

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Nuevas tecnologías para el seguimiento a distancia y continuo del
movimiento de taludes**

Trabajo de graduación presentado por Héctor Antonio Paiz Herrera para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2025

**Nuevas tecnologías para el seguimiento a distancia y continuo del
movimiento de taludes**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Nuevas tecnologías para el seguimiento a distancia y continuo del
movimiento de taludes**

Trabajo de graduación presentado por Héctor Antonio Paiz Herrera para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,


2025

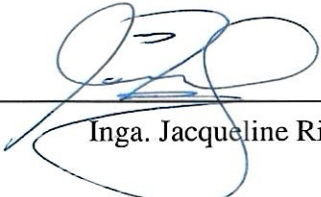
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Fernando Castillo

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Fernando Castillo

(f) 
Ing. Álvaro Rubio

(f) 
Inga. Jacqueline Rivera

Fecha de aprobación: Guatemala, 16 de enero de 2025.

PREFACIO

La estabilidad y seguridad en la construcción de taludes representan uno de los mayores desafíos en la ingeniería civil, donde el análisis geotécnico, el monitoreo detallado y la adecuada interpretación de los datos son esenciales para mitigar riesgos y proteger tanto las estructuras como a las personas. Este proyecto ha sido un esfuerzo integral por comprender y aplicar técnicas avanzadas para evaluar y garantizar la estabilidad del terreno, empleando herramientas como GeoStudio, inclinómetros digitales y la plataforma Beyond Monitoring, todas ellas indispensables para obtener resultados precisos y confiables.

A lo largo de esta investigación, he contado con el apoyo invaluable de mi familia, que ha sido el pilar fundamental en cada paso de este proceso. Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi padre, Héctor Enrique Paiz Castillo, también ingeniero civil, quien ha compartido su conocimiento, experiencia y apoyo incondicional, siendo una fuente de inspiración y guía. A mi madre, Elva Sánchez, cuya fe y amor inagotable han sido mi sustento constante, y a mis hermanas, Carmen Paiz y María Paiz, que con su ánimo y confianza en mí me han impulsado a seguir adelante.

También agradezco al Ing. Fernando Castillo por su asesoría y orientación profesional en este proyecto. Su experiencia y consejo han sido fundamentales para alcanzar los objetivos de este trabajo y lograr un análisis más profundo y preciso.

Finalmente, agradezco a Dios, por darme la fortaleza, la sabiduría y las oportunidades para enfrentar y superar cada reto en este camino. Sin Su presencia en mi vida, este proyecto no habría sido posible. Este trabajo está dedicado a ellos, con el deseo de que su apoyo y amor se vean reflejados en los logros y aprendizajes alcanzados aquí.

CONTENIDO

	Página
PREFACIO	IV
LISTA DE CUADROS	VIII
LISTA DE GRÁFICOS	X
RESUMEN	XI
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	2
III. OBJETIVOS	3
A Objetivo general	3
B Objetivos específicos	3
IV. MARCO TEÓRICO	4
A Mecánica de suelos	4
1 Tipos de suelo	4
2 Propiedades mecánicas de los suelos	6
3 Resistencia al corte	7
4 Reconocimiento del terreno	9
B Topografía	9
1 Medición y representación del terreno	9
2 Sistemas de información geográfica	10
C Taludes	11
1 Tipos de taludes	11
2 Factor de seguridad	12
3 Flujo de arcilla	13
4 Deslizamientos provocados por licuefacción	13
5 Factores que influyen en la estabilidad de taludes	14
6 Tipos de falla de taludes	14
7 Clasificación geomecánica	16
8 Protección de taludes	18
D Herramientas para la instrumentación del movimiento de taludes	19
1 Tipos de levantamiento	19
2 Desplazamientos horizontales	20
3 Desplazamientos verticales	22
4 Presiones de poro y niveles piezométricos	22
5 Esfuerzos y cargas	25

6	Nuevas tecnologías de instrumentación	27
7	Software	31
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		34
A	Estación total - Guía para el análisis de un talud	34
1	Análisis de las curvas de nivel	34
2	Realización de perfiles en civil 3D	35
3	Creación de un proyecto nuevo en GEOSTUDIO	35
4	Importar perfil a GEOSTUDIO	36
5	Definir regiones	37
6	Definir materiales	37
7	Asignación de materiales	38
8	Definir línea piezométrica	39
9	Definir sobrecarga	40
10	Definición del rango de superficie de deslizamiento	41
11	Obtención de resultados	41
B	Estación total - Aplicación en un caso real	43
1	Información de la obra	43
2	Información del entorno	43
C	Información geológica	46
1	Marco geológico general	46
2	Geología local	47
D	Información geotécnica del terreno	48
1	Características de exploración	48
2	Caracterización geotécnica del terreno	48
E	Análisis de estabilidad de taludes	50
1	Evaluación	50
2	Perfiles	51
F	Datos de perforación P-4	52
G	Datos de perforación P-8	52
H	Inclinómetro	57
I	Beyond Monitoring	60
J	Comparativo	63
VI. CONCLUSIONES		67
VII. RECOMENDACIONES		68
VIII. BIBLIOGRAFÍA		69
IX. APÉNDICES		73
A	Perfil No.1 - Civil 3D	73
B	Perfil No.2 - Civil 3D	73

C	Perfil No.3 - Civil 3D	74
D	Perfil No.4 - Civil 3D	74
E	Estratigrafía	75
F	Datos de perforación P-1	75
G	Datos de perforación P-2	76
H	Datos de perforación P-3	76
I	Datos de perforación P-5	76
J	Datos de perforación P-6	77
K	Datos de perforación P-7	77
L	Datos de perforación P-9	77
M	Datos de perforación P-10	78
N	Datos de perforación P-11	78

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Cuadro comparativo - Arenas y gravas	6
2	Cuadro comparativo - Arenas y limos	6
3	cuadro Comparativo - Limos y arcillas	6
4	Parámetros y clasificación propuesta por Bieniawski	17
5	Parámetros y clasificación propuesta por Bieniawski	18
6	Clasificación de daños	18
7	Clasificación de medidas de consolidación de taludes	19
8	Especificaciones del Inclinómetro Digitilt AT	57

LISTA DE GRÁFICOS

Ilustración	Página
1 Inclínómetro digital	20
2 Fisurómetro digital	21
3 Extensómetro digital	22
4 Funcionamiento de un piezómetro	23
5 Esquema de un piezómetro abierto Casa Grande	24
6 Piezómetro de cuerda vibrante	25
7 Celda de presión	26
8 Distintos tipos de celdas de carga	27
9 Estación total	27
10 Empleo de un equipo Cyclops	28
11 GPS topográfico	29
12 Funcionamiento de un INSAR	30
13 Un dron equipado con un escáner LIDAR	31
14 Determinar y numerar los perfiles a realizar	34
15 Ejemplo de un perfil realizado en CIVIL 3D	35
16 Definición de las condiciones del proyecto	36
17 Perfil del talud al ser importado a GEOSTUDIO	36
18 Esbozo del talud	37
19 Talud evaluado con sus diferentes regiones	37
20 Definición de los distintos materiales	38
21 Asignación de materiales	38
22 Talud evaluado con sus distintos materiales	39
23 Dibujo de línea piezométrica	39
24 Talud evaluado con su línea piezométrica	40
25 Definición de la sobrecarga	40
26 Talud evaluado con la sobrecarga	41
27 Rango de entrada y salida de superficie de deslizamiento	41
28 Se ejecuta el modelo realizado	42
29 Resultados obtenidos (factor de seguridad)	42
30 Ubicación geográfica del terreno	43
31 Probabilidad diaria de precipitación en Dominica	44
32 Velocidad media del viento en Dominica	44
33 Dirección del viento en Dominica	45
34 Topografía del terreno	46
35 Zona de estudio	47
36 Planta de ubicación de perforaciones	49
37 Estadísticas sísmicas	50
38 Ubicación de secciones analizadas	51

39	Datos de perforación P-4	52
40	Datos de perforación P-8	52
41	Perfil estratigráfico No.1 - Modelado en GeoStudio	53
42	Perfil estratigráfico No.1 - Factor de seguridad	53
43	Perfil estratigráfico No.2 - Modelado en GeoStudio	54
44	Perfil estratigráfico No.2 - Factor de seguridad	54
45	Perfil estratigráfico No.3 - Modelado en GeoStudio	55
46	Perfil estratigráfico No.3 - Factor de seguridad	55
47	Perfil estratigráfico No.4 - Modelado en GeoStudio	56
48	Perfil estratigráfico No.4 - Factor de seguridad	56
49	Lectura del inclinómetro - Eje A	58
50	Lectura del inclinómetro - Eje B	59
51	Creación de perfiles	60
52	Distintos equipos que integra Beyond Monitoring	61
53	Integración de vistas personalizadas	61
54	Visualización de alarmas	62
55	Información presentada en reportes	62
56	Perfil No.1	73
57	Perfil No.2	73
58	Perfil No.3	74
59	Perfil No.4	74
60	Estratigrafía	75
61	Perforación P-1	75
62	Perforación P-2	76
63	Perforación P-3	76
64	Perforación P-5	76
65	Perforación P-6	77
66	Perforación P-7	77
67	Perforación P-9	77
68	Perforación P-10	78
69	Perforación P-11	78

RESUMEN

Al momento de realizar cualquier tipo de construcción es importante tomar en cuenta ciertos factores que generan riesgos significativos a cualquier infraestructura. Uno de estos riesgos son los deslizamientos de taludes. Un deslizamiento es un tipo de fenómeno que actúa de taludes naturales o artificiales configurados geométricamente y se define como el movimiento de una masa rocosa, escombros o tierra bajo la influencia de la gravedad. Muchos deslizamientos exhiben una combinación de diferentes tipos de movimientos. Son causados por alteraciones en el equilibrio natural de una pendiente debido a precipitaciones, cambio en la temperatura y a acciones humanas. Pueden producirse durante lluvias, terremotos y erupciones volcánicas. (Gariano & Guzzetti, 2016)

Los deslizamientos están presentes en todo el mundo y juegan un papel importante en la evolución de los paisajes y logran ser bastante destructivos dependiendo de su volumen y velocidad. Se han registrado deslizamientos que llegan a alcanzar velocidades mayores a los 160 kilómetros por hora. Ocasionan daños materiales a viviendas y áreas agrícolas. Además, arrasan con carreteras y líneas de comunicación, afectando la infraestructura de la región afectada. (CDG, 2018)

Debido a esto, son eventos geológicos peligrosos que tienen consecuencias significativas para las personas y el entorno. La comprensión de las causas y factores involucrados en la generación de este fenómeno, junto con la implementación de medidas preventivas y de mitigación, es esencial para reducir el riesgo asociado con los movimientos de taludes. Actualmente, se están empezando a emplear equipos y softwares dedicados a la recopilación de información precisa relacionado al movimiento de estos empleando instrumentos de monitoreo.

En el presente trabajo se evaluarán distintos equipos topográficos en condiciones similares con el objetivo de determinar si existe una diferencia significativa entre utilizar equipos modernos o equipos topográficos convencionales. Además, se determinaron sus tiempos de medición, exactitud, precisión y ventajas.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el monitoreo de taludes ha cobrado gran relevancia dentro del campo de la ingeniería geotécnica debido a los graves riesgos que estos fenómenos representan para la infraestructura y la seguridad humana. Los taludes, ya sean naturales o artificiales, están sujetos a condiciones dinámicas que pueden desencadenar deslizamientos, especialmente en zonas con alta actividad sísmica o propensas a fuertes precipitaciones. Estos eventos geológicos pueden afectar tanto la estabilidad del terreno como las construcciones aledañas, generando importantes pérdidas económicas y sociales.

El uso de nuevas tecnologías para el seguimiento a distancia del movimiento de taludes ha demostrado ser una herramienta efectiva para mitigar estos riesgos. Métodos como el sistema LiDAR y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten recopilar datos precisos y georreferenciados sobre la topografía y la estabilidad del terreno. Estas herramientas han optimizado el análisis y la gestión de los taludes al ofrecer información en tiempo real sobre su comportamiento, lo que es crucial para la toma de decisiones en la planificación y ejecución de obras de ingeniería civil.

Dentro de este contexto, el software GeoStudio ha emergido como una herramienta clave para el análisis y simulación de la estabilidad de taludes. GeoStudio permite a los ingenieros modelar distintos escenarios y realizar análisis de estabilidad bajo diferentes condiciones de carga, incluidos los efectos de las lluvias y la actividad sísmica. Su capacidad para simular las interacciones entre el suelo y las estructuras proporciona una comprensión más profunda de los factores que pueden llevar a fallas geotécnicas.

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la viabilidad del uso de tecnologías modernas, como el GeoStudio, para el monitoreo y análisis de taludes en Guatemala. Se buscó determinar si el uso de estas herramientas ofrece ventajas significativas en comparación con los métodos convencionales de monitoreo, como la precisión en la recolección de datos, la eficiencia en el tiempo de análisis y los costos asociados. Asimismo, se explorará la implementación de estas tecnologías en proyectos de infraestructura en áreas vulnerables, con el fin de reducir los riesgos asociados a deslizamientos y mejorar la resiliencia de las construcciones frente a estos fenómenos naturales.

Con el análisis detallado de estos aspectos, se contribuyó al desarrollo de estrategias de monitoreo geotécnico más eficientes, que integren tanto el uso de tecnologías avanzadas como modelos computacionales de alta precisión como GeoStudio, optimizando así la seguridad y la gestión del riesgo en proyectos de ingeniería civil.

II. JUSTIFICACIÓN

Los deslizamientos de taludes representan un peligro significativo para la seguridad de las personas y las infraestructuras cercanas. Estas amenazas se presentan en diferentes situaciones y condiciones geológicas. Actualmente, es uno de los problemas más significativos que afronta Guatemala. Este problema es ocasionado principalmente por la temporada de lluvias y huracanes. Según información proporcionada por la Conred, se estima que han ocurrido 372 incidentes en todo el país relacionados con el movimiento de taludes afectando a más de 300 mil personas. (COCIGER, 2022). El monitoreo de taludes es de suma importancia para cualquier proyecto relacionado con la ingeniería, principalmente aquellos relacionados con el estudio de la topografía e inestabilidad de un área en específico. De esta forma, se pueden tomar medidas de prevención antes de que sucedan este tipo de incidentes asociados con deslizamientos y fallas. (Galvis Flórez, J. A, 2016)

El entendimiento de los cambios que surgen con el tiempo en la geometría de los taludes, además del conocimiento relacionada a las masas de roca, son esenciales para el diseño seguro de taludes y para la reducción de los riesgos asociados con el fallo de taludes. Recientes avances tecnológicos han permitido obtener información precisa y totalmente geo-referenciada que puede ser empleada para realizar monitoreos de los procesos de deformación, caracterización de las masas rocosas. Adicional a esto, también brinda información relacionada a cualquier mecanismo de falla subyacente. Sin embargo, su uso no se restringe únicamente al monitoreo de taludes. (Vanneschi et al., 2017)

Estas tecnologías no son nada nuevo, el registro más antiguo del uso de estas tecnologías se dio en 1960 con el uso del método LiDar. Este método es empleado generalmente para obtener información geométrica detallada de forma rápida y precisa al computar posiciones usando láseres de gran potencia. Otro método es el fotométrico, el cual tiene la capacidad de realizar modelos 3D a través de una serie de fotografías 2D. Una de las ventajas de utilizar este método es que tiene la capacidad de obtener coordenadas 3D de cada uno de los puntos localizados en la zona superpuesta de dos fotos de la misma zona tomadas desde dos puntos de vista diferentes. (Vanneschi et al., 2017) Ambas tecnologías han sido empleadas en proyectos relacionados a la minería en el sur de Inglaterra. Fueron empleadas para el monitoreo de la regresión de taludes y el monitoreo de la disposición del material, y más importante aún fueron empleados para los análisis espaciales para la identificación de áreas críticas de inestabilidad de taludes.

El uso de estas tecnologías para el control y monitoreo a distancia brindan una gran cantidad de ventajas en comparación a métodos tradicionales. Por lo general, estas tecnologías tienen un menor costo de instalación y permiten realizar monitoreos rápidos y remotos ya que la información recopilada se puede compartir empleando telecomunicaciones. Además, poseen la capacidad de determinar deformaciones de forma inmediata, obtener datos geoméricos, determinar la existencia de agua, detectar indicios de erosión y detectar bloques de roca desprendidos. (Osasan & Afeni, 2010)

La implementación de estas nuevas tecnologías puede mejorar significativamente la seguridad y la gestión de riesgos en áreas propensas a movimientos de tierra en Guatemala. Adicional a esto, el monitoreo a distancia permite recolectar datos de manera continua, inmediata y en tiempo real, lo que optimiza los recursos humanos y financieros.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Determinar la viabilidad del uso de nuevas tecnologías para el monitoreo a distancia de los taludes en Guatemala.

B. Objetivos específicos

- Analizar y determinar los aspectos principales sobre el monitoreo geotécnico y aplicación específica a estas nuevas tecnologías.
- Identificar las distintas tecnologías que existen para monitorear taludes, así como establecer sus diferencias.
- Generar una guía para la planificación y monitoreo geotécnico empleando estas tecnologías.
- Determinar las ventajas que se obtienen al emplear estas tecnologías en comparación con métodos convencionales.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Mecánica de suelos

El suelo es el material de construcción más abundante en el mundo y constituye el soporte fundamental de la mayoría de las estructuras. Además, forma los taludes de corte, los terraplenes de carreteras y cumple diversas funciones clave en un proyecto de ingeniería. La capacidad de adaptarlo y controlarlo para satisfacer las necesidades de un proyecto es una de las habilidades más importantes de un ingeniero civil. (Jimenez et al., 1981)

Para lograr este dominio del terreno, los ingenieros recurren a la mecánica de suelos, una disciplina que combina técnicas y conocimientos destinados a comprender y utilizar adecuadamente las propiedades del suelo en diferentes aplicaciones de la construcción. La mecánica de suelos proporciona una amplia gama de herramientas que permiten analizar y resolver problemas relacionados con el suelo (Whitlow, 2000), tales como:

- El origen y la formación de los distintos tipos de suelo, comprendiendo así sus propiedades fundamentales y su comportamiento bajo diversas condiciones de carga.
- La clasificación de los suelos según sus características físicas y químicas, lo cual es esencial para determinar su idoneidad en diferentes aplicaciones de construcción.
- El análisis de la resistencia al corte del suelo, que ayuda a evaluar la estabilidad de taludes y terraplenes, permitiendo diseñar estructuras que minimicen el riesgo de deslizamientos.
- La determinación de la capacidad de carga del suelo, una propiedad esencial para el diseño de cimentaciones y otras estructuras que requieren una base sólida.
- La comprensión de la permeabilidad y el flujo de agua en el suelo, lo que permite diseñar drenajes y reducir problemas de infiltración que podrían afectar la estabilidad de la construcción.

1. Tipos de suelo

a. **Arenas** Es un tipo de suelo en el cual las partículas son visibles y finas. El diámetro de las partículas de arena se encuentra entre 0.05 y 2 mm. Las arenas poseen la particularidad de no ser plásticas y cuentan con poca cohesión, reduciéndose fácilmente a polvo. Además, son erosionadas por el viento con bastante facilidad. Las arenas cuentan con una estructura porosa que permite que el agua fluya a través de ellas rápidamente. Debido a su excelente capacidad de drenaje, son empleadas en aplicaciones o proyectos donde el drenaje eficiente es de suma importancia. (J. Pérez, 1993)

La resistencia y la compresión de las propiedades de las arenas son aspectos críticos en la mecánica de suelos. Las arenas cuentan con una resistencia a la compresión más alta en comparación con suelos más finos, sin embargo, su estabilidad se ve comprometida por la presencia de agua. Las arenas saturadas pueden experimentar pérdida de resistencia debido a la disminución de las fuerzas de fricción entre las partículas. (Rucks et al., 2004)

b. **Gravas** Es el tipo de suelo con el tamaño de partícula más grande, siendo mayores a 2 mm. Al igual que las arenas, las gravas carecen de plasticidad cuando no están cubiertas de arcillas o limos. Poseen una insuficiente capacidad para retener agua ya que existen grandes espacios entre sus partículas, por lo que el paso del agua por acciones gravitatorias es rápido. (J. Pérez, 1993)

Se caracterizan por su alta capacidad de carga y gran resistencia a la compresión. Estas propiedades vuelven a las gravas, el tipo de suelo ideal para la construcción de cimentaciones, carreteras y otras construcciones que requieran de una alta capacidad de carga. (Rucks et al., 2004) Aunque las gravas ya posean una alta capacidad de carga, esta puede ser mejorada al compactar el suelo. Al compactar las partículas, estas mejoran sus propiedades mecánicas. Cuando aumenta la densidad de las gravas, se puede garantizar que pueda alcanzar una mejor cohesión y estabilidad, aumentando su capacidad de carga.

c. **Arcillas** Encontradas en depósitos sedimentarios o de origen volcánico, las arcillas poseen partículas con tamaños menores a 0.002 mm. Las partículas de arcilla poseen una carga neta negativa en su superficie, causada por su composición química. Su característica principal es su alta plasticidad, que desarrollan cuando entran en contacto con una limitada cantidad de agua. El agua es atraída a la superficie cargada negativamente, al ser dipolar. (J. Pérez, 1993)

El comportamiento mecánico de las arcillas está fuertemente influenciado por su estructura cristalina y coloidal. La cohesión entre las partículas permite que las arcillas presenten una resistencia al corte elevada incluso en condiciones saturadas. Por otro lado, la baja permeabilidad de las arcillas genera desafíos en la realización de proyectos de ingeniería, especialmente en la construcción de cimentaciones. Esto se debe a que la arcilla posee la capacidad de hincharse al absorber agua generando un aumento de volumen. La hinchazón es fácilmente observable a nivel macroscópico, por la formación de fases gelatinosas cuando se añade agua. (Bergaya & Lagaly, 2006)

Se pueden clasificar en silicatos y no silicatos. Entre los silicatos se encuentra la caolinita, vermiculita, montmorillonita, etc. La variación de plasticidad, cohesión y adhesión entre estos grupos de arcillas es bastante significativa. Debido a esto, es importante conocer que tipos de arcillas predominan en un suelo. (Bergaya et al., 2011)

d. **Limos** Las partículas microscópicas de los limos son irregulares y de distintas formas. Entre estas se destaca el cuarzo. Los limos poseen propiedades plásticas, cohesivas y de absorción generadas por la presencia de un recubrimiento de arcilla que envuelve a las partículas de los limos. El tamaño de su partícula varía desde los 0.002 y los 0.05 mm, entre mayor sea el tamaño mayor será la presencia de minerales no arcillosos. (J. Pérez, 1993)

Al igual que en las arcillas, el contenido de humedad altera el comportamiento de los limos. Su capacidad de retención de agua es superior al de las arenas, pero inferior al de las arcillas. Su resistencia al corte, permeabilidad son factores que dependen principalmente del contenido de agua y del tamaño de las partículas. La plasticidad de los limos presenta grandes desafíos, especialmente en la estabilidad y compactación del suelo. (Rucks et al., 2004)

En condiciones sin presencia de agua, los limos son susceptibles a la erosión y la cohesión de sus partículas se reduce. Por otro lado, en condiciones saturadas pueden experimentar pérdida de resistencia y aumentar su volumen al absorber el agua.

Cuadro 1

Cuadro comparativo - Arenas y gravas

Gravas (> 2 mm)	Arenas (entre 0.06 y 2 mm)
Los granos no se apelmazan, aunque estén húmedos, debido a la pequeñez de las tensiones capilares.	Los granos se apelmazan si están húmedos, debido a las tensiones capilares.
Cuando el gradiente hidráulico es mayor que 1, se produce en ellas flujo turbulento.	No se puede producir en ellas flujo turbulento, aunque el gradiente hidráulico sea mayor que 1.
Es difícil perforar un túnel en gravas con agua mediante aire comprimido, porque la pérdida de aire es muy alta.	El aire comprimido es adecuado para perforar en ellas.

Fuente: (Jimenez & Justo, 1975)

Cuadro 2

Cuadro comparativo - Arenas y limos

Arenas (entre 0.06 y 2mm)	Limos (entre 0,002 y 0,06 mm)
Partículas visibles.	Partículas invisibles.
En general, no plásticas.	En general, algo plásticos.
Los terrenos secos tienen una ligera cohesión, pero se reducen a polvo fácilmente entre los dedos.	Los terrones secos tienen una cohesión apreciable, pero se pueden reducir a polvo con los dedos.
Fácilmente erosionadas por el viento	Difícilmente erosionados por el viento.
Fácilmente drenadas mediante bombeo.	Casi imposible de drenar mediante bombeo.
Los asientos de las construcciones realizadas sobre ellas suelen estar terminados al acabar la construcción.	Los asientos suelen continuar después de acabada la construcción.

Fuente: (Jimenez & Justo, 1975)

Cuadro 3

Cuadro comparativo - Limos y arcillas

Limos (entre 0,002 y 0,06 mm)	Arcillas (< 0,002 mm)
No suelen tener propiedades coloidales.	Suelen tener propiedades coloidales.
A partir de 0,002 mm, y a medida que aumenta el tamaño de las partículas, se va haciendo cada vez mayor la proporción de minerales no arcillosos.	Consisten en su mayor parte en minerales arcillosos
Tacto áspero.	Tacto suave.
Se secan con relativa rapidez y no se pegan a los dedos.	Se secan lentamente y se pegan a los dedos.
Los terrones secos tienen una cohesión apreciable, pero se pueden reducir a polvo con los dedos.	Los terrones secos se pueden partir, pero no reducir a polvo con los dedos.

Fuente: (Jimenez & Justo, 1975)

2. Propiedades mecánicas de los suelos

a. **Permeabilidad** Es una propiedad de los materiales que permite el paso del agua en su interior. Depende principalmente de los espacios que tenga el material, ya que estos son los que forman los canales por los cuales fluye el agua. El flujo de agua depende de la conductividad y el gradiente hidráulico. (Llano, 1975)

Adicional a esto, los factores que afectan la permeabilidad del suelo son:

- Distribución de tamaño de poro y grano
- Relación de vacíos
- Grado de saturación
- Rugosidad de las partículas minerales
- Viscosidad del fluido

b. **Porosidad** La porosidad se puede determinar mediante la medición del volumen de los huecos de un material. Se debe de secar la muestra al calentarla para luego embeber la muestra en agua. Luego se mide el volumen de agua absorbido. En carreteras se limita el valor de la porosidad a 1.5. (Llano, 1975)

c. **Plasticidad** Se define como la capacidad de un suelo para cambiar su consistencia en relación con el contenido de humedad presente. La plasticidad de un suelo depende únicamente de los elementos finos del mismo, ya que los elementos gruesos no son plásticos. Se utiliza el método de Atterberg para determinar la plasticidad, el cual consiste en definir los límites correspondientes a los tres estados en los que puede presentarse un suelo: líquido, plástico o sólido. (Cavero Panez, 2010) Estos límites son:

- Límite líquido (LL) Se define como la humedad que existe en el suelo, en la que ocurre la transición entre un estado plástico a uno plástico. Para determinar el límite líquido, se emplea la cuchara de Casa Grande. Esta cuchara consiste en un aparato cóncavo en donde se coloca la muestra de suelo. Se realiza una ranura en el medio y se cuentan la cantidad de golpes necesarios para cerrar esta ranura. Se hace este procedimiento para distintos contenidos de humedad. (Llano, 1975)
- Límite de plasticidad (LP) Se conoce como la humedad para la cual la muestra de suelo se convierte en plástica. Para determinar el límite plástico de forma experimental se utiliza el Ensayo ASTM D4318, el cual consiste en moldear el suelo en rollos de 3 mm de diámetro. El límite plástico es el contenido de humedad para el cual los rollos 3 mm de diámetros no se desmoronan. (Llano, 1975)
- Límite de retracción Es el contenido de humedad para el cual el suelo se fisura y pierde cohesión debido a la falta de agua. (Llano, 1975)

3. Resistencia al corte

a. **Cohesión** Es el valor de la resistencia al corte en suelo cuando la tensión normal es igual a cero. Mantiene unida a las partículas, incluso cuando las tensiones normales son inexistentes. Dicho de otra forma, es la resistencia al deslizamiento causada por la fricción entre la superficie de contacto y la densidad de las partículas. (Flor Arroyo, 2016)

Puede dividirse en dos: cohesión verdadera y cohesión aparente. Por un lado, la verdadera es causada por la atracción molecular entre las partículas de suelo. Mientras que, la cohesión aparente se genera a partir de la tensión superficial del agua y se emplea para expresar la resistencia adquirida por el suelo debido a factores como la microestructura y cementación del suelo o por las presiones de succión generadas por el agua. (Hossne et al., 2011)

Según varios estudios, las arenas carecen de cohesión. Se considera que la cohesión es una propiedad que se encuentra en su mayoría en arcillas expansibles. (Flor Arroyo, 2016)

b. **Ángulo de fricción** La fricción interna en los suelos está definida por el ángulo de fricción, cuya tangente es la relación entre la fuerza que resiste el deslizamiento y la fuerza normal. Es el valor más importante cuando se habla de resistencia al corte. (Flor Arroyo, 2016) Depende de factores como:

- Tamaño de las partículas
- Forma de las partículas
- Distribución de tamaño
- Densidad

En arcillas plásticas el valor del ángulo de fricción varía desde los 0° hasta 45°. Para suelos secos, como arenas y gravas, el ángulo de fricción se encuentra alrededor de 30°. Además, el ángulo de fricción se puede relacionar con el índice de plasticidad, de forma que los suelos no cohesivos no poseen plasticidad. (Flor Arroyo, 2016)

c. **Contenido de humedad** Es un parámetro ampliamente utilizado en la mecánica de suelos y que expresa la cantidad de agua presente en un material sólido. (Quichimbo et al., 2016) Se puede representar en términos de una base de masa seca o masa húmeda. Además, es empleado en la industria de alimentos, la industria del papel, la fabricación de instrumentos de medición, entre otros. (Martines & Lira, 2010)

Los elementos más destacados en relación con el contenido de humedad incluyen el control, el transporte y los efectos que ocasiona su presencia en los materiales. El contenido de humedad puede determinarse a partir de un método termogravimétrico. Este método consiste en calentar la muestra y anotar la cantidad de masa perdida debido a la evaporación del agua. (Mettler, 2022)

d. **Presión de poro** La presión de poro se define como la presión que ejercen los fluidos confinados en un espacio poroso. Se puede clasificar en dos: normal y anormal. Cuando la presión es igual a la presión hidrostática, la presión de poro es normal. Por otro lado, se categoriza como anormal cuando la presión es diferente a la presión normal de formación. (Z. Pérez et al., 2009)

Es uno de los aspectos más importantes de la geomecánica y se utiliza generalmente para identificar zonas inestables y para dar seguimiento a los métodos de corrección. (Cavero Panes, 2010) Su análisis es de suma importancia en la planificación y diseño de pozos ya que permite determinar

ciertos parámetros indispensables, como la ventana de peso de lodo apropiada y la composición química del lodo. (Velazquez-Cruz & Espinosa-Castañeda, 2006)

4. Reconocimiento del terreno

Antes de empezar con cualquier construcción u obra de ingeniería civil, es necesario realizar un reconocimiento geotécnico del terreno ya que es de suma importancia conocer sus características y propiedades. Al llevar a cabo un reconocimiento geotécnico, es posible determinar las condiciones geológicas e hidrológicas de un área determinada tomando en cuenta sus perfiles estratigráficos. Al mismo tiempo, se pueden determinar las características y propiedades físico-mecánicas del suelo. Contar con esta información es imprescindible para efectuar los cálculos correspondientes en un proyecto donde las condiciones del terreno determinarán el método de campo a emplear. (Herrera y Castillas, 2012)

Además, permite dimensionar la obra, de manera que las cargas provenientes de las cimentaciones, rellenos, y excavaciones, no produzcan situaciones de inestabilidad o movimientos riesgosos en las estructuras o en el mismo suelo. Es importante que se analicen fallas geológicas activas, evidencia de inestabilidad y áreas afectadas por crecidas de ríos y licuefacción.

