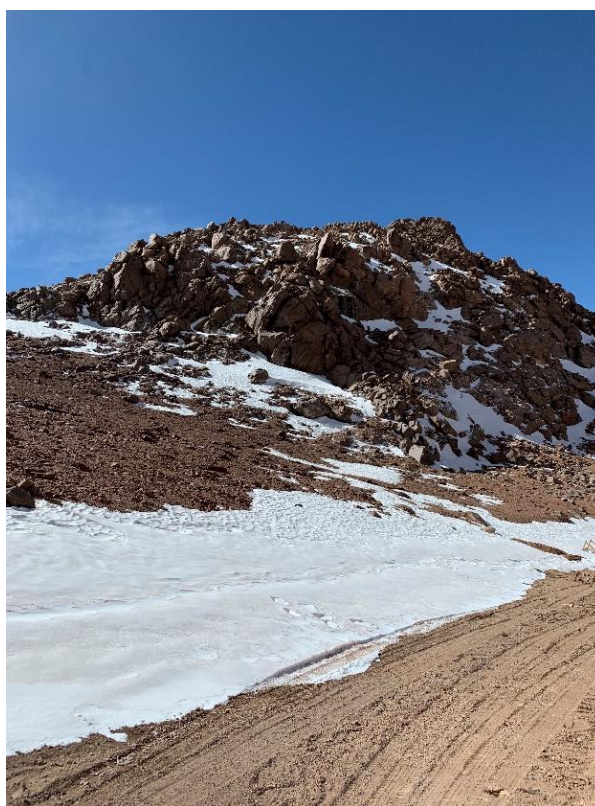
En la Fotografía 12 se puede apreciar la perforación realizada en el punto B3 sobre pumita blanca en el DM 2+500 del camino de acceso.



Fotografía 12. Perforación en pumita blanca punto B3. DM 2+500



Fotografía 13. Muestra recolectada de pumita blanca la perforación realizada punto B3. En la Fotografía 15 se puede apreciar la perforación realizada en el punto B2 sobre material café claro ubicado en el DM 6+950.



Fotografía 14. Vista panorámica punto B2 DM 6+950



Fotografía 15. Perforación material café claro punto B2



Fotografía 16. Muestra recolectada de perforación punto B2

En la Figura 3 se muestra el área donde se han presentado problemas de estabilidad

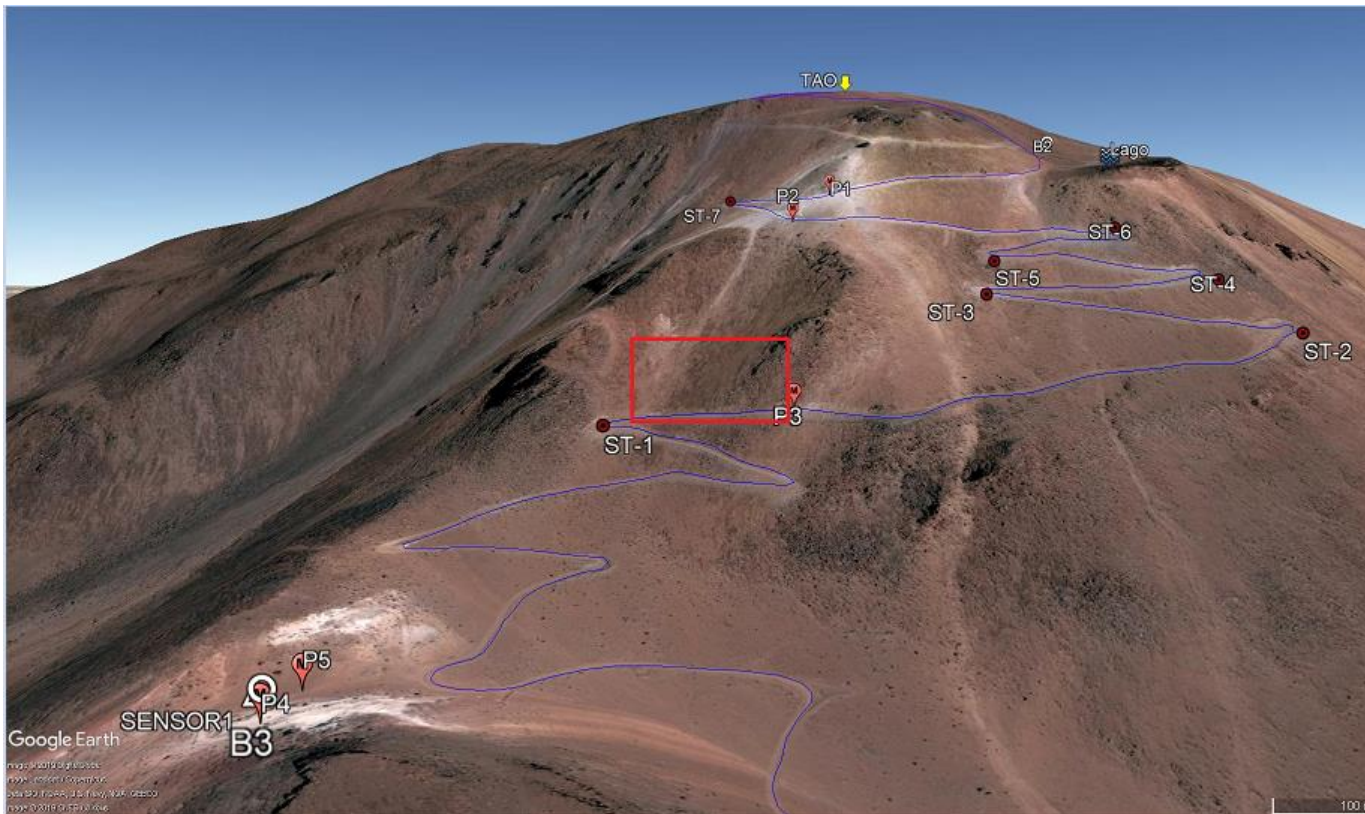


Figura 3. Vista Isométrica, cuadro rojo señala el área donde se presentan problemas de estabilidad.

Como se puede apreciar en las Fotografías 17 y 18, la zona inestable se encuentra predominada por pumita blanca rica en contenido de hielo



Fotografía 17. Vista panorámica del talud DM 2+500. Cuadro rojo señala área donde hay problemas de estabilidad.



Fotografía 18. Acercamiento del talud inestable. DM 2+500



Fotografía 19. Acercamiento del material compuesto por pumita blanca. DM 2+500

En la Tabla 6 se resumen los datos obtenidos de las mediciones con su respectiva información.

Tabla 6. Información sobre perforación y muestras.

Nombre	Descripción	Conductividad Térmica [W/m*K]	Resistividad Térmica [(m*K)/W]	Constante Dieléctrica	Dm (m)
P1	Pumita Blanca. Dificultad de perforación baja-media	0.120	8.336	2.5119	6+400
P2	Roca dura color amarillento. Dificultad de perforación alta. No se pudo enterrar por completo el sensor.	0.619	1.615	3.7789	6+200
P3	Material Café Claro húmedo. Dificultad de perforación media	0.287	3.480	2.5162	5+500
P4	Pumita Blanca. Dificultad de perforación baja	0.630	1.587	3.3601	2+500
		0.787	1.271	3.1031	
P5	Material café claro. Dificultad de perforación baja	0.167	5.998	4.249	2+500
		0.132	7.561	4.6557	

Anexo E. Registro de ensayos de laboratorio.

Contenido de Humedad y Granulometría

Muestra 16 – Arena Café

PROYECTO :	TAO	SONDEO :	B2
UBICACIÓN :	San Pedro de Atacama, Chile	MUESTRA :	16
FECHA :	jun-19	PROFUNDIDAD :	0-2 m
DESCRIPCIÓN :	Material Granular café claro Muestra con hielo intersticial	COTA :	5485 m
		COORDENADAS :	-

**ANALISIS GRANULOMETRICO
ASTM C-136**

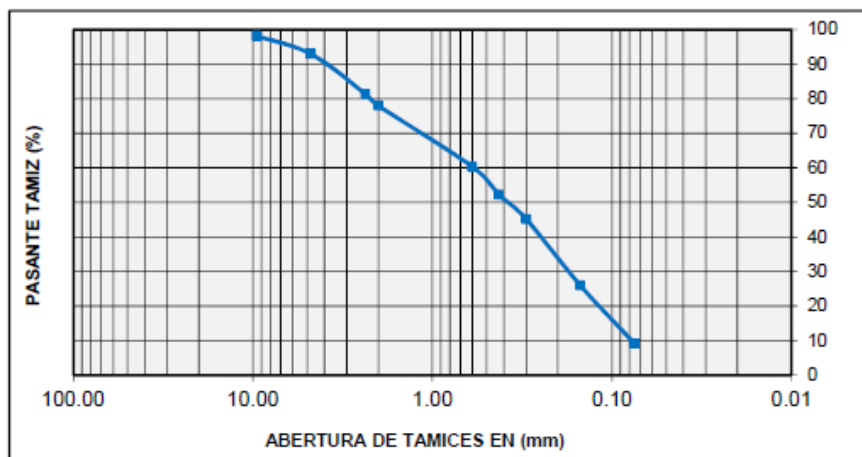
TAMIZ		RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
ASTM	mm.				
3/8"	9.50	6.9	2.0	2.0	98.0
No. 4	4.75	17.8	5.1	7.1	92.9
No. 8	2.36	40.5	11.6	18.7	81.3
No. 10	2.00	11.6	3.3	22.0	78.0
No. 30	0.60	61.5	17.6	39.7	60.3
No. 40	0.43	28.3	8.1	47.8	52.2
No. 50	0.30	24.7	7.1	54.9	45.1
No. 100	0.15	66.8	19.2	74.0	26.0
No. 200	0.08	58.5	16.8	90.8	9.2
Total		348.6	gr.		

w(%)= 21.25

D60= 0.59 Cu = 7.5

D30= 0.18 Cc = 0.7

D10= 0.08



CLASIFICACION	
SUCS	SP SM
AASHTO	A-1-a

Muestra 17 – Arena Café

PROYECTO : TAO
UBICACIÓN : San Pedro de Atacama, Chile
FECHA : jun-19
DESCRIPCIÓN : Material Granular café claro

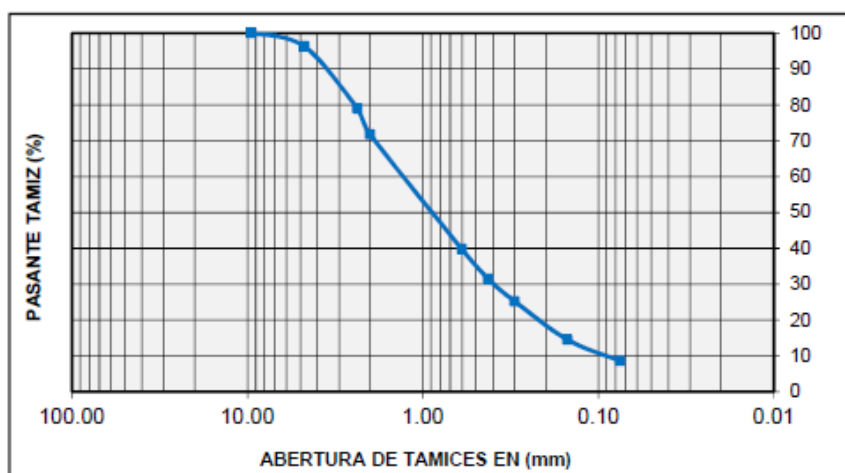
SONDEO : B2
MUESTRA : 17
PROFUNDIDAD : 7-8 m
COTA : 5485
COORDENADAS : -

**ANALISIS GRANULOMETRICO
 ASTM C-136**

TAMIZ		RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
ASTM	mm.				
3/8"	9.50	0.0	0.0	0.0	100.0
No. 4	4.75	13.0	3.7	3.7	96.3
No. 8	2.36	60.7	17.4	21.1	78.9
No. 10	2.00	25.0	7.2	28.3	71.7
No. 30	0.60	111.8	32.0	60.2	39.8
No. 40	0.43	29.0	8.3	68.5	31.5
No. 50	0.30	21.8	6.2	74.8	25.2
No. 100	0.15	37.3	10.7	85.5	14.5
No. 200	0.08	20.9	6.0	91.4	8.6
Total		349.4	gr.		

