



**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA EROSIÓN COSTERA SOBRE LA  
ESTABILIDAD DE UN TALUD DE SUELO EN EL MUNICIPIO DE ARBOLETES,  
ANTIOQUIA**

Victor Andres Otalvaro Escobar

Trabajo de grado presentado para optar el título de Ingeniero Oceanográfico.

Asesor

Carlos Alberto Palacio Tobón, Doctor en Ingeniería.

Co-asesor

Juan Camilo Viviescas Restrepo, Doctor en Ingeniería geotécnica y ambiental

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental  
Ingeniería Oceanográfica  
Turbo, Antioquia, Colombia

2023

<b>Cita</b>	(Otalvaro-Escobar, V., 2023)
<b>Referencia</b>	Otalvaro-Escobar, V. (2023). <i>Análisis de la influencia de la erosión costera sobre la estabilidad de un talud de suelo en el municipio de Arboletes, Antioquia</i> . [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Créditos: Carlos Alberto Palacio Tobón, Juan Camilo Viviescas Restrepo, Vladimir Giovanni Toro Valencia, Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño (PIMECLA), Universidad de Antioquia, Departamento Administrativo para la Gestión del Riesgo de Desastres de Antioquia (DAGRAN), Gobernación de Antioquia.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Diana Catalina Rodríguez L.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria y Agradecimientos**

Este trabajo se lo dedico y agradezco a mis padres Oscar Alberto Otalvaro Henao y Yudy Escobar Hernández, quienes desde su cuidado y apoyo durante mis estudios la dieron toda por brindarme las posibilidades de salir adelante a través de la educación. También a mis hermanos Juan y Sofía, mis amigos de Ingeniería Oceanográfica e Ingeniería Civil y todas las personas que hicieron parte de este maravilloso proceso, permitiéndome no solo conocer excelentes profesionales, sino que también excelentes seres humanos.

A mis asesores Carlos Alberto Palacio Tobón y Juan Camilo Viviescas Restrepo quienes, a partir de su conocimiento fueron parte fundamental para desarrollar esta propuesta. Gracias por el apoyo, la motivación, la disposición y el tiempo.

A los diferentes profesores que hicieron parte de mí trayectoria en ambos pregrados, quienes a través de clase a clase, lograron formarme no solo como profesional, sino como persona. En especial le agradezco a los profesores Vladimir Giovanni Toro Valencia y Juan Sebastián Monsalve Giraldo.

A todos los estudiantes de la sede Ciencias del Mar y de la sede Apartadó, quienes me acompañaron, motivaron y nunca dejaron de apoyarme para alcanzar este logro. En especial me gustaría agradecerles a las cohortes de Ingeniería Oceanográfica 2016-1, Maria C. Aguirre, David E. Ochoa, Daniel S. Lambertino, Juan G. Torres y Jaime A. Suarez. Del mismo modo, a la cohorte de Ingeniería Civil 2017-1/2, de la sede de Apartadó, Deiler Palacios, Ricardo Vega, Camilo S. Giraldo, Alexi A. Abuchar, Mateo Medina, Jose Medrano y Jader Osorio.

Adicionalmente, me gustaría agradecerle al Ingeniero Oceanográfico Juan D. Ruiz Parody y al futuro Oceanógrafo, José Manuel Zapata Pico, ambos excelente profesionales y amigos, siempre dispuestos para ayudar en todo lo que necesité.

Por último, me gustaría agradecerle a la Universidad de Antioquia, que a través de los profesores Vladimir G. Toro y Carlos A. Palacio, me permitieron realizar este proyecto en el marco del proyecto PIMECLA. A la Gobernación de Antioquia y al “Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la erosión Costera en el Litoral Antioqueño (PIMECLA)” en el convenio DAGRAN-UDEA.

## Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1. Planteamiento del problema	13
2 Objetivos	14
2.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos	14
2 Marco teórico	15
2.1. Estabilidad de taludes	15
2.2. Métodos analíticos de taludes.	18
3 Metodología	21
3.1. Área de estudio	21
3.2. Modelo geotécnico de estabilidad	22
4 Resultados y Análisis	29
4.1. Resultados de modelación a corto plazo (parámetros no drenados).	29
4.2. Resultados de modelación a largo plazo (parámetros drenados).	34
4.3 Análisis comparativo con variables climatológicas	45
6 Conclusiones	52
Referencias	55

## Lista de tablas

Tabla 1 Parámetros drenados y no drenados del Depósito Aluvial. Fuente: Proyecto PIMECLA (2022). .....	23
Tabla 2 Parámetros drenados y no drenados de la Arcillolita. Fuente: Proyecto PIMECLA (2022). .....	23
Tabla 3 Seguimiento de la erosión costera en los perfiles. Fuente: Proyecto PIMECLA 2022.....	25
Tabla 4 Comportamiento del factor de seguridad de los parámetros no drenados.....	29
Tabla 5 Porcentaje de variación del factor de seguridad para parámetros no drenados.....	31
Tabla 6 Factor de seguridad para los perfiles en condición DRENADA.....	34
Tabla 7 Porcentaje de variación de seguridad para los perfiles en condición DRENADA .....	37
Tabla 8 Probabilidad de falla para perfiles en condición drenada .....	39

## Lista de figuras

Figura 1 Cambio en la configuración del talud por Erosión. ....	16
Figura 2. Efecto de la precipitación en un talud. ....	16
Figura 3. Efecto de un sismo sobre un talud.....	17
Figura 4. Talud con diferentes estratos. ....	17
Figura 5 Talud sometido a una sobrecarga. ....	18
Figura 6 Área de estudio( Lote de la Universidad de Antioquia).....	21
Figura 7 Localización de los sondeos y coordenadas.. ....	22
Figura 8 Ubicación de los perfiles en la zona de estudio. ....	24
Figura 9 Parámetros geotécnicos de modelación.....	26
Figura 10 Ejemplo modelo geotécnico para el perfil 1. ....	27
Figura 11 Resultado de la modelación del perfil 1. ....	27
Figura 12 Comportamiento del factor de seguridad para parámetros no drenados. ....	31
Figura 13 Porcentaje de variación del factor de seguridad para parámetros no drenados. ....	32
Figura 14 Valor de estabilidad promedio para la condición no drenada ....	34
Figura 15 Factor de seguridad en el tiempo para la condición drenada ....	36
Figura 16 Porcentaje de variación del factor de seguridad para parámetros drenados. ....	38
Figura 17 Probabilidad de falla de los perfiles 1 al 8 para la condición drenada. ....	40
Figura 18 Probabilidad de falla de los perfiles 2 al 8 para la condición drenada. ....	41
Figura 19 Valor de estabilidad promedio en condición drenada.....	43
Figura 20 Estabilidad promedio por mes en condición drenada. ....	44
Figura 21 Ubicación de los datos de reanálisis. ....	45
Figura 22 Velocidad promedio del viento a 10m.....	46
Figura 23 Velocidad promedio mes a mes del viento.....	47
Figura 24 Precipitación diaria en el tiempo .....	49
Figura 25 Precipitación total mes a mes .....	50

## Siglas, acrónimos y abreviaturas

<b>PIMECLA</b>	Programa integral para el monitoreo y mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño
<b>FS</b>	Factor de seguridad
<b>PV</b>	Porcentaje de variación
<b>SPT</b>	Standard Penetration Test
<b>kPa</b>	Kilopascales
<b>°</b>	Grado sexagesimal
<b>h</b>	Hora
<b>m</b>	Metros
<b>UdeA</b>	Universidad de Antioquia