El reconocimiento debe de proporcionar la siguiente información:

- Las características de los diferentes estratos
- Muestras de subsuelo
- Las características del nivel freático y los acuíferos
- La permeabilidad de las formaciones atravesadas

B. Topografía

Aunque se pueden encontrar evidencias de la topografía en la matemática griega, los conceptos topológicos empezaron a establecerse con el desarrollo del cálculo diferencial en el siglo XVII y se fundamentaron en el siglo XIX cuando la topografía empezó a considerarse como una disciplina matemática. El primer uso de la palabra “topografía” tuvo su origen en el tratado “Vorstudien zur Topologie” de Johann Benedict, publicado en 1847. Sin embargo, los primeros trabajos relacionados con la topografía empezaron desde los primeros años del siglo XX.

Para poder llevar a cabo ciertas mediciones en la topografía que tienen como objetivo determinar la posición relativa de los puntos terrestres, se emplean numerosos aparatos y herramientas, entre las cuales se destaca el teodolito. Debido a su amplio campo de aplicación, el teodolito se puede emplear para trazar direcciones y determinar diferencias de elevación entre dos puntos. Todo esto es empleado en la realización de un óptimo levantamiento topográfico. Debido a su gran ayuda al momento de realizar cálculos matemáticos y a la gran precisión de sus resultados, el teodolito es bastante empleado no solo en la ingeniería civil, sino que también es utilizada en otras ramas de la ingeniería. (Gallardo, 2018).

1. Medición y representación del terreno

a. **Taquimetría** Área de la topografía enfocada al levantamiento de planos mediante el uso del taquímetro. (León-Bonillo, 2011) Estudia la proyección de los puntos de un plano, tratando de relacionar estos puntos en el espacio. Consiste en la toma de puntos en el terreno usando el taquímetro, para luego calcular las distancias horizontales y las cotas de los puntos. Se colocan en un plano y se interpolan los datos con el objetivo de poder trazar las curvas de nivel. (Fernández, 2013)

La taquimetría pierde su exactitud cuando se emplean ángulos vertical de gran magnitud. Adicional a esto, se requiere la toma de datos como la altura del instrumento, la altura del prisma. Las fórmulas taquimétricas se basan en la conversión de coordenadas polares a coordenadas cartesianas. (León-Bonillo, 2011)

b. **Planimetría** Estudio de los puntos de la superficie terrestre con el objetivo de poder proyectarlos en un plano horizontal, conocido como plano de referencia. (León-Bonillo, 2011) Para poder representar un punto en un espacio bidimensional, es necesario establecer un sistema de referencia capaz de situar los puntos en un origen común. (Márquez, 2017)

Los levantamientos planimétricos pueden realizarse de distintas formas, entre los más empleados se encuentran:

- Por medio de triangulaciones
- Por medio de poligonales
- Por medio del empleo de cinta

c. **Altimetría** La altimetría es el área de la topografía enfocada al estudio de las distancias verticales entre dos puntos. Además, estudia la diferencia entre los distintos puntos situados en un terreno con el objetivo de representar el relieve del terreno en planos, perfiles u otros métodos. (León-Bonillo, 2011)

Se hace uso de un alfiler, el cual es un instrumento de medición capaz de determinar la diferencia de altura entre un punto evaluado y un punto de referencia. En la altimetría se emplean desniveles y distancias horizontales para realizar los cálculos respectivos. (Jiménez, 2011)

2. Sistemas de información geográfica

Los SIG son marcos utilizados para reunir, analizar e integrar datos. Analiza la ubicación espacial del entorno y organiza las capas de información para que estas puedan ser visualizadas. O expresado de otra forma, un Sistema de Información Geográfica es una herramienta utilizada para trabajar con información georreferenciada (información que contiene una posición geográfica). Para lograr esto, se emplean mapas en 2D y escenas en 3D. Además, los SIG tiene como objetivo desvelar el conocimiento que se está oculto en los datos, trata de descifrar patrones e identificar relaciones y situaciones. Todo esto permite que los usuarios logren tomar decisiones más inteligentes al utilizar estos conocimientos. (Pucha-Cofrep et al., 2017)

El concepto de un sistema de información geográfica no es nada nuevo. El primer uso que se le dio fue el de identificar cambios al hacer un análisis simultáneo en mapas del mismo tema produci-

dos en diferentes fechas. Adicional a esto, este concepto también fue utilizado para determinar las relaciones de dos mapas con diferentes tipos de información para un mismo espacio geográfico. Por el contrario, lo que sí es relativamente nuevo, y progresa a un ritmo elevado es el desarrollo de las computadoras que permiten que la digitalización de información, la interpretación y reproducción de mapas se realicen con mayor velocidad en los SIG. (Pucha-Cofrep et al., 2017)

a. **Georreferenciación** Es el proceso por el cual se le asignan coordenadas geográficas a objetos espaciales, datos o información. Se hace esto para que puedan ser ubicados con exactitud sobre la superficie de la Tierra. La georreferenciación es uno de los aspectos más importantes al momento de realizar mapas empleando Sistemas de Información Geográfica. (Cascón-Katchadourian et al., 2019)

La georreferenciación consiste en emplear sistemas de coordenadas geográficas para asignar ubicaciones precisas a puntos específicos en la superficie terrestre. Estos sistemas de coordenadas abarcan el Sistema de Coordenadas Geográficas, que utiliza latitud, altitud y longitud. Además, así emplea sistemas de coordenadas proyectadas, como la proyección UTM (Universal Transversal de Mercator). (Cascón-Katchadourian et al., 2019)

C. Taludes

Un talud se conoce como una superficie inclinada, con respecto a la horizontal, formada por suelos, rocas o mezclas de estos elementos. (Valiente Sanz et al., 2016) Las acumulaciones de tierra pueden adoptar esta inclinación de forma permanente o temporal. Adicional a esto, los taludes pueden ser construidos de forma artificial por el ser humano o pueden formarse de forma natural. (Posse, 1987)

Cuando se generan deslizamientos repentinos en los taludes, sus consecuencias suelen ser graves. En el ámbito económico, los costos directos e indirectos ocasionados por fallos en taludes exceden los mil millones de dólares. Según estudios del Departamento de Minería y Geología de California, los daños debido a deslizamiento de taludes corresponden a un 20 % por ciento del total de los daños por riesgos geológicos. La presencia de fallas no se limita únicamente a los taludes naturales, también se pueden generar en taludes artificiales. (Valeria & Jair, 2014)

Con el objetivo de que los deslizamientos no generen pérdidas económicas, y especialmente pérdidas humanas, es necesario realizar un análisis de la estabilidad de taludes. Se debe lograr que las masas de suelo no se deslicen y que el diseño de excavaciones y rellenos sean seguros y económicos. (Valeria & Jair, 2014)

1. Tipos de taludes

a. **Laderas naturales** Son formaciones geológicas formadas naturalmente por la dinámica de los suelos a lo largo del tiempo. Se diferencian de otro tipo de formaciones naturales debido a su pendiente y cobertura. La geología y formación del terreno se ve afectado por distintos factores internos y externos. Son afectadas principalmente por los efectos de la erosión. (González & Morcote, 2012)

b. **Taludes artificiales (configurados geoméricamente)** Son generados por la acción del hombre ante la necesidad de modificar la formación natural de algún terreno. Son modificados generalmente al trabajar obras de ingeniería. Son realizados para la construcción de carreteras, edificios, etc. Al igual que las laderas naturales, se ven afectados por efectos de la erosión. (González & Morcote, 2012)

2. Factor de seguridad

El factor de seguridad es una razón utilizada en la ingeniería geotécnica para evaluar la estabilidad de taludes. Compara las fuerzas que resisten el movimiento del talud contra las fuerzas que impulsan la falla del talud. Un factor de seguridad mayor a 1 indica que la fuerza resistente excede a las fuerzas impulsoras, esto significa que el talud es estable. Por el contrario, un factor de seguridad menor a 1 sugiere que el talud es inestable y es más propenso a fallar. En términos prácticos, el factor de seguridad provee a los ingenieros una medida de que tan propenso es un talud a fallar, sirviendo como punto de referencia crítico las evaluaciones de estabilidad de taludes. (Das & Sobhan, 2013)

El cálculo del factor de seguridad incluye distintos métodos, entre los más comunes se encuentran:

- Métodos de equilibrio límite
- Simulaciones numéricas
- Modelos probabilísticos

Varios factores pueden influenciar considerablemente el factor de seguridad de un talud:

- Las propiedades del suelo: Las propiedades del suelo, como la cohesión, el ángulo de fricción interna, la densidad y la permeabilidad, son factores fundamentales que afectan la estabilidad de un talud. Su evaluación precisa es esencial para predecir el comportamiento ante cargas externas y condiciones naturales. Estas propiedades determinan la resistencia al corte del suelo, clave para evitar deslizamientos.
- Contenido de humedad: El contenido de humedad en el suelo es un factor crucial que afecta su estabilidad. Un aumento en la humedad disminuye la resistencia al corte, especialmente en suelos cohesivos, lo que puede resultar en deslizamientos. La retención de agua y la infiltración juegan un papel importante en la estabilidad de taludes.
- Geométrica del talud: La geometría de un talud, que incluye la inclinación y la altura, influye directamente en su estabilidad. Taludes más empinados tienen un mayor riesgo de falla, mientras que una geometría más estable (menor pendiente) proporciona un mayor factor de seguridad.
- Cargas externas: Las cargas externas, como edificios, vehículos y acumulación de agua, añaden tensiones adicionales al talud. Estas cargas incrementan la probabilidad de fallas, por lo que deben considerarse en el diseño geotécnico para garantizar la estabilidad a largo plazo.

- Actividad sísmica: La actividad sísmica puede generar fuerzas dinámicas que desestabilizan un talud. Los terremotos reducen la resistencia del suelo, lo que puede desencadenar deslizamientos incluso en taludes previamente estables. En zonas sísmicas, es vital incluir la evaluación de estos factores en el análisis de estabilidad.

El Factor de Seguridad (FS) es una herramienta crucial en el diseño y mantenimiento de taludes en proyectos de ingeniería. Su importancia radica en varios aspectos clave. Primero, en la gestión de riesgos, ya que un FS más alto proporciona un margen de seguridad ante condiciones inesperadas como eventos climáticos extremos o cambios en el uso del suelo, previniendo deslizamientos catastróficos que pongan en peligro vidas y bienes. En segundo lugar, es fundamental para el cumplimiento normativo, ya que los códigos de construcción y estándares de ingeniería suelen especificar valores mínimos de FS, los cuales deben cumplirse para la aprobación legal de los proyectos. Además, un talud con un FS adecuado garantiza la longevidad de la infraestructura, como carreteras, vías férreas y terraplenes, reduciendo los costos de mantenimiento y prolongando su vida útil. Por último, desde una perspectiva de protección ambiental, un FS elevado contribuye a evitar deslizamientos que podrían destruir hábitats, alterar cauces de agua y causar daños ambientales a largo plazo.

3. Flujo de arcilla

Se refiere al movimiento lento de una masa arcillosa con un alto contenido de humedad. Por lo general, se forman en el pie de un deslizamiento, cuentan con una inclinación de 4 a 15° en la zona inferior y su velocidad media se encuentra entre 4 y 600 m/año. La velocidad puede aumentar en épocas lluviosas o en presencia de deshielos. Su movimiento se genera principalmente por deslizamiento sobre el suelo que soporta a esta masa arcillosa. (Jimenez et al., 1981)

El empuje recibido del material recién caído en la cabecera es el causante de que el material arcilloso pueda deslizarse sobre pendientes con inclinaciones bajas.

Muchos de los flujos de arcillas están compuestas por arcillas expansivas. Pueden llegar a poseer una longitud de hasta 1.8 metros. Además, existe un tipo de flujo de arcillas conocido como “solifluxión” capaz de deslizarse en pendientes de por lo menos 2°. (Jimenez et al., 1981)

4. Deslizamientos provocados por licuefacción

Las arenas finas y los limos pueden formar depósitos inestables, especialmente si están conformados por granos redondos y uniformes. Si estos tipos de suelo están saturados, cualquier perturbación o cambio puede provocar presiones intersticiales elevadas. Esto se debe a que estos suelos poseen poca permeabilidad y el tiempo de drenaje es alto, causando que se genere el fenómeno de licuefacción o la anulación de las presiones efectivas. (Jimenez et al., 1981)

En caso se presenten estas condiciones, la masa de suelo se comporta como un fluido viscoso que alcanza velocidades de hasta 50 km/h sobre taludes llanos. Aunque la licuefacción es causada principalmente por sismos, también puede ser ocasionada debido a otros factores (Jimenez et al., 1981):

- Un descenso rápido del nivel de agua

- La deformación de la cimentación arcillosa

La licuefacción puede llegar a mover hasta 5 millones de metros cúbicos sin la intervención de sismos y pueden desplazarse horizontalmente hasta alcanzar distancias de 400 metros. (Jimenez et al., 1981)

5. Factores que influyen en la estabilidad de taludes

a. **Erosión** Es un proceso causado por agentes externos que desgastan o transportan partículas del suelo u otros materiales de la superficie de la Tierra. Se define como la pérdida físico – química del suelo, que reduce la capacidad productiva de los mismos. Puede darse por acción del agua, el viento, el clima, actividades humanas, etc. (Sanchez, 2016)

La erosión siempre ha existido y con más frecuencia en tiempos geológicos pasados. Cuando la erosión es producida sin intervenciones antrópica, se conoce como erosión natural y sus tasas son por lo general bajas. Las actividades humanas aceleran considerablemente el proceso de erosión. Por ejemplo, el arado y labranza del suelo aumentan la erosionabilidad de este. Cuando la intervención humana acelera estos procesos naturales, la erosión se conoce como acelerada o antrópica. (Cerdà, 2001)

b. **Sismos** Son movimientos de la corteza terrestre de corta duración y de intensidad variable. Una de las principales causas de los sismo son las placas tectónicas y sus interacciones. Sin embargo, los sismos también pueden ocurrir cuando las rocas no soportan los esfuerzos a los que están sometidas y se rompen súbitamente, liberando energía elástica en forma de ondas sísmicas. (Gobierno de México, 2017) La sismología puede emplearse para determinar su comportamiento y consecuencias. (Instituto Geográfico Nacional, 2016)

El movimiento de los sismos puede ser descrito por los siguientes parámetros:

- Aceleración: es el valor más utilizado para describir el movimiento. Se emplea para determinar las fuerzas inducidas en estructuras debido a su relación con las fuerzas inerciales.
- Velocidad: empleada para determinar y analizar frecuencias intermedias.
- Desplazamiento: es el menos empleado ya que es el parámetro más difícil de determinar.

6. Tipos de falla de taludes

a. **Falla por deslizamiento superficial** Es un proceso continuo y lento donde ocurre un deslizamiento ladera abajo, generado en la zona superficial de alguna laderas naturales. Por lo general, suele afectar grandes extensiones de terreno. La velocidad del movimiento no es mayor a algunos centímetros por año. (Valeria & Jair, 2014)

Se clasifica en dos tipos:

- Estacional: caracterizado por solo afectar la corteza superficial del talud. Depende de los cambios climáticos que ocasionan expansiones, contracciones, humedecimiento y secado del suelo. (Valeria & Jair, 2014)
- Masivo: afecta las capas de suelo más profundas. Su comportamiento no es alterado por factores climáticos, pero los factores internos del suelo si afectan su comportamiento. (Valeria & Jair, 2014)

b. **Falla por rotación** En las falla por rotación el movimiento se produce de forma repentina y se produce en una superficie cilíndrica o concoidal. Cuando ocurren estos deslizamientos, abarcan un gran área de suelo que afecta significativamente la geometría del talud. (Valeria & Jair, 2014)

Se puede clasificar en dos tipos, dependiendo a la profundidad en que se presenta la superficie de falla:

- Falla local: conocida también como desconchamiento, ocurre cuando la superficie de falla corta al plano inclinado entre el hombro y el pie. (Valeria & Jair, 2014)
- Falla de base: corresponde a una falla de la geometría total del talud. Ocurre cuando la superficie de falla corta al plano horizontal que forma la base del talud. (Valeria & Jair, 2014)

c. **Falla por traslación** Por lo general, el causante de la generación de este tipo de falla es un aumento en las condiciones de presión de poro en el estrato menos resistente. Ocurre en estratos de suelo poco resistentes y se define como un movimiento significativo del talud sobre una superficie plana. Esta falla tiene lugar sobre el pie del talud. La superficie de falla se forma en paralelo a la estratificación de suelos de baja cohesión. (Valeria & Jair, 2014)

Los estratos débiles que facilitan la aparición de la falla por traslación son las arcillas blandas, arenas finas y los limos de baja plasticidad que se encuentran entre estrados de suelos con mejores propiedades. (Valeria & Jair, 2014)

d. **Falla por flujo** Se caracteriza por poseer movimientos de tierra relativamente rápidos y se presenta comúnmente en taludes naturales conformados por materiales poco consolidados o no consolidados. Las fallas por flujo se presentan cuando existen grandes aumentos el contenido de humedad en el talud. (Valeria & Jair, 2014)

A diferencia de las fallas por deslizamiento superficial, las fallas por flujo no poseen una superficie de deslizamiento debido a que ocurren en un corto período de tiempo. Este fenómeno se manifiesta de manera rápido y repentina, lo cual puede resultar en movimientos de tierra más pronunciados en comparación con otros tipos de fallas geotécnicas. (Valeria & Jair, 2014)

e. **Falla por licuefacción** Es uno de los fenómenos más importantes y controversiales en la ingeniería geotécnica. (Brenes-Quesada, 2008) La licuefacción puede ser ocasionada durante sismos debido al movimiento del suelo, generando una pérdida en la resistencia al corte. Debido a esto el

suelo pasa a comportarse como un líquido. Esto tiene consecuencias catastróficas, donde edificios se desploman y los deslizamientos de tierra generan grandes daños económicos. (Sánchez, 2013)

La falla por licuefacción está vinculada a las características del suelo, especialmente a aquellos que están saturados y carecen de cohesión. Su ocurrencia aumenta en presencia de niveles freáticos superficiales, suelos finos-arenosos y en suelos mal gradados y drenados. (Cano-Franco et al., 2023) Estas características crean un entorno favorable para que el suelo pierda temporalmente su capacidad de soporte, lo que puede tener implicaciones significativas en términos de estabilidad del terreno. (Valeria & Jair, 2014)

7. Clasificación geomecánica

Debido a su carácter discontinuo y a la gran cantidad de parámetros que afectan sus propiedades, los macizos rocosos poseen un comportamiento complejo. Por esto, la clasificación geomecánica de un macizo rocoso es de suma importancia para determinar el índice de calidad del mismo mediante la observación en campo, la cuantificación de sus características y la realización de ensayos simples. Esta clasificación surgió de la necesidad de tomar decisiones rápidas al momento de escoger el sostenimiento en túneles. (Menéndez & González-Gallego, 2015)

Para obtener el índice de calidad, se asignan valores individuales a diversos parámetros del macizo rocoso y luego se integran todos los valores para poder realizar la clasificación por calidad de este.

Existen una gran variedad de sistemas de clasificación que pueden ser aplicados a los macizos rocosos. Sin embargo, los más empleados son el RMR, el SMR y el índice Q. El resto de métodos, son por lo general variaciones o adaptaciones de los ya mencionados anteriormente. (Menéndez & González-Gallego, 2015)

a. **Sistema Q** Propuesto en base a varios casos de estabilidad en excavaciones subterráneas, permite establecer un índice de calidad que es empleado en macizos rocosos en túneles (Carrillo et al., 2002) Al igual que el RMR, está basado en algunos parámetros fundamentales, entre los cuales se encuentran:

- Designación de la calidad de la roca (RQD)
- Número de fisuras (J_n)
- Rugosidad de las fisuras (J_r)
- Alteración de las fisuras (J_a)
- Factor de reducción en fisuras (J_w)
- Factor de reducción por esfuerzos (SRF)

El valor de Q se obtiene al emplear una ecuación.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

b. **RMR** Desarrollado por Bieniawski en 1972, permite estimar la calidad del macizo rocoso. Para esto, se cuantifican parámetros obtenidos fácilmente en campo y que poseen un costo económico mínimo (Hamidi et al., 2010). El índice de calidad está representado en función de cinco parámetros principales:

- Designación de la calidad de la roca (RQD)
- Espaciamiento de discontinuidades
- Condición de las discontinuidades
- Condición del agua subterránea
- Orientación de las discontinuidades

Al conocer la clasificación del macizo empleando el método de RMR, es posible determinar ciertas propiedades geotécnicas preliminares que son empleadas para analizar a detalle la estabilidad del talud. (Carrillo et al., 2002)

Cuadro 4
Parámetros y clasificación propuesta por Bieniawski

PARAMETER		RANGES OF VALUES								
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	> 8 MPa	4 - 8 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range — uniaxial compressive test is preferred			
		Uniaxial compressive strength	> 200 MPa	100 - 200 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	10-25 MPa	3-10 MPa	1-3 MPa	
		Rating	15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%			
	Rating		20	17	13	8	3			
3	Spacing of joints		> 3 m	1 - 3 m	0,3 - 1 m	50 - 300 mm	< 50 mm			
	Rating		30	25	20	10	5			
4	Condition of joints		Very rough surfaces. Not continuous. No separation. Hard joint wall rock.	Slightly rough surfaces. Separation < 1 mm. Hard joint wall rock.	Slightly rough surfaces. Separation < 1 mm. Soft joint wall rock.	Slickensided surfaces OR Gouge < 5 mm thick OR Joints open 1-5 mm. Continuous joints	Soft gouge > 5 mm thick OR Joints open > 5 mm. Continuous joints			
	Rating		25	20	12	6	0			
5	Ground water	Inflow per 10m tunnel length	None		< 25 litres/min	25 - 125 litres/min	> 125 litres/min			
		Ratio $\frac{\text{joint water pressure}}{\text{major principal stress}}$	OR 0		OR 0,0 - 0,2	OR 0,2 - 0,5	OR > 0,5			
		General conditions	OR Completely dry		OR Moist only (interstitial water)	OR Water under moderate pressure	OR Severe water problems			
	Rating		10		7	4	0			
Strike and dip orientations of joints		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very unfavourable				
Ratings	Tunnels		0	-2	-5	-10	-12			
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25			
	Slopes		0	-5	-25	-50	-60			

Cuadro 5
Parámetros y clasificación propuesta por Bieniawski

C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS					
Rating	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20
Class No.	I	II	III	IV	V
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock

D. MEANING OF ROCK MASS CLASSES					
Class No	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	10 years for 5 m span	6 months for 4 m span	1 week for 3 m span	5 hours for 1,5 m span	10 minutes for 0,5 m span
Cohesion of the rock mass	> 300 kPa	200 - 300 kPa	150 - 200 kPa	100 - 150 kPa	< 100 kPa
Friction angle of the rock mass	> 45°	40° - 45°	35° - 40°	30° - 35°	< 30°

THE EFFECT OF JOINT STRIKE AND DIP ORIENTATIONS IN TUNNELLING						
Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis		Dip 0° - 20° irrespective of strike
Drive with dip		Drive against dip		Dip 45°-90°	Dip 20°-45°	
Dip 45°-90°	Dip 20°-45°	Dip 45°-90°	Dip 20°-45°			
Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very unfavourable	Fair	Unfavourable

8. Protección de taludes

La protección de taludes tiene dos objetivos primordiales: proteger el talud de los efectos de la erosión y evitar su aflojamiento y su falla subsiguiente. (Jimenez, 1980)

En los taludes la ruptura progresiva inicia comúnmente en el pie de este. Para evitar que ocurra esta ruptura, se pueden construir muros o pantallas con anclajes pretensados en el pie del talud. Sin embargo, esta solución es insuficiente para soportar el peso del talud una vez que la falla ya haya iniciado, pero si puede ser una medida suficiente si la ruptura no ha dado inicio. (Jimenez, 1980)

a. **Daños en la infraestructura de una obra** Los daños que puede sufrir cualquier tipo de edificación por acción de deslizamientos pueden clasificarse de la siguiente manera:

Cuadro 6
Clasificación de daños.

Emplazamiento de la Obra	Daño sufrido en la infraestructura	
Terraplén	Asientos (del terraplén o del cimient)	Por deformación plástica. Por compactación creciente
	Deslizamientos	Superficiales Profundos
	Degradación por erosión	
Media Ladera	Asientos (del terraplén o del cimient)	Por deformación plástica. Por compactación creciente
	Deslizamientos	Superficiales Profundos
	Desprendimientos	
	Degradación por erosión	
Trincheras y taludes naturales	Deslizamientos	Superficiales Profundos
	Desprendimientos	
	Degradación por erosión	

Fuente: (Jimenez, 1980)

b. **Medidas a tomar según daños** Las medidas que pueden ser aplicadas elevan el coeficiente de seguridad de los taludes que se encuentran en situaciones riesgosas, son variadas, pero pueden clasificarse en tres grupos:

- 1) Medidas Tipo I – Modificaciones favorables del perfil geométrico y las medidas adoptadas para conservar el talud existente. (Jimenez, 1980)
- 2) Medidas Tipo II – Modificaciones que disminuyen las tensiones de cortante que actúan sobre la superficie de ruptura. (Jimenez, 1980)
- 3) Medidas Tipo III – Las modificaciones que incrementan la capacidad de resistencia del suelo a esfuerzo cortante, a lo largo de la posible superficie de rotura. (Jimenez, 1980)

Cuadro 7
Clasificación de medidas de consolidación de taludes.

Daños / Medidas			TIPOS DE MEDIDAS		
			Medidas tipo I	Medidas Tipo II	Medidas Tipo III
TIPOS DE DAÑOS	Asientos	a. Por Deformación Plástica	Cadenas drenantes	Drenes subhorizontales, rebajamiento de nivel freático, cunetas, drenes profundos, galerías y pozos drenantes, galerías con pilotes drenantes, pantallas de transición	Pantallas de desague, cadenas drenantes
		b. Por deformación creciente			Inyección, mejora del terreno, sustitución del terreno
	Deslizamientos	a. Superficiales	Plantaciones, riegos superficiales, muros de revestimiento, arquerías, túneles artificiales	Plantaciones, Riegos superficiales	Plantaciones, pilotes, drenes superficiales, tratamientos químicos, consolidación electrocinética
		b. Profundos	Muros de pie bien cimentados, defensas en el cauce, disminución del talud, escalonamiento del talud, espaldones laterales	Cunetas de coronación	Drenes subhorizontales, sistemas de pozos y galerías drenantes, drenes pentagonales, inyecciones químicas para mejora de terrenos, muros anclados, muros de pie con contrafuertes, plantaciones
	Desprendimientos		Eliminación de bloques, telas metálicas, bermas de pie y defensas, plantación, bulonado, muros de acompañamiento, contrafuertes y vigas, paños de recalce	Gunitado, protección productos bituminosos, captaciones profundas y desague, plantaciones	Anclaje a la ladera, captaciones y drenes
	Erosión	Eólica		Rompevientos, ordenado de cultivos, cobertura vegetal	Enmiendas, aportación materia orgánica, estabilizaciones químicas, plantaciones
		Hídrica	Ebcesperados, plantaciones a nivel, encauzamiento arroyos, defensa y corrección de barrancos	Mulch, encespados, repoblaciones arbóreas, terrazas y bancales, barreras y vegetales	Drenaje, encespados, plantaciones

Fuente: (Jimenez, 1980)

D. Herramientas para la instrumentación del movimiento de taludes

1. Tipos de levantamiento

a. **Levantamiento geodésico** Los levantamientos geodésicos se realizan en grandes áreas de la superficie terrestre y son el conjunto de procesos y operaciones de campo que tienen como objetivo determinar las coordenadas geodésicas de puntos sobre un determinado terreno. Debido a que son llevados a cabo en grandes extensiones de terreno, la curvatura de la Tierra es tomada en cuenta en estos levantamientos. Además, un levantamiento geodésico debe de realizarse con instrumentos y técnicas que permitan alcanzar un alto grado de precisión en las mediciones. (Rodríguez, 2011)

Existen tres tipos diferentes de levantamiento geodésicos:

Levantamientos geodésicos horizontales: tienen como objetivo determinar las coordenadas geodésicas horizontales entre los puntos que están ubicados sobre la superficie terrestre. (Duch, 1985)

Levantamientos geodésicos verticales: tienen como objetivo determinar la distancia vertical que existe entre puntos sobre la superficie terrestre. (Duch, 1985)

Levantamientos geodésicos gravimétricos: tiene como objetivo principal determinar el campo gravimétrico que existe y determinar su relación con los levantamientos geodésicos horizontales y verticales. (Duch, 1985) Cualquier punto de la superficie terrestre puede ser evaluado usando cualquier tipo de levantamiento geodésico, siempre y cuando cumpla con ciertas características necesarias.