w(%)= 17.22

D60= 1.49 Cu = 16.0
 D30= 0.40 Cc = 1.1
 D10= 0.09



CLASIFICACION	
SUCS	SW SM
AASHTO	A-1-a

Muestra 18 – Arena Café

PROYECTO : TAO
UBICACIÓN : San Pedro de Atacama, Chile
FECHA : jun-19
DESCRIPCIÓN : Material Granular café claro

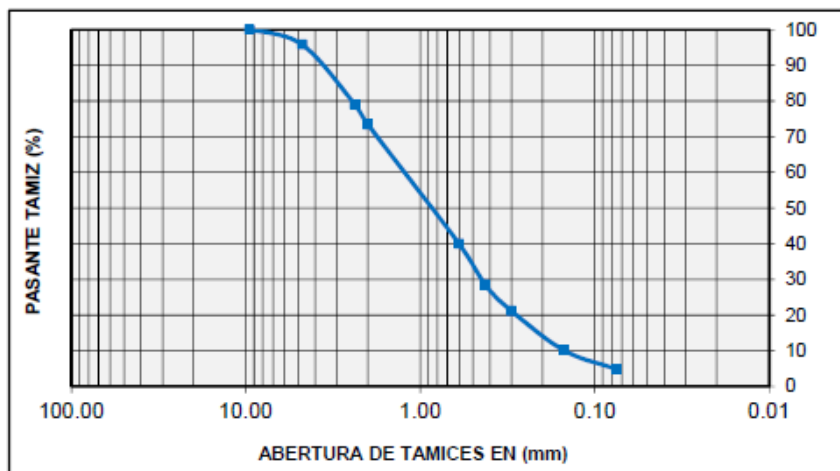
SONDEO : B2
MUESTRA : 18
PROFUNDIDAD : 11-13 m
COTA : 5485
COORDENADAS : -

**ANALISIS GRANULOMETRICO
 ASTM C-136**

TAMIZ		RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
ASTM	mm.				
3/8"	9.50	0.0	0.0	0.0	100.0
No. 4	4.75	15.9	4.2	4.2	95.8
No. 8	2.36	63.5	16.9	21.1	78.9
No. 10	2.00	20.5	5.4	26.6	73.4
No. 30	0.60	125.8	33.4	60.0	40.0
No. 40	0.43	43.1	11.5	71.5	28.5
No. 50	0.30	27.8	7.4	78.8	21.2
No. 100	0.15	41.5	11.0	89.9	10.1
No. 200	0.08	19.9	5.3	95.2	4.8
Total		376.1	gr.		

w(%)= 9.23

D60= 1.44 Cu = 9.7
 D30= 0.45 Cc = 0.9
 D10= 0.15



CLASIFICACION	
SUCS	SP
AASHTO	A-1-a

Muestra S/N – Ignimbrita Blanca

PROYECTO : TAO
UBICACIÓN : San Pedro de Atacama, Chile
FECHA : jun-19
DESCRIPCIÓN : Pumita Blanca

SONDEO : B3
MUESTRA : S/N
PROFUNDIDAD : -
COTA : 5079
COORDENADAS : -

**ANALISIS GRANULOMETRICO
 ASTM C-136**

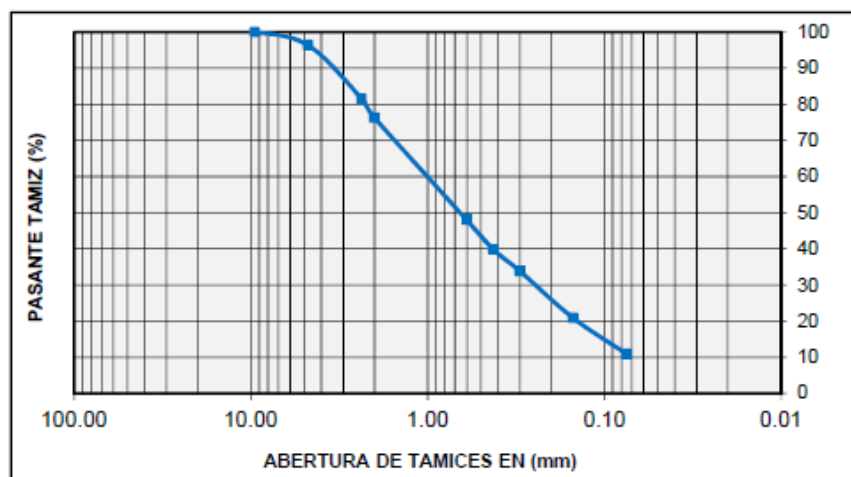
TAMIZ		RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
ASTM	mm.				
3/8"	9.50	0.0	0.0	0.0	100.0
No. 4	4.75	12.2	3.6	3.6	96.4
No. 8	2.36	50.1	14.9	18.5	81.5
No. 10	2.00	17.5	5.2	23.7	76.3
No. 30	0.60	95.3	28.3	52.1	47.9
No. 40	0.43	27.2	8.1	60.2	39.8
No. 50	0.30	20.3	6.0	66.2	33.8
No. 100	0.15	43.6	12.9	79.2	20.8
No. 200	0.08	33.3	9.9	89.1	10.9
Total		336.3	gr.		

w(%)= 19.29

D60= 1.20 Cu =

D30= 0.26 Cc =

D10=



CLASIFICACION	
SUCS	SP SM
AASHTO	A-1-a

Muestra S/N – Ignimbrita Blanca

PROYECTO : TAO
UBICACIÓN : San Pedro de Atacama, Chile
FECHA : jul-19
DESCRIPCIÓN : Pumita Blanca

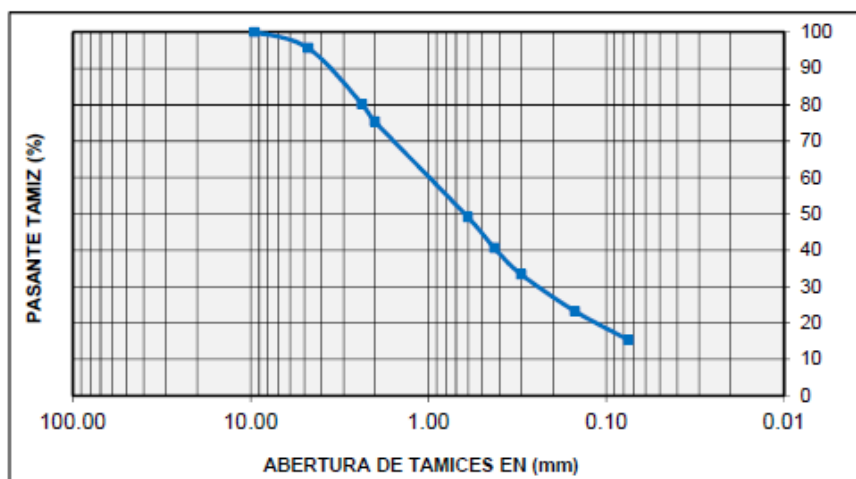
SONDEO : B2
MUESTRA : 19
PROFUNDIDAD : 4-6 m
COTA : 5079
COORDENADAS : -

**ANALISIS GRANULOMETRICO
 ASTM C-136**

TAMIZ		RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
ASTM	mm.				
3/8"	9.50	0.0	0.0	0.0	100.0
No. 4	4.75	13.7	4.4	4.4	95.6
No. 8	2.36	48.3	15.4	19.8	80.2
No. 10	2.00	15.1	4.8	24.6	75.4
No. 30	0.60	82.2	26.3	50.9	49.1
No. 40	0.43	26.7	8.5	59.5	40.5
No. 50	0.30	22.7	7.2	66.7	33.3
No. 100	0.15	31.5	10.1	76.8	23.2
No. 200	0.08	24.9	8.0	84.7	15.3
Total		312.6	gr.		

w(%)= 29.66

D60= 1.18 Cu =
 D30= 0.25 Cc =
 D10=



CLASIFICACION	
SUCS	SM
AASHTO	A-1-a

Corte Simple

Muestra S/N – Ignimbrita Blanca



Ensayo de Corte Simple

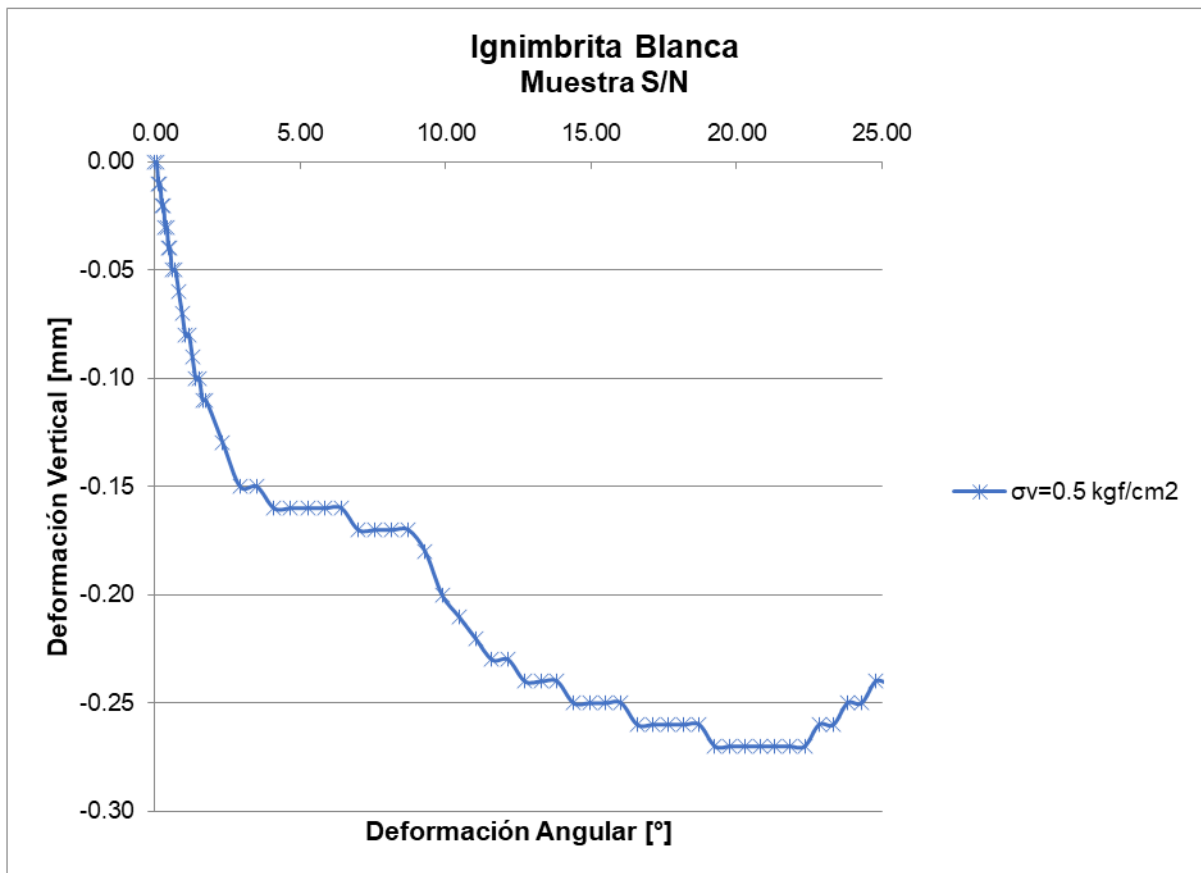
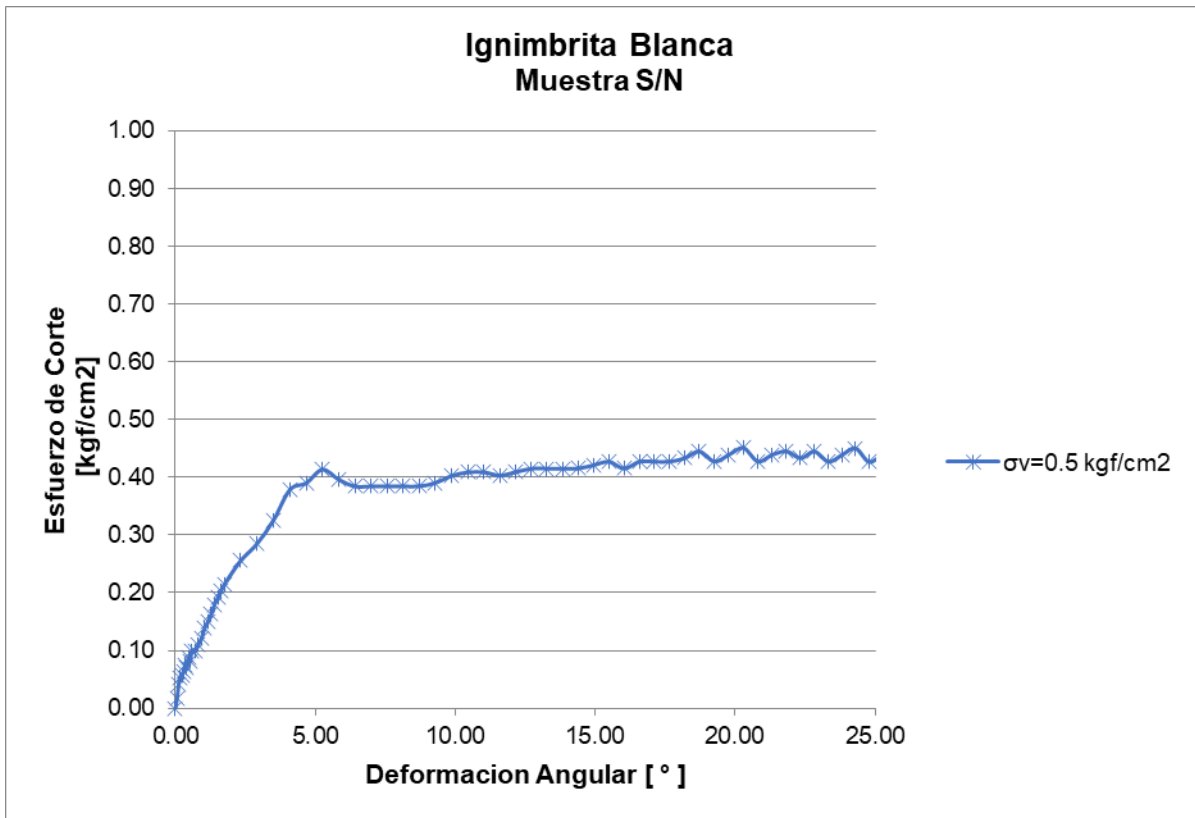
Muestra: S/N
Material: Ignimbrita Blanca