## **Resumen**

La erosión costera es un fenómeno natural que se ha visto acelerado a causa del ser humano, la gran mayoría de las líneas de costa del departamento de Antioquia están experimentando retrocesos constantes de sus playas y taludes costeros, generando pérdidas materiales y humanas. A partir de la problemática en el departamento nace el Programa integral para el monitoreo y mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño (PIMECLA), en un lote costero perteneciente a la universidad de Antioquia, en el cual se perfiló el talud costero y se monitoreó durante 8 meses. Con el fin de contribuir al análisis geotécnico del proyecto, se propone este trabajo de grado, que tiene como objetivo principal analizar el comportamiento del talud a medida que se genera erosión costera. Se conformó un modelo geotécnico de estabilidad y posteriormente se llevaron a cabo 254 modelaciones numéricas mediante el software de SLIDE, bajo parámetros drenados y no drenados, se analizaron 8 perfiles, 5 intervenidos por el proyecto y 3 sin intervenir. Los resultados indican que los taludes intervenidos presentan un mejor comportamiento ante la erosión costera, a corto y largo plazo. Del mismo modo, se logró determinar que los meses donde en promedio se presentaron los menores valores de estabilidad fueron diciembre y enero. En cuanto a la relación de las variables climatológicas, los datos sugieren que existe una relación directa con el viento y se evidencia un rezago en cuanto al efecto de la precipitación sobre el FS.

*Palabras claves:* Factor de seguridad, PIMECLA, erosión costera, estabilidad, talud costero, parámetros geotécnicos.



### **Abstract**

Coastal erosion is a natural phenomenon that has been accelerated by humans. The vast majority of coastlines in the department of Antioquia are experiencing constant retreats of their beaches and coastal slopes, generating material and human losses. Due this problem in the department and, the Comprehensive Program for the Monitoring and Mitigation of Coastal Erosion in the Antioquia Coast (PIMECLA in spanish) was born, in a coastal lot belonging to the University of Antioquia in which the coastal slope was outlined and monitored for 8 months. In order to contribute to the geotechnical component of the project, this degree work was proposed, whose main objective is to analyze the behavior of the slope as coastal erosion is generated. A geotechnical stability model was formed and subsequently 254 numerical modeling was carried out using SLIDE software, under drained and non-drained parameters. 8 profiles were analyzed, 5 intervened by the project and 3 without intervention. The results indicate that the intervened slopes present a better behavior in the face of coastal erosion, in the short and long term. In the same way, it was possible to determine that the months where on average the lowest stability values were presented were in December and January. Regarding the relationship of climatological variables, the data indicate that there is a direct relationship with wind and there is evidence of a lag in terms of the effect of precipitation on FS.

*Keywords:* Safety factor, PIMECLA, coastal erosion, stability, coastal slope, geotechnical parameters.

---

### **Introducción**

Se estima que para el año 2100, el aumento generalizado del nivel del mar se encuentre entre 0.4 y 0.8m por encima del nivel actual, como consecuencia de la crisis ambiental y climática mundial que ha precipitado el cambio climático, generando una contribución directa en el aumento de inundaciones y procesos erosivos, implicando, de este modo, un alto riesgo en las zonas costeras bajas como playas, dunas y taludes costeros (IPCC, 2021).

Bird en 1987, determinó que aproximadamente el 70% de las playas del mundo se encuentran sufriendo procesos erosivos, entendiéndose de este modo que gran parte de la población mundial se encuentra en riesgo asociado al retroceso de la línea de costa. De acuerdo con la “*Conferencia sobre los Océanos de las Naciones Unidas*” del 2017, cerca del 40% de la población mundial vive a menos de 100km de la línea de costa.

Para el caso de Colombia, la población que vive en municipios con línea de costa representa aproximadamente el 11% de los habitantes del país (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016). El Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, *José Benito Vives de Andrés* (INVERMAR), realizó en 2018 un estudio en el cual, a través de un análisis multicriterio ponderado de variables oceanográficas, geológicas y geomorfológicas, determinó que los índices de amenaza de las costas del país ante la erosión costera se distribuyen de la siguiente manera: el 1.5% tienen una amenaza muy alta, el 29.6% presentan amenazas altas, el 53.7% se encuentra en un estado de amenaza moderada y, finalmente, el 15.2% se encuentra en un estado de amenaza bajo. De acuerdo con el mismo estudio, INVERMAR menciona que para el caso del Caribe, el 2.8% de las costas presentaron una amenaza muy alta, el 27.8% se encuentran en un nivel de amenaza alto, el 39.7% se encuentra en un nivel de amenaza moderado y el 29.7% se encuentra en un nivel bajo.

Otros autores, como Stronkhorst et al., en el 2018, realizaron una cuantificación directa de la erosión costera sobre el caribe colombiano, usando el sistema de clasificación costera CHW, en el cual, usando información oceanográfica, geomorfológica y meteorológica, determinaron que

---

aproximadamente el 47% de la línea de costa presenta niveles de riesgo muy altos, y como causa principal se determinó que fue por un descenso en la disponibilidad de sedimentos.

Correa & Vernet en el 2004, realizaron una investigación profunda del problema de erosión costera en Antioquia, efectuaron un inventario de las intervenciones antrópicas que se habían construido hasta la fecha en el Urabá Antioqueño, encontrando una cantidad de 155 obras de protección costera, entre espolones, enrocados, barreras de protección, etc. Estos autores concluyeron que en la gran mayoría de las zonas afectadas por estas obras se presentaron niveles de recuperación nulos y mínimos. Los autores también determinaron las tasas de erosión en el golfo, encontraron que para el municipio de Arboletes se presentaron las tasas más altas en todo el golfo de Urabá, entre 7m a 40m/año.

Con respecto a los taludes costeros de suelo, es importante mencionar que estas geoformas han sido estudiadas muy poco en el país, a pesar de que representan un porcentaje extenso del área de línea de costa, y su importancia es notoria, desde el punto de vista geotécnico. Usualmente en estado natural, los taludes costeros se presentan principalmente en forma de acantilados. Algunos acantilados estudiados en el municipio de Puerto Escondido en el departamento de Córdoba presentan una serie de factores que propician la inestabilidad, algunos de estos son la socavación por acción del oleaje, el exceso de agua superficial (escorrentía) y agua de infiltración, fenómenos que propician de manera directa el desprendimiento de material (INVEMAR, 2008).

La Universidad de Antioquia en asociación con la gobernación de Antioquia, específicamente con el Departamento Administrativo para la Gestión del Riesgo de Desastres de Antioquia (DAGRAN), establecieron el laboratorio natural costero en el municipio de Arboletes, mediante el Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño (PIMECLA), el cual tiene como objetivo realizar experimentos físicos y numéricos, con el fin de generar conocimiento que permita tomar decisiones para la mitigación de la problemática de erosión costera en las costas antioqueñas. El laboratorio natural costero se

encuentra ubicado en las coordenadas comprendidas entre la latitud  $8^{\circ}50'54.85''\text{N}$ , longitud  $76^{\circ}26'12.39''\text{O}$  y la latitud  $8^{\circ}50'53.24''\text{N}$ , longitud  $76^{\circ}26'15.67''\text{O}$ .

Arboletes es un municipio del Urabá antioqueño, es el municipio más al norte del departamento, limita con el departamento de Córdoba. El municipio cuenta con una ubicación geográfica privilegiada, lo que le permite apostarle de manera directa al turismo, debido a sus playas y el volcán del lodo. El municipio se encuentra localizado en el “Cinturón del Sinú”, una formación sedimentaria conformada principalmente por sedimentos de tipo limos y arcillas, además de materiales biogénicos (Caro, 1984).