Además, existen varios métodos para realizar un levantamiento geodésico, entre los cuales se encuentran:

- Método de triangulación
- Método de trilateración
- Método de polígonos
- Método inercial

Se diferencia de un levantamiento topográfico principalmente porque se realiza en grandes extensiones de terreno. Por otro lado, los levantamientos topográficos son llevados a cabo en pequeñas porciones de terreno y no consideran la curvatura de la Tierra, sino que la consideran como un plano. Cada uno tiene sus usos y no dejan de ser importantes en sus áreas de aplicación. (Latitud19, 2019).

2. Desplazamientos horizontales

a. **Inclinómetros** Es uno de los métodos más empleados para el análisis de deslizamiento de taludes. Su funcionamiento es posible gracias a un transductor senso- gravitacional que, al recorrer una tubería inclinómetra, mide la inclinación de esta respecto a la vertical. (Hurtarte, 2019)

Figura 1. Inclinómetro digital.



Fuente: (DGSI, 2018)

Los inclinómetros poseen una gran variedad de usos, entre los más importantes se encuentran:

- Determinación de la zona de falla de un talud
- Monitoreo del movimiento horizontal
- Monitoreo de la deflexión en elementos estructurales

b. **Fisurómetros** Son herramientas empleadas para controlar la evolución de fisuras y grietas en superficies planas. Su principal uso es determinar el ancho de estas fisuras en distintos materiales, teniendo un rango de reconocimiento desde 0 hasta 8 mm. Es empleado en distintas obras civiles, como lo son: puentes, túneles, edificios, cubiertas de hormigón y superficies metálicas. (INLAD-SAC, 2023)

Existen dos tipos de fisurómetros, los análogos y los digitales. Los análogos emplean una escala graduada para determinar el tamaño de la grieta, tienen un costo bajo en comparación con otros fisurómetros y son sencillos de usar. Por otro lado, los fisurómetros digitales emplean un indicador digital para realizar las mediciones. Se caracterizan por poseer un alto grado de precisión y por tener la capacidad de almacenar los datos en una memoria interna. Por lo general, los fisurómetros digitales poseen una precisión de hasta 0.001 mm. (INLADSAC, 2023)

Figura 2. Fisurómetro digital



Fuente: (Ibérica, s.f.)

3. Desplazamientos verticales

a. **Extensómetros** Los extensómetros son instrumentos de suma importancia en el monitoreo geotécnico ya que permiten la medición de la deformación o desplazamiento del suelo bajo distintas cargas o condiciones. El objetivo principal de un extensómetro es cuantificar el cambio de longitud de un material a lo largo de una dirección determinada. Existen extensómetros específicos para distintos ensayos, entre estos se encuentran ensayos de tracción, compresión, medidas axiales, diametrales, deformaciones, etc. (SERVOSIS, 2023)

Una de las principales aplicaciones de los extensómetros es la rehabilitación de presas. Sin embargo, también proporcionan información importante para determinar el comportamiento y estabilidad en estructuras como puentes, túneles y edificios. (SISGEO, 2023b)

En Guatemala la práctica para la verificación y clasificación del sistema de extensómetros se encuentra estipulado en la norma NTG 4107-h16 redactada por la COGUANOR y basada en la norma ASTM E83. (CONRED, s.f.)

Figura 3. Extensómetro digital



Fuente: (Datageo, s.f.)

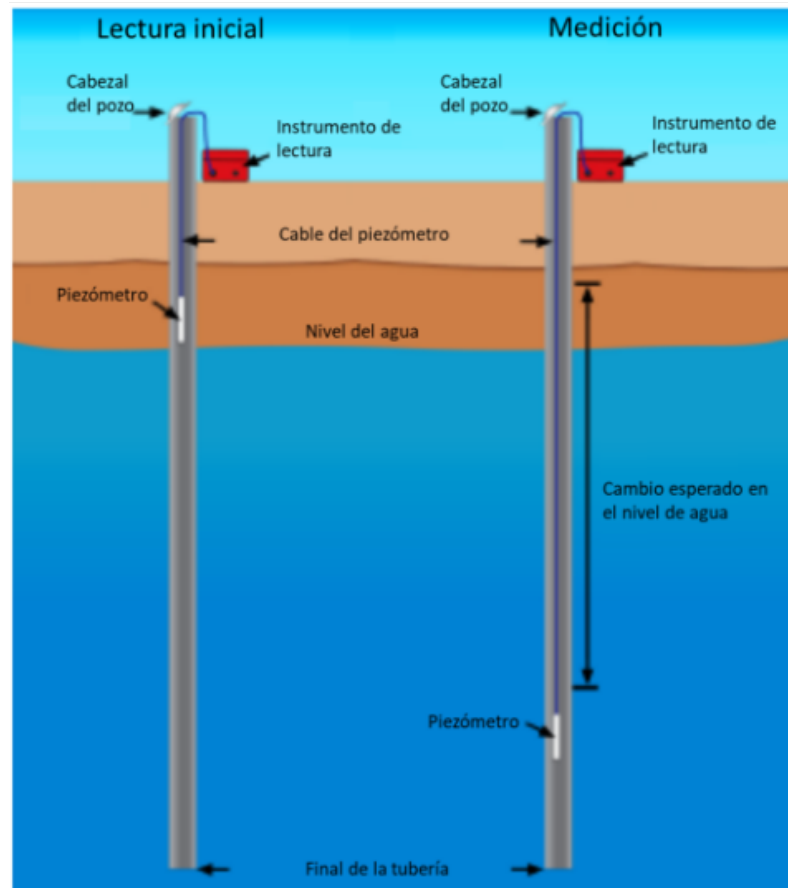
4. Presiones de poro y niveles piezométricos

a. **Piezómetros** Son dispositivos empleados para medir la presión del agua subterránea en presas, tuberías y otro tipo de conductos. Son colocados en pozos que son rellenos con un tipo

de lechada de baja permeabilidad que no se contrae. Determinan la presión de poro negativas y positivas, las cuales son importantes para comprender el comportamiento del suelo antes, durante y después de cualquier construcción. (Chaulya & Prasad, 2016)

Emplea un diafragma y un cable de acero tensionado para convertir la presión de agua a una frecuencia de señal. El agua presente en el suelo se mueve en dirección al depósito, provocando que el diafragma se desplace hasta que la presión interna del depósito es igual a la presión del agua que se encuentra en los poros del suelo. Un cambio de presión en el diafragma causa un aumento o disminución de la tensión en el cable. La vibración del cable al encontrarse cerca de una bobina magnética genera una frecuencia que es transmitida al dispositivo de lectura. Este dispositivo procesa la señal de frecuencia y muestra una lectura. (Chaulya & Prasad, 2016)

Figura 4. Funcionamiento de un piezómetro



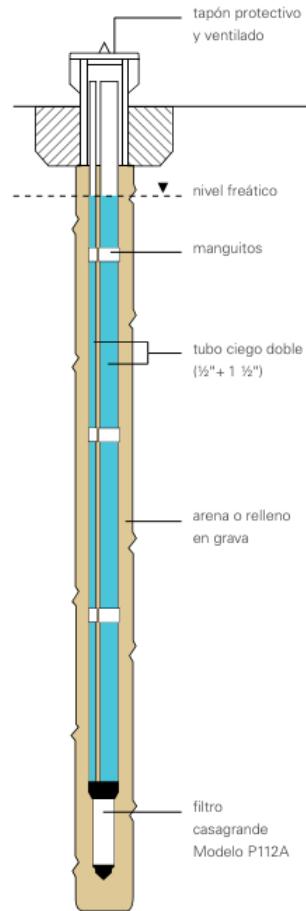
Fuente: (AguaEx, 2021)

b. **Piezómetros abiertos tipo Casa Grande** Este tipo de piezómetro son empleados específicamente para determinar y monitorear la presión de agua en terrenos que poseen niveles bajos o intermedios de permeabilidad. La unidad de filtro Casagrande está compuesta por polietileno sintético de alta densidad y pueden ser interpretados manualmente usando sondas, escalas hidrométricas o de forma automática mediante el uso de un transductor. Por lo general, el agujero realizado para su uso se rellena con arena gruesa o grava. (SISGEO, 2023c)

Es empleado para diversas aplicaciones, entre las cuales se destacan (CACISA, 2023):

- Control del nivel del freático
- Construcción y control de estabilidad
- Estabilidad en pendientes
- Pruebas de permeabilidad

Figura 5. Esquema de un piezómetro abierto Casa Grande



Fuente: (sISGEO, 2023)

c. **Piezómetros de cuerda vibrante** Al igual que los piezómetros abiertos tipo casa grande, pueden monitorear el nivel freático. Sin embargo, también son capaces de determinar las variaciones en las presiones intersticiales del terreno. Son piezómetros eléctricos que ofrecen una gran precisión, estabilidad de lecturas y un alto rendimiento ante condiciones geotécnicas extremas. Están compuestos por un cable de acero con una ancla fija a una extremidad y un diafragma al otro extremo que entra en contacto con la presión del agua. (RST, s.f.)

Esto los convierte en la herramienta ideal para monitorear y medir presión en espacios largos de tiempo. Para poder realizar sus mediciones los piezómetros de cuerda vibrante usan un modelo de frecuencia de vibración, asociado directamente con la presión de poro. (CACISA, 2023)

Entre sus principales aplicaciones se encuentra la investigación de estabilidad de taludes, el monitoreo de niveles de agua de pozos, la evaluación de desempeño e investigación de estabilidad de diques. (CACISA, 2023)

Figura 6. Piezómetro de cuerda vibrante



Fuente: (Corpfrak, 2024)

5. Esfuerzos y cargas

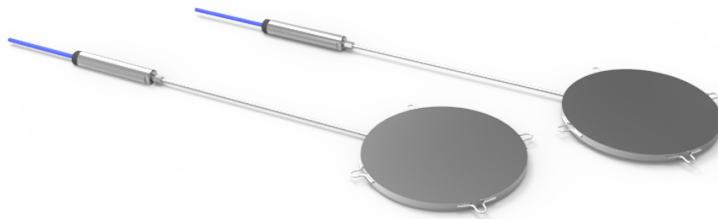
a. **Celdas de presión** Son empleadas principalmente para medir los esfuerzos verticales que llegan hasta el punto donde se encuentra instalada la celda de presión. Este dato se emplea para determinar la distribución y reducción de esfuerzos de un pavimento en relación con la profundidad de interés. (Wang Qiu, [2018](#))

Las celdas de presión se pueden dividir por el rango de succión que pueden aplicarse, el número de muestras que pueden ensayar, el tipo de material que se coloca en la base de la celda para separar la presión del aire y del agua. (Wang Qiu, [2018](#)) Existen distintos tipos de celdas de presión, entre los más comunes se encuentran:

Es empleado para diversas aplicaciones, entre las cuales se destacan (Wang Qiu, [2008](#)):

- Celdas de presión con membrana
- Celdas depresión con disco de cerámica de alto valor de entrada de aire
- Celda de extracción volumétrica
- Celda de temperatura
- Celda de presión volumétrica modificada

Figura 7. Celda de presión



Fuente: (SISGEO, [2023a](#))

b. **Celdas de carga** También conocidas como transductores de carga o sensores de carga, son sensores empleados para determinar la presencia de ciertos elementos al medir la deformación o carga sobre una determinada superficie. Además, son empleadas para medir la fuerza o el peso y su cambio con el tiempo. Las celdas de carga son transductores que pueden convertir fuerza en señales eléctricas. Muchas celdas de carga emplean componentes flexibles y resistentes a carga. (Al-Mutlaq, [2016](#))

La fuerza es aplicada al elemento elástico, causando que este se flexione. Esto es detectado por el sensor auxiliar que lo convierte en un resultado medible. Este resultado puede adoptar la forma de señales eléctricas, como medidores de deformación y transductor diferencial variable lineal. (Al-Mutlaq, [2016](#))

Las células de carga basadas en galgas extensométricas son las celdas de carga más comunes, siendo empleadas en una gran variedad de aplicaciones. La capacidad nominal de carga de este tipo de celda varía desde 5 N hasta más de 50 MN. Han llegado a emplearse como un estándar de transmisión de fuerza con indicadores digitales de alta resolución (Kamble et al., 2020)

Figura 8. Distintos tipos de celdas de carga



Fuente: (FUTEK, s.f.)

6. Nuevas tecnologías de instrumentación

a. **Estación total** Una estación total integra en su interior cuatro equipos con el objetivo de facilitar y agilizar ciertos procesos, estos cuatro equipos son: el nivel de precisión, el distanciómetro láser, el teodolito y la computadora. Cada uno de sus componentes cumple una función diferente, pero en conjunto son utilizados para la medición láser de distancias y ángulos horizontales y verticales. (TopoServis, 2021).

Figura 9. Estación total



Fuente: (MMT, 2018)

El primer modelo de Estación total, GEODIMETER, salió al mercado en 1971 por parte de la empresa Trimble, seguido del modelo GUPPY lanzado en 1976 por parte de Topcon. Desde entonces su uso se ha popularizado y su desarrollo ha permitido que sus componentes sean cada vez más avanzados y precisos. A principios de la década de los 90s, se empezó a fabricar y comercializar la estación total robótica y poco tiempo después se implementó la recepción GPS entre sus utilidades. En 2003 se empezó a emplear el sistema R-Track para el rastreo de señales LC2. Actualmente, las estaciones totales cuentan con plomadas láser, pantallas alfanuméricas, distanciómetros óptico-electrónicos y entre otras herramientas que facilitan la medición de datos. (Santana, 2016)

Unos de los accesorios más importantes de la estación total es el prisma, el cual permite determinar la distancia, el ángulo vertical y el ángulo horizontal de un punto a partir de un láser. Para lograr esto, el láser debe de ser apuntado hacia el centro del prisma para que este rebote en la estación total y esta pueda determinar su inclinación y el tiempo que este tarda en regresar. La medición angular se realiza en grados sexagesimales y en centesimales. La estación total puede realizar mediciones de puntos que se encuentren ubicados hasta a 5000 metros de distancia, pero esto dependen del tipo de equipo y prisma. (Advincula, 2020)

b. **Cámaras de monitoreo continuo (Cyclops)** Es un sistema topográfico 3D automatizado, destinado al monitoreo de estructuras y superficies. Permite la obtención de mediciones precisas para reducir el riesgo de errores humanos en la construcción. Además, monitorea el movimiento del suelo y muestra la deformación en tres dimensión de las estructuras. (Sixense Group, 2020)

Figura 10. Empleo de un equipo Cyclops



Fuente: (SIXENSE, 2020)

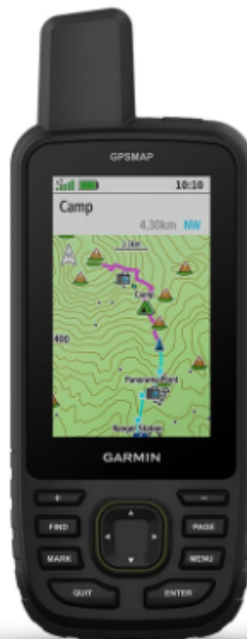
El sistema Cyclops es capaz de controlar a distancia varios teodolitos para monitorear eficiente el movimiento o la pendiente de las superficies a gran detalle. Esto permite monitorear grandes extensiones de terreno sin perder precisión en la toma de datos. (Sixense Group, 2020) Tiene varias aplicaciones, entre las cuales se destacan:

- Monitorear la deformación *in situ* y el movimiento de estructuras
- Convergencia de túneles y excavaciones
- Monitorear la deformación de superficies

c. **GPS de monitoreo** El GPS funciona por medio de una red de por lo menos 30 satélites que se encuentran sobre la órbita del planeta a aproximadamente 20,000 km de altitud, las estaciones terrestres de seguimiento y control y de los receptores GPS que poseen los usuarios. Los receptores GPS necesitan como mínimo la señal de tres satélites para poder determinar la localización del usuario y la hora exacta sobre cualquier condición climática y en cualquier lugar del mundo. El sistema cuenta con una precisión que puede variar desde los pocos centímetros hasta unos cuantos metros. (De Castillo, 2021)

En el área de topografía y cartografía, el GPS es una parte vital de muchos de los proyectos topográficos y es bastante utilizado ya que permite aumentar significativamente la productividad y la precisión de los datos. El GPS permite realizar con mayor precisión la cartografía y la modelación del mundo físico. Además, permite visualizar las superficies medidas a través de sistemas de información geográfica que almacenan y modifican los datos georreferenciados. Al utilizar este sistema las estaciones ya no se encuentran restringidas a la visibilidad entre ellas, sino que estas se pueden movilizar a mayores distancias sin preocuparse por los obstáculos que pueden impedir la toma correcta de datos en un levantamiento. (Gobierno de los Estados Unidos, 2012)

Figura 11. GPS topográfico



Fuente: (Garmin, 2023)

d. **INSAR (Interferometry Synthetic Aperture Radar)** Es una técnica de mapeo de deformaciones de suelos que emplea imágenes radares de la superficie de la Tierra que son recolectada de satélites que orbitan la atmosfera. Estos satélites pasan sobre un área determinada y recolectan información sobre ella, para la creación de las imágenes InSAR es necesario que estos satélites pasen varias veces sobre el mismo espacio. A diferencia de otras técnicas de mapeo, la ondas radares son capaces de penetrar la mayoría de nubes y son igualmente efectivas en la oscuridad, siendo capaz de examinar cambios en el suelo aun en las peores condiciones. (USGS, [s.f.](#))

Las imágenes Insar son creadas en el momento en el que los satelides emiten un pulso de energía radar, la cual se dispersa sobre la suberficie de la tierra y regresa al setelite con información relacionada con la amplitud y la fase. La distancia entre el satélite y la superffice es medida en unidades de longitud de onda. (USGS, [s.f.](#))

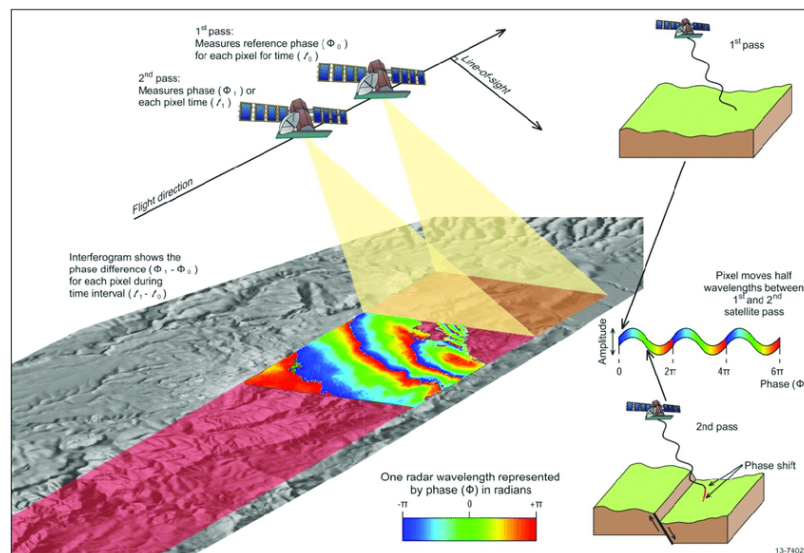
Para determinar los cambios en un área se emplean dos imágenes radar tomadas en diferentes espacios de tiempo, pero desde una posición similar. Cualquier cambio en la superficie durante el tiempo de toma de fotografías puede ser medido. Estas imágenes pueden ser proporcionadas distintas agencias espaciales alrededor del mundo. (USGS, [s.f.](#))

Proporciona mapas de distribución donde se pueden apreciar con gran detalle los desplazamientos y muestra el cambia de los mismos con el paso del tiempo. Luego de comparar ambas imágenes, este método obtiene información significativa para determinar los movimientos con precisión milimétrica. (López Vinielles, [2022](#))

Esta técnica una gran variedad en el campo de la ingeniería civil, entre los más importantes se encuentran:

- Identificación y mapeo automático de anomalías
- Auscultación y caracterización
- Evaluación de daños (Tomás, [2022](#))

Figura 12. Funcionamiento de un INSAR



Fuente: (Xu & Sandwell, [2015](#))

e. **Escáner LIDAR** Empleado desde la década de los años 60, este método es empleado generalmente para obtener información geométrica detallada de forma rápida y precisa al computar posiciones usando láseres de gran potencia. El escáner LiDAR hace uso de ondas ópticas que poseen menor longitud de onda, en comparación a las ondas de radio. Debido a esto tienen la capacidad de alcanzar una mayor precisión en la detección 3D. (Li et al., 2022)

LiDAR es un técnica de detección a distancia no destructiva empleada para determinar la distancia entre dos puntos. La distancia entre el sensor y el objetivo puede ser determinada por medio de dos métodos. El primero consiste en calcular el tiempo en el que el pulso láser en viajar entre el señor y el objetivo, conocido como el tiempo de vuelo. Mitras que el segundo, determina las diferencias de fase entre los rayos láser incidentes y reflejados. Además, este método es capaz de proveer modelos 3D que permiten visualizar de mejor manera el terreno. (Rosell et al., 2009)

Figura 13. Un dron equipado con un escáner LIDAR



Fuente: (Solution, 2022)

7. Software

a. **GeoStudio** Es un software dedicado al análisis numérico geotécnico, permitiendo combinar múltiples análisis usando distintos productos en un único proyecto de modelado. Usando este enfoque, es posible modelas secuencias de construcción, establecer condiciones iniciales, realizar análisis de sensibilidad, y modelar secuencias de tiempo complejos.(PDSVISION, 2024)

Entre sus funciones destacadas se encuentran:

- Personalización de manejo de datos
- Resolver múltiples análisis en paralelo
- Aplicar materiales a regiones con facilidad
- Generar un mallado automatizado de elementos finitos
- Definir modelos usando herramientas avanzadas

Como fue mencionado anteriormente, GeoStudio permite la implementación de una gran variedad de productos de manera simultánea. (PDSVISION, 2024) Entre los cuales se encuentran:

- SLOPE/W: empleado para el análisis de taludes
- SEEP/W y SEEP3D: permite el análisis de elementos finitos del flujo de agua subterránea en medios porosos saturados/insaturados.
- SIGMA/W: permite el análisis de tensiones y deformaciones por elementos finitos de terrenos y materiales estructurales
- QUAKE/W: al usarse permite el análisis de elementos finitos de licuación sísmica y carga dinámica.
- TEMP/W y TEMP 3D: empleado generalmente para el análisis de elementos finitos de transferencia de calor y cambio de fase en medios porosos.
- AIR/W y AIR3D: usado para el análisis de elementos finitos de la transferencia de aire en desechos mineros y otros medios porosos.
- CTRAN/W y CTRAN3D: permite el análisis de elementos finitos del transporte de solutos y gases en medios porosos.
- BUILD3D: es una herramienta que al utilizarse con GeoStudio, permite la creación de geometría para dominios 3D complejos.

b. **SLOPE/W** Es el software de análisis de estabilidad de taludes más empleados para taludes de suelo y roca. Es capaz de analizar eficientemente problemas simples y complejos para una gran variedad de problemas con distintas geometrías de talud, condiciones de presión de agua de poro, propiedades del suelo y condiciones de carga. (SEEQUENT, 2024)

SLOPE/W es una herramienta completa utilizada para el análisis de estabilidad de taludes naturales de suelo y roca bajo diversas condiciones. Permite evaluar situaciones de carga adicional, actividad sísmica, fluctuaciones de la presión de poros en zonas saturadas y no saturadas, y más. Además, ofrece un extenso modelo de materiales y técnicas de búsqueda que permiten manejar los mecanismos de falla más complejos en la ingeniería geotécnica. (SEEQUENT, 2024)

En el diseño de presas y diques, SLOPE/W es ampliamente utilizado para analizar estructuras hidráulicas sometidas a fuerzas naturales y antropogénicas, como inundaciones, descenso rápido de niveles de agua, carga sísmica y sistemas hidrogeológicos cambiantes. También permite realizar análisis probabilísticos y de sensibilidad para la evaluación de riesgos, además de integrarse con SIGMA/W o QUAKE/W para análisis más sofisticados de estabilidad y deformación mediante elementos finitos y métodos de Newmark. (SEEQUENT, 2024)

Para carreteras, puentes y terraplenes, SLOPE/W se usa comúnmente para evaluar la estabilidad de infraestructuras como caminos, vías férreas, estribos de puentes y muros de tierra reforzada, tanto durante como después de su construcción. El software puede analizar cada etapa de construcción, considerando los cambios en la presión de poros y la interacción con refuerzos estructurales. (SEEQUENT, 2024)

En proyectos de estabilización de taludes, SLOPE/W ofrece una amplia gama de opciones, desde bermas simples hasta técnicas complejas de drenaje subterráneo y estructuras de suelo reforzado. Las funcionalidades de refuerzo, la biblioteca de modelos de materiales y la capacidad de definir

presiones de poro permiten diseñar soluciones avanzadas de estabilización de taludes. (SEEQUENT, 2024)

Finalmente, en excavaciones de construcción y taludes mineros, SLOPE/W, junto con la integración en GeoStudio, facilita el modelado de cortes verticales y taludes escalonados. Sus herramientas geométricas y el árbol de análisis de GeoStudio permiten diseñar refuerzos y optimizar configuraciones de taludes para garantizar la estabilidad en obras mineras y de construcción. (SEEQUENT, 2024)

SLOPE/W ofrece una amplia lista de características, entre las más destacadas se encuentran:

- Trece métodos de análisis, incluyendo Morgenstern-Price
- Varias técnicas de búsqueda de superficies de deslizamiento, como Entrada-Salida y Cuadrícula y Radio
- Algoritmo riguroso de búsqueda de raíces para calcular el factor de seguridad
- Definición integral de presión de poro
- Integración de elementos finitos con SEEP/W, SEEP3D y SIGMA/W
- Integración de elementos finitos con SEEP/W, SEEP3D y SIGMA/W
- Integración de elementos finitos con SEEP/W, SEEP3D y SIGMA/W

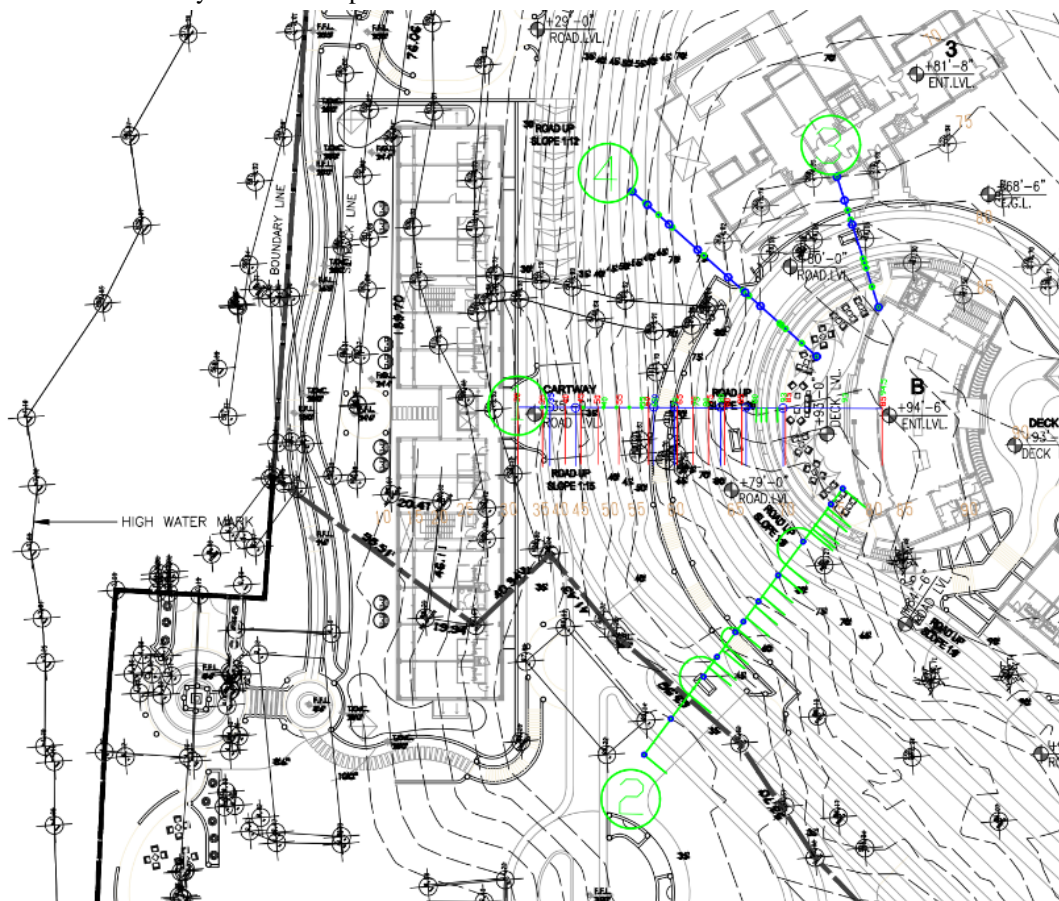
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Estación total - Guía para el análisis de un talud

Utilizando los datos obtenidos a través de una Estación total, como las curvas de nivel de un área específica, es posible realizar análisis detallados de estabilidad de taludes. Estos análisis permiten calcular el Factor de Seguridad (FS) de los taludes evaluados, el cual es un indicador clave para determinar la estabilidad de las pendientes. Un Factor de Seguridad adecuado sugiere que el talud es estable y no representa un riesgo significativo para las estructuras o personas en sus alrededores. Por el contrario, un FS bajo puede indicar la necesidad de medidas de refuerzo o mitigación para prevenir deslizamientos y asegurar la protección del área y sus habitantes.