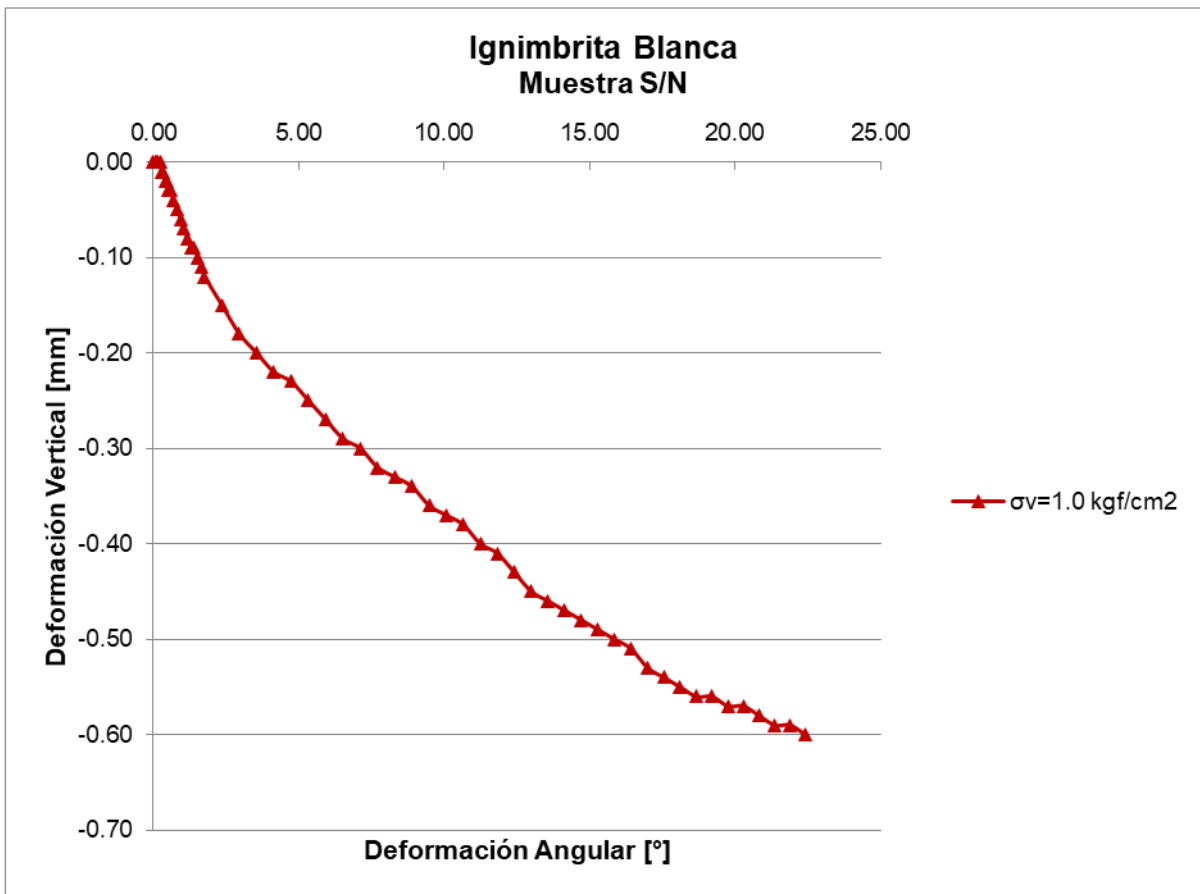
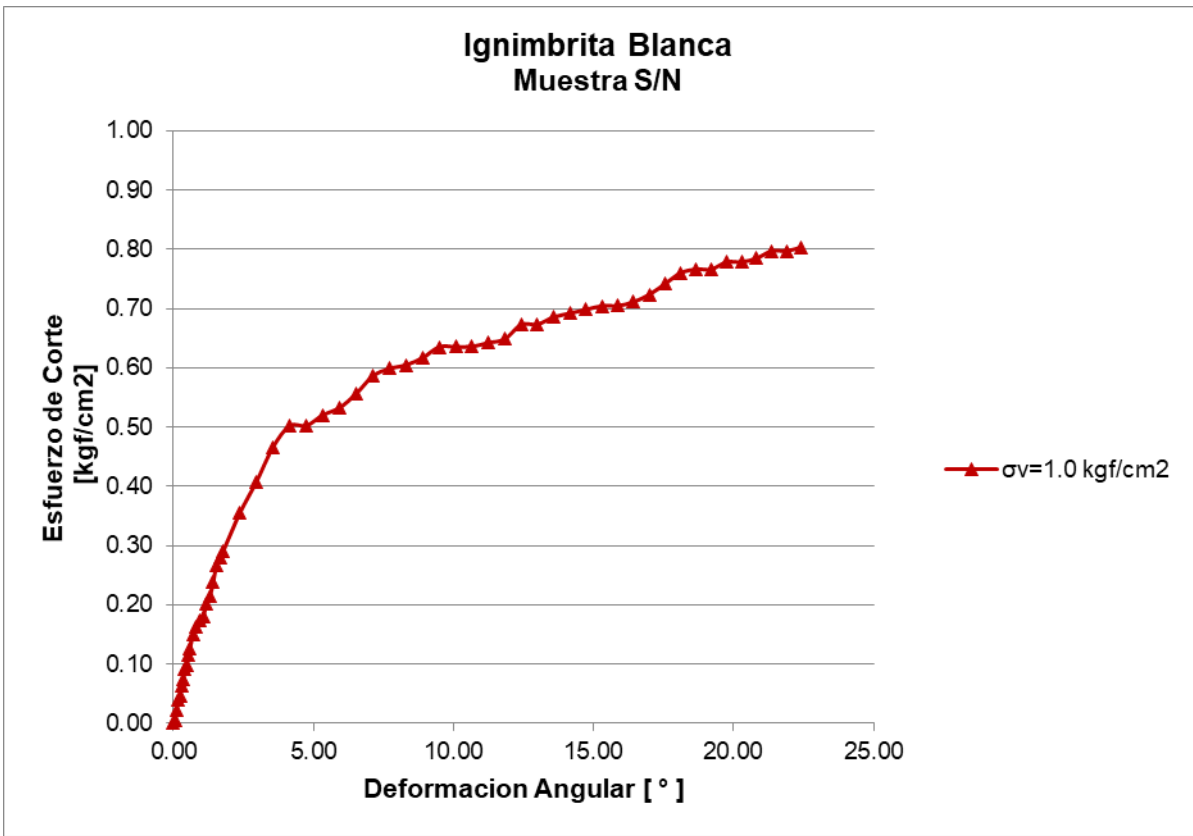
Fecha: oct-19