El caso de estudio de la presente investigación se desarrollará en el laboratorio natural de erosión costera de la Universidad de Antioquia, y tiene como objeto investigar y analizar la influencia de la erosión costera en taludes de suelo, mediante la modelación numérica del talud perfilado en el laboratorio natural, con el fin de analizar la variación del factor de seguridad en diferentes escenarios, a través de cambios en la configuración del perfil del talud causados debido a la erosión. Estas evaluaciones podrán predecir la estabilidad del talud en el largo plazo, de acuerdo con la interacción océano-continente, y de este modo, identificar las condiciones que más afectan la estabilidad de los taludes costeros conformados por suelo.

## **1. Planteamiento del problema**

Urabá es una subregión del departamento de Antioquia que se caracteriza, entre muchas cosas, por ser la única subregión del departamento que cuenta con acceso directo al mar. En los últimos años se presentaron 3 proyectos portuarios: Puerto Antioquia y Puerto Pisisí, que se encuentran en fase de construcción, y Darién International Port, proyectado a iniciar construcción en el año 2024. Se estima que los tres puertos generarán una inversión cercana a 1.170 millones de dólares (Álvarez, 2022).

En términos de turismo, la subregión no se queda atrás, según la Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia, en el 2021 la subregión cuenta con 268 establecimientos pertenecientes al Registro Nacional de Turismo, estando la mayor parte de estos en los municipios de Necoclí, Apartadó, Arboletes y Turbo, respectivamente.

Como se aprecia, la importancia económica y turística alrededor de la línea de costa para la subregión y el departamento es innegable. Sin embargo, la costa toma otro tipo de importancia al comenzar a retroceder, debido a que una serie de comunidades, fincas e infraestructuras como vías, se encuentran muy cerca al mar, lo que involucra directamente la interacción océano-continente, siendo este un problema de erosión costera. Correa & Vernet en el 2004, mencionan que en Urabá es posible afirmar que las altas tasas de erosión costera se presentan de manera indiscriminada entre playas y acantilados, y que debido a las deficientes propiedades geotécnicas de la zona, no es posible frenar de manera natural estas altas tasas de erosión en la zona.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, y el hecho de que existe muy poca literatura sobre la interacción entre la erosión y la estabilidad de los taludes (acantilados de suelo), se hace necesario abordar la problemática de la erosión costera, no solo desde el mar hacía el continente, sino en ambos sentidos, esto, principalmente, porque existen parámetros ajenos a la pérdida de material que pueden provocar una inestabilidad en el talud. De este modo, se pretende identificar, de manera cuantitativa, parámetros importantes que pueden influir sobre la inestabilidad del talud de suelo, para contribuir de manera positiva en el desarrollo científico y el entendimiento sobre los taludes de suelo que se encuentran en interacción directa con el océano.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Analizar los cambios del factor de seguridad producidos en un talud de suelo en la línea de costa del municipio de Arboletes-Antioquia, para cambios en la topografía generados por la erosión costera, mediante el uso de modelación numérica.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Establecer un modelo geotécnico del talud mediante información *in-situ* e información secundaria de la zona de estudio.
- Analizar el comportamiento del factor de seguridad para variaciones en la topografía como consecuencia de la erosión costera.
- Determinar las épocas con mayores variaciones en términos de factor de seguridad con respecto al inicio de mediciones topográficas.
- Estimar el grado de influencia de la erosión costera sobre el factor de seguridad.

---

## **2 Marco teórico**

El Programa de Permisos para Áreas de Riesgo de Erosión Costera de Nueva York (CEHA, por sus siglas en inglés) define, en el 2022, la erosión costera como un fenómeno natural, mediante el cual se pierde o se desplaza la línea de costa, dando consigo un cambio generalizado en las características protectoras naturales como playas, dunas, acantilados y áreas cercanas a la costa. A continuación se definirán conceptos claves para entender la temática.

### **2.1. Estabilidad de taludes**

Se define como talud a una porción de suelo que cuenta con una superficie externa que se encuentra elevada con respecto a una línea horizontal. Usualmente, se define a esta porción de suelo con el nombre de ladera, si se presenta de manera natural, y, si se presenta a raíz de una intervención antrópica, se le conoce como talud (Montoya, 2009). El principal fin del estudio de la estabilidad de los taludes es poder predecir el comportamiento actual y el comportamiento futuro que tiene o tendrá un talud, ante variaciones en los principales aspectos que pueden desencadenar una falla. Budhu en el 2007 describe que las principales causas de falla en taludes son las siguientes:

#### **2.1.1. Erosión**

Hace referencia a la pérdida de material en la superficie exterior generada por mecanismos como el viento y el agua superficial de escorrentía para taludes continentales, y para el caso de taludes costeros, entran a tener efecto el oleaje y las mareas. Este fenómeno genera un cambio en la topografía del talud, afectando de esta manera su estado de esfuerzos, lo que puede llevar a la falla.

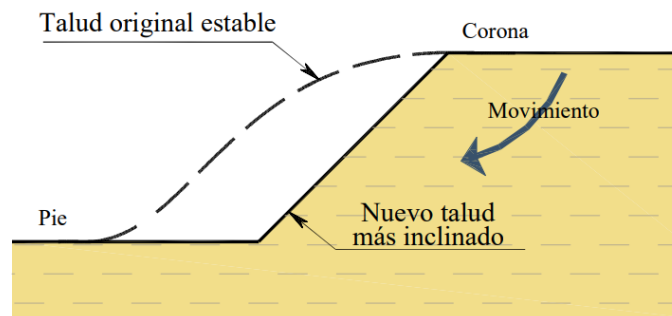


Figura 1 Cambio en la configuración del talud por Erosión. Fuente: Montoya, 2009.

### 2.1.2 Precipitación

A la hora de analizar un talud, es importante tener en cuenta que uno de los factores más importantes es la saturación presente por precipitación, debido a que un aumento en la saturación genera un aumento en la presión de poros, ocasionando una disminución en la resistencia al corte no drenado, que aumenta la probabilidad de falla.

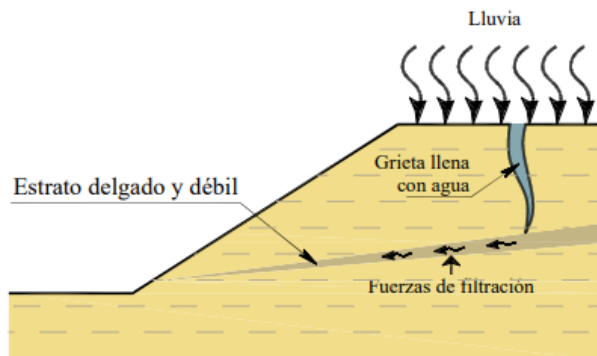


Figura 2. Efecto de la precipitación en un talud. Fuente: Montoya, 2009.

### 2.1.3. Sismo

El aumento de presión que genera una fuerza dinámica como la de un sismo, tiene efectos sumamente negativos sobre cualquier masa de suelo, ya que se genera un aumento en la presión sobre el agua que se encuentra dentro de la masa de suelo, la presión de poros aumenta, la resistencia al corte no drenado disminuye y, del mismo modo, se pueden generar fenómenos de licuefacción de suelos, aumentando la posibilidad de falla.



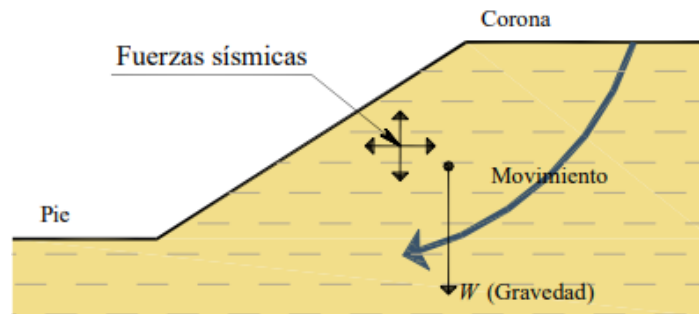


Figura 3. Efecto de un sismo sobre un talud. Fuente: Montoya, 2009.