A continuación se muestran los pasos a realizar para poder obtener el factor de seguridad, a partir de las curvas de nivel.

Figura 14. Determinar y numerar los perfiles a realizar

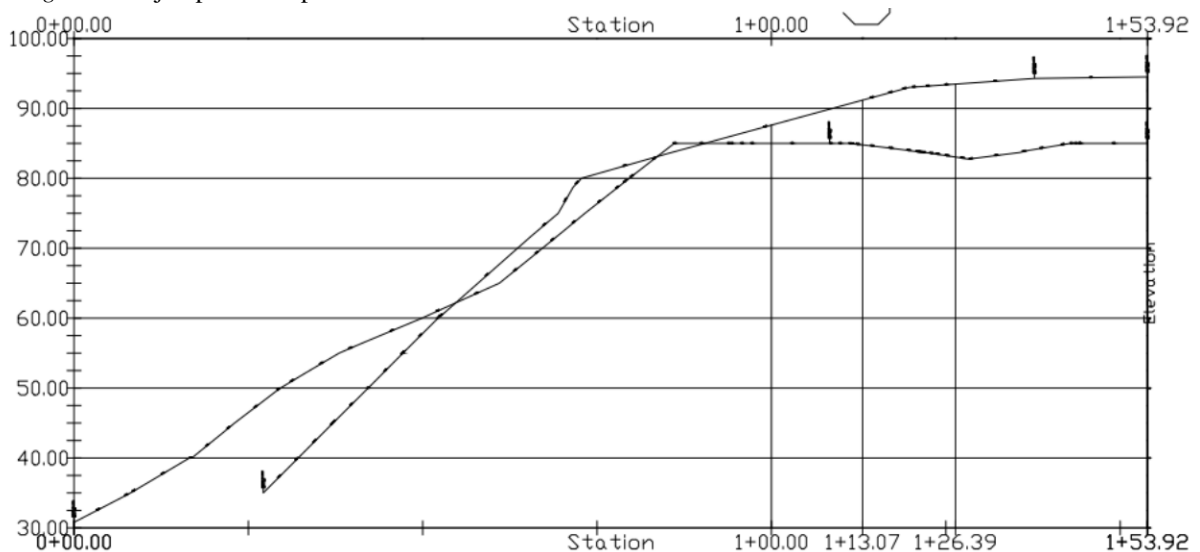


1. Análisis de las curvas de nivel Una vez generadas las curvas de nivel en Civil 3D, es posible identificar con precisión el área de estudio, lo cual facilita la ubicación exacta del talud a analizar. A partir de esta ubicación, se procede a seleccionar la cantidad y posición de los perfiles transversales necesarios para el análisis, considerando aspectos como la orientación del talud, sus características geomorfológicas, y las condiciones del terreno. Estos perfiles son fundamentales para realizar un

análisis estático detallado, ya que permiten visualizar la forma del talud, identificar posibles zonas de debilidad y calcular parámetros críticos que influyen en su estabilidad, como el ángulo de inclinación y la altura del talud. Además, con esta información se podrán establecer secciones representativas que reflejen con mayor exactitud el comportamiento potencial del talud frente a cargas estáticas, facilitando así la determinación del Factor de Seguridad y la evaluación de la estabilidad del terreno.

2. Realización de perfiles en civil 3D Luego de definir la posición del talud, se seleccionan los puntos de inicio y fin de la línea de corte a lo largo del talud para crear el perfil longitudinal o transversal necesario. A continuación, se emplea la herramienta de Creación de Perfiles en Civil 3D, que permite trazar la línea base y obtener la representación del perfil del terreno natural. Es importante ajustar las escalas del perfil para asegurar que reflejen adecuadamente la topografía y características del talud. Una vez generado el perfil, se puede exportar o utilizar directamente para realizar los cálculos de estabilidad, como la determinación del Factor de Seguridad, evaluando los parámetros críticos que afectan la estabilidad del talud bajo condiciones estáticas.

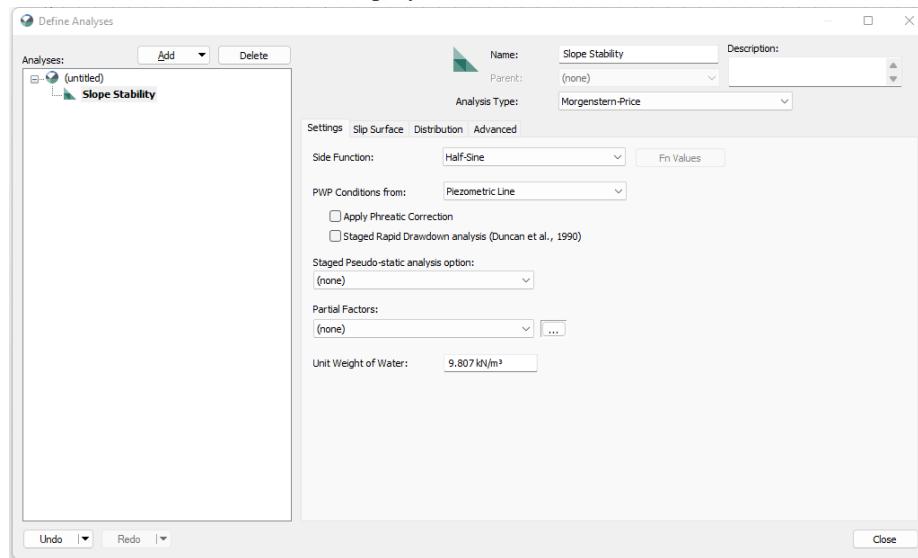
Figura 15. Ejemplo de un perfil realizado en CIVIL 3D



3. Creación de un proyecto nuevo en GEOSTUDIO Una vez recopilada la información detallada de los perfiles en Civil 3D, el siguiente paso es crear un nuevo proyecto en GeoStudio, el software especializado para el análisis de estabilidad de taludes. GeoStudio permite modelar el talud de manera precisa, incorporando las características geométricas y condiciones del terreno obtenidas previamente. Al iniciar el proyecto en GeoStudio, se debe de ingresar cierta información como:

- El tipo de análisis
- La función lateral
- Las condiciones de la presión de agua de poro
- Peso del agua

Figura 16. Definición de las condiciones del proyecto



4. Importar perfil a GEOSTUDIO Una vez que se han definido todas las condiciones y parámetros del proyecto, el siguiente paso crucial es importar el perfil del talud, previamente elaborado en Civil 3D, al entorno de GeoStudio. Esta importación es esencial, ya que permite utilizar la información topográfica exacta y detallada del perfil como base para el modelado del talud. A partir de este perfil, se puede realizar el "sketch" esbozo detallado de la geometría del talud en GeoStudio, asegurando que el modelo digital represente fielmente la estructura y características del terreno real.

El perfil importado proporciona las dimensiones y pendientes del talud, lo que facilita el trazado de sus diferentes estratos y permite definir las condiciones de contorno del terreno.

Figura 17. Perfil del talud al ser importado a GEOSTUDIO

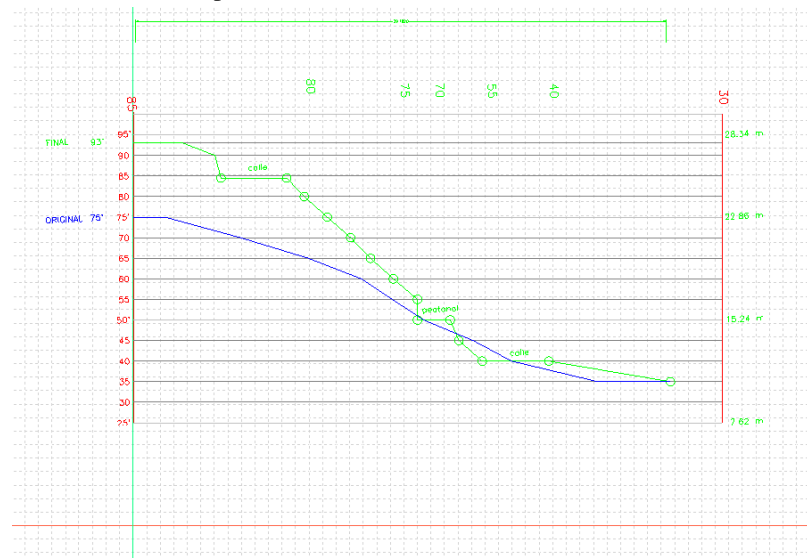
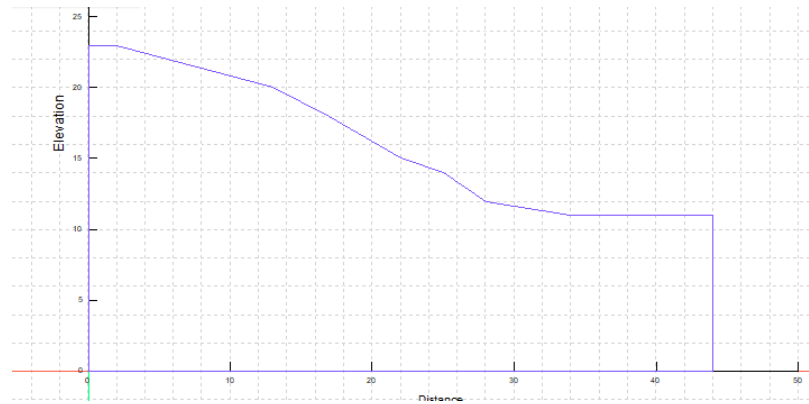


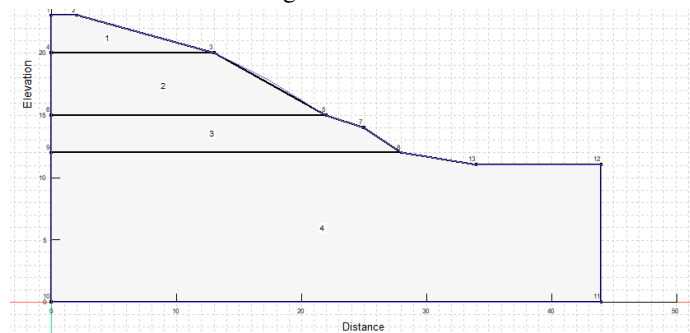
Figura 18. Esbozo del talud



5. Definir regiones Posteriormente, es necesario definir las distintas regiones o zonas dentro del talud, correspondientes a los diferentes estratos de suelo, cada uno con propiedades mecánicas específicas. Estos estratos suelen presentar variaciones en sus características físicas y mecánicas, como cohesión, ángulo de fricción, y densidad, factores que influyen en la estabilidad general del talud. La identificación y delimitación precisa de estas regiones se realiza en función de la profundidad, basándose en los datos obtenidos a partir del análisis de la estratigrafía del suelo.

La estratigrafía proporciona información detallada sobre la composición del subsuelo, identificando capas de distintos tipos de material, tales como arcilla, arena, grava o roca. Esta información permite modelar el talud en GeoStudio con un nivel de detalle que refleja las condiciones reales del terreno.

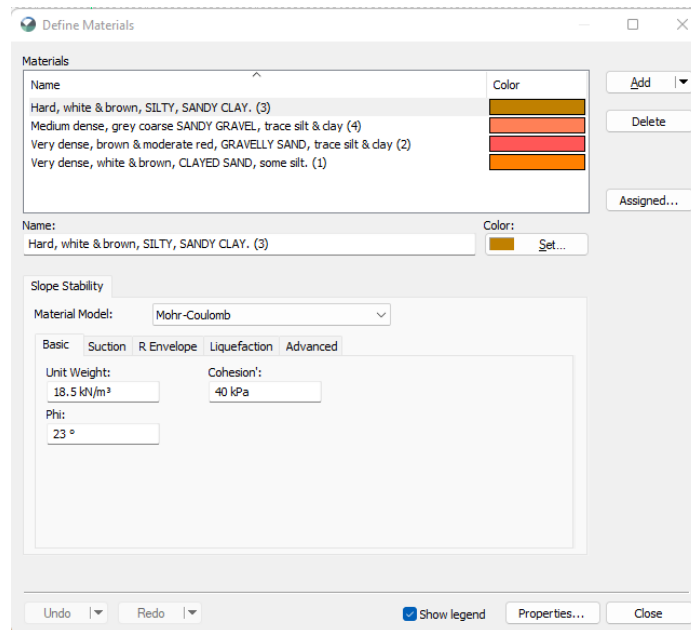
Figura 19. Talud evaluado con sus diferentes regiones



6. Definir materiales Así como en el caso de las regiones, los materiales y sus propiedades específicas también se definen a partir de la información obtenida en el estudio de la estratigrafía del suelo. Sin embargo, en esta etapa resulta fundamental incorporar los datos obtenidos a partir de perforaciones realizadas en el terreno, que permiten un análisis directo y detallado de las propiedades mecánicas del suelo en profundidad. Estas perforaciones proporcionan valores esenciales, como la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso específico del suelo, que son necesarios para evaluar con precisión el comportamiento de cada estrato bajo condiciones de carga estática.

La cohesión indica la resistencia inherente de las partículas del suelo a deslizarse entre sí, el ángulo de fricción refleja la capacidad del suelo para resistir fuerzas de corte, y el peso específico define la densidad del material, un factor crítico para calcular las cargas en el talud.

Figura 20. Definición de los distintos materiales



7. Asignación de materiales Una vez que se han definido y caracterizado los distintos materiales del talud, el siguiente paso es asignarlos adecuadamente a las diversas regiones o capas del modelo en GeoStudio. Esta asignación se realiza en función de la profundidad de cada región, de acuerdo con la estratigrafía y el perfil de suelo obtenidos previamente. Cada región del talud corresponde a una profundidad específica y presenta materiales con propiedades mecánicas particulares, como cohesión, ángulo de fricción y peso específico, los cuales son fundamentales para el análisis de estabilidad.

Figura 21. Asignación de materiales

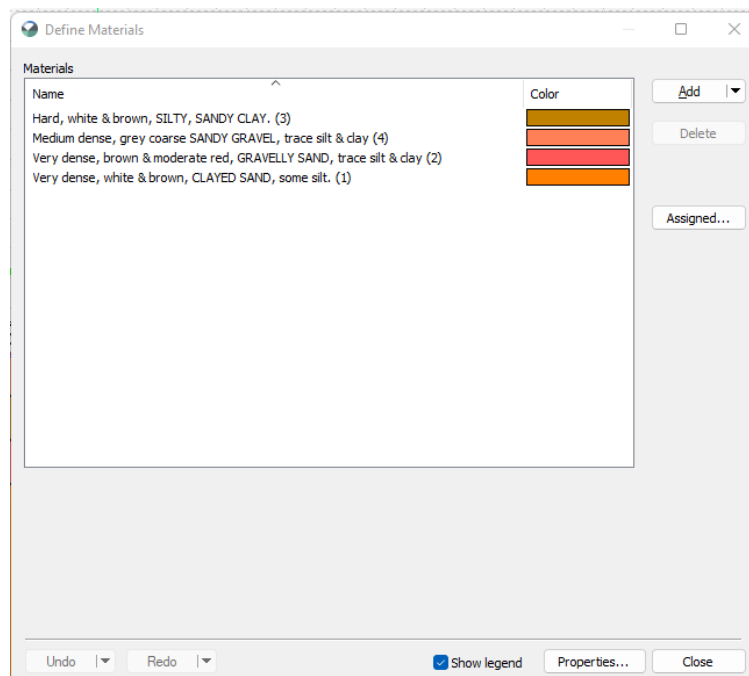
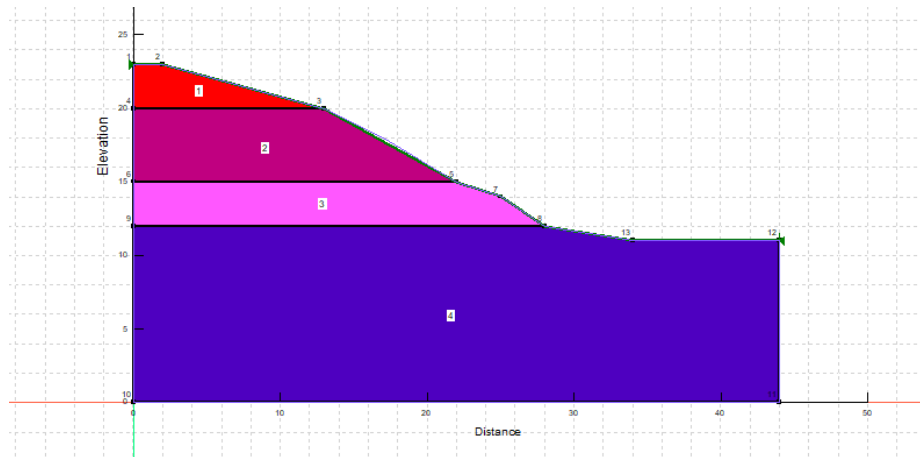


Figura 22. Talud evaluado con sus distintos materiales



8. Definir línea piezométrica De manera similar a otros parámetros críticos en el análisis de estabilidad, la línea piezométrica se obtiene a partir de los datos de la estratigrafía del suelo. La línea piezométrica representa el nivel freático o la altura a la que se encuentra el agua subterránea dentro del talud, y su correcta identificación es fundamental para evaluar cómo la presencia de agua influye en la estabilidad del terreno. Esta línea se traza en el modelo de GeoStudio con base en la información de profundidad obtenida de las perforaciones y ensayos de campo, los cuales indican la variación del nivel de agua a diferentes profundidades y ubicaciones del talud.

Figura 23. Dibujo de línea piezométrica

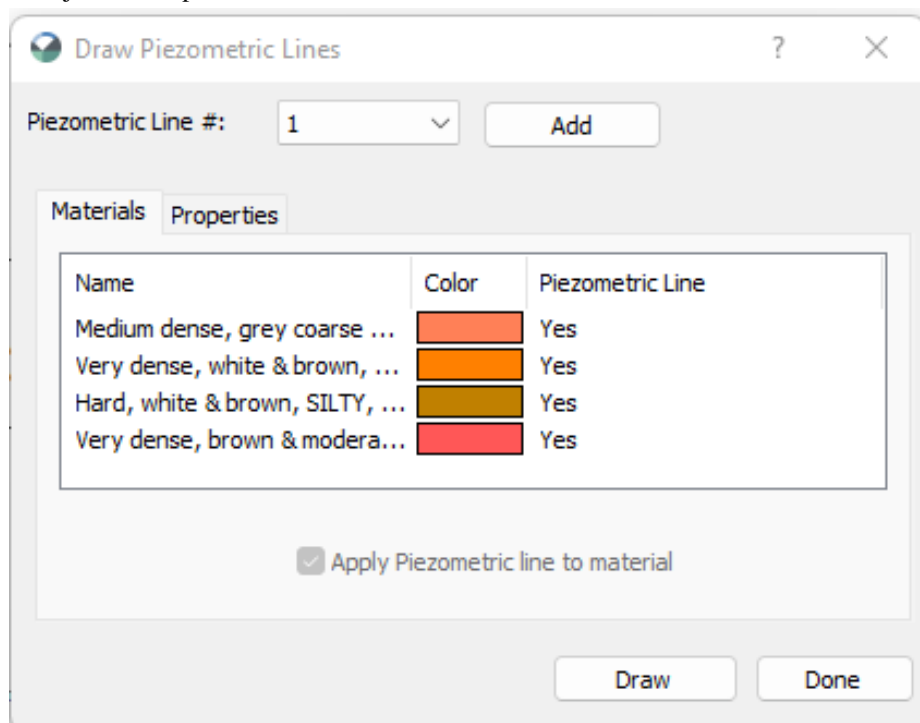
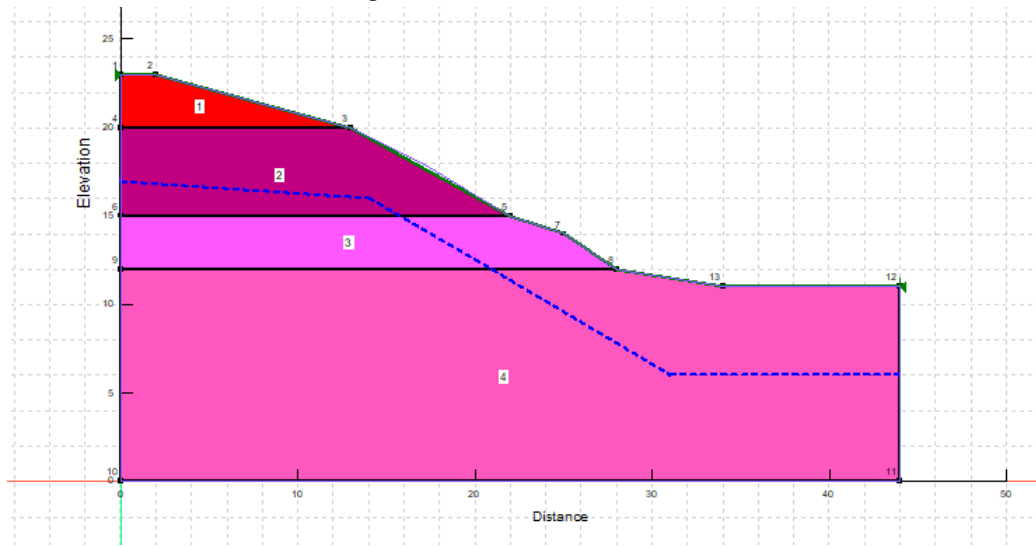


Figura 24. Talud evaluado con su línea piezométrica



9. Definir sobrecarga El trazado de la sobrecarga es un paso crucial en el cálculo del Factor de Seguridad del talud, ya que incorpora las cargas adicionales que actúan sobre la superficie del suelo. Estas sobrecargas pueden provenir de diversas fuentes externas, tales como edificios, carreteras, estructuras residenciales o cualquier otro elemento que añada peso y presión en la zona de análisis. La magnitud y ubicación de estas cargas se determinan en función de las características específicas de las estructuras y su disposición sobre el terreno.

Al incorporar las sobrecargas en el modelo de GeoStudio, se logra una representación realista de las fuerzas adicionales que afectan la estabilidad del talud. Estas cargas aumentan el esfuerzo en el suelo y pueden modificar el equilibrio de fuerzas entre la resistencia del material y las fuerzas deslizantes, lo que impacta directamente en el Factor de Seguridad.

Figura 25. Definición de la sobrecarga

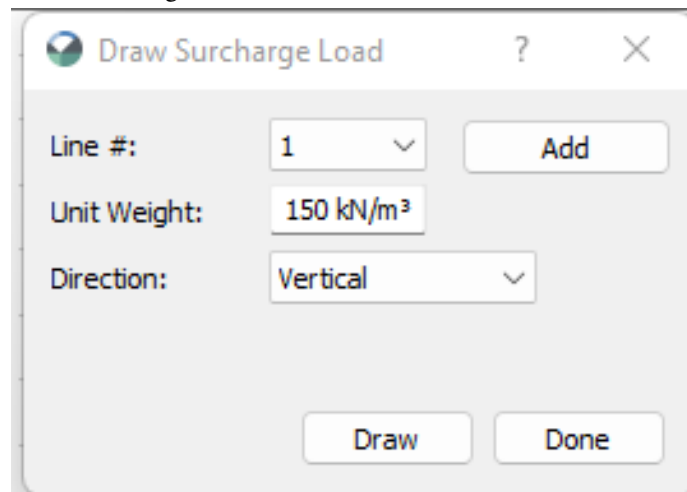
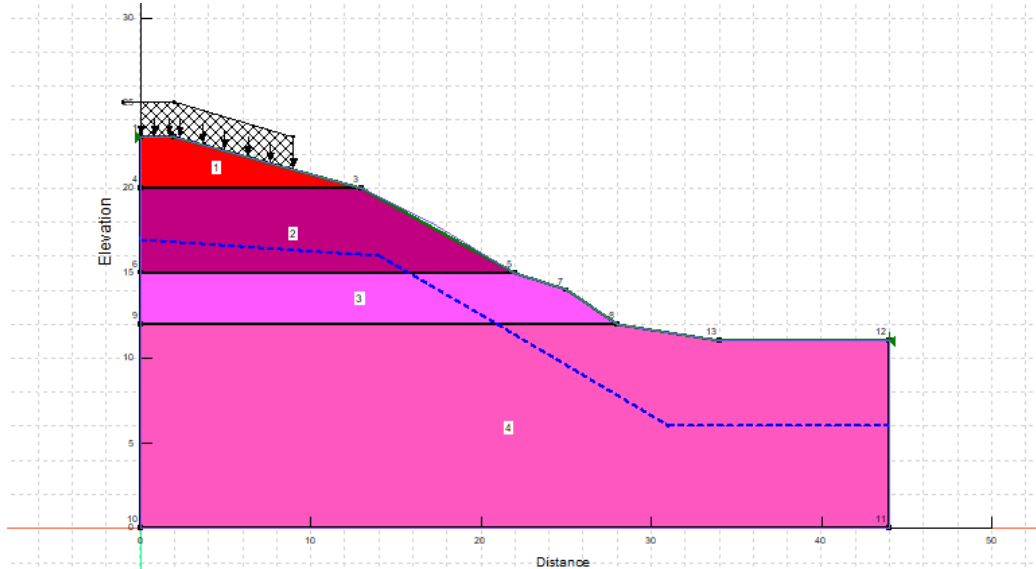


Figura 26. Talud evaluado con la sobrecarga



10. Definición del rango de superficie de deslizamiento Se establece el rango de entrada y salida de la superficie de deslizamiento como parte integral del análisis de estabilidad del talud. Este proceso implica definir los límites superiores e inferiores de la posible superficie de deslizamiento, que es la zona a través de la cual el material del talud podría desplazarse en caso de una falla. La entrada de la superficie de deslizamiento se refiere a la parte superior del talud, donde se inicia el movimiento potencial, mientras que la salida se refiere a la parte inferior, donde el material deslizante podría llegar a depositarse.

Figura 27. Rango de entrada y salida de superficie de deslizamiento

Entry Range (Left Side)			Exit Range (Right Side)		
Type:	Left Point:	Right Point:	Type:	Left Point:	Right Point:
Range	X: -9.864744 r Y: 22.9 m	X: -0.3 m Y: 22.9 m	Range	X: 23.4 m Y: 14.4 m	X: 32.6 m Y: 11.121875 m
Number of increments over range:	8		Number of increments over range:	8	
Number of radius increments:	4				
Slip Surface Projection Angle					
<input type="checkbox"/>	Use Left (Active) Projection Angle:	135 °			
<input type="checkbox"/>	Use Right (Passive) Projection Angle:	45 °			
Clear			Close		

11. Obtención de resultados Finalmente, se procede a ejecutar el modelo desarrollado en GeoStudio con el objetivo de calcular el Factor de Seguridad (FS) del talud. Este análisis es esencial para

evaluar la estabilidad del terreno, ya que permite determinar si las fuerzas que resisten el deslizamiento son mayores que las fuerzas que tienden a provocar el deslizamiento.

El Factor de Seguridad se calcula como la relación entre las fuerzas resistentes, que incluyen la cohesión del suelo y la fricción interna, y las fuerzas que empujan al talud hacia abajo, que son principalmente la gravedad y cualquier sobrecarga aplicada, como edificaciones o infraestructura. Un FS superior a 1 indica que el talud es estable, lo que significa que las fuerzas resistentes son suficientes para contrarrestar las fuerzas que lo empujan. Por otro lado, un FS inferior a 1 sugiere que el talud es inestable y que las fuerzas que actúan para causar el deslizamiento superan las que lo resisten, lo que aumenta el riesgo de fallas en el terreno.

Figura 28. Se ejecuta el modelo realizado

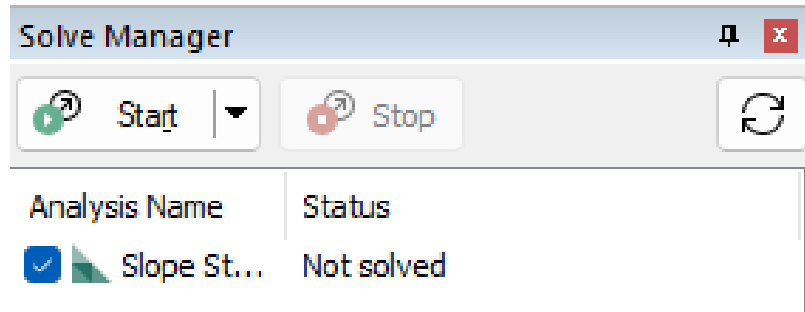
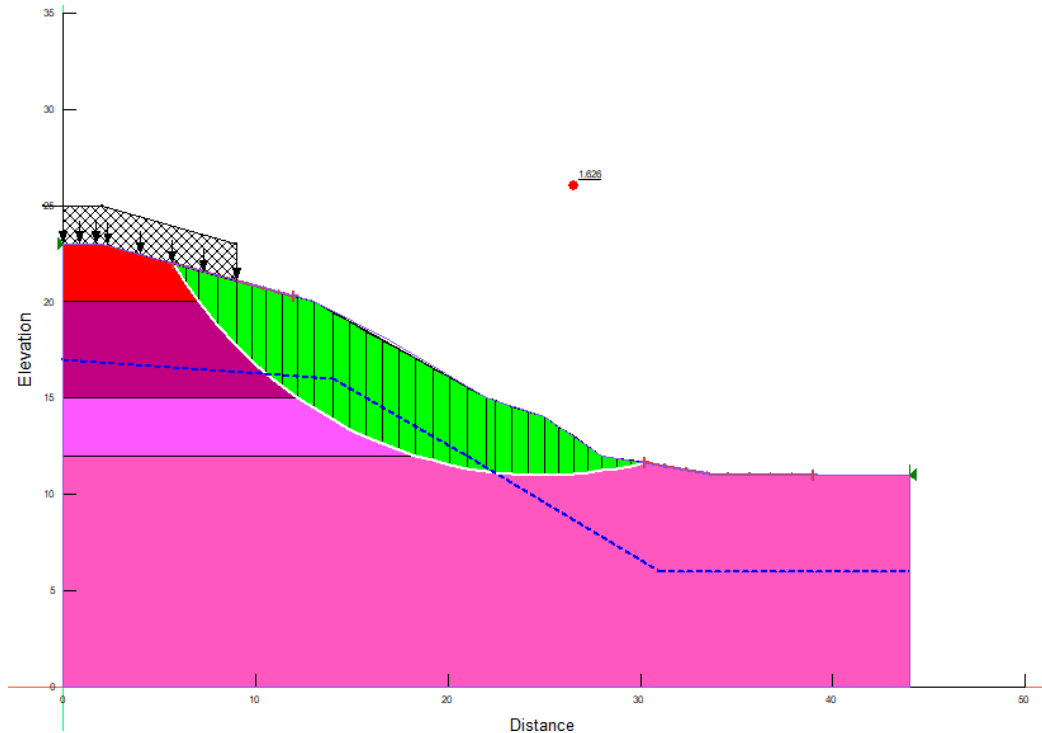


Figura 29. Resultados obtenidos (factor de seguridad)



B. Estación total - Aplicación en un caso real

1. Información de la obra

a. **Descripción** El área en estudio se ubica en el norte de Dominica, específicamente en Portsmouth. A continuación, se muestra una fotografía aérea, donde se localiza el área de estudio.