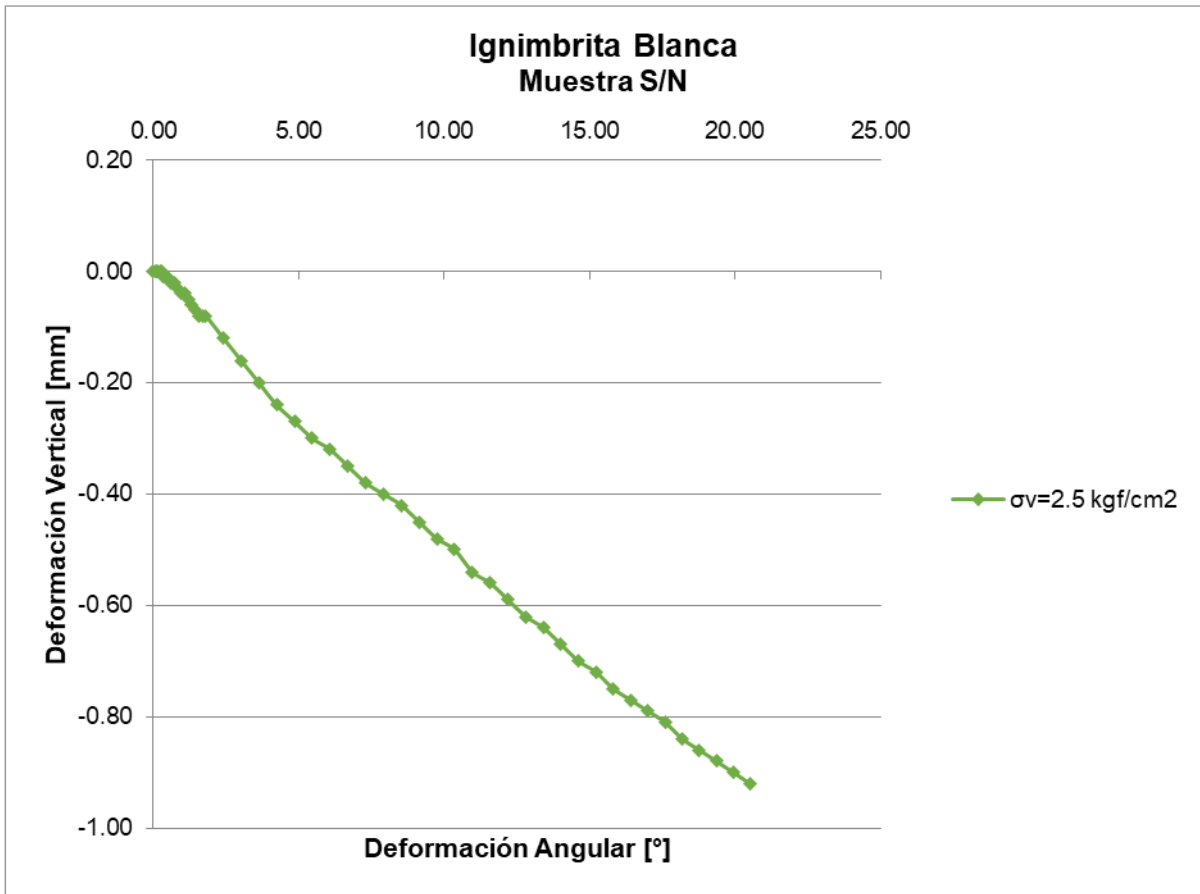
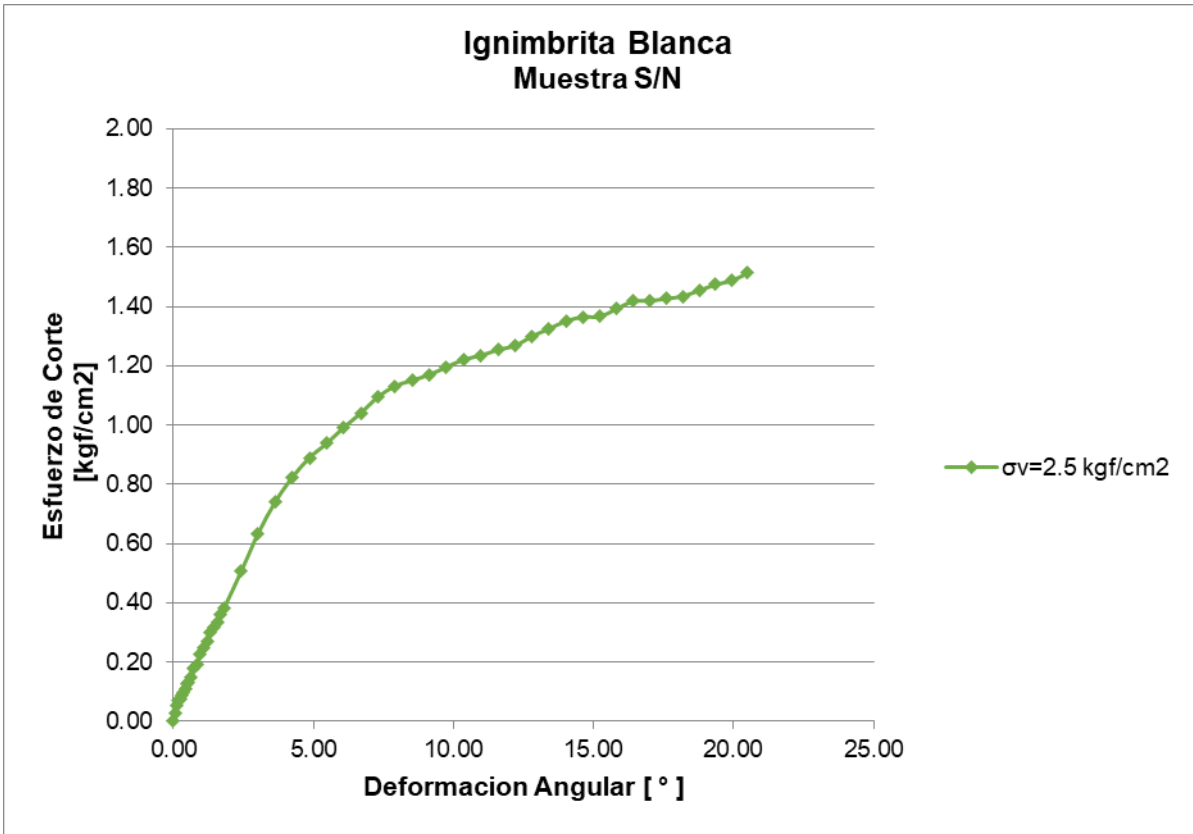
Área de la probeta [cm ²]	38.48451
Altura de la probeta [cm]	2.0
Diámetro de la probeta [cm]	7.0
Volumen efectivo [cm ³]	76.96902

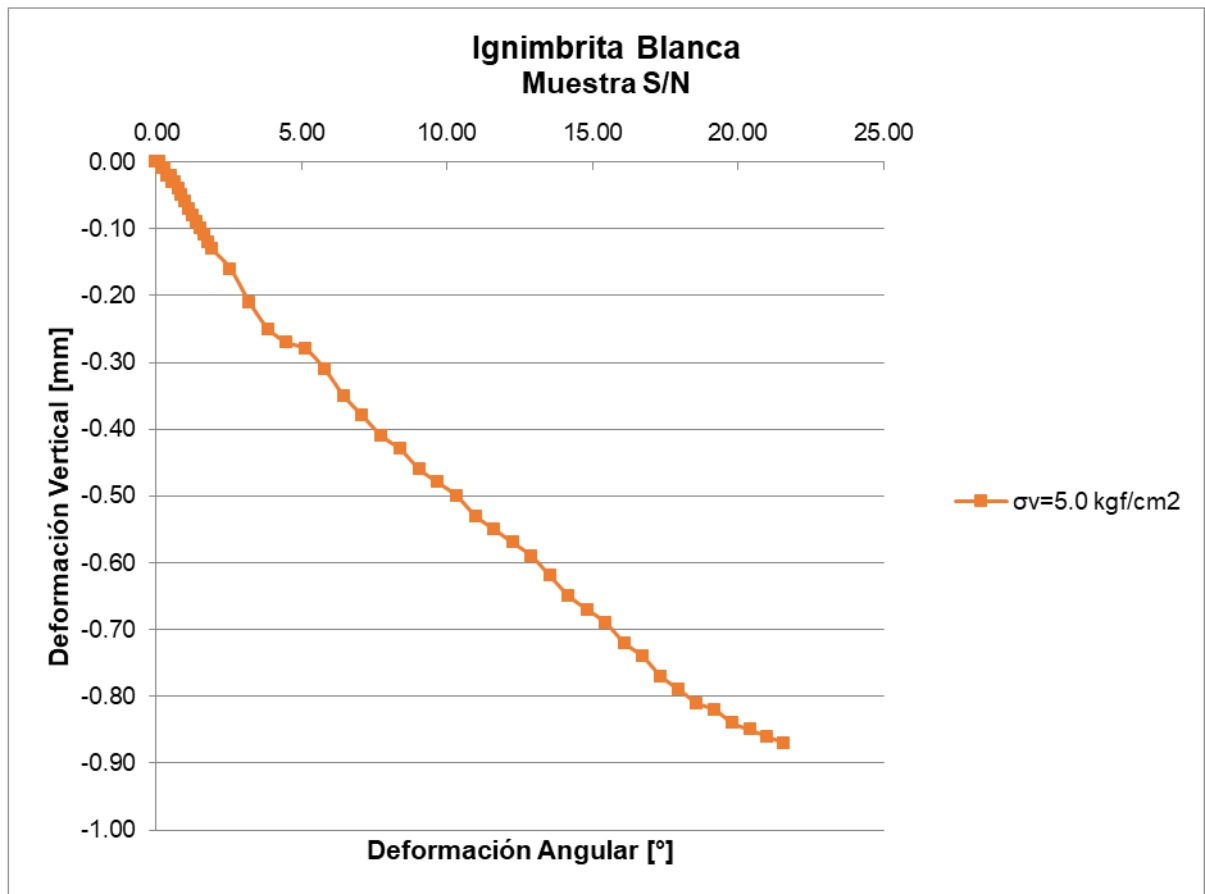
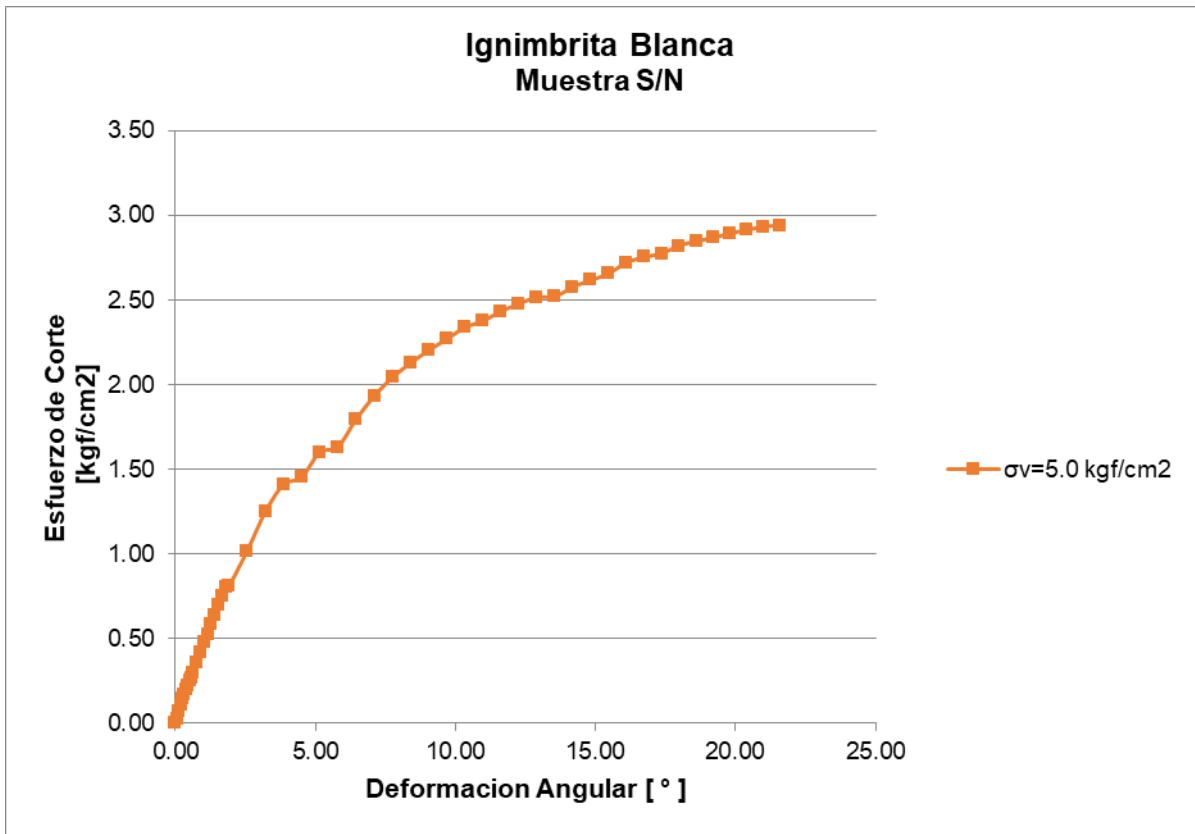
Tensión normal [kgf/cm ²]	0.5
Carga Aplicada	19.24
Consolidación por Tensión Normal [rayas]	-26