#### 2.1.4. Aspectos geológicos y geotécnicos

Un parámetro muy importante (y curiosamente, pocas veces tenido en cuenta) es la geología propia de la zona, el hecho de que existan fallas o aspectos geológicos que al someterse a intervenciones antrópicas no fueron tenidos en cuenta, pueden desencadenar una falla. Sin embargo, los parámetros geotécnicos usualmente si se tienen en cuenta, pero de una manera global, y comúnmente no se relaciona para los taludes parámetros de capacidades muy deficientes debido a la geología propia de la zona.

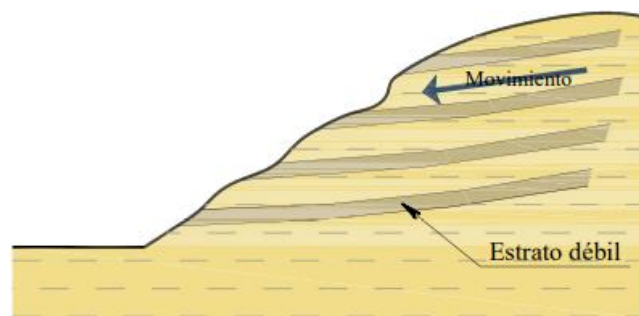
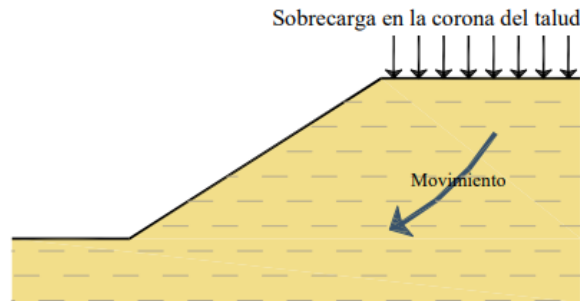


Figura 4. Talud con diferentes estratos. Fuente: Montoya, 2009.

#### 2.1.5 Sobrecarga

Las condiciones en las cuales un talud permanece en reposo por un periodo prolongado de tiempo dan en muchos casos una sensación de que el talud es estable para cualquier situación, usualmente una mala interpretación de esta supuesta estabilidad lleva a intervenciones antrópicas

mayores, usualmente construyendo estructuras sin un adecuado análisis del talud. El aumento de cargas a las cuales se encuentra el talud genera un cambio drástico en la distribución de esfuerzos y en el comportamiento propio de la superficie de falla.



*Figura 5 Talud sometido a una sobrecarga. Fuente: Montoya, 2009.*

Es importante mencionar que ninguno de los factores previamente mencionados, actúa de manera individual, la falla de un talud suele ir ligada a una suma de factores que afectan la estabilidad, como lo puede ser una pérdida de material, sumada a una época de lluvias, en un talud sometido a sobrecargas constantes, como lo es un talud común en las vías del país.

## **2.2. Métodos analíticos de taludes.**

Los taludes al ser masas de suelo, se rigen a partir de los principios de la geotecnia y la física clásica, en este caso, se hace necesario analizar el equilibrio del cuerpo rígido, constituido principalmente por el talud y por una superficie (variable) de deslizamiento, mediante el cual se analizan las fuerzas de tensión (o movilizadoras) y las fuerzas resistentes (GeoStru, 2022). Usualmente, el análisis de taludes se divide en análisis de tipo determinístico y probabilístico, los cuales dependen de parámetros como el ángulo de fricción  $\phi'$  y la cohesión  $c'$ , los valores de estos se obtienen a partir del muestreo de la zona de estudio, y los posteriores ensayos de laboratorio (Romel Gallardo, 2014).

De esta manera la ecuación que rige cuan estable es un talud, se le conoce como el factor de seguridad, la cual es una comparación entre las fuerzas movilizadoras y las fuerzas resistentes presentes en la masa de suelo. A continuación se presenta la ecuación:

$$F.S = \frac{\sum \text{Fuerzas resistentes al cortante}}{\sum \text{Fuerzas cortantes actuantes}} \quad (1)$$

Es importante recalcar que en ingeniería geotécnica, el esfuerzo cortante necesario para el cálculo del factor de seguridad es definido bajo el modelo de falla de Mohr-Coulomb, que se describe así:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan(\phi') \quad (2)$$

Donde:

- $\tau_f$  = Esfuerzo cortante a la falla
- $c'$  = Cohesión efectiva
- $\tan(\phi')$  = Tangente del ángulo de fricción efectivo
- $\sigma'$  = Esfuerzo efectivo del suelo

Diferentes autores como Bishop (1925), Fellenius (1927), Janbu (1954), Morgenstern-Price (1965) y Spencer (1967), desarrollaron métodos de equilibrio limite. Cada autor considera diferentes aproximaciones simplificadas o diferentes parámetros geotécnicos (Romel Gallardo, 2014). Como se presentará en la metodología, el método de análisis seleccionado para esta investigación fue el de Morgenstern-Price (1965).

### 2.2.1 Método de Morgenstern y Price

Diferentes autores suelen usar este método debido a dos factores principales, su precisión y aplicabilidad, Suarez en el 2002, describe el método de Morgenstern-Price como un método con una precisión muy alta, que se puede usar para cualquier tipo de geometría. El método se considera como uno de los métodos de rebanadas precisos, debido a que se basa en realizar una partición del talud en “rebanadas”, las cuales también se conocen como dovelas. El método sugiere que la fuerza resultante entre dovelas cambia con base en dos parámetros, una función arbitraria y una constante  $\lambda$  (Montoya, 2009). A continuación se presenta lo descrito por el método:

$$FS_m = \frac{\sum \{c\beta + (N - uL)R \tan \phi\}}{\sum W_x - \sum Nf \pm \sum Dd} \quad (3)$$

$$FS_f = \frac{\sum \{c\beta + (N - u) \tan \phi \cos \alpha\}}{\sum N \sin \alpha - \sum D \cos \alpha} \quad (4)$$

Donde:

- $FS_m$ : factor de seguridad con respecto al equilibrio de momentos
- $FS_f$ : factor de seguridad con respecto al equilibrio de fuerzas
- $c$ : cohesión del suelo
- $\phi$ : ángulo de fricción del suelo
- $\beta$ : longitud de la superficie de falla
- $W$ : peso de la dovela
- $\alpha$ : inclinación de la superficie de falla
- $N$ : fuerza normal entre dovelas
- $x$ : fuerza tangencial entre dovelas

Es importante mencionar que con respecto al Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), la norma establece los valores y metodologías necesarias para análisis de estabilidad de taludes, sin embargo, es importante resaltar que dentro de esta norma no se consideran situaciones poco convencionales, como el presente caso de estudio, pero sí trae apreciaciones aplicables, así como recomendaciones de diseño, construcción, de ensayos de campo y laboratorio.

### 3 Metodología

#### 3.1. Área de estudio

Como se mencionó previamente, esta investigación se basa en la aplicación y el análisis de diferentes escenarios de estabilidad de taludes para condiciones del mar Caribe colombiano, en específico en un talud costero localizado en el terreno perteneciente a la Universidad de Antioquia (Figura 6), ubicado en el municipio de Arboletes-Antioquia. Los datos se obtuvieron en convenio directo con el Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño (PIMECLA), que suministró información geotécnica y oceanográfica del área de estudio, además, sumado a esta, información de autores externos e investigaciones similares que complementaron los datos.