Figura 30. Ubicación geográfica del terreno



b. **Colindancias** El terreno estudiado colinda al Nor-oeste, con el mar caribe, al Nor-este con terrenos baldíos con vegetación, al Sur-oeste con terrenos baldíos con vegetación alta (árboles) y con el mar caribe, y al Sur-este con la carretera Ross Boulevard con viviendas y terrenos baldíos.

c. **Cargas y nivel de protección** Las cargas de diseño de la estructura serán: cargas muertas y vivas de diseño las cuales no sobrepasan las 15 ton/m² en promedio, las cuales se indicarán en el diseño o cálculo estructural (diseño del ingeniero especialista en estructuras), las condiciones de sitio y niveles de protección deben de ser diseñadas con un nivel de protección sísmica y para una probabilidad de sismo de diseño de 10 por ciento en 50 años.

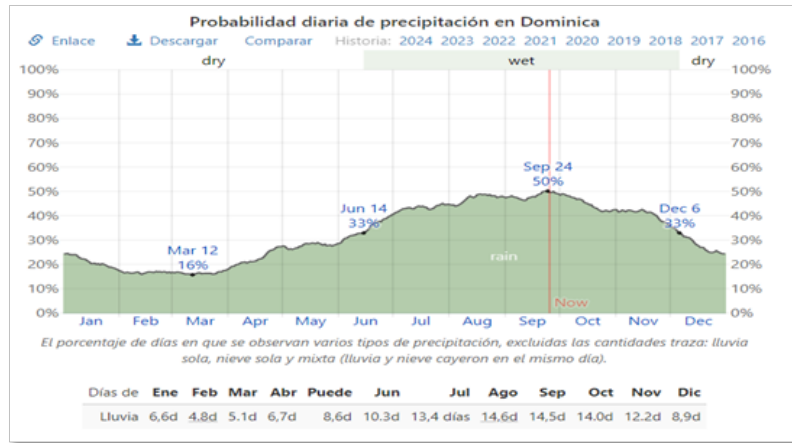
2. Información del entorno

a. **Clima** El terreno estudiado se encuentra en el norte de Dominica, junto a la costa del mar Caribe, formando parte de las islas del Caribe. Su altitud no supera los 50 metros sobre el nivel

del mar (msnm). Según datos de WEATHERSPARK, el clima en esta región es cálido y húmedo, característico de las zonas costeras. Las montañas ubicadas al sureste, con elevaciones superiores a los 500 msnm, generan variabilidad climática al causar precipitaciones cuando el aire frío del este choca con el aire cálido del oeste. Este fenómeno contribuye a que la región experimente lluvias en gran parte del año, con un promedio de 10 meses de precipitación.

El mes más lluvioso es septiembre, con un 50 por ciento de probabilidad de lluvia y un promedio de 152.4 mm de precipitación. Las precipitaciones promedio varían según la estación y los meses de lluvias, alcanzando sus picos más altos en junio y noviembre, como se muestra en la figura B-1.

Figura 31. Probabilidad diaria de precipitación en Dominica



Los vientos del área en estudio, vienen con dirección de este a oeste durante todo el año, y los meses con más velocidad del viento son junio y diciembre con velocidades promedio de 17 mph en promedio, donde debemos de recordar que en junio empieza la temporada de huracanes. ver figuras B-2 y B-3 siguientes.

Figura 32. Velocidad media del viento en Dominica

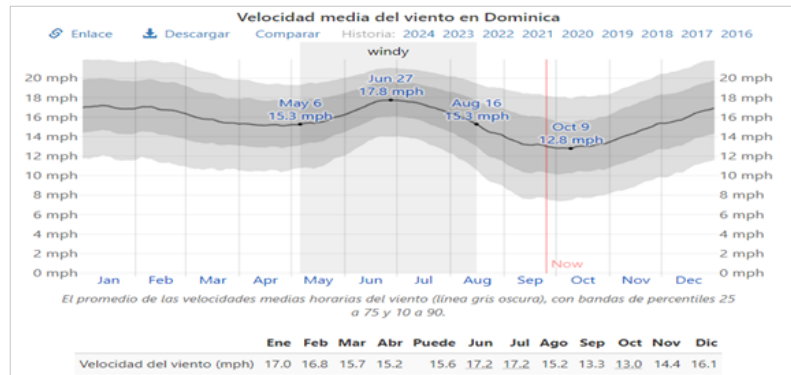
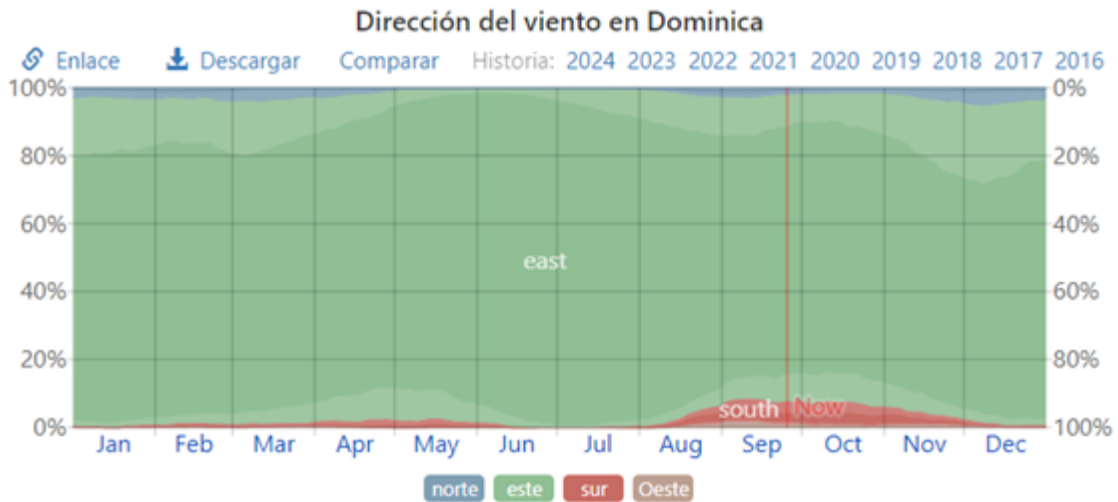


Figura 33. Dirección del viento en Dominica

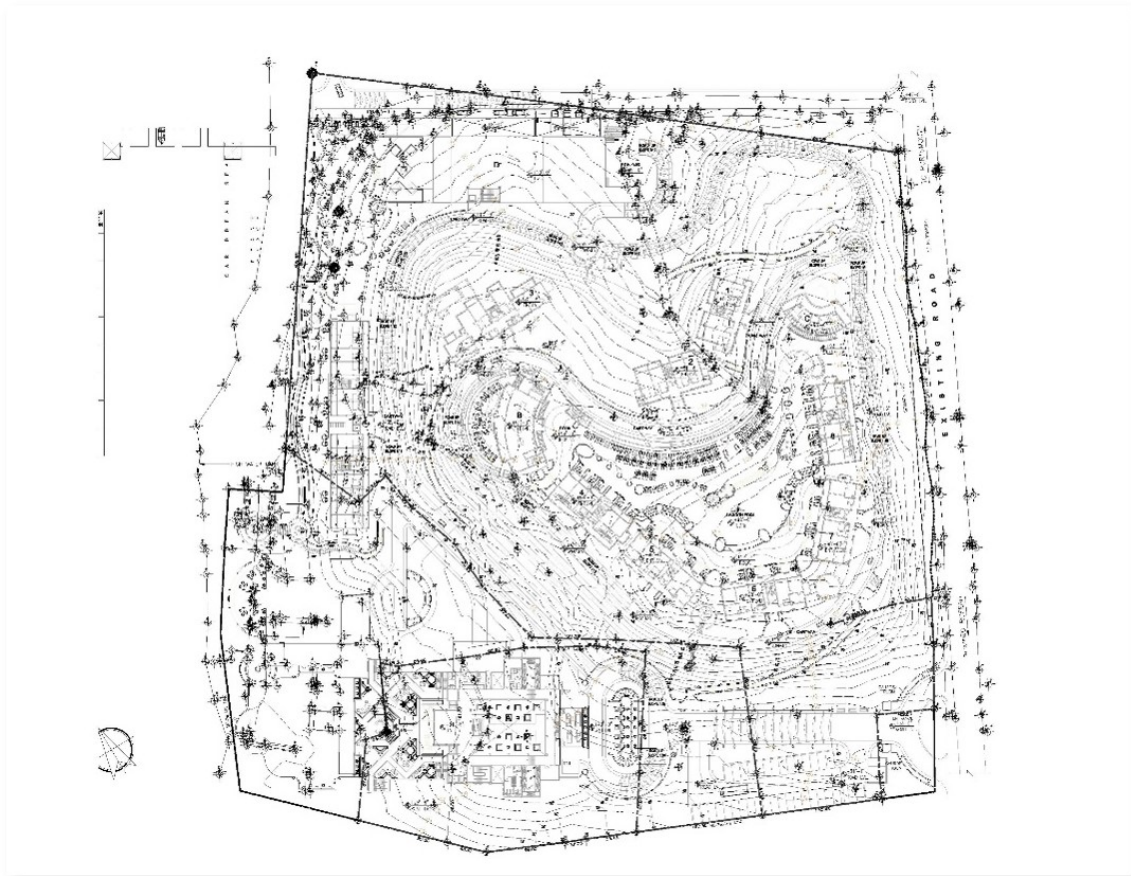


b. **Vegetación** Actualmente dentro del área en estudio se localizó vegetación o maleza con un promedio de 1.0 m de altura. Además, en otras áreas se localizan árboles y palmeras. Se estima que el terreno no fue utilizado anteriormente para ninguna obra por su topografía y el tipo de vegetación; también podemos observar que fuera del terreno en el área sur-oeste hay árboles de tamaño considerable.

c. **Topografía** El terreno en estudio se ubica en la parte norte de Dominica, a orillas del mar Caribe, como se mencionó anteriormente. Su topografía presenta una elevación central que alcanza hasta 30 metros, descendiendo gradualmente hacia los cuatro lados. En el lado oeste, el terreno desciende hasta el nivel del mar, mientras que en los otros lados desciende hasta encontrarse con las carreteras adyacentes. Este perfil crea una pequeña montaña con pendientes de hasta 40 grados de inclinación.

Dentro de esta área, se observa que el terreno posee la pendiente de 40 grados antes mencionada, la cual forma pequeños taludes que deberán considerarse en futuras construcciones. Además, el terreno se encuentra elevado respecto al nivel de calle, un factor que también deberá tomarse en cuenta para el movimiento de tierra, la instalación de drenajes y la estabilización de los taludes.

Figura 34. Topografía del terreno



C. Información geológica

1. Marco geológico general La Placa del Caribe es una placa tectónica con una superficie de 3,2 millones de km², que incluye una parte continental de la América central y constituye el fondo del Mar Caribe al norte de la costa de América del Sur. La placa del Caribe colinda con la Placa Norteamericana, la Placa Sudamericana, y la Placa de Cocos.

Como en la mayoría de bordes de placas tectónicas, en los límites de la placa del Caribe hay una actividad sísmica importante y en algunas zonas hay presencia de volcanes. El límite norte de la Placa del Caribe (LNPC) es en su mayor parte una falla de límite transcurrerte (como la falla de San Andrés en California, Estados Unidos). La parte occidental del LNPC está constituida por la falla de Motagua, que se prolonga hacia el este por la zona de falla de las Islas Swan, la Fosa del Caimán, la falla de Oriente al sur de la isla de Cuba y el norte de la Española y la fosa de Puerto Rico.

El límite este es una zona de subducción. La subducción es responsable de las islas volcánicas del arco de las Antillas Menores, desde las Islas Vírgenes hasta la costa de Venezuela. En esta zona hay 70 volcanes activos, entre ellos los de las Soufriere Hills en Montserrat, Monte Pelée de Martinica, La Grande Soufrière en Guadalupe, Soufrière Saint Vincent en San Vicente y las Granadinas, y el volcán submarino Kick-'em-Jenny que se encuentra a 10 km al norte de Granada.

Hay dos posiciones sobre el origen de la Placa del Caribe, que datan su separación a fines del

Cretácico o comienzos del Paleoceno (hace 70-60 millones de años) cuando comienzan a funcionar simultáneamente el arco de Costa Rica-Panamá y el de las Antillas. Según un grupo de científicos, esta placa corresponde a un enorme 'Plateau' originado en el punto caliente de Galápagos (Kerr et al, 1999, Kerr, 2005). Otro grupo considera que no hace falta un punto caliente para explicar su origen y puede invocarse una dorsal oceánica (Meschede and Frisch,1998) o un juego complejo de zonas de subducción (Pindell 1990, Pindell 1994).

Figura 35. Zona de estudio



2. Geología local Dominica fue la última isla que se formó en el Caribe. La isla se creó por acción volcánica hace unos 26 millones de años. Está situada sobre dos placas tectónicas opuestas. Esto explica que una isla un poco mayor que Singapur tenga montañas de casi 1.524 m. Geológicamente, Dominica forma parte del escarpado arco volcánico de las Antillas Menores. La columna vertebral central del país, un eje noroeste-sureste de empinadas laderas volcánicas y profundos desfiladeros, varía generalmente en elevación de 300 a 1.400 metros (984 a 4.593 pies) sobre el nivel del mar. Varias estribaciones montañosas de dirección este-oeste se extienden hasta la estrecha llanura costera, salpicada de acantilados marinos y con extensiones llanas que no superan los 2.000 m. El pico más alto es el Morne Diablotins, de 1.447 m; el Morne Trois Pitons, de 1.423 m, se encuentra más al sur y alberga el parque nacional.

El interior presenta montañas escarpadas de origen volcánico. El vulcanismo sigue siendo bastante evidente en la isla; los ejemplos más populares son el Lago Hirviente de Dominica y el "valle de la desolación". El lago hirviente (el segundo más grande del mundo) está dentro de un cráter y se alimenta de una cascada; se cree que la ebullición se debe al calor de una cámara de magma situada bajo el lago. El Valle de la Desolación es un valle sulfuroso de chimeneas volcánicas y fuentes termales que impide el crecimiento de muchas plantas, en marcado contraste con la selva tropical circundante. Técnicamente inactiva en la actualidad, esta caldera entró en erupción por última vez en 1880. Según los informes, la zona que explotó el 4 de enero de 1880 tenía "nueve millas cuadradas".

La escarpada superficie de Dominica está marcada por su pasado volcánico. Las formaciones rocosas son principalmente andesita volcánica y riolita, con rocas caídas y protuberancias de bordes afilados que salpican las bases de las laderas. Los suelos arcillosos y arenosos de tonos claros a oscuros, derivados de las rocas y de la vegetación descompuesta, son generalmente fértiles y porosos. Sin embargo, sólo unos pocos valles interiores y franjas costeras son lo suficientemente planos como para acumular suelos de importancia. Aunque en 1986 se registraron decenas de sacudidas sísmicas, en su mayoría leves, las erupciones volcánicas cesaron hace miles de años. Sin embargo, los manantiales sulfúricos y los respiraderos de vapor, concentrados principalmente en las zonas central y meridional de la isla, siguen activos. Uno de los mayores manantiales, el lago Hirviente, se encuentra en el parque nacional

D. Información geotécnica del terreno

1. Características de exploración La exploración del subsuelo fue llevada a cabo por medio de once (11) perforaciones mecánicas, por la empresa GEOTECH ASSOCIATES LTD. A profundidades máxima de estudio entre -5.0 mts y - 11.0 mts, con el método SPT (Standard Penetration Test), según norma ASTM 1586-99, se requirió emplear un procedimiento ya establecido, para la obtención de muestras y parámetros para cálculos de cargas admisibles, obtención de muestras para el laboratorio.

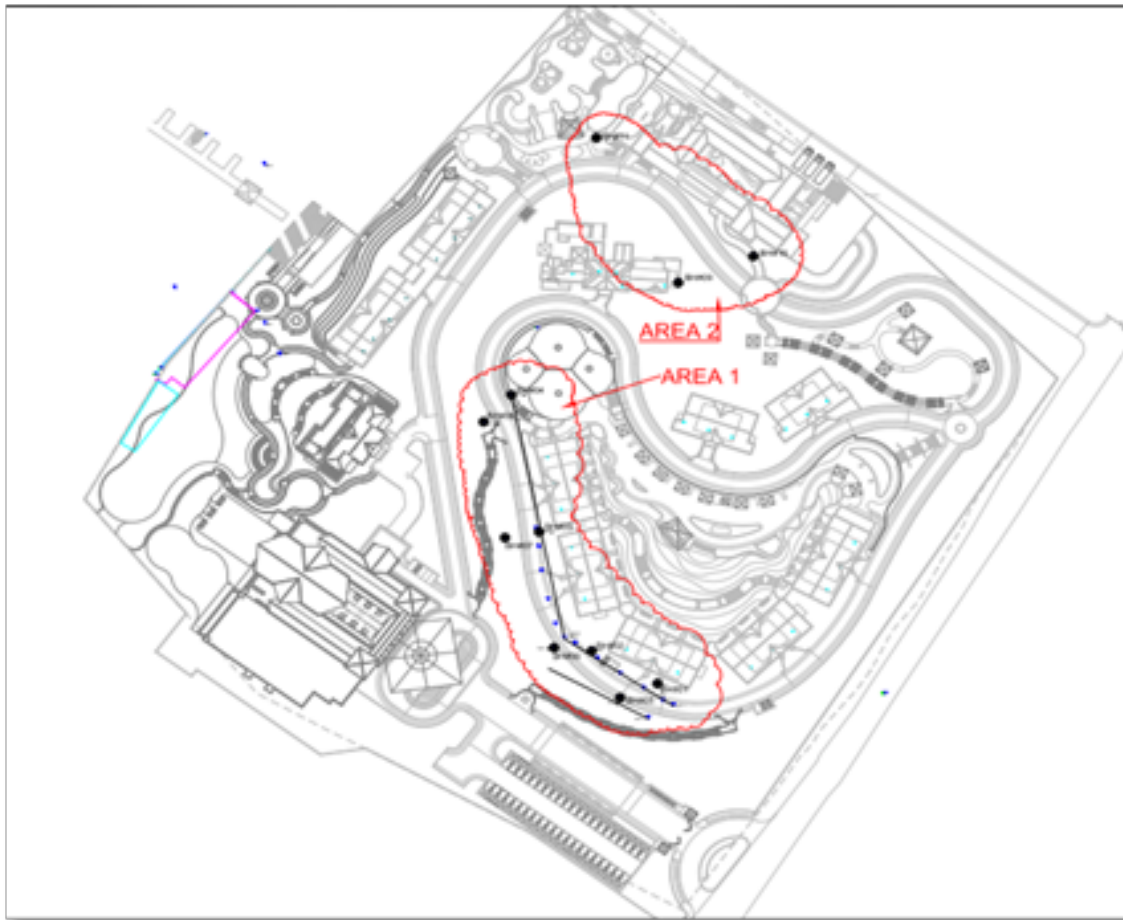
2. Caracterización geotécnica del terreno

a. **Características del subsuelo** En el terreno donde se realizaron 11 perforaciones, se identificaron varios estratos de suelo natural de espesores variables.

Durante el estudio se observaron aspectos importantes que deben ser considerados para futuras construcciones, entre ellos:

- Existen taludes en el terreno con ángulos de inclinación de hasta 40 grados, lo que requiere una evaluación cuidadosa de estabilidad.
- Se identificaron fallas en muros de contención, detalladas en el estudio de suelos, que presentan los siguientes problemas y conclusiones según el ingeniero geotécnico a cargo:
 - 1) Área 1: Las fallas en las estructuras de contención se atribuyen a la presencia de rellenos con baja compactación, lo que compromete su estabilidad.
 - 2) Área 2: Se encuentran materiales susceptibles a la erosión causada por lluvias, junto con pendientes pronunciadas que agravan la pérdida de suelo y estabilidad en estas zonas.

Figura 36. Planta de ubicación de perforaciones



Estas observaciones son críticas para la planificación de cualquier construcción en el área, dado que los problemas identificados impactan la estabilidad y durabilidad de futuras estructuras.

b. **Perfil estratigráfico** Al analizar cada perfil estratigráfico, se encontraron varios estratos bien definidos, de acuerdo al estudio realizado por GEOTECH ASSOCIATES LTD.

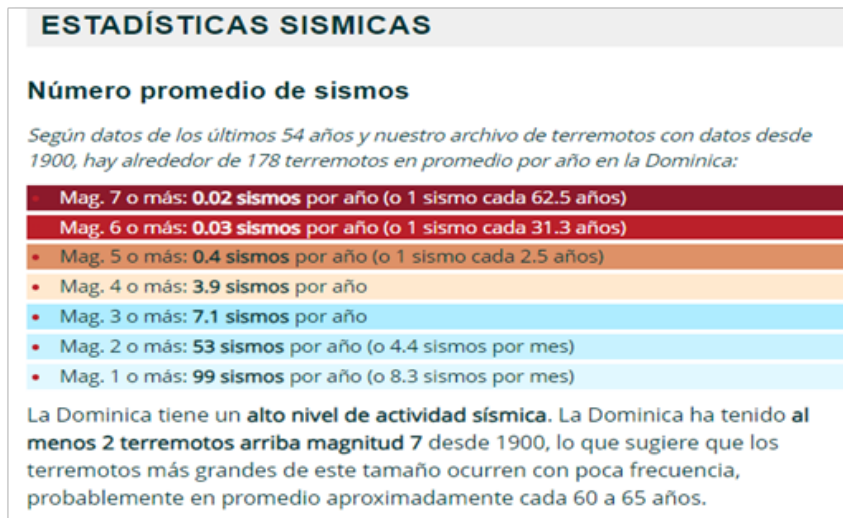
Dichos materiales son arcillas, arcillas limosas, arcillas arenosas y gravas, de mediana a alta densidad y en algunos estratos se encuentran vetas de colores café, todos estos estratos forman parte de los tipos de suelos del lugar.

c. **Amenazas geológicas** En el área de estudio se encuentran taludes de hasta 10 metros de altura con pendientes de hasta 40 grados, los cuales actualmente no son estables y representan un riesgo para las estructuras existentes debido a fallas en los muros de contención armados y deslizamientos causados por la erosión. No se detectó el nivel freático dentro de la profundidad máxima del estudio, y aunque el terreno no es susceptible a asentamientos por licuefacción, sí presenta riesgo de asentamientos por consolidación debido a compactación deficiente en los rellenos, lo que podría provocar asentamientos diferenciales.

El terreno no está en riesgo de inundación, ya que se encuentra en las elevaciones más altas del área y cuenta con pendientes que facilitan el drenaje natural. Sin embargo, es esencial que un ingeniero sanitario o hidrólogo diseñe un sistema de captación de aguas pluviales para dirigir el agua de lluvia hacia los drenajes y así evitar empozamientos, saturaciones y escorrentías que puedan afectar la estabilidad del suelo.

La ubicación de Dominica dentro de la placa del Caribe, con su límite al este a 83 km de la placa Norteamericana y al sur de la placa Sudamericana, no representa un riesgo inmediato de fallas geológicas. No obstante, es importante tener en cuenta eventos sísmicos previos, como el sismo de 5.7 grados en la escala de Richter ocurrido el 18 de octubre de 2016, al considerar futuras medidas de seguridad y monitoreo en la zona.

Figura 37. Estadísticas sísmicas



E. Análisis de estabilidad de taludes

Para el análisis estático del talud se consideró lo siguiente:

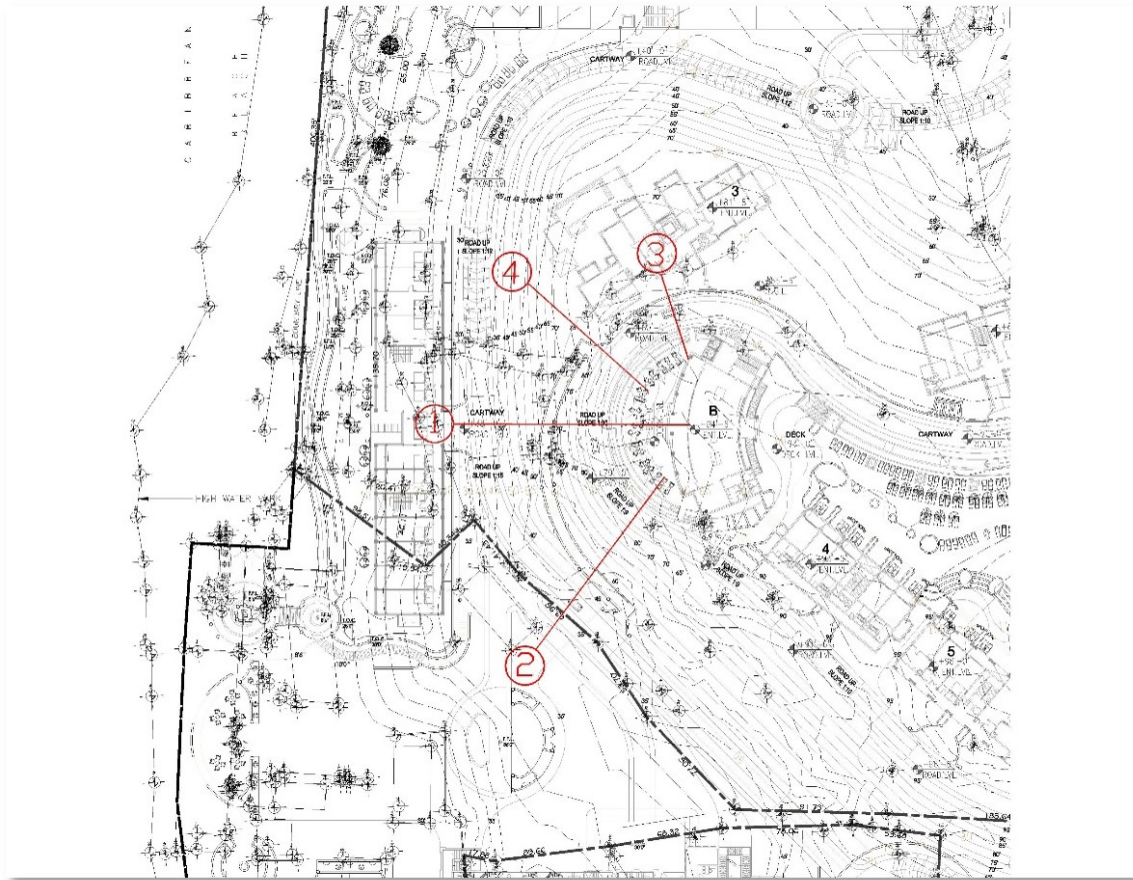
- Se efectuó el análisis del cálculo de la estabilidad de taludes, según el Método Morgenstern Y Price, utilizando el Programa GeoStudio 2018, que incorpora sismo (Horizontal 0.2 de g., Vertical 0.1 de g.) al cálculo de estabilidad de taludes.
- Para efectuar el análisis del talud, se utilizaron los datos obtenidos de las perforaciones ejecutadas por la empresa Geotech Associates Ltd. (estudio de suelos antes mencionado). Específicamente, de las perforaciones No.4 y No.8 ya que son las que se encuentran más cercanas al lugar de estudio.
- Se desarrolló el Análisis de Estabilidad según perfiles proporcionados y prediseño de conjunto, asumiendo una Carga Vertical de 150 kn/m² (Estructuras de Edificios en fase de construcción) en la corona del talud.

1. Evaluación Se llevó a cabo un análisis detallado basado en el prediseño del conjunto y en los perfiles proporcionados, obteniéndose resultados clave para la estabilidad de los taludes en el área

de estudio. Entre los perfiles analizados, el Factor de Seguridad (FS) mínimo encontrado fue de 1.337, mientras que el máximo fue de 1.987. Estos valores indican que los taludes cumplen con los requisitos de estabilidad establecidos por la norma AGIES 2018, que exige un FS superior a 1.50 en condiciones estáticas y un FS superior a 1.10 en condiciones sísmicas.

El cumplimiento de estos factores mínimos de seguridad implica que los taludes tienen una capacidad adecuada para resistir tanto las cargas estáticas habituales como los esfuerzos adicionales que se generarían durante un sismo, minimizando el riesgo de deslizamientos y fallas estructurales en la zona. Este análisis es fundamental para la planificación y diseño de futuras estructuras en el área, asegurando que los taludes proporcionen un soporte confiable bajo distintas condiciones de carga. Además, estos resultados fortalecen la confianza en la estabilidad del terreno, permitiendo avanzar con el diseño de infraestructura sin comprometer la seguridad de las edificaciones y habitantes de la zona.

Figura 38. Ubicación de secciones analizadas



2. Perfiles Los datos mecánicos del suelo, como la cohesión, el ángulo de fricción y el peso específico fueron obtenidos a partir de las perforaciones. Se emplearon únicamente los datos de las perforación No.4 y No.8 debido a que son las únicas que se encuentran en las cercanías del área evaluada.