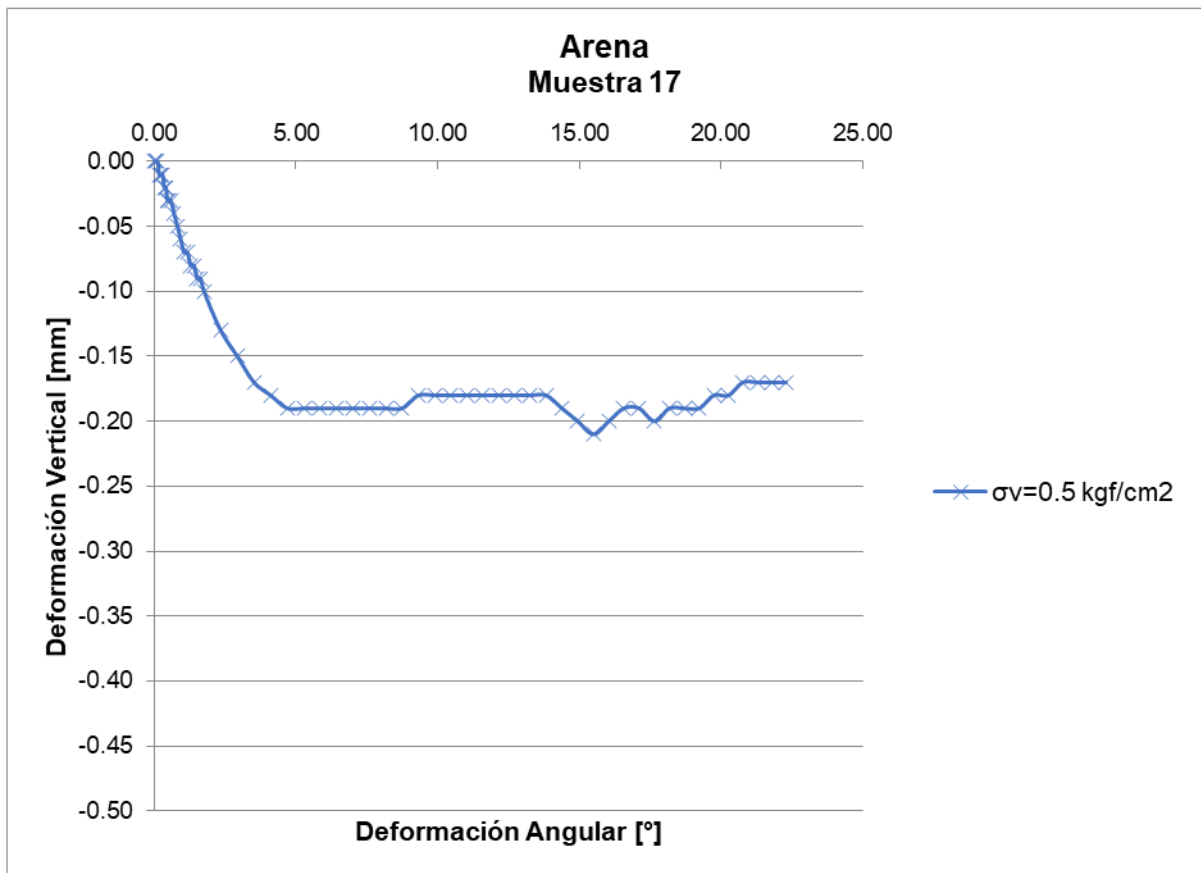
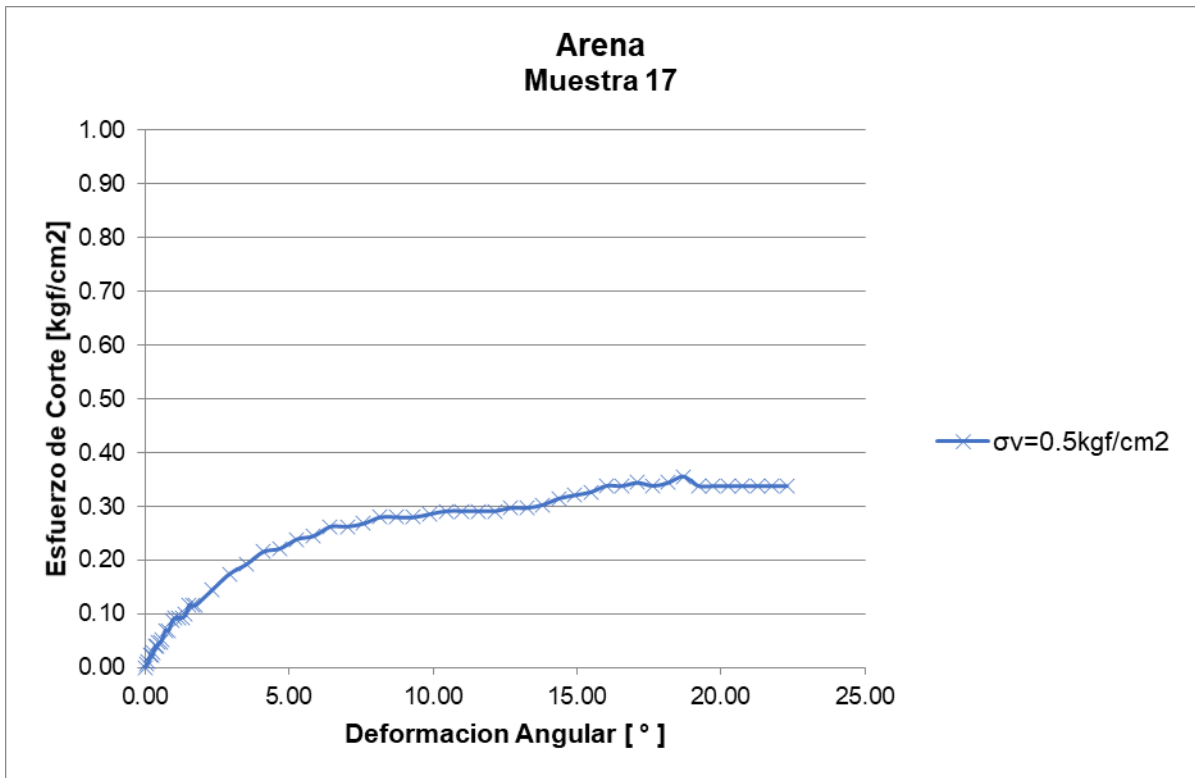
Deformación Horizontal 0,02 mm	Deformación Vertical 0,01 mm	Carga [kgf]	ε []	Area efec [cm ²]	σ [kgf/cm ²]	τ [kgf/cm ²]	γ [°]
0	0	0.000	0.0000	38.485	0.500	0.0000	0.0000
10	0	0.667	0.0000	38.485	0.500	0.0173	0.0581
20	-1	1.556	-0.0005	38.465	0.500	0.0405	0.1162
30	-1	2.001	-0.0005	38.465	0.500	0.0520	0.1742
40	-2	2.223	-0.0010	38.446	0.501	0.0578	0.2324
50	-2	2.445	-0.0010	38.446	0.501	0.0636	0.2905
60	-3	2.890	-0.0015	38.426	0.501	0.0752	0.3488
70	-3	2.668	-0.0015	38.426	0.501	0.0694	0.4070
80	-4	3.335	-0.0020	38.407	0.501	0.0868	0.4653
90	-4	3.112	-0.0020	38.407	0.501	0.0810	0.5235
100	-5	3.779	-0.0025	38.387	0.501	0.0984	0.5820
120	-5	3.779	-0.0025	38.387	0.501	0.0984	0.6983
140	-6	4.224	-0.0030	38.368	0.502	0.1101	0.8151
160	-7	4.668	-0.0035	38.349	0.502	0.1217	0.9320
180	-8	5.335	-0.0041	38.329	0.502	0.1392	1.0490
200	-8	5.780	-0.0041	38.329	0.502	0.1508	1.1656
220	-9	6.224	-0.0046	38.310	0.502	0.1625	1.2827
240	-10	6.891	-0.0051	38.291	0.503	0.1800	1.4000
260	-10	7.336	-0.0051	38.291	0.503	0.1916	1.5166
280	-11	7.781	-0.0056	38.271	0.503	0.2033	1.6341
300	-11	8.225	-0.0056	38.271	0.503	0.2149	1.7507
400	-13	9.781	-0.0066	38.233	0.503	0.2558	2.3361
500	-15	10.893	-0.0076	38.194	0.504	0.2852	2.9222
600	-15	12.449	-0.0076	38.194	0.504	0.3259	3.5053
700	-16	14.450	-0.0081	38.175	0.504	0.3785	4.0898
800	-16	14.894	-0.0081	38.175	0.504	0.3902	4.6716
900	-16	15.783	-0.0081	38.175	0.504	0.4134	5.2525
1000	-16	15.116	-0.0081	38.175	0.504	0.3960	5.8323
1100	-16	14.672	-0.0081	38.175	0.504	0.3843	6.4108
1200	-17	14.672	-0.0086	38.156	0.504	0.3845	6.9917
1300	-17	14.672	-0.0086	38.156	0.504	0.3845	7.5678
1400	-17	14.672	-0.0086	38.156	0.504	0.3845	8.1424
1500	-17	14.672	-0.0086	38.156	0.504	0.3845	8.7154
1600	-18	14.894	-0.0091	38.137	0.505	0.3905	9.2912
1700	-20	15.339	-0.0101	38.099	0.505	0.4026	9.8708
1800	-21	15.561	-0.0106	38.079	0.505	0.4086	10.4442
1900	-22	15.561	-0.0111	38.060	0.506	0.4089	11.0161
2000	-23	15.339	-0.0117	38.041	0.506	0.4032	11.5864
2100	-23	15.561	-0.0117	38.041	0.506	0.4091	12.1489
2200	-24	15.783	-0.0122	38.022	0.506	0.4151	12.7153
2300	-24	15.783	-0.0122	38.022	0.506	0.4151	13.2733
2400	-24	15.783	-0.0122	38.022	0.506	0.4151	13.8287
2500	-25	15.783	-0.0127	38.003	0.506	0.4153	14.3885
2600	-25	16.006	-0.0127	38.003	0.506	0.4212	14.9387
2700	-25	16.228	-0.0127	38.003	0.506	0.4270	15.4862
2800	-25	15.783	-0.0127	38.003	0.506	0.4153	16.0308
2900	-26	16.228	-0.0132	37.984	0.507	0.4272	16.5804
3000	-26	16.228	-0.0132	37.984	0.507	0.4272	17.1193
3100	-26	16.228	-0.0132	37.984	0.507	0.4272	17.6550
3200	-26	16.450	-0.0132	37.984	0.507	0.4331	18.1875
3300	-26	16.895	-0.0132	37.984	0.507	0.4448	18.7168
3400	-27	16.228	-0.0137	37.965	0.507	0.4274	19.2520
3500	-27	16.673	-0.0137	37.965	0.507	0.4392	19.7749
3600	-27	17.117	-0.0137	37.965	0.507	0.4509	20.2944
3700	-27	16.228	-0.0137	37.965	0.507	0.4274	20.8104
3800	-27	16.673	-0.0137	37.965	0.507	0.4392	21.3229
3900	-27	16.895	-0.0137	37.965	0.507	0.4450	21.8318
4000	-27	16.450	-0.0137	37.965	0.507	0.4333	22.3372
4100	-26	16.895	-0.0132	37.984	0.507	0.4448	22.8284
4200	-26	16.228	-0.0132	37.984	0.507	0.4272	23.3263
4300	-25	16.673	-0.0127	38.003	0.506	0.4387	23.8096
4400	-25	17.117	-0.0127	38.003	0.506	0.4504	24.2998
4500	-24	16.228	-0.0122	38.022	0.506	0.4268	24.7751
4600	-24	16.673	-0.0122	38.022	0.506	0.4385	25.2577
4700	-23	16.895	-0.0117	38.041	0.506	0.4441	25.7250