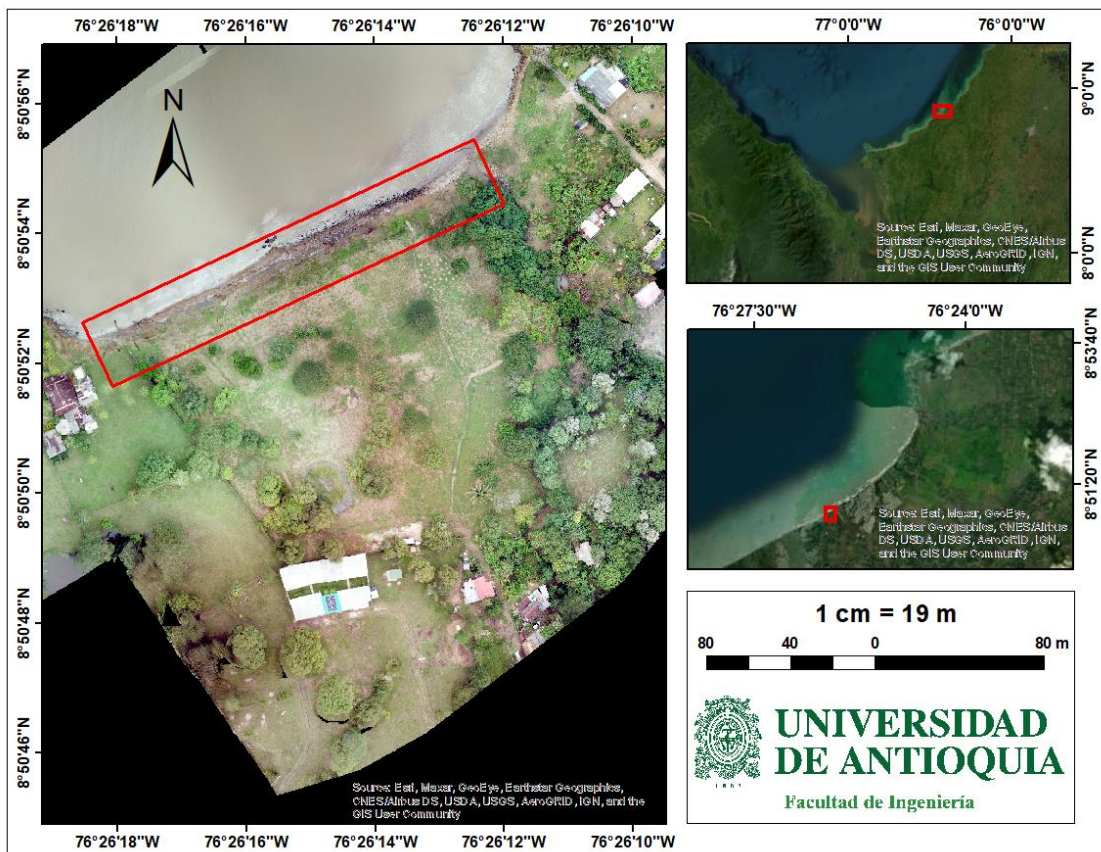


Figura 6 Área de estudio( Lote de la Universidad de Antioquia). Fuente: Elaboración propia.

La zona de estudio cuenta con un clima tropical, con dos temporadas climáticas principales. La temporada seca, que abarca desde finales de diciembre hasta principios de abril, y la temporada húmeda, desde mayo hasta noviembre. La temporada seca, en promedio, cuenta con precipitaciones que rondan los 40mm/mes y velocidades promedios de viento de 8m/s; y la temporada húmeda llega a valores de precipitación cercanas a 100mm/mes y velocidades promedio de viento de aproximadamente 3m/s (Thomas et al., 2007).

### 3.2. Modelo geotécnico de estabilidad

Con el fin de establecer un modelo geotécnico de estabilidad a partir de las diferentes investigaciones y mediciones realizadas en PIMECLA en el laboratorio natural de la Universidad de Antioquia, se deben establecer dos pilares fundamentales para analizar la estabilidad del talud: la primera es la topografía o geometría del talud, y la segunda es la información geotécnica.

El 21 de septiembre del 2021, el proyecto PIMECLA en el marco de su análisis geotécnico, realizó tres perforaciones en la zona de estudio, alcanzando profundidades máximas de 8m. A continuación se presenta los puntos de exploración:

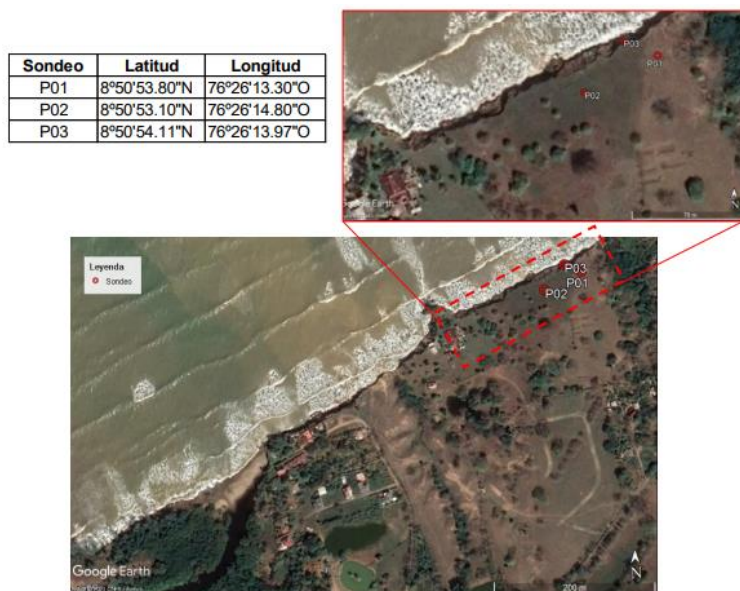


Figura 7 Localización de los sondeos y coordenadas. Fuente: Proyecto PIMECLA (2021).

En el análisis de campo y de laboratorio, el proyecto, identifico 2 grandes estratos:

- Un primer estrato de tipo deposito aluvial, identificado con una textura de tipo arena limosa de color marrón, el estrato se presenta a una profundidad de entre 6-8m por debajo de la corona del talud.
- Un segundo estrato de tipo arcillolita gris, identificada con una textura de tipo arcilla de alta plasticidad, el estrato se presenta una vez que acabe el depósito aluvial, llegando a las profundidades máximas del talud (entre 8m-12m).

Una vez realizadas las perforaciones, el proyecto realizó los diferentes ensayos de laboratorio y se obtuvo los siguientes datos:

*Tabla 1 Parámetros drenados y no drenados del Depósito Aluvial. Fuente: Proyecto PIMECLA (2022).*

Parámetro	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar	Promedio	Cov (%)	Parámetro elegido
$\Phi'$ (°)	17	29	4	21	17.0%	21
C' (kPa)	3	19	5	9	53.6%	9
$\Phi$ (°)	-	-	-	-	-	30
Su (kPa)	20	63	14	36	37.8%	18
E (kPa)	3900	11100	2135	5890.91	36.2%	5890.91

*Tabla 2 Parámetros drenados y no drenados de la Arcillolita. Fuente: Proyecto PIMECLA (2022).*

Parámetro	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar	Promedio	Cov (%)	Parámetro elegido
$\Phi'$ (°)	18	30	6	25	22.3%	25
C' (kPa)	8	56	20	34	58.5%	34
$\Phi$ (°)	17.75	26.32	6.06	22.04	27.5%	22.04
Su (kPa)	30.89	53.08	15.69	41.99	37.4%	41.99
E (kPa)	8100	19500	7924	14550.00	54.5%	14550.00