F. Datos de perforación P-4

Figura 39. Datos de perforación P-4

Proyecto: DOMINICA

P-4

profundidad (m)	número de golpes (N)	$\gamma =$ peso suelo humedo kN/m^3	C kPa (spt)	ϕ (SPT)	Ks MN/m^2	E _s kPa	μ	K _a	K _p	C _n	N ₆₀ corregido	q _a kg/cm^2
1.0	9	18.30	35.00	21	26.95	22221.81	0.25	0.47	2.12	1.70	15	1.6
2.0	20	18.30	35.00	23	56.98	33365.20	0.25	0.44	2.28	1.62	32	3.4
3.0	22	18.30	40.00	23	51.18	31379.24	0.25	0.44	2.28	1.32	29	3.0
4.0	24	18.50	40.00	23	54.73	32599.08	0.30	0.44	2.28	1.14	31	3.3
5.0	29	18.50	44.00	25	59.10	34074.16	0.30	0.41	2.46	1.02	34	3.5
6.0	36	18.50	52.00	28	66.93	36647.67	0.30	0.36	2.77	0.93	38	4.0
7.0	38	18.90	60.00	29	72.96	38574.93	0.30	0.35	2.88	0.86	41	4.3
8.0	45	18.90	65.00	33	80.71	40990.80	0.30	0.29	3.39	0.80	46	4.8
9.0	78	18.90	65.00	33	131.75	55763.05	0.30	0.29	3.39	0.76	75	> 6

G. Datos de perforación P-8

Figura 40. Datos de perforación P-8

Proyecto: DOMINICA

P-8

profundidad (m)	número de golpes (N)	$\gamma =$ peso suelo humedo kN/m^3	C kPa (spt)	ϕ (SPT)	Ks MN/m^2	E _s kPa	μ	K _a	K _p	C _n	N ₆₀ corregido	q _a kg/cm^2
1.0	18	18.30	35.00	22	53.90	32317.40	0.25	0.45	2.20	1.70	31	3.2
2.0	20	18.30	35.00	22	56.98	33365.20	0.25	0.45	2.20	1.62	32	3.4
3.0	34	18.30	40.00	25	79.10	40493.08	0.25	0.41	2.46	1.32	45	4.7
4.0	39	18.50	40.00	28	88.93	43493.16	0.30	0.36	2.77	1.14	50	5.3
5.0	45	18.50	44.00	30	91.70	44324.53	0.30	0.33	3.00	1.02	52	5.5
6.0	49	18.50	52.00	30	91.10	44145.69	0.30	0.33	3.00	0.93	52	5.4
7.0	49	18.90	60.00	33	94.09	45034.34	0.30	0.29	3.39	0.86	53	5.6
8.0	57	18.90	65.00	33	102.23	47427.62	0.30	0.29	3.39	0.80	58	6.1

Debido a la proximidad entre ambas perforaciones, los datos obtenidos presentan una alta similitud en sus características geotécnicas (peso específico, cohesión y ángulo de fricción). Esta semejanza se debe a distintos factores clave, como la composición estratigráfica, los niveles de humedad, la densidad y las resistencias mecánicas, lo cual sugiere que ambas perforaciones están representando condiciones del terreno muy parecidas. La similitud en los datos es útil para validar la consistencia de los resultados y brinda una base más sólida para el análisis, reduciendo la necesidad de realizar ajustes significativos en el diseño.

a. **Análisis estático** Resultados obtenidos para el Factor de Seguridad, empleando un análisis sísmico.

Figura 41. Perfil estratigráfico No.1 - Modelado en GeoStudio

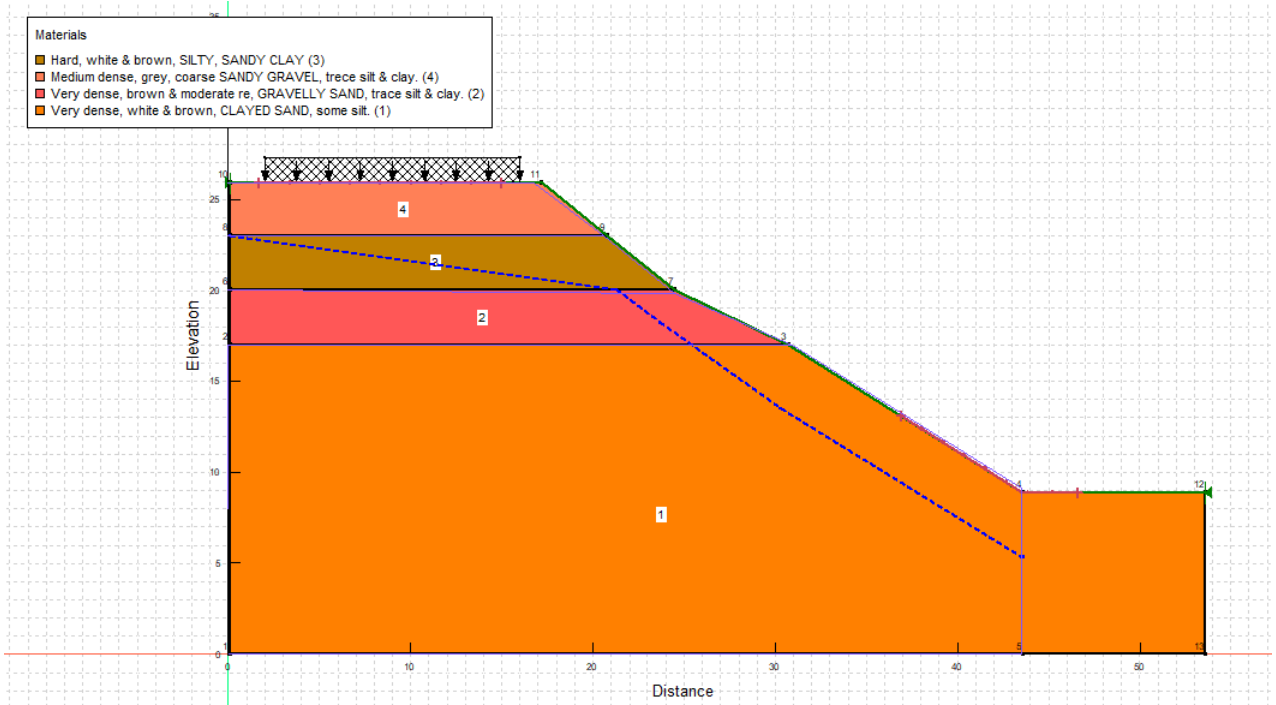
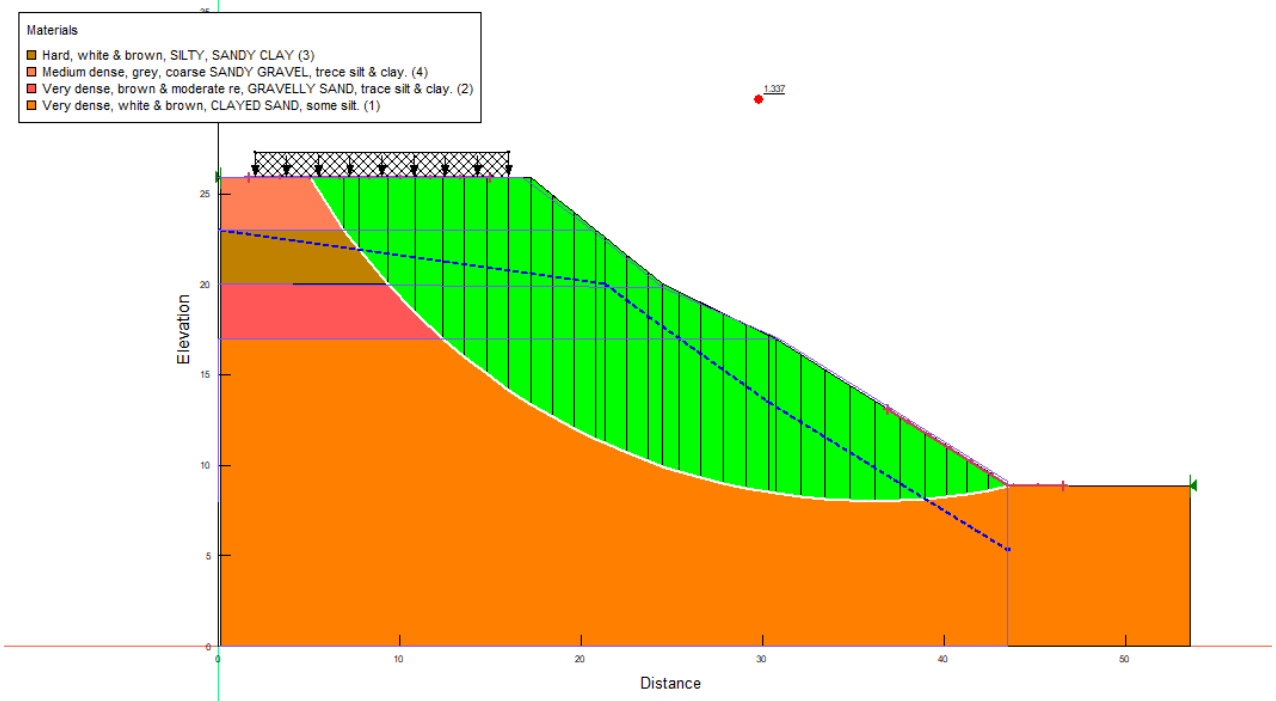


Figura 42. Perfil estratigráfico No.1 - Factor de seguridad



Para el perfil No. 1, el Factor de Seguridad calculado es de 1.337, lo que indica que el talud es estable. Este valor del Factor de Seguridad refleja que las fuerzas resistentes que impiden el desli-

zamiento son mayores que las fuerzas que generan el volteo o deslizamiento del talud. En términos prácticos, un Factor de Seguridad superior a 1 implica que el talud tiene suficiente capacidad para soportar las cargas aplicadas sin riesgo inmediato de falla. Este nivel de estabilidad es de suma importancia para garantizar la seguridad de las estructuras cercanas al talud y minimizar el riesgo de deslizamientos en la zona evaluada.

Figura 43. Perfil estratigráfico No.2 - Modelado en GeoStudio

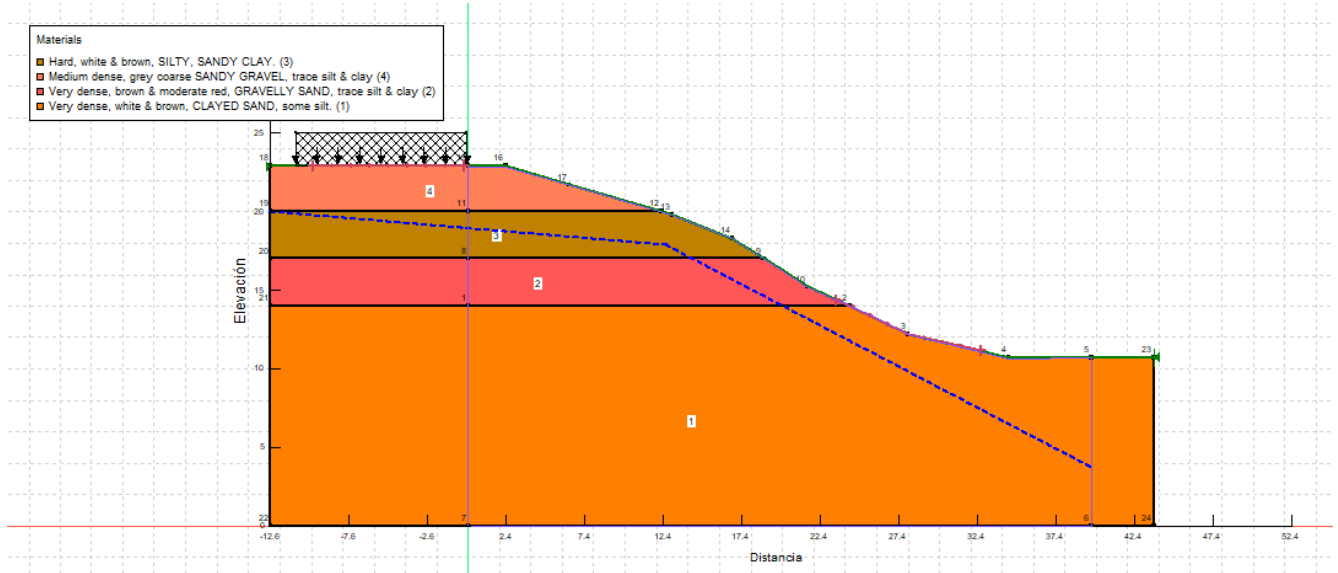
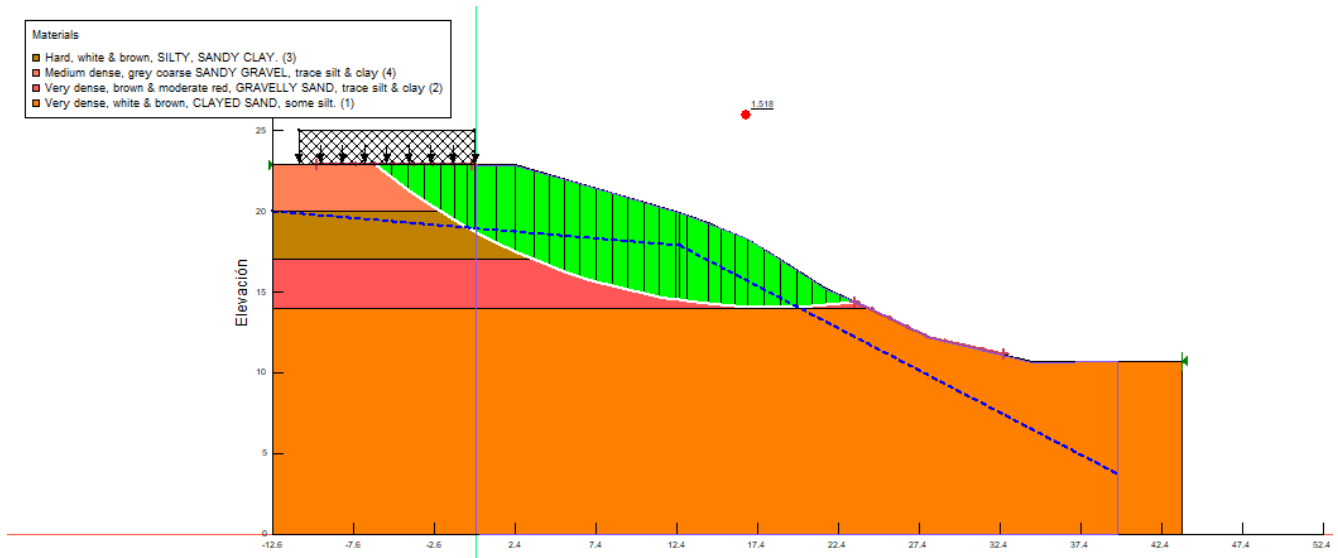


Figura 44. Perfil estratigráfico No.2 - Factor de seguridad



En el perfil No. 2, el Factor de Seguridad calculado es de 1.518, lo cual confirma que el talud es estable. Este valor indica que las fuerzas resistentes del suelo superan de manera adecuada las fuerzas deslizantes, proporcionando un margen de seguridad confiable.

Figura 45. Perfil estratigráfico No.3 - Modelado en GeoStudio

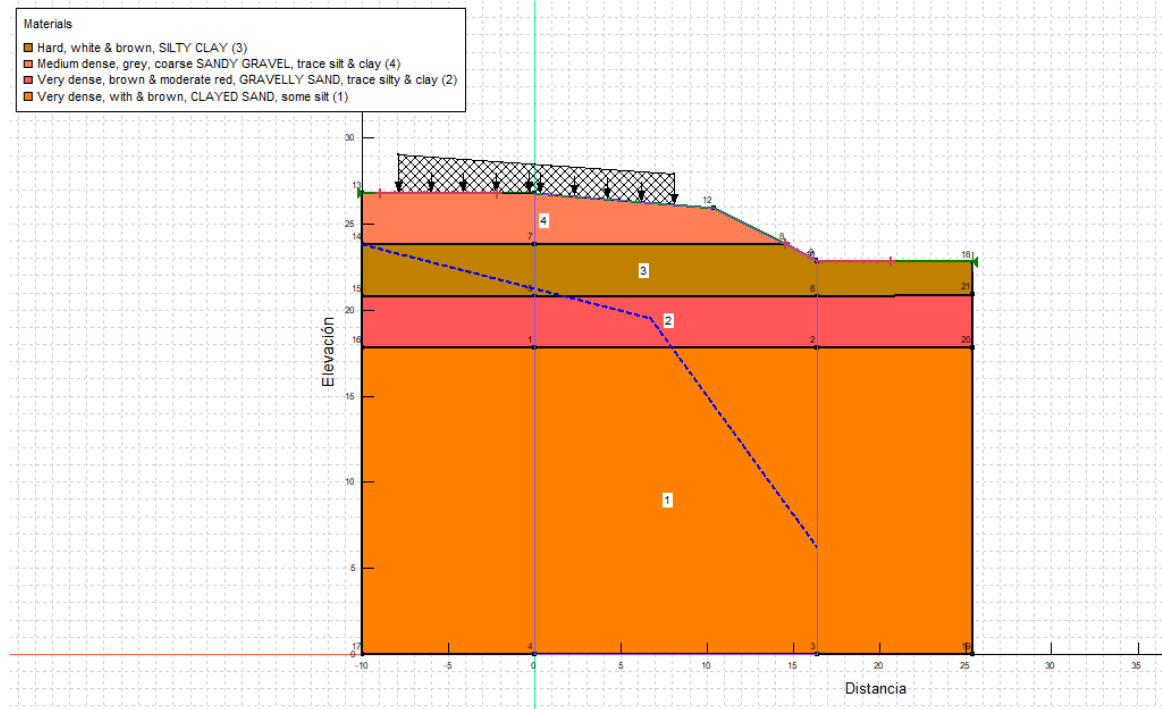
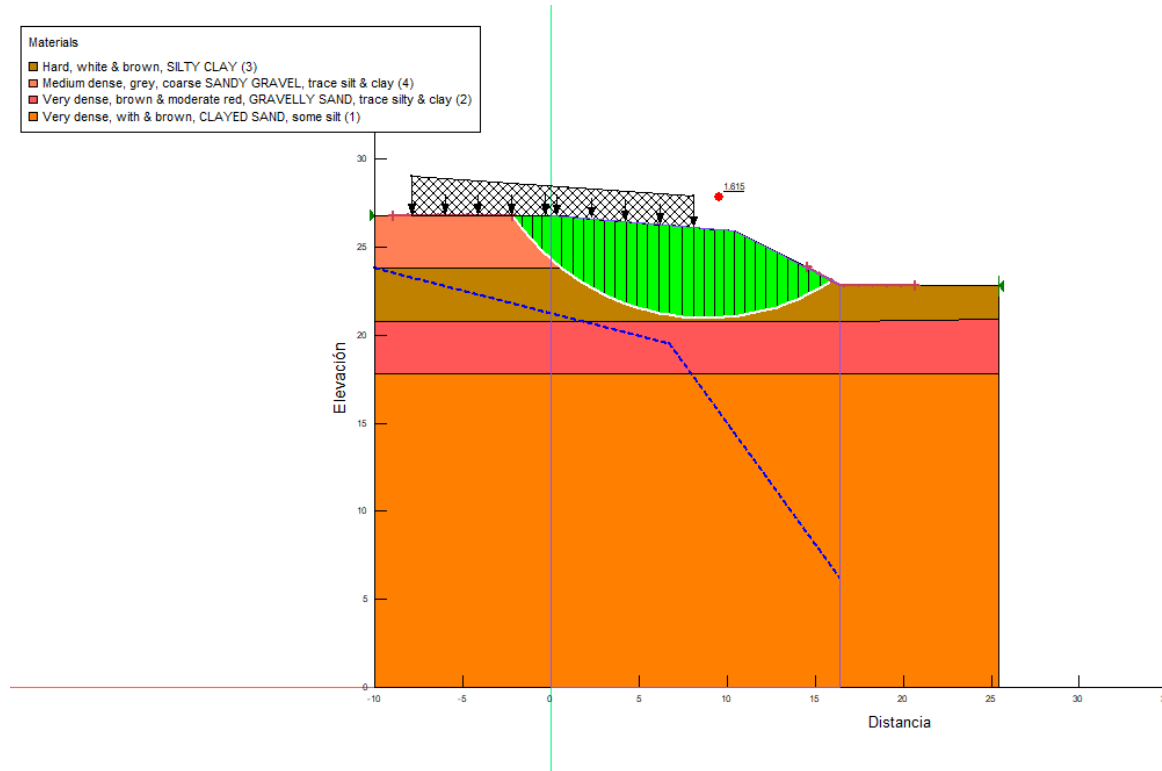


Figura 46. Perfil estratigráfico No.3 - Factor de seguridad



En el perfil No. 3, el Factor de Seguridad calculado es de 1.615, lo que indica una estabilidad

sólida en el talud. Este valor refleja que las fuerzas resistentes en esta sección superan ampliamente las fuerzas deslizantes, proporcionando un margen adicional de seguridad.

Figura 47. Perfil estratigráfico No.4 - Modelado en GeoStudio

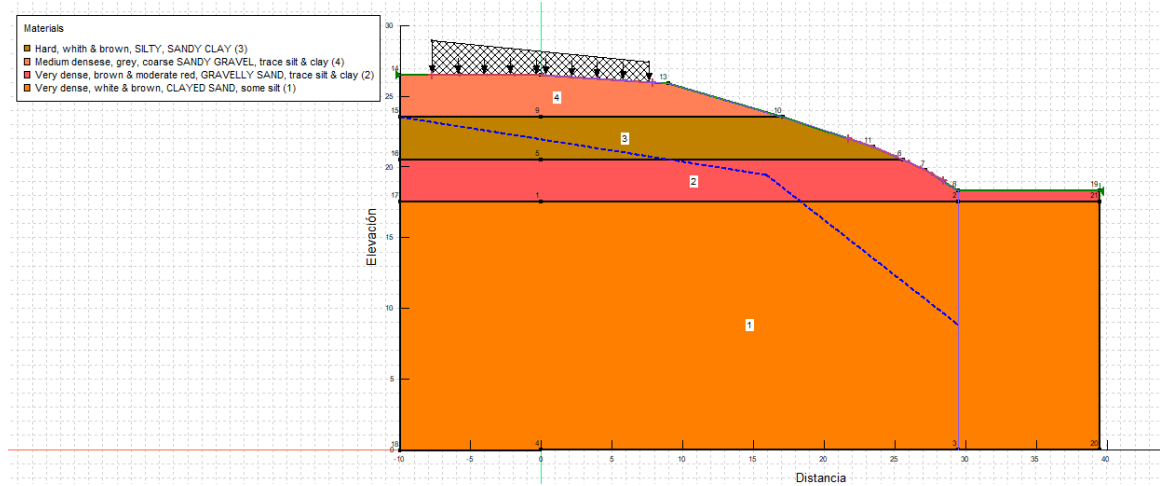
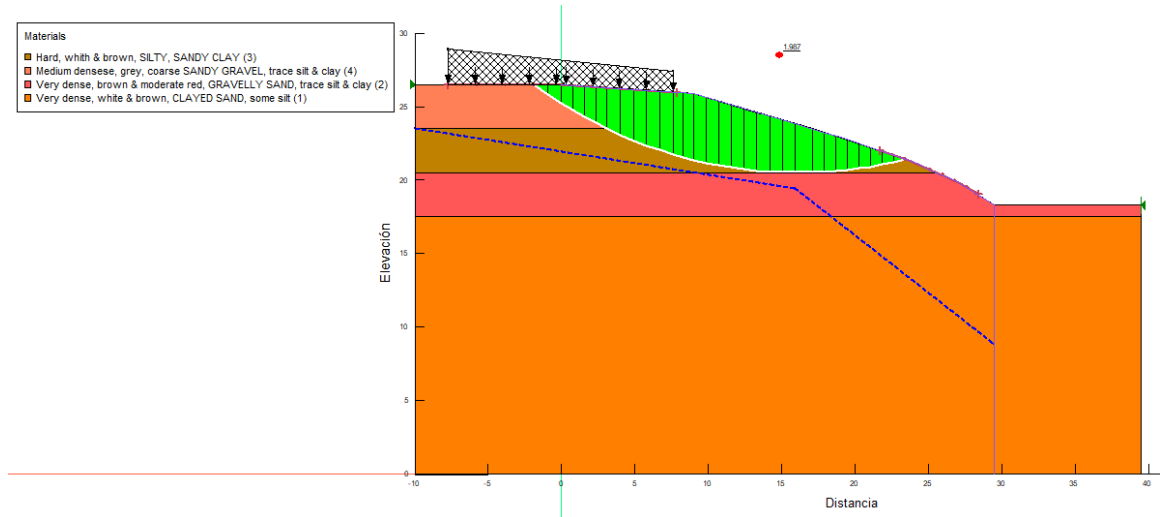


Figura 48. Perfil estratigráfico No.4 - Factor de seguridad



Finalmente, para el perfil No. 4, el Factor de Seguridad calculado es de 1.987, lo que indica una estabilidad excepcional en esta sección del talud.

El cálculo del Factor de Seguridad (FS) para los cuatro perfiles se puede realizar utilizando los datos topográficos detallados proporcionados por una estación total. En cada uno de los perfiles evaluados, el FS indica una estabilidad adecuada en la zona. Gracias a la precisión de los datos obtenidos con la estación total, el software puede calcular un FS ajustado a las condiciones reales de cada perfil, permitiendo así una evaluación confiable de la estabilidad del terreno.

H. Inclinómetro

A diferencia de los resultados obtenidos con la estación total, el uso del inclinómetro permite medir desplazamientos horizontales del talud, información crucial para evaluar posibles deslizamientos. Los inclinómetros son una de las principales herramientas para detectar y cuantificar movimientos en taludes, ya que miden directamente el desplazamiento en profundidad, proporcionando datos precisos sobre el comportamiento del terreno a lo largo del tiempo.

El inclinómetro utilizado en este estudio es el sistema digital Digitilt AT, con un rango de profundidad de hasta 25 metros. Este equipo cuenta con dos componentes, denominados Eje A y Eje B, que miden los desplazamientos en diferentes direcciones. El Eje A captura el desplazamiento horizontal del talud hacia el rostro o la cara del mismo, mientras que el Eje B mide los desplazamientos perpendiculares a esta dirección, proporcionando una visión integral de los movimientos dentro del terreno.

Cuadro 8

Especificaciones del Inclinómetro Digitilt AT (DGSI, 2018).

	Metric
Tilt Sensors	MEMS x 2
Wheel Base	500 mm
Range	$\pm 30^\circ$
Resolution	0.005 mm
Repeatability	$\pm 0.003^\circ$
Temp Rating	-20 to +70°C
Material	Acero Inoxidable

Las mediciones con el inclinómetro se realizaron en las siguientes fechas:

- 22 de marzo de 2024
- 2 de abril de 2024
- 8 de abril de 2024
- 5 de mayo de 2024
- 3 de junio de 2024

Para determinar el desplazamiento acumulado del talud, se utiliza una lectura inicial de referencia, contra la cual se comparan todas las lecturas posteriores. Esto permite identificar cambios incrementales y patrones de desplazamiento a lo largo del tiempo, fundamentales para evaluar la progresión de cualquier movimiento en el talud. Los datos obtenidos son analizados y graficados en función de la profundidad para visualizar el comportamiento del terreno en cada nivel.

En la representación gráfica, el eje X indica los desplazamientos horizontales acumulados en milímetros o centímetros, y el eje Y muestra la profundidad de las mediciones en metros. Este tipo de análisis permite una interpretación precisa del perfil de desplazamiento en el talud, facilitando la identificación de zonas críticas donde los desplazamientos pueden estar concentrados y ayudando en la planificación de medidas preventivas para garantizar la estabilidad de la zona en cuestión.

Figura 49. Lectura del inclinómetro - Eje A

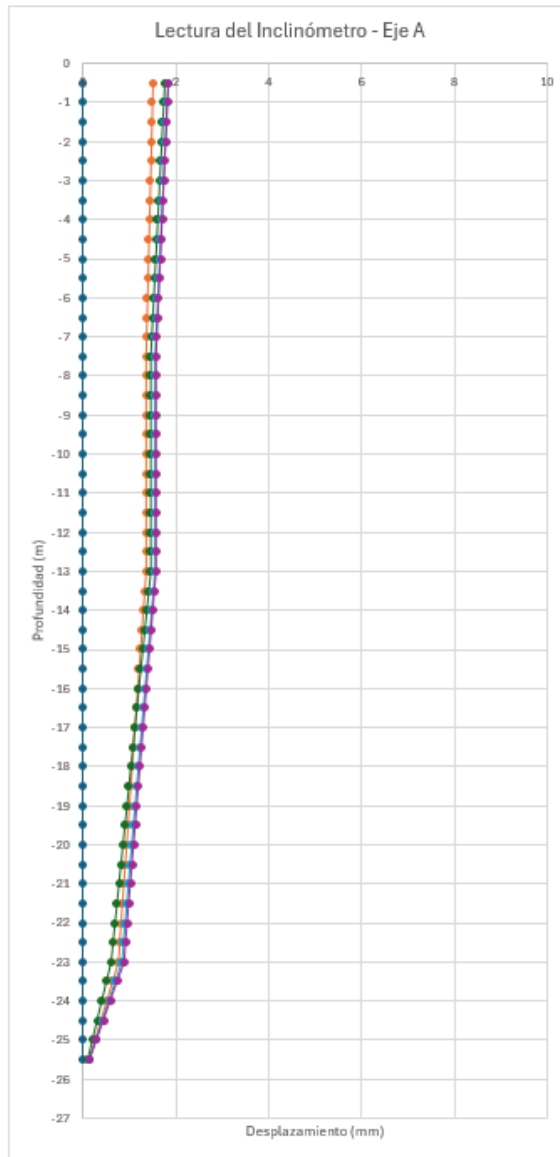
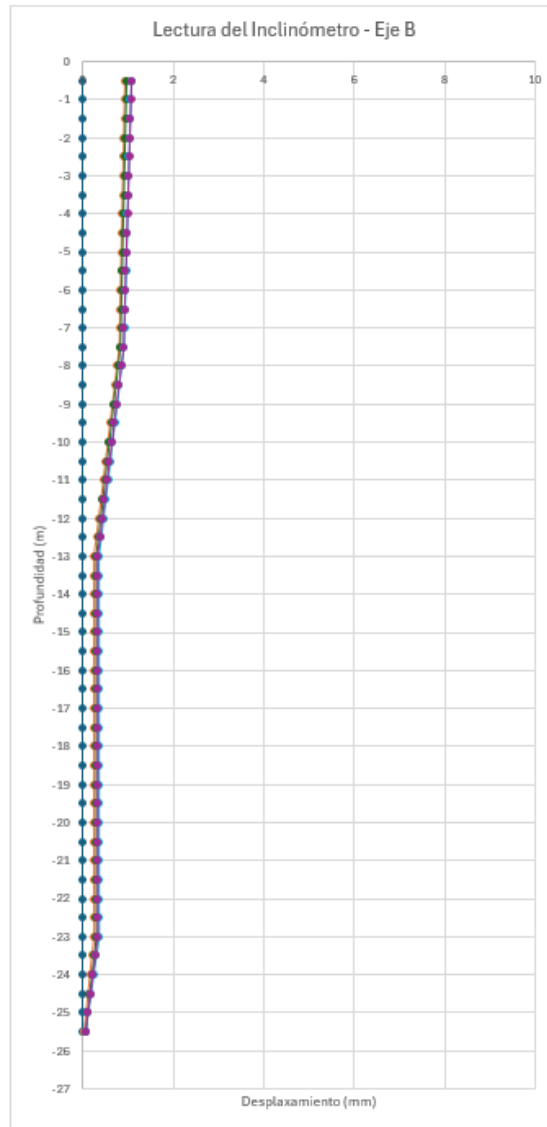


Figura 50. Lectura del inclinómetro - Eje B



Se observa que en ambos ejes el desplazamiento máximo se presenta en la corona del talud, donde se registraron desplazamientos de hasta 2 mm en comparación con la lectura inicial. A medida que aumenta la profundidad de las mediciones, el desplazamiento disminuye progresivamente, lo cual sugiere que la mayor movilidad se concentra en las capas superficiales del talud. Esto indica una mayor estabilidad en las capas más profundas, donde el suelo muestra una menor tendencia al movimiento.