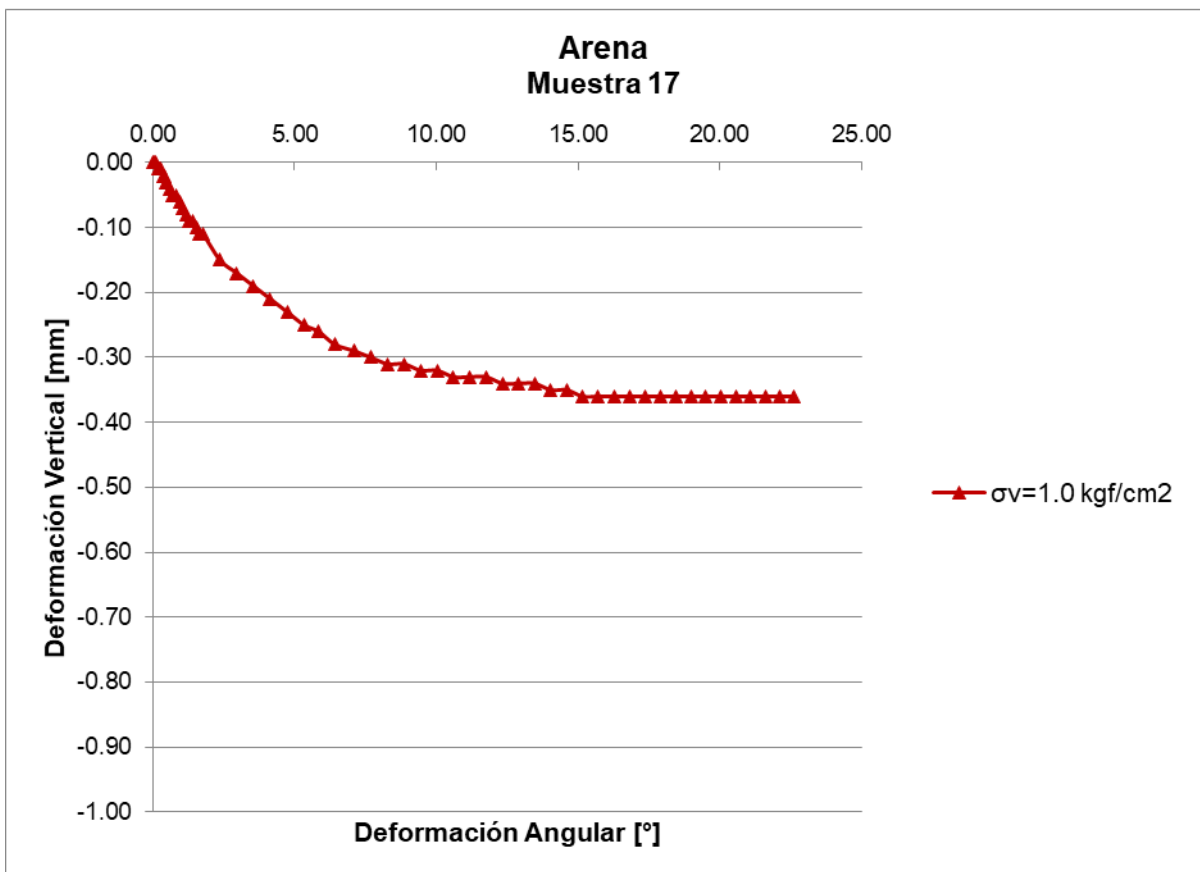
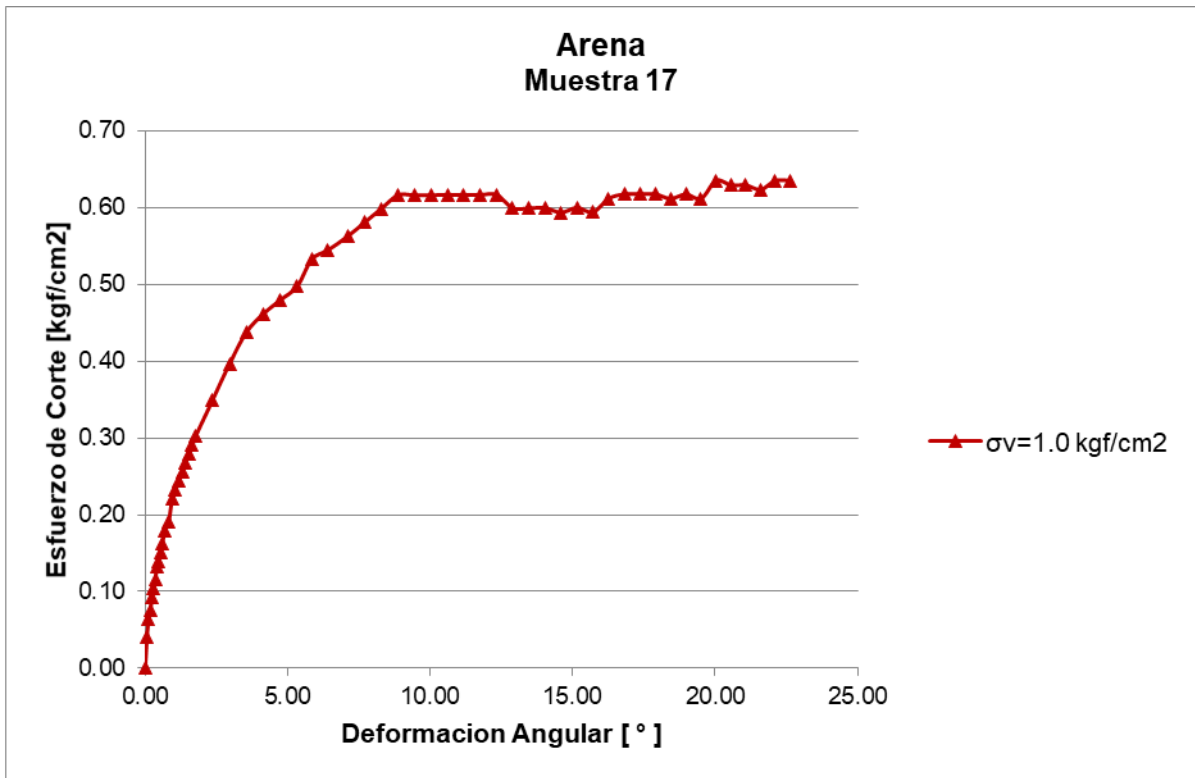
Muestra: 17
Material: Arena Café

Fecha: oct-19

Área de la probeta [cm ²]	38.48451
Altura de la probeta [cm]	2.0
Diámetro de la probeta [cm]	7.0
Volumen efectivo [cm ³]	76.96902

Tensión normal [kgf/cm ²]	1.0
Carga Aplicada	38.48
Consolidación por Tensión Normal [rayas]	-44

Deformación Horizontal 0,02 mm	Deformación Vertical 0,01 mm	Carga [kgf]	ϵ []	Area efec [cm ²]	σ [kgf/cm ²]	τ [kgf/cm ²]	γ [°]
0	0	0.000	0.0000	38.485	1.000	0.0000	0.0000
10	0	1.556	0.0000	38.485	1.000	0.0404	0.0586
20	0	2.445	0.0000	38.485	1.000	0.0635	0.1172
30	-1	2.890	-0.0005	38.465	1.001	0.0751	0.1758
40	-1	3.557	-0.0005	38.465	1.001	0.0925	0.2345
50	-1	4.001	-0.0005	38.465	1.001	0.1040	0.2931
60	-2	4.446	-0.0010	38.445	1.001	0.1156	0.3519
70	-2	5.113	-0.0010	38.445	1.001	0.1330	0.4105
80	-3	5.335	-0.0015	38.426	1.002	0.1388	0.4694
90	-3	5.780	-0.0015	38.426	1.002	0.1504	0.5281
100	-4	6.224	-0.0020	38.406	1.002	0.1621	0.5870
120	-5	6.891	-0.0026	38.386	1.003	0.1795	0.7048
140	-5	7.336	-0.0026	38.386	1.003	0.1911	0.8222
160	-6	8.447	-0.0031	38.367	1.003	0.2202	0.9402
180	-7	8.892	-0.0036	38.347	1.004	0.2319	1.0582
200	-8	9.337	-0.0041	38.328	1.004	0.2436	1.1763
220	-9	9.781	-0.0046	38.308	1.005	0.2553	1.2946
240	-9	10.226	-0.0046	38.308	1.005	0.2669	1.4122
260	-10	10.670	-0.0051	38.289	1.005	0.2787	1.5307
280	-11	11.115	-0.0056	38.269	1.006	0.2904	1.6492
300	-11	11.560	-0.0077	38.192	1.008	0.3027	1.7706
400	-15	13.338	-0.0087	38.153	1.009	0.3496	2.3626
500	-17	15.116	-0.0097	38.114	1.010	0.3966	2.9553
600	-19	16.673	-0.0107	38.076	1.011	0.4379	3.5487
700	-21	17.562	-0.0118	38.037	1.012	0.4617	4.1425
800	-23	18.229	-0.0128	37.999	1.013	0.4797	4.7366
900	-25	18.896	-0.0133	37.980	1.013	0.4975	5.3282
1000	-26	20.229	-0.0133	37.980	1.013	0.5326	5.8382
1100	-28	20.674	-0.0143	37.941	1.014	0.5449	6.4173
1200	-29	21.341	-0.0148	37.922	1.015	0.5628	7.0994
1300	-30	22.008	-0.0153	37.903	1.015	0.5806	7.6882
1400	-31	22.675	-0.0158	37.884	1.016	0.5985	8.2759
1500	-31	23.342	-0.0158	37.884	1.016	0.6161	8.8580
1600	-32	23.342	-0.0164	37.865	1.016	0.6164	9.4430
1700	-32	23.342	-0.0164	37.865	1.016	0.6164	10.0216
1800	-33	23.342	-0.0169	37.846	1.017	0.6167	10.6035
1900	-33	23.342	-0.0169	37.846	1.017	0.6167	11.1781
2000	-33	23.342	-0.0169	37.846	1.017	0.6167	11.7504
2100	-34	23.342	-0.0174	37.827	1.017	0.6171	12.3266
2200	-34	22.675	-0.0174	37.827	1.017	0.5994	12.8944
2300	-34	22.675	-0.0174	37.827	1.017	0.5994	13.4596
2400	-35	22.675	-0.0179	37.808	1.018	0.5997	14.0292
2500	-35	22.452	-0.0179	37.808	1.018	0.5939	14.5893
2600	-36	22.675	-0.0184	37.789	1.018	0.6000	15.1541
2700	-36	22.452	-0.0184	37.789	1.018	0.5941	15.7086
2800	-36	23.119	-0.0184	37.789	1.018	0.6118	16.2602
2900	-36	23.342	-0.0184	37.789	1.018	0.6177	16.8087
3000	-36	23.342	-0.0184	37.789	1.018	0.6177	17.3540
3100	-36	23.342	-0.0184	37.789	1.018	0.6177	17.8961
3200	-36	23.119	-0.0184	37.789	1.018	0.6118	18.4349
3300	-36	23.342	-0.0184	37.789	1.018	0.6177	18.9704
3400	-36	23.119	-0.0184	37.789	1.018	0.6118	19.5024
3500	-36	24.008	-0.0184	37.789	1.018	0.6353	20.0310
3600	-36	23.786	-0.0184	37.789	1.018	0.6294	20.5560
3700	-36	23.786	-0.0184	37.789	1.018	0.6294	21.0775
3800	-36	23.564	-0.0184	37.789	1.018	0.6236	21.5953
3900	-36	24.008	-0.0184	37.789	1.018	0.6353	22.1094
4000	-36	24.008	-0.0184	37.789	1.018	0.6353	22.6199