Con respecto a la topografía, el proyecto realizó mediciones de 8 perfiles entre el 14 de agosto del 2021, hasta el 23 de abril del 2022, en una frecuencia aproximada de una toma cada 15 días (excepto por diciembre y enero), siendo un total de 16 mediciones para cada perfil. A continuación se muestran la ubicación de los perfiles:

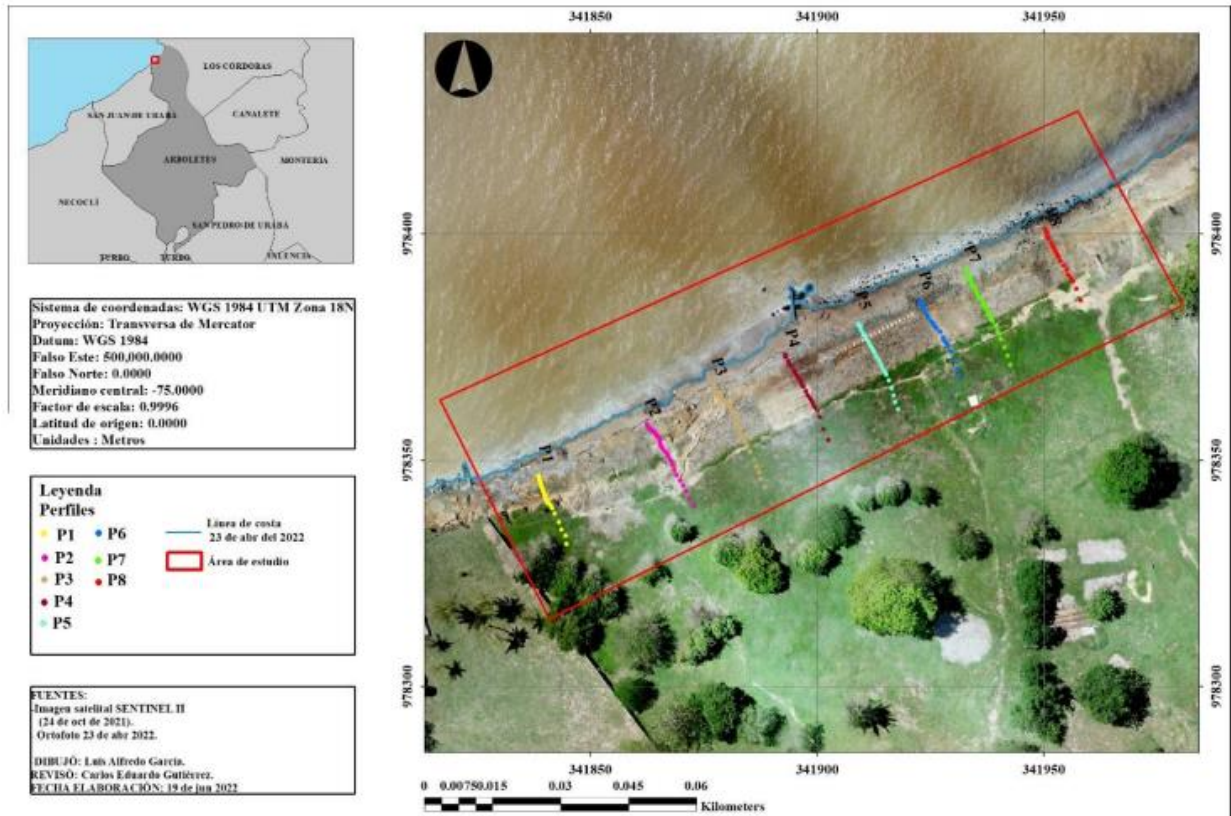


Figura 8 Ubicación de los perfiles en la zona de estudio. Fuente: Proyecto PIMECLA (2022).

Es importante mencionar que los 8 perfiles se distribuyen en 2 zonas distintas, la primera es una zona natural, la cual no cuentan con intervención humana (Perfiles 1, 2 y 3) y la segunda es una zona que recibió un perfilamiento del talud, el cual cuenta con dos pendientes, la primera de 15° y la segunda de 35°, (Perfiles 4,5,6,7 y 8). El proyecto realizó también el análisis de pérdida de material ocasionado por la erosión costera en los diferentes taludes, como se muestra a continuación:



*Tabla 3 Seguimiento de la erosión costera en los perfiles. Fuente: Proyecto PIMECLA 2022*

Fecha	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Perfil 8
14/08/2021*	-	-	-	-	-	-	-	-
28/08/2021	0.33	0.26	0.67	0.39	0.07	0.11	0.00	0.08
12/09/2021	0.00	0.99	0.13	0.03	0.00	0.01	0.00	0.05
25/09/2021	0.02	0.20	0.05	0.10	0.41	0.14	0.51	0.05
10/10/2021	0.78	0.17	0.75	0.00	-	0.18	0.48	0.48
23/10/2021	0.27	0.00	0.00	0.11	0.00	0.22	0.00	0.39
6/11/2021	0.07	0.03	0.00	0.08	0.01	0.16	0.04	0.04
20/11/2021	0.00	0.00	0.33	0.24	0.03	0.00	0.00	0.00
4/12/2021	0.17	0.00	0.14	0.12	0.03	0.35	0.02	-
29/01/2022	3.56	0.30	2.62	0.24	0.57	1.39	1.57	0.07
10/02/2022	0.00	0.09	0.30	0.00	0.04	0.58	0.19	0.00
26/02/2021	1.59	0.09	0.79	0.37	0.66	0.02	0.76	0.27
12/03/2022	0.41	0.24	0.12	0.40	0.53	0.11	0.10	0.00
26/03/2022	0.53	1.22	0.29	0.08	0.33	0.14	0.02	0.01
09/04/2022	0.65	0.45	0.25	0.25	0.03	-1.46	1.01	0.21
23/04/2022	0.21	-0.21	0.02	0.03	0.07	0.13	1.30	0.00
<b>Total</b>	<b>8.60</b>	<b>3.83</b>	<b>6.47</b>	<b>2.45</b>	<b>2.79</b>	<b>2.08</b>	<b>6.00</b>	<b>1.65</b>

**Metodología para el desarrollo de los objetivos:**

Con el fin de llevar a cabo un desarrollo lógico y consecuente con el objetivo general y los específicos, se plantea la siguiente metodología, a partir de dos etapas, que se describirán a continuación:

**Etapas 1. Planteamiento del modelo de estabilidad:** En esta fase de la investigación, los datos geotécnicos, tales como valores del ensayo de penetración estándar (SPT), caracterización del tipo de suelo en profundidad, valores de ángulo de fricción, peso específico y cohesión, fueron suministrados por el proyecto PIMECLA, además de todo el monitoreo de la topografía entre agosto del 2021 y abril del 2022. Posteriormente, usando el software SLIDE (ver figuras 9, 10 y

11), se establecieron 16 modelos por cada uno de los 8 perfiles (uno para cada medición de topografía), siendo un total de 127 modelos debido a que en el 04 de diciembre no sé pudo tomar los datos del perfil 8. Cada modelo consiste en una vista 2D del talud, la cual se dividió en los dos estratos identificados, cada estrato cuenta con parámetros no drenados (corto plazo) y parámetros drenados (largo plazo). Es importante mencionar que en las exploraciones en campo no se evidencio un valor de nivel freático, sin embargo, se ubicó en todos los casos de análisis en la intersección de los estratos. A continuación se presenta la información en el software SLIDE.