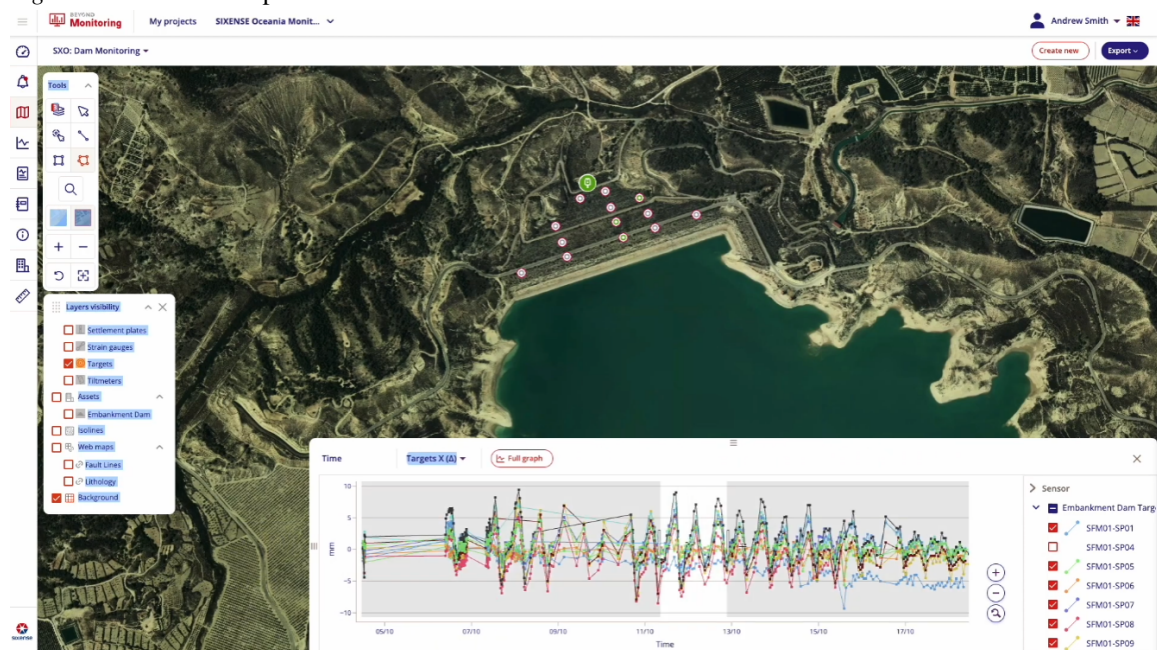
La localización del mayor desplazamiento en la corona puede deberse a factores como la exposición a condiciones atmosféricas, erosión superficial, o la falta de confinamiento, que hacen que las capas superiores sean más susceptibles a cambios. La disminución del desplazamiento en profundidad, en cambio, es un indicativo positivo de estabilidad en las capas inferiores, lo cual es fundamental para la integridad del talud en su conjunto. Este comportamiento sugiere que los esfuerzos de control de estabilidad deberían enfocarse especialmente en las áreas superiores del talud para mitigar posibles movimientos y preservar la estabilidad global de la estructura.

I. Beyond Monitoring

Beyond Monitoring es un software desarrollado por Sixsense que permite la gestión de información en tiempo real sobre proyectos de ingeniería y el entorno que los rodea. Esta plataforma es una herramienta avanzada para la toma de decisiones, diseñada para anticiparse a riesgos geotécnicos, ambientales y estructurales. Su versatilidad permite su uso tanto en proyectos de pequeña escala, empleando un número reducido de sensores, como en proyectos de gran magnitud, donde puede integrar miles de sensores simultáneamente. (Tabani, 2020)

La plataforma está optimizada para proyectos que emplean diversas metodologías de análisis y monitoreo, facilitando así una integración coherente de datos. Beyond Monitoring utiliza Sistemas de Información Geográfica (SIG) para una navegación eficiente y representación visual precisa de los proyectos. El uso de SIG facilita el manejo de grandes volúmenes de información georreferenciada, que está disponible para el usuario a un clic de distancia. Con esta tecnología, la creación de perfiles y secciones transversales del terreno es rápida y sencilla: basta con seleccionar el área de interés, y el software, en conjunto con los sensores instalados, genera perfiles en cuestión de segundos. (Tabani, 2020)

Figura 51. Creación de perfiles

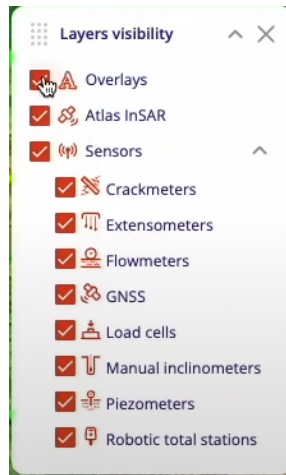


El software también permite visualizar líneas de contorno ISO y mapas de calor, proporcionando una comprensión más profunda y visualmente accesible de los datos recolectados. Beyond Monitoring implementa múltiples capas de información (layers) que muestran la ubicación de sensores y sus mediciones, incluyendo detalles como fecha de calibración, profundidad de medición, fecha de instalación, marca y modelo del equipo, entre otros. Esta información detallada está disponible de forma remota, optimizando la toma de decisiones al brindar acceso continuo a datos críticos del proyecto. (Tabani, 2020) Entre las layers más importantes, se destacan:

- Extensómetros

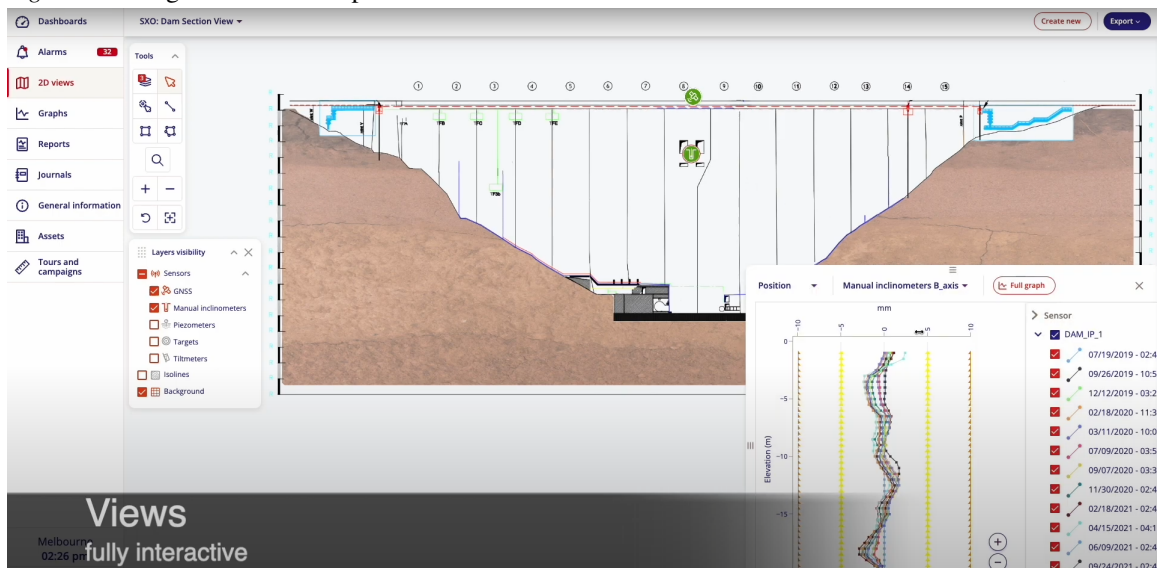
- Inclinómetros
- Placas de asentamiento
- Fisurómetros
- Piezómetros

Figura 52. Distintos equipos que integra Beyond Monitoring



Además, Beyond Monitoring permite a los usuarios subir vistas personalizadas de la zona de estudio, lo que facilita una representación visual precisa del área de monitoreo y la ubicación exacta de cada sensor. Estas vistas también pueden incluir gráficas y datos específicos del área de estudio, mejorando la interpretación y análisis de la información recolectada. (Tabani, 2020)

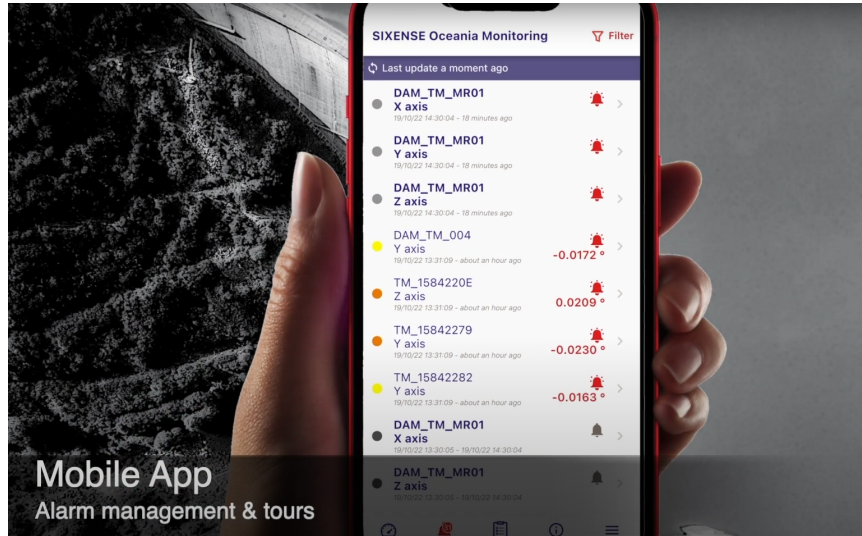
Figura 53. Integración de vistas personalizadas



Una de las características más destacadas de Beyond Monitoring es su capacidad para enviar alertas automáticas cuando los datos de algún sensor superan los límites establecidos. Esto optimiza

el monitoreo de áreas vulnerables, permitiendo una respuesta rápida ante cualquier riesgo potencial, como deslizamientos. Las alertas pueden filtrarse por fecha, tipo de alarma, instrumento y ubicación. Además, pueden visualizarse desde dispositivos móviles a través de una aplicación, lo que facilita el monitoreo sin necesidad de una computadora. (Tabani, 2020)

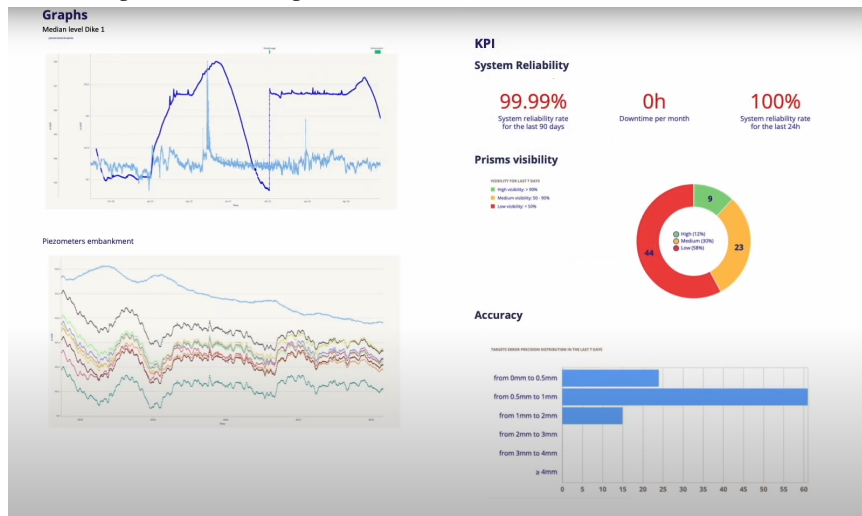
Figura 54. Visualización de alarmas



Para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos y la calidad de los datos, Beyond Monitoring permite programar visitas de mantenimiento periódicas, lo que ayuda a mejorar la productividad y la precisión de las mediciones. (Tabani, 2020)

El software también facilita la generación de reportes detallados que incluyen gráficos, precisión y exactitud de los sensores, y otra información adicional importante. Adicionalmente, cuenta con un tablero en tiempo real que muestra información esencial para la evaluación continua del proyecto, optimizando la eficiencia del monitoreo y la seguridad del área supervisada. (Tabani, 2020)

Figura 55. Información presentada en reportes



Al rededor del mundo Beyond Monitoring a empezado a ser utilizado debido a su facilidad en el manejo de información. Se ha utilizado en proyectos como en el Circuito ferroviario suburbano de Melbourne, Australia. Este protect es una red ferroviaria orbital que conectará suburbios a 15-25 kilómetros del distrito central de negocios (CBD), en un recorrido de aproximadamente 90 kilómetros. Esta infraestructura reducirá tiempos de viaje y aliviará la congestión, al enlazar áreas clave sin pasar por el centro. (Tabani, 2020)

En la primera etapa, que conecta Cheltenham con Box Hill y ya está en construcción, Sixense realiza un monitoreo detallado de la zona mediante tecnología Atlas-InSAR de media y alta resolución. Además, se han instalado Reflectores Artificiales de Esquina (ACR) en áreas críticas o de difícil acceso, lo que permite recolectar datos más precisos y detectar posibles movimientos del suelo o impactos estructurales. (Tabani, 2020)

Entre los beneficios del uso de Beyond Monitoring, se encuentran:

- Mitigación de riesgos
- Mayor información con menor cantidad de datos
- Versatilidad
- Equipo con 25 años de experiencia

J. Comparativo

Comparación metodologías			
Aspecto	Estación total	Inclinómetro	Beyond Monitoring
Función principal	Es empleado para la medición de distancias, ángulos y coordenadas de puntos topográficos con el objetivo de realizar mapas.	Monitoreo de desplazamientos horizontales, detectando movimientos internos para asegurar la estabilidad del talud.	Gestión avanzada de datos en tiempo real, integrando una gran cantidad de sensores e información geotécnica y estructural para el monitoreo de riesgos.

Continúa en la siguiente página

Comparación metodologías (continuación)			
Aspecto	Estación total	Inclinómetro	Beyond Monitoring
Ventajas	Alta precisión en la captura de datos topográficos, permite generar perfiles detallados en software como Civil 3D y GeoStudio. Ideal para estudios topográficos y evaluaciones de estabilidad iniciales.	Mide desplazamientos internos del talud con gran precisión, ideal para monitoreo de taludes con riesgo de deslizamiento. Además, permite análisis de estabilidad en profundidad.	Ofrece datos en tiempo real y visualización avanzada mediante perfiles, líneas ISO, mapas de calor y capas de información, lo que facilita la interpretación de condiciones geotécnicas en tiempo real, sin necesidad de visitar los proyectos. Ideal para proyectos grandes o complejos.
Desventajas	Limitado para monitorear desplazamientos internos y no permite medir movimientos a lo largo del tiempo sin una medición constante. Únicamente permite realizar análisis estáticos.	Dependiendo del equipo a utilizar, posee un alcance de profundidad limitado y solo determina los desplazamientos horizontales.	Requiere una configuración y gestión avanzada, y es costoso para proyectos de menor tamaño. Adicional a esto, su desempeño depende de la cantidad y calidad de los sensores instalados.
Uso en proyectos	Esencial para estudios topográficos iniciales, modelado de áreas y diseños de infraestructura donde se necesita precisión en las medidas de distancias y ángulos.	Ideal para monitoreo en áreas de alto riesgo de deslizamiento, ya que ofrece datos precisos de desplazamiento en profundidad y ayuda a anticipar fallas.	Ideal para proyectos de gran escala con monitoreo continuo, como grandes infraestructuras, donde es crucial anticiparse a riesgos geotécnicos y tomar decisiones en tiempo real.

Continúa en la siguiente página

Comparación metodologías (continuación)			
Aspecto	Estación total	Inclinómetro	Beyond Monitoring
Alerta de riesgos	No incluye sistema de alertas; requiere que el equipo regrese al sitio para nuevas mediciones o análisis de cambios.	Sin capacidad de alerta en tiempo real; se requiere monitoreo constante y manual de los datos para detectar posibles problemas.	Sistema de alertas automático que notifica a los usuarios cuando los datos de algún sensor superan los límites permisibles; las alertas pueden configurarse para ser filtradas por fecha, ubicación, tipo de alarma e instrumento, y se pueden recibir directamente en dispositivos móviles.
Generación de reportes	La generación de reportes es limitada a datos topográficos y gráficos generados a partir de software adicional, como GeoStudio.	Los datos recopilados deben analizarse en software especializado para la creación de reportes de desplazamiento y estabilidad.	Ofrece reportes completos sin necesidad de softwares adicionales, que incluyen gráficos de desplazamiento, precisión de sensores y estado de calibración, permitiendo un análisis detallado y continuo para una mejor interpretación.

Continúa en la siguiente página

Comparación metodologías (continuación)			
Aspecto	Estación total	Inclinómetro	Beyond Monitoring
Uso	Requiere conocimientos avanzados en topografía y el uso de software de modelado.	Necesita personal capacitado para la instalación y lectura de datos, así como software especializado para el análisis de desplazamientos.	Interfaz intuitiva con opciones de personalización; sin embargo, requiere conocimientos básicos relacionados con el software y los sistemas de información geográfica para la interpretación de datos.
Costo	Varía dependiendo del modelo y las características del equipo. El rango de precio se encuentra entre los Q25,000.00 y los Q200,000.00	Precios similares a los de la estación total.	Alto, sin embargo depende de la magnitud del área a evaluar.

VI. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- Al utilizar GeoStudio junto con los perfiles obtenidos a partir de datos topográficos, fue posible calcular el Factor de Seguridad de los taludes en un proyecto real. Este análisis permitió determinar que los taludes evaluados presentan un FS adecuado, confirmando su estabilidad y garantizando que no representan un riesgo para personas ni edificaciones cercanas. Esta evaluación es clave para la planificación de proyectos seguros, ya que ayuda a prevenir deslizamientos y otros fallos estructurales en terrenos propensos a inestabilidad.
- Si bien GeoStudio permite realizar análisis de estabilidad efectivos mediante cálculos del Factor de Seguridad, este análisis es estático, por lo que no refleja el comportamiento dinámico y los desplazamientos del talud a lo largo del tiempo. Para monitorear cambios en el terreno y captar desplazamientos en tiempo real, sería necesario realizar análisis estáticos en intervalos periódicos o emplear técnicas adicionales que monitoreen la evolución del talud de manera continua..
- El uso del inclinómetro fue fundamental para determinar de manera precisa los desplazamientos horizontales de los taludes, obteniendo así los movimientos internos que pueden indicar inestabilidad. Aunque los gráficos de desplazamiento fueron elaborados en Excel, su correcta interpretación requiere un conocimiento profundo en geotecnia y mecánica de suelos, ya que una lectura errónea podría llevar a conclusiones incorrectas y comprometer la seguridad del proyecto.
- La incorporación de herramientas avanzadas, como GeoStudio y el inclinómetro digital, permite realizar un monitoreo preciso de la estabilidad de taludes. Este nivel de precisión es crucial para evaluar riesgos geotécnicos, ya que permite anticiparse a problemas y tomar medidas de prevención en caso de inestabilidad. Especialmente en zonas propensas a deslizamientos, estas tecnologías resultan esenciales para proteger infraestructuras y garantizar la seguridad.
- La integración de tecnologías modernas, como Beyond Monitoring, facilita una recopilación y análisis de datos detallados, optimizando así la comprensión de los desplazamientos en profundidad. Los datos generados por esta plataforma permiten construir modelos detallados y dinámicos del talud, que son fundamentales para evaluar el comportamiento del terreno a largo plazo, detectar zonas críticas, y planificar refuerzos específicos para prevenir fallas.
- El estudio muestra que las metodologías empleadas, como el uso de GeoStudio, inclinómetros y Beyond Monitoring, se adaptan eficazmente a las condiciones geológicas particulares de la región de Guatemala. Esto incluye factores como la inclinación del terreno, el tipo de subsuelo y el clima local, permitiendo diseñar y construir taludes estables y seguros. En consecuencia, estas metodologías contribuyen a una planificación de obras de ingeniería más efectiva y adecuada para las características y necesidades del entorno guatemalteco.

VII. RECOMENDACIONES

- Para garantizar la estabilidad de los taludes, es fundamental implementar un sistema de monitoreo continuo que incluya inclinómetros y otros dispositivos en intervalos regulares. Este monitoreo permite detectar cualquier desplazamiento en sus etapas iniciales, lo cual es clave para prevenir fallas inesperadas y reducir riesgos. Una detección temprana facilita la toma de decisiones preventivas que protegen tanto la infraestructura como las vidas humanas en áreas potencialmente inestables.
- Capacitar al personal en el uso de herramientas de análisis, como GeoStudio, y dispositivos de monitoreo avanzados, como inclinómetros digitales, optimiza significativamente la precisión y eficiencia en la recolección y análisis de datos. Esta capacitación asegura que los resultados obtenidos sean precisos y confiables, facilitando la interpretación correcta y la toma de decisiones informadas en cada etapa del proyecto.
- Cuando se identifican desplazamientos significativos en el talud, es recomendable considerar alternativas de refuerzo, como la construcción de muros de contención, estabilización con anclajes o la instalación de sistemas de drenaje. Estas medidas ayudan a estabilizar el talud y reducen la probabilidad de futuros deslizamientos, minimizando riesgos y protegiendo la infraestructura y áreas circundantes.
- Dado que el nivel de saturación del suelo es un factor crucial para la estabilidad de los taludes, se sugiere integrar datos hidrológicos en el análisis geotécnico, especialmente durante temporadas de lluvias intensas. Este enfoque ayuda a prever y mitigar los efectos de infiltración de agua en áreas vulnerables, anticipando problemas y permitiendo que se implementen medidas de drenaje adecuadas para reducir el riesgo de inestabilidad.
- Dado que GeoStudio está orientado principalmente al análisis estático, se recomienda complementarlo con metodologías de monitoreo dinámico, como el uso de inclinómetros o los sensores integrados en plataformas avanzadas como Beyond Monitoring. Esta combinación ofrece un enfoque más completo, monitoreando tanto la estabilidad estructural como los desplazamientos en tiempo real para obtener una evaluación más precisa del comportamiento del talud.
- Es fundamental que el proceso de recolección de datos mediante cualquier tipo de herramienta de monitoreo, como estaciones totales, inclinómetros o software avanzado, sea llevado a cabo por técnicos capacitados. Esto garantiza la precisión de los datos, minimiza errores humanos y asegura que los análisis y conclusiones se basen en información confiable y de alta calidad, optimizando así la seguridad y efectividad de las intervenciones geotécnicas.
- Para futuras investigaciones y modelos de análisis de estabilidad de taludes es recomendable el empleo del Método de Elementos Finitos. A diferencia de análisis estáticos, este método obedece las leyes de la mecánica de materiales y considera el comportamiento dinámico del suelo bajo diferentes condiciones de carga. Su aplicación en la fase de resultados habría facilitado la identificación temprana de zonas críticas de falla, optimizando el diseño de soluciones. Además, proporciona una evaluación más precisa de los factores de seguridad y de la respuesta del suelo, reduciendo el riesgo de deslizamientos y fallas estructurales. El Método de Elementos Finitos proporciona un análisis más detallado y resultados más precisos.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- AguaEx. (2021). *Piezómetro*. <https://aguaex.com/metodologias/piezometro/>
- Al-Mutlaq, S. (2016). *Getting started with load cells*. Contenido online.
- Bergaya, F., Jaber, M., & Lambert, J. F. (2011). *Clays and clay minerals*. Rubber-Clay Nanocomposites: Science, Technology, Applications, 1-44.
- Bergaya, F., & Lagaly, G. (2006). *General introduction: clays, clay minerals, and clay science*. Developments in clay science, 1, 1-18.
- Brenes-Quesada, F. (2008). *Evaluación del potencial de licuefacción en suelos*.
- CACISA. (2023). *Piezómetros*. <https://www.cacisa.cr/piezometros-funcion-tipos-y-aplicaciones/>
- Cano-Franco, V., Medina-Mosquera, K. D., Restrepo-Escobar, J. F., & Vélez-Hoyos, V. H., F. J. and Aristizabal-Tique. (2023). *Análisis y validación experimental de licuefacción de suelos mediante estudio granulométrico*. DYNA, 90(225), 164-171.
- Carrillo, M., Linkimer, L., Rodríguez, A., & Zúñiga, H. (2002). *Clasificación geomecánica y análisis estabilidad de taludes del macizo rocoso Coris, Cartago, Costa Rica*. Revista Geológica de América Central, 26.
- Cascón-Katchadourian, J., López-Herrera, A., Ruiz-Rodríguez, A., & Herrera-Viedma, E. (2019). *Proyecto Histocarto: aplicación de SIGs (georreferenciación y geolocalización) para mejorar la recuperación de la documentación histórica gráfica*. Profesional de la información, 28(4).
- Cavero Panes, C. (2010). *Análisis de métodos para la predicción de presión de poros aplicado a la estabilidad de pozos de perforación petrolera*.
- CDG. (2018). *Deslizamientos de tierra y aludes de barro*. <https://www.cdc.gov/es/disasters/landslides.html>
- Cerdà, A. (2001). *La erosión del suelo y sus tasas en España*. Ecosistemas, 10(3).
- Chaulya, S., & Prasad, G. M. (2016). *Sensing and monitoring technologies for mines and hazardous areas: monitoring and prediction technologies*. Elsevier.
- CONRED. (s.f.). *Método de ensayo. Determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del concreto a compresión*. https://conred.gob.gt/normas/NRD3/2_concreto/norma_coguanor_ntg_41017_h16_astm_c_469.pdf
- Corpfrak. (2024). *PIEZÓMETRO DE CUERDA VIBRANTE RST*. <https://corpfrak.com/productos-destacados/piezometros-de-cuerda-vibrante/>
- Das, B., & Sobhan, K. (2013). *Principles of Geotechnical Engineering*. World Journal of Engineering; Technology.
- Datageo. (s.f.). *Instrumentación Geotécnica SOIL*. <https://datageo.cl/instrumentacion-geotecnica/>
- DGSI. (2018). *Digitilt AT System*. <https://durhamgeo.com/products/digitilt-at-system/>
- Fernández, J. (2013). *Estudio comparativo de levantamientos con GPS cinemático y taquimetría eléctrica*.
- Flor Arroyo, A. (2016). *Determinación de ángulo de fricción y cohesión del suelo mediante correlaciones obtenidas en los ensayos de plasticidad, módulo de elasticidad y NSPT de suelos de tres sectores de la ciudad de Quito*. PUCE.
- FUTEK. (s.f.). *Tipos de celda de carga: ¿Cuáles son los tipos de celda de carga?* <https://www.futek.com/tipos-de-celda-de-carga>

- Galvis Flórez, J. A. (2016). *Monitoreo superficial de movimientos en masa, empleando tecnología LiDAR, relacionando la geología, topografía e información geotécnica del sitio*. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/466>
- Gariano, S., & Guzzetti, F. (2016). *Landslides in a changing climate*. *Earth-Science Reviews*, 162, 227-252.
- Garmin. (2023). *GPSMAP® 67*. <https://garminguatemala.com/producto/gpsmap-67/>
- Gobierno de México. (2017). *SISMOS: Causas, características e impactos*. <https://www.gob.mx/sgm/es/articulos/sismos-causas-caracteristicas-e-impactos?idiom=es>
- González, J. R. Q., & Morcote, C. A. (2012). *Metodologías sostenibles para el control de la erosión en laderas naturales y taludes artificiales*. L'esprit Ingénieur.
- Hamidi, J., Shahriar, K., Rezai, B., & Rostami, J. (2010). *Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system*. *Tunnelling; Underground Space Technology*, 25(4), 333-345.
- Hossne, A., Paredes, G., Carvajal, R., Santaella, E., & Malaver, J. (2011). *Cohesión aparente de un suelo agrícola franco arenoso de sabana*. *Acta Universitaria*, 21(3), 5-13.
- Hurtarte, A. (2019). *Utilización del inclinómetro digital para monitorear desplazamientos horizontales en taludes*. Doctoral dissertation, Universidad del Valle de Guatemala.
- Ibérica, G. (s.f.). *Fisurómetro digital para medición de grietas y fisuras*. <http://www.gisiberica.com/fisurómetros/fipsg150-fisurómetro-digital.html>
- INLADSAC. (2023). *Fisurómetros: la herramienta perfecta para el control de grietas*. <https://www.inladsac.com/tienda/laboratorios/instrumentos-de-medida/fisurómetros-la-herramienta-perfecta-para-el-control-de-grietas/>
- Instituto Geográfico Nacional. (2016). *Sismología*. <https://www.ign.es/web/sis-teoria-general>
- Jimenez, J. (1980). *2da. Parte - GEOTECNIA Y CIMENTOS III – CIMENTACIONES, EXCAVACIONES Y APLICACIONES DE LA GEOTECNIA*). Editorial Rueda.
- Jimenez, J., De Justo, J., & Serrano, A. (1981). *2da. EDICION GEOTECNIA Y CIMENTOS II – MECANICA DEL SUELO Y DE LAS ROCAS*). Editorial Rueda.
- Jimenez, J., & Justo, J. (1975). *2da. EDICIÓN - GEOTECNIA Y CIMENTOS I – Propiedades de los Suelos y de las Rocas*). Editorial Rueda.
- Jiménez, G. (2011). *ALTIMETRÍA*. Doctoral dissertation, Universidad del Quindío.
- Kamble, V., Shinde, V., & Kittur, J. (2020). *Overview of load cells*. *Journal of Mechanical; Mechanics Engineering*.
- León-Bonillo, M. (2011). *FUNDAMENTO DE PLANIMETRIA Y TAQUIMETRIA*. Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Gráfica.
- Li, N., Ho, C., Xue, J., Lim, L., Chen, G., Fu, Y., & Lee, L. (2022). *A progress review on solid-state LiDAR and nanophotonics-based LiDAR sensors*. *Laser Photonics Reviews*, 16(11), 2100511.
- Llano, J. (1975). *Mecánica de Suelos*. Editions Eyrolles.
- López Vinielles, J. (2022). *Aplicación de técnicas de interferometría radar satélite al análisis de estabilidad de taludes en zonas mineras*. Doctoral dissertation, Caminos.
- Márquez, F. (2017). *Curso básico de topografía: planimetría, agrimensura, altimetría*. Editorial Pax México.