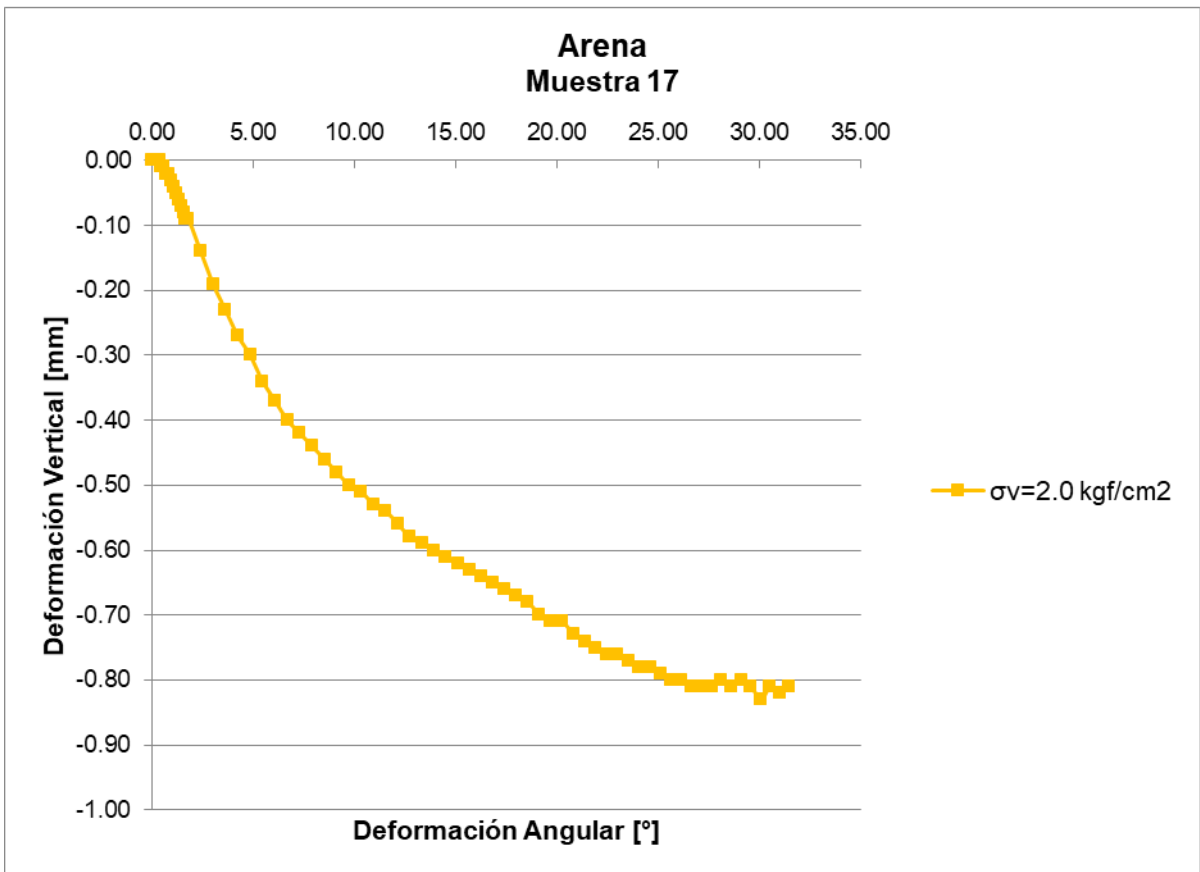
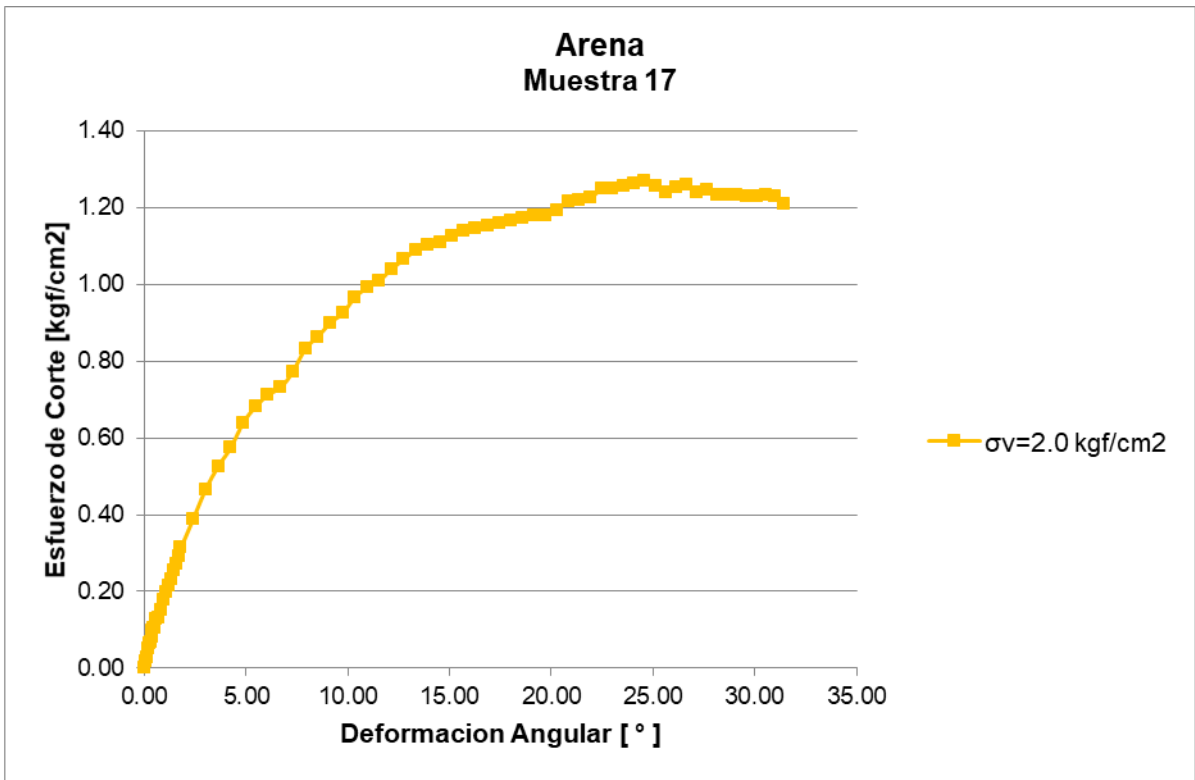
Muestra: 17
Material: Arena Café

Fecha: oct-19

Área de la probeta [cm ²]	38.48451
Altura de la probeta [cm]	2.0
Diámetro de la probeta [cm]	7.0
Volumen efectivo [cm ³]	76.96902

Tensión normal [kgf/cm ²]	2.0
Carga Aplicada	76.97
Consolidación por Tensión Normal [rayas]	-87

Deformación Horizontal 0,02 mm	Deformación Vertical 0,01 mm	Carga [kgf]	ϵ []	Area efec [cm ²]	σ [kgf/cm ²]	τ [kgf/cm ²]	γ [°]
0	0	0.000	0.0000	38.485	2.000	0.0000	0.0000
10	0	0.667	0.0000	38.485	2.000	0.0173	0.0599
20	0	1.112	0.0000	38.485	2.000	0.0289	0.1198
30	0	2.001	0.0000	38.485	2.000	0.0520	0.1797
40	0	2.445	0.0000	38.485	2.000	0.0635	0.2396
50	0	2.668	0.0000	38.485	2.000	0.0693	0.2995
60	0	3.112	0.0000	38.485	2.000	0.0809	0.3594
70	0	3.779	0.0000	38.485	2.000	0.0982	0.4193
80	-1	4.001	-0.0005	38.464	2.001	0.1040	0.4795
90	-1	4.001	-0.0005	38.464	2.001	0.1040	0.5394
100	-1	4.891	-0.0005	38.464	2.001	0.1271	0.5993
120	-2	5.113	-0.0010	38.444	2.002	0.1330	0.7195
140	-2	5.780	-0.0010	38.444	2.002	0.1503	0.8394
160	-3	6.891	-0.0016	38.424	2.003	0.1793	0.9598
180	-4	7.558	-0.0021	38.404	2.004	0.1968	1.0804
200	-5	8.225	-0.0026	38.384	2.005	0.2143	1.2010
220	-6	8.892	-0.0031	38.364	2.006	0.2318	1.3217
240	-7	9.781	-0.0037	38.344	2.007	0.2551	1.4426
260	-8	10.448	-0.0042	38.324	2.008	0.2726	1.5636
280	-9	11.115	-0.0047	38.304	2.009	0.2902	1.6847
300	-9	12.004	-0.0047	38.304	2.009	0.3134	1.8049
400	-14	14.894	-0.0073	38.205	2.015	0.3898	2.4123
500	-19	17.784	-0.0099	38.106	2.020	0.4667	3.0223
600	-23	20.007	-0.0120	38.027	2.024	0.5261	3.6330
700	-27	21.785	-0.0141	37.949	2.028	0.5741	4.2453
800	-30	24.231	-0.0157	37.890	2.031	0.6395	4.8568
900	-34	25.787	-0.0178	37.812	2.036	0.6820	5.4720
1000	-37	26.898	-0.0193	37.754	2.039	0.7125	6.0853
1100	-40	27.565	-0.0209	37.696	2.042	0.7312	6.6992
1200	-42	29.121	-0.0220	37.658	2.044	0.7733	7.3096
1300	-44	31.344	-0.0230	37.619	2.046	0.8332	7.9197
1400	-46	32.456	-0.0240	37.581	2.048	0.8636	8.5293
1500	-48	33.790	-0.0251	37.543	2.050	0.9000	9.1382
1600	-50	34.679	-0.0261	37.504	2.052	0.9247	9.7464
1700	-51	36.235	-0.0267	37.485	2.053	0.9666	10.3482
1800	-53	37.124	-0.0277	37.447	2.055	0.9914	10.9541
1900	-54	37.791	-0.0282	37.428	2.056	1.0097	11.5527
2000	-56	38.903	-0.0293	37.390	2.059	1.0405	12.1558
2100	-58	39.792	-0.0303	37.352	2.061	1.0653	12.7575
2200	-59	40.681	-0.0308	37.333	2.062	1.0897	13.3507
2300	-60	41.126	-0.0314	37.314	2.063	1.1021	13.9416
2400	-61	41.348	-0.0319	37.295	2.064	1.1087	14.5302
2500	-62	42.015	-0.0324	37.276	2.065	1.1271	15.1162
2600	-63	42.459	-0.0329	37.258	2.066	1.1396	15.6997
2700	-64	42.682	-0.0335	37.239	2.067	1.1462	16.2804
2800	-65	42.904	-0.0340	37.220	2.068	1.1527	16.8584
2900	-66	43.126	-0.0345	37.201	2.069	1.1593	17.4335
3000	-67	43.349	-0.0350	37.182	2.070	1.1658	18.0056
3100	-68	43.571	-0.0355	37.163	2.071	1.1724	18.5746
3200	-70	43.793	-0.0366	37.126	2.073	1.1796	19.1501
3300	-71	43.793	-0.0371	37.107	2.074	1.1802	19.7129
3400	-71	44.238	-0.0371	37.107	2.074	1.1922	20.2623
3500	-73	45.127	-0.0382	37.070	2.076	1.2173	20.8286
3600	-74	45.127	-0.0387	37.051	2.077	1.2180	21.3812
3700	-75	45.349	-0.0392	37.033	2.078	1.2246	21.9303
3800	-76	46.238	-0.0397	37.014	2.079	1.2492	22.4758
3900	-76	46.238	-0.0397	37.014	2.079	1.2492	23.0063
4000	-77	46.461	-0.0403	36.995	2.081	1.2559	23.5442
4100	-78	46.683	-0.0408	36.977	2.082	1.2625	24.0783
4200	-78	46.905	-0.0408	36.977	2.082	1.2685	24.5967
4300	-79	46.461	-0.0413	36.958	2.083	1.2571	25.1228
4400	-80	45.794	-0.0418	36.940	2.084	1.2397	25.6451
4500	-80	46.238	-0.0418	36.940	2.084	1.2517	26.1510
4600	-81	46.461	-0.0423	36.921	2.085	1.2584	26.6650
4700	-81	45.794	-0.0423	36.921	2.085	1.2403	27.1624
4800	-81	46.016	-0.0423	36.921	2.085	1.2463	27.6553
4900	-80	45.572	-0.0418	36.940	2.084	1.2337	28.1309
5000	-81	45.572	-0.0423	36.921	2.085	1.2343	28.6280
5100	-80	45.572	-0.0418	36.940	2.084	1.2337	29.0944
5200	-81	45.349	-0.0423	36.921	2.085	1.2283	29.5830
5300	-83	45.349	-0.0434	36.884	2.087	1.2295	30.0809
5400	-81	45.572	-0.0423	36.921	2.085	1.2343	30.5202
5500	-82	45.349	-0.0429	36.903	2.086	1.2289	30.9960
5600	-81	44.682	-0.0423	36.921	2.085	1.2102	31.4397