#	Material Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
1	Deposito aluvial NO DRENADO	Phi	Normal	30	4.5	26	34
2	Deposito aluvial NO DRENADO	Cohesion	Normal	36	14	20	63
3	Arcillolita NO DRENADO	Phi	Normal	22.04	6.06	17.75	26.32
4	Arcillolita NO DRENADO	Cohesion	Normal	42	15.69	30.89	53.08
5	Deposito aluvial DRENADO	Cohesion	Normal	9	5	3	19
6	Deposito aluvial DRENADO	Phi	Normal	21	4	17	29
7	Arcillolita DRENADO	Cohesion	Normal	34	20	8	56
8	Arcillolita DRENADO	Phi	Normal	25	6	18	30

*Figura 9 Parámetros geotécnicos de modelación. Fuente: Extraído de modelo SLIDE*

Se hace relevante mencionar adicionalmente que únicamente se utilizó el método de equilibrio límite de Morgenstern-Price, con una tolerancia de 0.05 y 50 rebanadas.

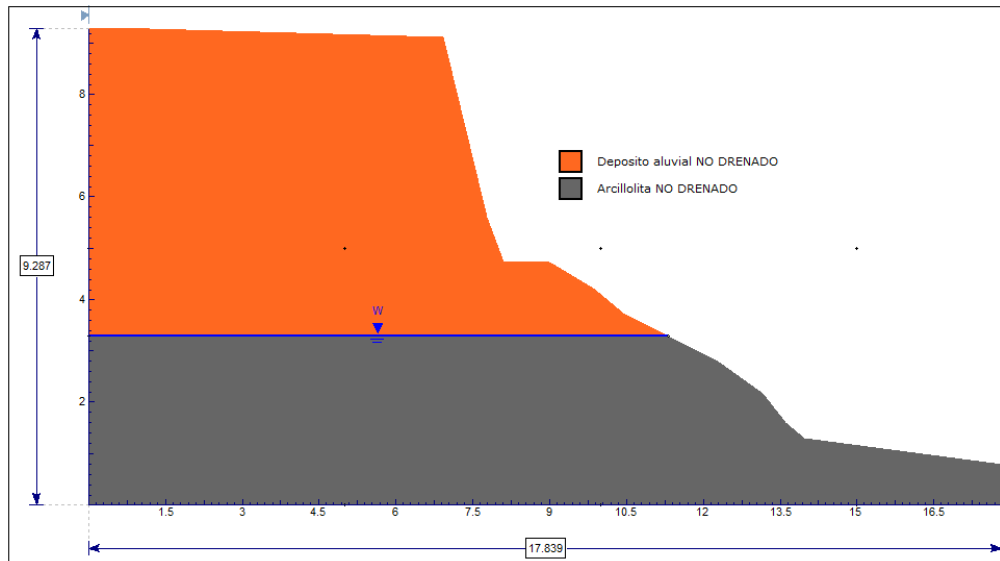


Figura 10 Ejemplo modelo geotécnico para el perfil 1 Fuente: Extraído de modelo SLIDE.

Posterior a la introducción de los datos geotécnicos, topográficos y las metodologías de análisis, el programa entrega el siguiente resultado (como ejemplo del perfil 1):

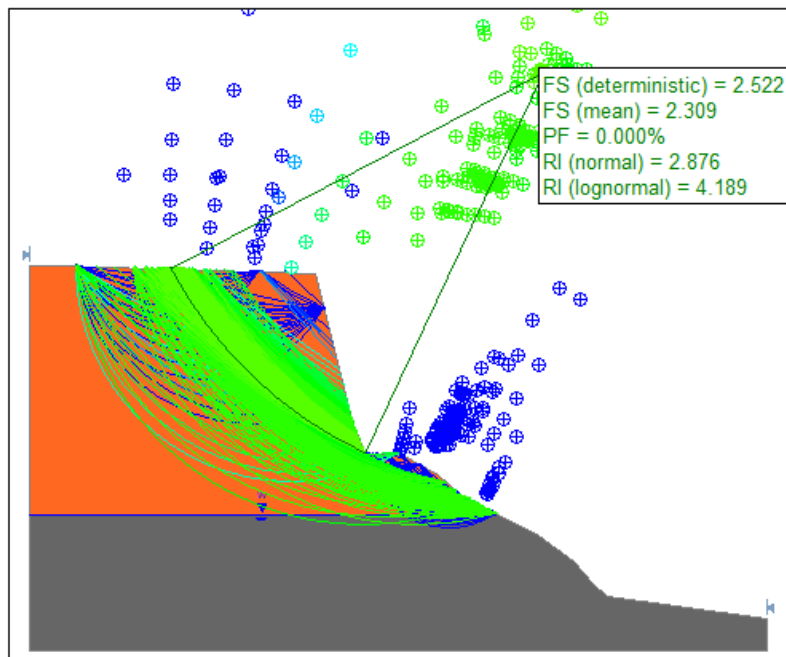


Figura 11 Resultado de la modelación del perfil 1. Fuente: Extraído de modelo SLIDE.

**Etapla 2. Análisis de resultados:** Una vez realizadas las 127 modelaciones (en los casos de corto y largo plazo), se tomó como valor base el valor de estabilidad de la primera medición, con ese valor cada perfil se comparó cada perfil posterior. Lo primero que se realizó fueron las gráficas del comportamiento de estabilidad en el tiempo, con lo que se pudo identificar las épocas del año con variaciones significativas. Posteriormente, se realizaron las gráficas del porcentaje de variación con respecto a la primera topografía.

Tanto para el comportamiento en el tiempo como para la variación en el tiempo, se calcularon los promedios por perfil, de este modo se pudo identificar las diferencias promedio entre los 8 perfiles, y así se determinó la variación individual según la zona y se pudo establecer una diferencia entre la zona no intervenida y la zona intervenida.

Una vez establecido el comportamiento en el tiempo del factor de seguridad, se obtuvo gráficas de del cambio de la precipitación y el viento en el tiempo (los datos para estas gráficas fueron obtenidos de la base de datos global de ERA5, la cual cuenta con una resolución de aproximadamente 0.2 grados). El mayor inconveniente para este análisis fue la poca disponibilidad de datos *in-situ* de las variables en este periodo de tiempo, y lo mismo la gruesa resolución de los datos en una escala global. Sin embargo, con los datos disponibles, se llevaron a cabo comparaciones para encontrar posibles correlaciones entre variables climatológicas y el factor de seguridad.

#### **4 Resultados y Análisis**

A continuación, se presentan los resultados a partir de la metodología planteada, los resultados se llevaron a cabo de tal modo que dieran respuesta a los objetivos específicos.

Se llevaron a cabo 254 modelaciones, las cuales se distribuyen en 127 modelaciones en condición de parámetros no drenados (corto plazo), y 127 en condición de parámetros drenados (largo plazo). Las 127 se dividen en 32 modelaciones por perfil (exceptuando el perfil 8 que tuvo 30 modelaciones). A continuación se presentan los resultados de las modelaciones, divididos en corto y largo plazo.

##### **4.1. Resultados de modelación a corto plazo (parámetros no drenados).**

En la tabla 3, se presentan los resultados de las modelaciones de todos los perfiles para la condición en la cual se usaron los parámetros no drenados. Como se evidencia, ningún talud presenta un factor menor a 1.0 para una condición de corto plazo, límite que se suele tener en cuenta para considerar que un talud se encuentra en una adecuada estabilidad. Se aprecia como el perfil 1 (el cual tiene la mayor inclinación de todos), cuenta con los valores mínimos de factor de seguridad, alcanzando su mínimo de 2.234 el 23 de abril de 2022. Por otro lado, el talud que mayor estabilidad presentó fue el perfil 3, el cual alcanzó su valor máximo de 3.952 el 12 de septiembre de 2021.