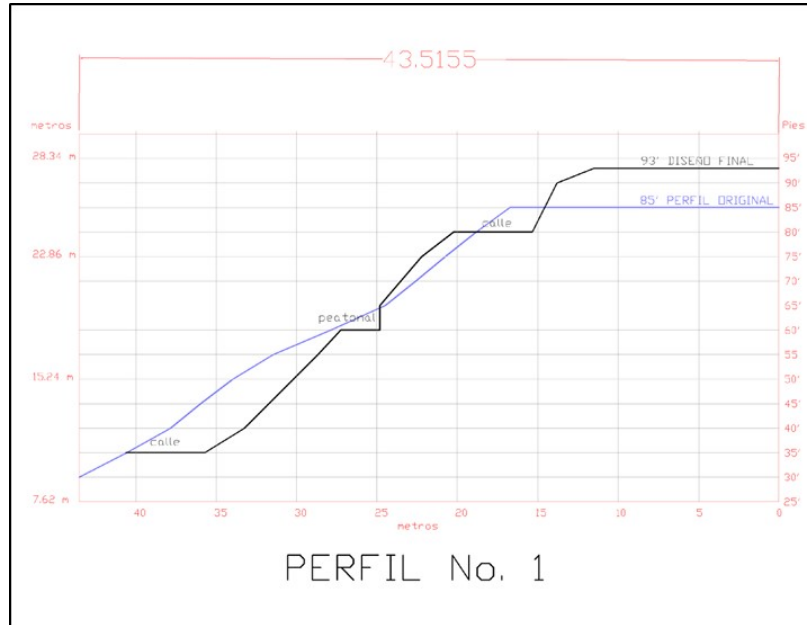
- Martines, E., & Lira, L. (2010). *Análisis y Aplicación de las Expresiones del Contenido de Humedad en Sólidos*. <https://www.cenam.mx/sm2010/info/pviernes/sm2010-vp01b.pdf>
- Menéndez, M. M., & González-Gallego, F. J. (2015). *Las clasificaciones geomecánicas en macizos rocosos volcánicos*. INGENIERÍA GEOLÓGICA, 61.
- Mettler, T. (2022). *Determinación del contenido de humedad*. https://www.mt.com/mx/es/home/applications/Laboratory_weighing/moisture-content-determination.html
- MMT. (2018). *Estación Total Sokkia iM-105*. https://www.mmtequipos.com/estaciones_ficha_tecnica_sokkia_iM_100.html
- Osasan, K. S., & Afeni, T. B. (2010). *Review of surface mine slope monitoring techniques*. Journal of Mining Science 46 (2010): 177-186.
- PDSVISION. (2024). *Analyze slope stability, ground deformation and heat mass transfer with GeoStudio*. <https://pdsvision.com/products/geostudio/>
- Pérez, J. (1993). *Conceptos Generales de la Mecánica del Suelo*. <https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Profesores/valcarcel/MaterMRHE-0809/1a-Mecanica%20Suelo.pdf>
- Pérez, Z., Ojeda, G., & Mateus, D. (2009). *Estimación de presión de poro a partir de velocidades sísmicas*. CTF Ciencia, Tecnología y Futuro, 3(5), 7-17.
- Posse, F. (1987). *Manual de ingeniería de taludes (No. 3)*. IGME.
- Pucha-Cofrep, F., Fries, A., Cánovas-García, F., Oñate-Valdivieso, F., González-Jaramillo, V., & Pucha-Cofrep, D. (2017). *Fundamentos de SIG: aplicaciones con ArcGIS*. Franz Pucha Cofrep.
- Quichimbo, P., Guamán, J., Cajamarca, M., & Aguirre, A. J. (2016). *Evaluación del contenido de humedad del suelo por gravimetría y reflectometría*. Ecuador es Calidad, 4(1).
- Rosell, J., Llorens, J., Sanz, R., Arnó, J., Ribes-Dasi, M., Masip, J., & Palacín, J. (2009). *Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning*. Agricultural; Forest Meteorology, 149(9), 1505-1515.
- RST. (s.f.). *Piezómetros de cuerda vibrante*. <https://rstinstruments.com/wp-content/uploads/Piezometros-de-cuerda-vibrante-ELB0069F.pdf>
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay.
- Sanchez, D. (2016). *Degradación de suelos*. <http://www.ideam.gov.co/web/siac/erosion>
- Sánchez, N. (2013). *Licuefacción de suelos*. UNEFA. Venezuela.
- SEEQUENT. (2024). *GeoStudio 2D*. <https://www.seequent.com/products-solutions/geostudio-2d/>
- SERVOSIS. (2023). *Extensómetro o transductor de deformación*. <https://www.servosis.com/extensometro-o-transductor-de-deformacion/>
- SISGEO. (2023a). *Celdas de presión de tierra*. <https://sisgeo.com/es/productos/celulas-de-presion/celdas-de-presion-de-tierra/>
- SISGEO. (2023b). *Extensómetros*. <https://sisgeo.com/es/productos/extensometros/>
- SISGEO. (2023c). *PIEZÒMETROS DE CASAGRANDE Y DE TUBO ABIERTO*. <https://sisgeo.com/es/productos/piezometros/piezometros-de-casagrande-y-de-tubo-abierto/>
- sISGEO. (2023). *Piezómetros de Casagrande y de tubo abierto*. <https://sisgeo.com/es/productos/piezometros/piezometros-de-casagrande-y-de-tubo-abierto/>

- SIXENSE. (2020). *Cyclops™*. <https://www.sixense-group.com/en/offer/monitoring/soil-structural-and-environmental-measurement/cyclops>
- Sixense Group. (2020). *Cyclops*. <https://www.sixense-group.com/wp-content/uploads/2022/01/sixense-monitoring-cyclops-en.pdf>
- Solution, L. (2022). *What is LiDAR, and how does it work?* https://www.unavco.org/education/professional-development/short-courses/course-materials/insar/2017-insar-gmtsar-course-materials/02_Applications_of_InSAR_Xu.pdf
- Tabani, P. (2020). *Beyond Monitoring - Real time monitoring platform*. <https://www.sixense-group.com/en/offer/monitoring/soil-structural-and-environmental-measurement/beyond-monitoring>
- Tomás, R. (2022). *Aplicaciones de la interferometría radar de satélite en ingeniería civil*.
- USGS. (s.f.). *InSAR—Satellite-based technique captures overall deformation "picture"*. <https://www.usgs.gov/programs/VHP/insar-satellite-based-technique-captures-overall-deformation-picture>
- Valeria, B., & Jair, B. (2014). *Estabilidad de Taludes en Suelos*. Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Valiente Sanz, R., Sobrecases Martí, S., & Díaz Orrego, A. (2016). *Estabilidad taludes, conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo*. *Revista civilizate*, (7), 50-54.
- Vanneschi, C., Eyer, M., Francioni, M., & Coggan, J. (2017). *The Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring and Characterization of Slope Instability*. *Procedia Engineering*, 191, 150-157.
- Velazquez-Cruz, D., & Espinosa-Castañeda, G. (2006). *Análisis de Presión de Poro en la Costa Mexicana del Golfo*. Colegio de Ingenieros Petroleros de México.
- Wang Qiu, S. Q. (2008). *Determinación de curvas características en suelos no saturados con celdas de presión*. Publicación técnica.
- Wang Qiu, S. Q. (2018). *Generalidades y aplicaciones de la instrumentación de pavimentos en condiciones de campo en Costa Rica*. *Infraestructura Vial*, 20(36), 5-14.
- Whitlow, R. (2000). *Fundamentos de Mécanica de Suelos - Segunda Edición*. CECSA.
- Xu, X., & Sandwell, D. (2015). *Some Applications of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)*. https://www.unavco.org/education/professional-development/short-courses/course-materials/insar/2017-insar-gmtsar-course-materials/02_Applications_of_InSAR_Xu.pdf

IX. APÉNDICES

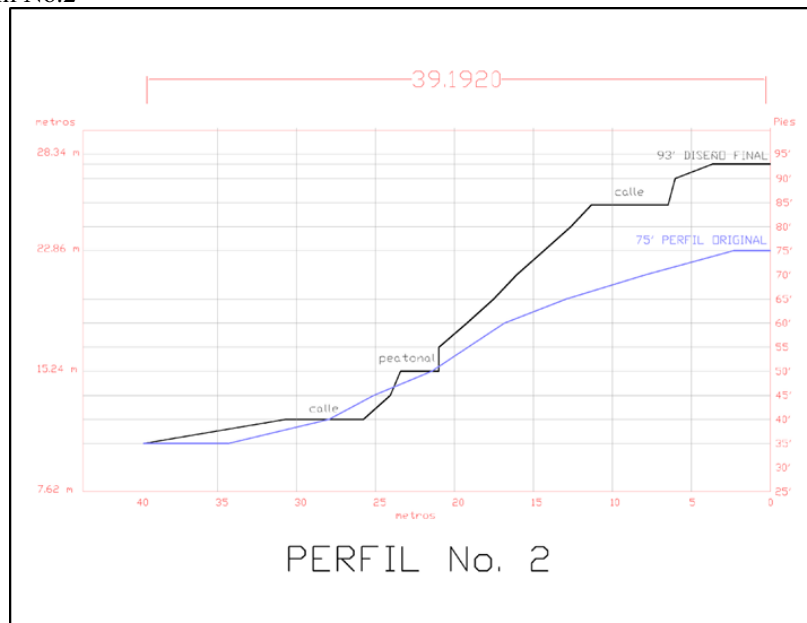
A. Perfil No.1 - Civil 3D

Figura 56. Perfil No.1



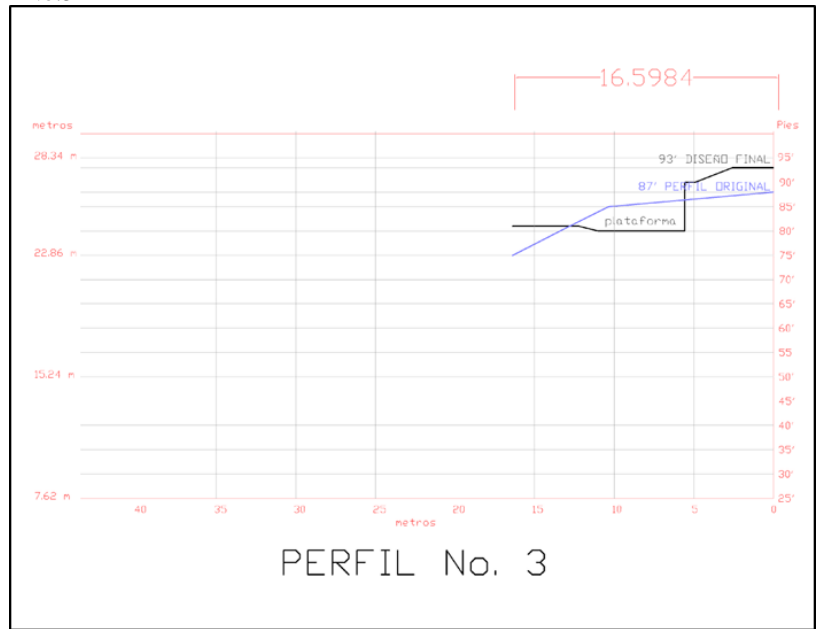
B. Perfil No.2 - Civil 3D

Figura 57. Perfil No.2



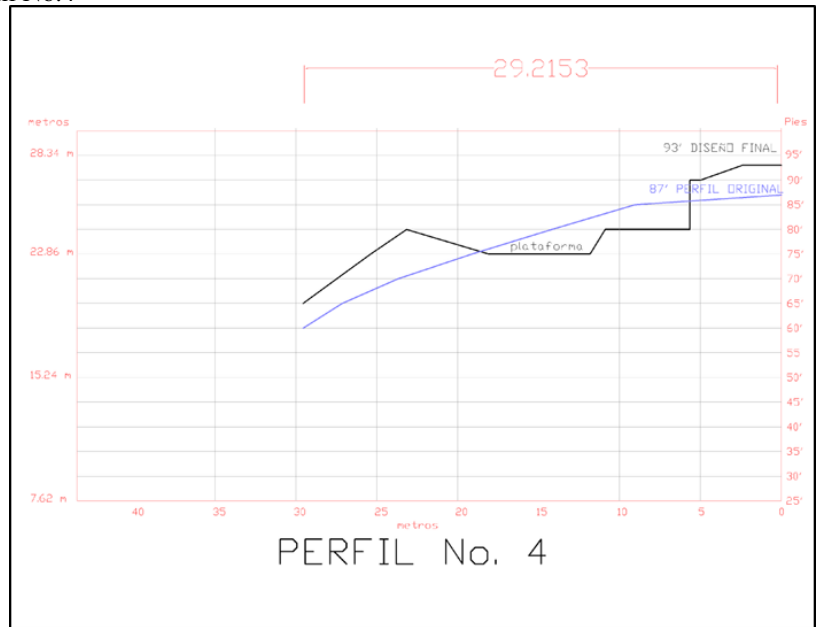
C. Perfil No.3 - Civil 3D

Figura 58. Perfil No.3



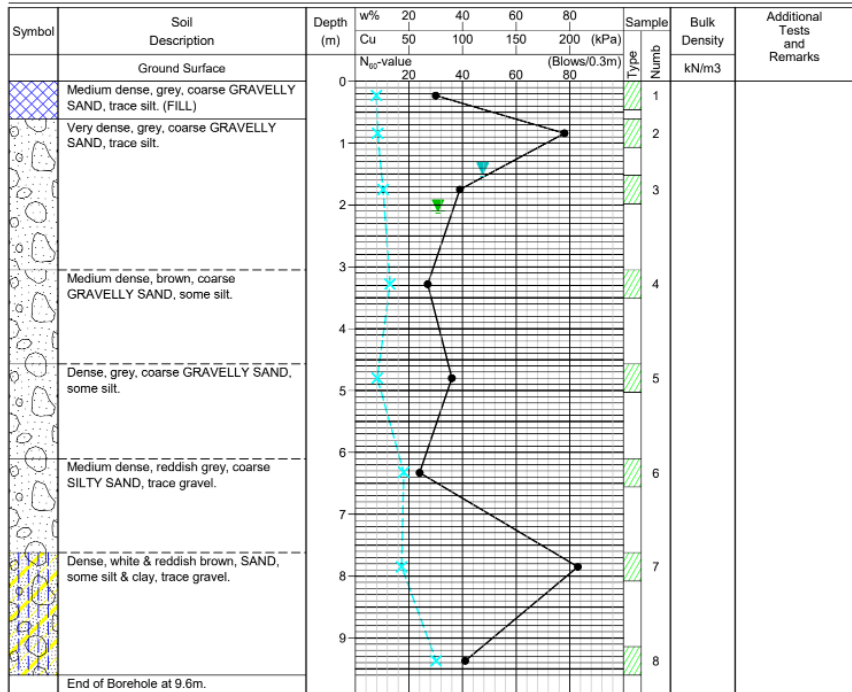
D. Perfil No.4 - Civil 3D

Figura 59. Perfil No.4



E. Estratigrafía

Figura 60. Estratigrafía



F. Datos de perforación P-1

Figura 61. Perforación P-1

Proyecto: DOMINICA

P-1

profundidad (m)	número de golpes (N)	$\gamma =$ peso suelo húmedo (kN/m ³)	C (kPa) (spt)	ϕ' (SPT)	K _s (MN/m ²)	E _s (kPa)	μ	K _a	K _p	C _n	N ₆₀ corregido	q _a (kg/cm ²)
1.0	11	18.30	35.00	21	32.94	24658.23	0.25	0.47	2.12	1.70	19	2.0
2.0	9	18.30	35.00	20	25.64	21668.21	0.25	0.49	2.04	1.62	15	1.5
3.0	14	18.30	40.00	22	32.57	24511.85	0.25	0.45	2.20	1.32	18	1.9
4.0	14	18.60	40.00	22	31.90	24246.40	0.30	0.45	2.20	1.14	18	1.9
5.0	16	18.60	44.00	22	32.57	24512.03	0.30	0.45	2.20	1.02	18	1.9
6.0	19	18.60	52.00	23	35.28	25571.85	0.30	0.44	2.28	0.93	20	2.1
7.0	22	18.60	60.00	23	42.24	28192.42	0.30	0.44	2.28	0.86	24	2.5
8.0	24	18.90	65.00	23	43.04	28485.58	0.30	0.44	2.28	0.80	24	2.6
9.0	29	18.90	65.00	22	48.98	30611.12	0.30	0.45	2.20	0.76	28	2.9
10.0	31	18.90	77.74	30	52.24	31746.56	0.30	0.33	3.00	0.72	30	3.1
11.0	35	18.90	0.00	30	56.20	33098.66	0.30	0.33	3.00	0.68	32	3.3

G. Datos de perforación P-2

Figura 62. Perforación P-2

Proyecto: DOMINICA

P-2

profundidad (m)	número de golpes (N)	$\gamma =$ peso suelo humedo kN/m^3	C kPa (spt)	ϕ (SPT)	Ks MN/m^2	E _s kPa	μ	K _a	K _p	C _n	N ₆₀ corregido	q _a kg/cm ²
1.0	21	18.30	35.00	22	62.88	35328.57	0.25	0.45	2.20	1.70	36	3.7
2.0	25	18.30	35.00	23	71.23	38025.12	0.25	0.44	2.28	1.62	40	4.2
3.0	23	18.30	40.00	22	53.51	32182.30	0.25	0.45	2.20	1.32	30	3.2
4.0	25	18.50	40.00	23	57.01	33372.29	0.30	0.44	2.28	1.14	32	3.4
5.0	30	18.50	44.00	28	61.13	34751.65	0.30	0.36	2.77	1.02	35	3.6
6.0	38	18.50	52.00	29	70.65	37840.90	0.30	0.35	2.88	0.93	40	4.2
7.0	46	18.90	60.00	30	88.33	43311.68	0.30	0.33	3.00	0.86	50	5.3
8.0	59	18.90	65.00	31	105.82	48467.37	0.30	0.32	3.12	0.80	60	6.3

H. Datos de perforación P-3

Figura 63. Perforación P-3

Proyecto: DOMINICA

P-3

profundidad (m)	número de golpes (N)	$\gamma =$ peso suelo humedo kN/m^3	C kPa (spt)	ϕ (SPT)	Ks MN/m^2	E _s kPa	μ	K _a	K _p	C _n	N ₆₀ corregido	q _a kg/cm ²
1.0	21	18.30	35.00	20	62.88	35328.57	0.25	0.49	2.04	1.70	36	3.7
2.0	21	18.30	35.00	22	59.83	34319.81	0.25	0.45	2.20	1.62	34	3.6
3.0	22	18.30	40.00	22	51.18	31379.24	0.25	0.45	2.20	1.32	29	3.0
4.0	24	18.50	40.00	23	54.73	32599.08	0.30	0.44	2.28	1.14	31	3.3
5.0	30	18.50	44.00	25	61.13	34751.65	0.30	0.41	2.46	1.02	35	3.6
6.0	24	18.50	52.00	23	44.62	29058.11	0.30	0.44	2.28	0.93	25	2.7
7.0	29	18.90	60.00	26	55.68	32925.13	0.30	0.39	2.56	0.86	32	3.3
8.0	36	18.90	65.00	29	64.57	35879.22	0.30	0.35	2.88	0.80	37	3.8
9.0	42	18.90	65.00	33	70.94	37932.63	0.30	0.29	3.39	0.76	40	4.2

I. Datos de perforación P-5

Figura 64. Perforación P-5

Proyecto: DOMINICA

P-5

profundidad (m)	número de golpes (N)	$\gamma =$ peso suelo humedo kN/m^3	C kPa (spt)	ϕ (SPT)	Ks MN/m^2	E _s kPa	μ	K _a	K _p	C _n	N ₆₀ corregido	q _a kg/cm ²
1.0	13	18.30	35.00	20	38.93	26962.63	0.25	0.49	2.04	1.70	22	2.3
2.0	12	18.30	35.00	20	34.19	25149.39	0.25	0.49	2.04	1.62	19	2.0
3.0	14	18.30	40.00	21	32.57	24511.85	0.25	0.47	2.12	1.32	18	1.9
4.0	16	18.50	40.00	21	36.48	26035.65	0.30	0.47	2.12	1.14	21	2.2
5.0	20	18.50	44.00	22	40.76	27644.54	0.30	0.45	2.20	1.02	23	2.4
6.0	15	18.50	52.00	23	27.89	22613.92	0.30	0.44	2.28	0.93	16	1.7
7.0	19	18.90	60.00	22	36.48	26035.24	0.30	0.45	2.20	0.86	21	2.2
8.0	18	18.90	65.00	21	32.28	24398.38	0.30	0.47	2.12	0.80	18	1.9
9.0	31	18.90	65.00	28	52.36	31787.80	0.30	0.36	2.77	0.76	30	3.1

J. Datos de perforación P-6

Figura 65. Perforación P-6

Proyecto: DOMINICA

P-6

profundidad (m)	número de golpes (N)	$\gamma =$ peso suelo húmedo kN/m^3	C kPa (spt)	ϕ' (SPT)	Ks MN/m^2	E _s kPa	μ	K _a	K _p	C _n	N ₆₀ corregido	q _a kg/cm ²
1.0	7	18.30	35.00	20	20.96	19606.06	0.25	0.49	2.04	1.70	12	1.2
2.0	11	18.30	35.00	20	31.34	24022.58	0.25	0.49	2.04	1.62	18	1.9
3.0	17	18.30	40.00	22	39.55	27194.94	0.25	0.45	2.20	1.32	22	2.4
4.0	16	18.50	40.00	22	36.48	26035.65	0.30	0.45	2.20	1.14	21	2.2
5.0	18	18.50	44.00	23	36.68	26111.14	0.30	0.44	2.28	1.02	21	2.2
6.0	19	18.50	52.00	22	35.33	25590.37	0.30	0.45	2.20	0.93	20	2.1
7.0	17	18.90	60.00	22	32.64	24540.69	0.30	0.45	2.20	0.86	19	1.9
8.0	15	18.90	65.00	21	26.90	22201.75	0.30	0.47	2.12	0.80	15	1.6
9.0	21	18.90	65.00	24	35.47	25645.99	0.30	0.42	2.37	0.76	20	2.1

K. Datos de perforación P-7

Fi

Proyecto: DOMINICA

P-7

profundidad (m)	número de golpes (N)	$\gamma =$ peso suelo húmedo kN/m^3	C kPa (spt)	ϕ' (SPT)	Ks MN/m^2	E _s kPa	μ	K _a	K _p	C _n	N ₆₀ corregido	q _a kg/cm ²
1.0	12	18.30	35.00	22	35.93	25824.79	0.25	0.45	2.20	1.70	20	2.1
2.0	12	18.30	35.00	22	34.19	25149.39	0.25	0.45	2.20	1.62	19	2.0
3.0	17	18.30	40.00	23	39.55	27194.94	0.25	0.44	2.28	1.32	22	2.4
4.0	23	18.50	40.00	24	52.45	31817.02	0.30	0.42	2.37	1.14	30	3.1
5.0	19	18.50	44.00	22	38.72	26883.78	0.30	0.45	2.20	1.02	22	2.3
6.0	19	18.50	52.00	22	35.33	25590.37	0.30	0.45	2.20	0.93	20	2.1
7.0	23	18.90	60.00	24	44.16	28892.05	0.30	0.42	2.37	0.86	25	2.6
8.0	35	18.90	65.00	29	62.77	35291.97	0.30	0.35	2.88	0.80	36	3.7
9.0	43	18.90	65.00	33	72.63	38468.69	0.30	0.29	3.39	0.76	41	4.3

L. Datos de perforación P-9

Figura 67. Perforación P-9

Proyecto: DOMINICA

P-9

profundidad (m)	número de golpes (N)	$\gamma =$ peso suelo húmedo kN/m^3	C kPa (spt)	ϕ' (SPT)	Ks MN/m^2	E _s kPa	μ	K _a	K _p	C _n	N ₆₀ corregido	q _a kg/cm ²
1.0	17	18.30	35.00	21	50.91	31284.02	0.25	0.47	2.12	1.70	29	3.0
2.0	30	18.30	35.00	25	85.48	42449.61	0.25	0.41	2.46	1.62	49	5.1
3.0	55	18.30	40.00	29	127.95	54716.93	0.25	0.35	2.88	1.32	73	7.6
4.0	54	18.50	40.00	33	123.13	53378.43	0.30	0.29	3.39	1.14	70	7.3
5.0	54	18.50	44.00	33	110.04	49681.67	0.30	0.29	3.39	1.02	62	6.6
6.0	62	18.50	52.00	35	115.27	51170.52	0.30	0.27	3.69	0.93	65	6.9
7.0	69	18.90	60.00	35	132.49	55967.20	0.30	0.27	3.69	0.86	75	7.9
8.0	88	18.90	65.00	35	157.83	62790.05	0.30	0.27	3.69	0.80	90	9.4
9.0	104	18.90	65.00	36	175.66	67453.26	0.30	0.26	3.85	0.76	100	10.5

M. Datos de perforación P-10

Figura 68. Perforación P-10

Proyecto: DOMINICA

P-10

profundidad (m)	número de golpes (N)	$\gamma =$ peso suelo húmedo kN/m^3	C kPa (spt)	ϕ (SPT)	K_s MN/m^2	E_s kPa	μ	K_a	K_p	C_n	N_{60} corregido	qa kg/cm^2
1.0	21	18.30	35.00	21	62.88	35328.57	0.25	0.47	2.12	1.70	36	3.7
2.0	20	18.30	35.00	21	56.98	33365.20	0.25	0.47	2.12	1.62	32	3.4
3.0	27	18.30	40.00	23	62.81	35304.86	0.25	0.44	2.28	1.32	36	3.7
4.0	32	18.50	40.00	28	72.97	38575.62	0.30	0.36	2.77	1.14	41	4.3
5.0	43	18.50	44.00	33	87.63	43100.70	0.30	0.29	3.39	1.02	50	6.2

N. Datos de perforación P-11

Figura 69. Perforación P-11

Proyecto: DOMINICA

P-11

profundidad (m)	número de golpes (N)	$\gamma =$ peso suelo húmedo kN/m^3	C kPa (spt)	ϕ (SPT)	K_s MN/m^2	E_s kPa	μ	K_a	K_p	C_n	N_{60} corregido	qa kg/cm^2
1.0	5	18.30	35.00	18	14.97	16726.09	0.25	0.53	1.89	1.70	9	0.9
2.0	9	18.30	35.00	19	25.64	21668.21	0.25	0.51	1.97	1.62	15	1.5
3.0	16	18.30	40.00	20	37.22	26317.56	0.25	0.49	2.04	1.32	21	2.2
4.0	21	18.50	40.00	21	47.88	30223.95	0.30	0.47	2.12	1.14	27	2.9
5.0	27	18.50	44.00	24	55.02	32699.94	0.30	0.42	2.37	1.02	31	3.3
6.0	29	18.50	52.00	29	53.92	32323.43	0.30	0.35	2.88	0.93	31	3.2

* K_a = Coeficiente de Presión A * β =Ángulo del Cono de arrancamiento con respecto a la vertical

* K_p = Coeficiente de Presión F Del Libro: Geotecnia y Cimientos III, primera parte

Del Libro : Principios de Ingen Autor: José Antonio Jimenez Salas (pag. 207)

Autor : Braja M. Das (pag. 3 * C_n = Coeficiente de ajuste de sobrepresión según Liao y Whitman

*C= Coeficiente de fricción del Del Libro: FOUNDATIONS ANALYSIS AND DESIGN Autor: Joseph E. Bowles

* ϕ = Ángulo de Fricción Interna * E_s = Modulo de Elasticidad

* γ = Peso unitario del suelo hu Del Libro: FOUNDATIONS ANALYSIS AND DESIGN

Autor: Joseph E. Bowles (pag. 316)

* K_s = Modulo de Balasto

Del Libro: FOUNDATIONS ANALYSIS AND DESIGN

Autor: Joseph E. Bowles (pag. 503)

* μ = Modulo de Poisson