Compresión no confinada



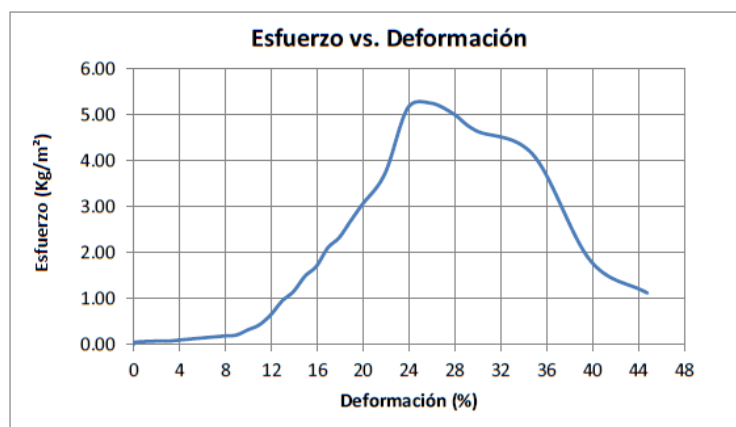
ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE ASTM D 2166

PROYECTO : TAO
FECHA : 7/11/2019
MUESTRA : S/N
MATERIAL: Ignimbrita Blanca

DATOS
Diám. inicial: 4.57 cm
Altura inicial: 10.05 cm
Área inicial: 16.40 cm²

LECTURA DEFORMACIÓN	DIAL DE CARGA	CARGA (Kgf)	DEFORM. ΔL (mm)	DEFORM UNITARIA (%)	AREA CORREGIDA	ESFUERZO (Kg/cm ²)
0	0	0.00	0.00	0.000	16.40	0.000
10	2.0	0.81	0.10	0.100	16.42	0.049
20	3.0	1.22	0.20	1.990	16.74	0.073
30	3.0	1.22	0.30	2.985	16.91	0.072
40	4.0	1.64	0.40	3.980	17.08	0.096
50	5.0	2.05	0.50	4.975	17.26	0.119
60	6.0	2.47	0.60	5.970	17.44	0.141
70	7.0	2.88	0.70	6.965	17.63	0.163
80	8.0	3.30	0.80	7.960	17.82	0.185
90	9.0	3.71	0.90	8.955	18.02	0.206
100	14.0	5.79	1.00	9.950	18.22	0.318
110	19.0	7.87	1.10	10.945	18.42	0.427
120	29.0	12.02	1.20	11.940	18.63	0.645
130	43.0	17.84	1.30	12.935	18.84	0.947
140	53.0	21.99	1.40	13.930	19.06	1.154
150	69.0	28.64	1.50	14.925	19.28	1.485
160	80.0	33.21	1.60	15.920	19.51	1.702
170	100.0	41.51	1.70	16.915	19.74	2.103
180	112.0	46.50	1.80	17.910	19.98	2.327
190	131.0	54.39	1.90	18.905	20.23	2.689
200	150.0	62.28	2.00	19.900	20.48	3.042
220	188.0	78.07	2.20	21.891	21.00	3.718
240	267.0	110.89	2.40	23.881	21.55	5.146
260	280.0	116.29	2.60	25.871	22.13	5.255
280	275.0	114.21	2.80	27.861	22.74	5.023
300	262.0	108.81	3.00	29.851	23.38	4.653
350	250.0	103.82	3.50	34.826	25.17	4.125
400	120.0	49.82	4.00	39.801	27.25	1.828
450	80	33.21	4.50	44.776	29.70	1.118

Esfuerzo maximo 5.26 (Kg/cm²)



ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

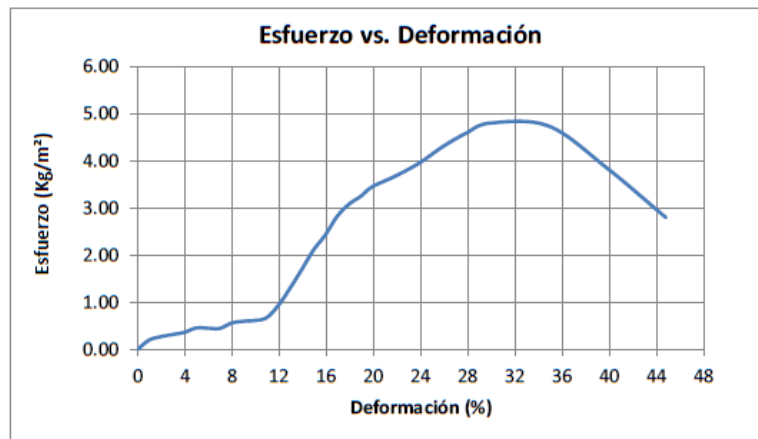
ASTM D 2166

PROYECTO : TAO
FECHA : 7/11/2019
MUESTRA : S/N
MATERIAL: Arena Café

DATOS
 Diám. inicial: 4.57 cm
 Altura inicial: 10.05 cm
 Área inicial: 16.40 cm²

LECTURA DEFORMACIÓN	DIAL DE CARGA	CARGA (Kgf)	DEFORM. ΔL (mm)	DEFORM UNITARIA (%)	AREA CORREGIDA	ESFUERZO (Kg/cm ²)
0	0	0.00	0.00	0.000	16.40	0.000
10	8.0	3.30	0.10	0.995	16.57	0.199
20	11.0	4.54	0.20	1.990	16.74	0.272
30	13.0	5.37	0.30	2.985	16.91	0.318
40	15.0	6.21	0.40	3.980	17.08	0.363
50	19.0	7.87	0.50	4.975	17.26	0.456
60	19.0	7.87	0.60	5.970	17.44	0.451
70	19.0	7.87	0.70	6.965	17.63	0.446
80	24.0	9.94	0.80	7.960	17.82	0.558
90	26.0	10.78	0.90	8.955	18.02	0.598
100	27.0	11.19	1.00	9.950	18.22	0.614
110	30.0	12.44	1.10	10.945	18.42	0.675
120	42.0	17.42	1.20	11.940	18.63	0.935
130	59.0	24.48	1.30	12.935	18.84	1.300
140	78.0	32.38	1.40	13.930	19.06	1.699
150	98.0	40.68	1.50	14.925	19.28	2.110
160	114.0	47.33	1.60	15.920	19.51	2.426
170	134.0	55.64	1.70	16.915	19.74	2.818
180	148.0	61.45	1.80	17.910	19.98	3.075
190	158.0	65.61	1.90	18.905	20.23	3.244
200	170.0	70.59	2.00	19.900	20.48	3.447
220	186.0	77.24	2.20	21.891	21.00	3.678
240	205.0	85.13	2.40	23.881	21.55	3.951
260	229.0	95.10	2.60	25.871	22.13	4.298
280	251.0	104.24	2.80	27.861	22.74	4.584
300	270.0	112.13	3.00	29.851	23.38	4.795
350	287.0	119.19	3.50	34.826	25.17	4.736
400	252.0	104.66	4.00	39.801	27.25	3.841
450	200	83.05	4.50	44.776	29.70	2.796
500	129	53.56	5.00	49.751	32.64	1.641
550	70	29.05	5.50	54.726	36.23	0.802

Esfuerzo maximo 4.80 (Kg/cm²)



ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

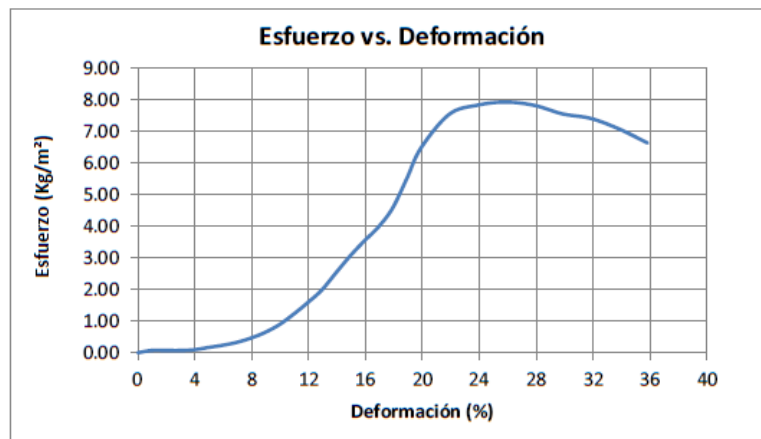
ASTM D 2166

PROYECTO : TAO
FECHA : 7/11/2019
MUESTRA : S/N
MATERIAL: Arena Café

DATOS
 Diám. inicial: 4.57 cm
 Altura inicial: 10.05 cm
 Área inicial: 16.40 cm²

LECTURA DEFORMACIÓN	DIAL DE CARGA	CARGA (Kgf)	DEFORM. ΔL (mm)	DEFORM UNITARIA (%)	AREA CORREGIDA	ESFUERZO (Kg/cm ²)
0	0	0.00	0.00	0.000	16.40	0.000
10	3.0	1.22	0.10	0.995	16.57	0.074
20	3.0	1.22	0.20	1.990	16.74	0.073
30	3.0	1.22	0.30	2.985	16.91	0.072
40	4.0	1.64	0.40	3.980	17.08	0.096
50	7.0	2.88	0.50	4.975	17.26	0.167
60	10.0	4.13	0.60	5.970	17.44	0.237
70	14.0	5.79	0.70	6.965	17.63	0.328
80	20.0	8.28	0.80	7.960	17.82	0.465
90	28.0	11.61	0.90	8.955	18.02	0.644
100	39.0	16.18	1.00	9.950	18.22	0.888
110	54.0	22.41	1.10	10.945	18.42	1.216
120	71.0	29.47	1.20	11.940	18.63	1.582
130	90.0	37.36	1.30	12.935	18.84	1.983
140	116.0	48.16	1.40	13.930	19.06	2.527
150	142.0	58.96	1.50	14.925	19.28	3.058
160	166.0	68.93	1.60	15.920	19.51	3.533
170	189.0	78.49	1.70	16.915	19.74	3.975
180	220.0	91.36	1.80	17.910	19.98	4.572
190	268.0	111.30	1.90	18.905	20.23	5.503
200	319.0	132.49	2.00	19.900	20.48	6.470
220	381.0	158.24	2.20	21.891	21.00	7.535
240	406.0	168.63	2.40	23.881	21.55	7.825
260	422.0	175.27	2.60	25.871	22.13	7.921
280	428.0	177.77	2.80	27.861	22.74	7.818
300	425.0	176.52	3.00	29.851	23.38	7.549
320	429.0	178.18	3.20	31.841	24.07	7.404
340	422.0	175.27	3.40	33.831	24.79	7.070
360	408	169.46	3.60	35.821	25.56	6.630
380	396	164.47	3.80	37.811	26.38	6.236
400	371	154.09	4.00	39.801	27.25	5.655

Esfuerzo maximo 7.92 (Kg/cm²)



Anexo F. Coeficiente de correlación cruzda.