*Tabla 4 Comportamiento del factor de seguridad de los parámetros no drenados*

Fecha	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Perfil 8
14/08/2021	2.522	3.71	3.621	3.245	3.080	3.062	3.107	3.28
28/08/2021	2.579	3.718	3.859	3.232	3.073	3.071	3.105	3.145
12/09/2021	2.79	3.477	3.952	3.187	3.080	3.068	3.094	3.181
25/09/2021	2.624	3.802	3.646	3.140	3.104	3.087	3.187	3.501
10/10/2021	2.407	3.652	3.661	2.870	3.011	3.165	3.142	3.379
23/10/2021	2.378	3.528	3.931	3.166	3.036	3.275	3.09	3.207
6/11/2021	2.652	3.425	3.921	3.154	3.066	3.322	3.102	3.278
20/11/2021	2.582	3.423	3.657	3.124	3.004	3.026	3.054	3.24
4/12/2021	2.589	3.312	3.598	3.141	3.138	3.018	3.224	N/A
29/01/2022	2.337	3.303	3.47	3.160	3.045	3.132	3.118	3.144

Fecha	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Perfil 8
10/02/2022	2.624	3.289	3.471	3.146	2.990	2.814	3.307	3.147
26/02/2022	2.264	3.304	3.537	3.165	3.055	3.249	3.148	3.159
12/03/2022	2.296	3.327	3.495	3.161	3.023	2.84	3.156	3.108
26/03/2022	2.43	3.343	3.431	3.169	3.06	3.011	3.14	3.13
9/04/2022	2.365	3.373	3.563	3.146	3.155	2.914	3.228	3.073
23/04/2022	2.234	3.385	3.189	3.183	3.008	3.014	3.227	3.322

Con el fin de observar el comportamiento de los datos en el tiempo, en la figura 12 se graficaron los datos de la tabla 4. Existe una tendencia a la baja del factor de seguridad en el tiempo, se evidencian comportamientos diferentes en algunos perfiles. A continuación se mencionará el comportamiento general de los perfiles:

**Perfil 1:** Cuenta con la mayor pendiente y no contó con ninguna intervención por parte del proyecto, el valor de estabilidad inicial fue de 2.522 y valor al finalizar el análisis fue de 2.234, teniendo una reducción en la estabilidad de -0.288 en un periodo de 8 meses.

**Perfiles 2 y 3:** Son los perfiles de menores pendientes, los cuales no sufrieron intervenciones por parte del proyecto, sin embargo, ambos cuentan con las menores pendientes de entre todos los taludes. En ambos casos se presentó una reducción del factor de seguridad en el segundo perfil paso de 3.71 a 3.385, reduciéndose -0.325 y en el tercer perfil pasó de tener 3.621 a 3.189, con una reducción de -0.432.

**Perfiles 4,5,6,7 y 8:** Se presentan 5 perfiles, todos se encuentran en la zona de intervención, con pendientes de 15° y 35°, se evidencia que los perfiles 4, 5 y 6, presentaron una disminución del factor de seguridad en el tiempo. Por otro lado, en los perfiles 7 y 8, el factor de seguridad aumentó en 0.12 y 0.042 respectivamente.

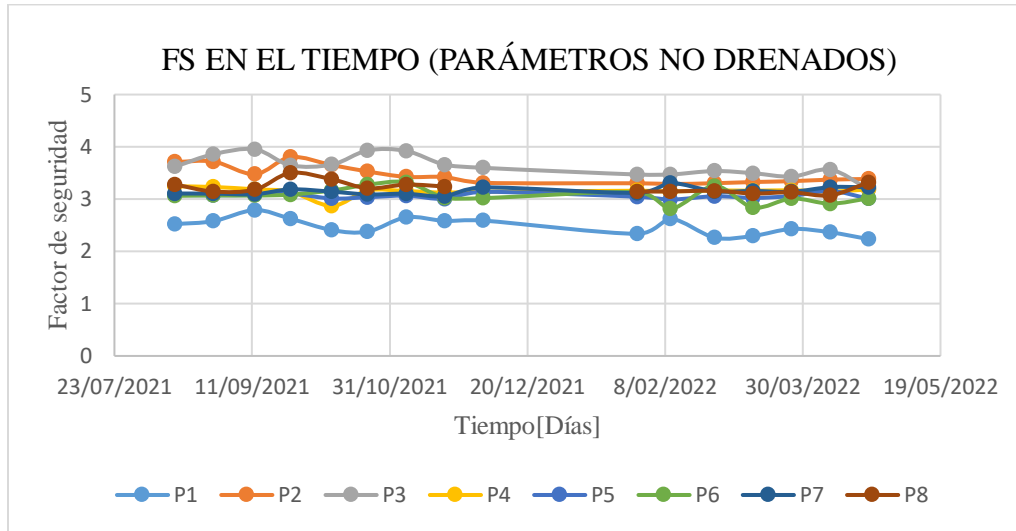


Figura 12 Comportamiento del factor de seguridad para parámetros no drenados.

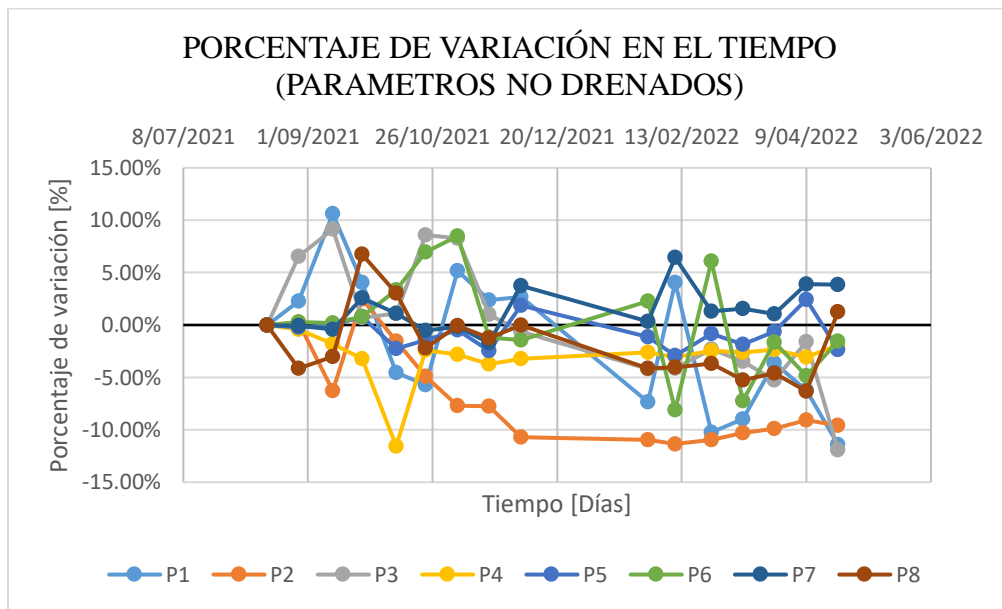
Al analizar los resultados de la figura 12, no son notorias las variaciones individuales entre los diferentes perfiles, debido a esto se procedió a calcular el porcentaje de variación entre el primer resultado y los siguientes, de este modo, se puede evidenciar de manera más notoria, las modificaciones porcentuales en el factor de seguridad. En la tabla 5, se puede observar el porcentaje de variación en el tiempo para parámetros no drenados.

Tabla 5 Porcentaje de variación del factor de seguridad para parámetros no drenados.

Porcentaje de variación de seguridad para los perfiles en condición NO DRENADA								
Fecha	% var P1	% var P2	% var P3	% var P4	% var P5	% var P6	% var P7	% var P8
14/08/2021	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
28/08/2021	2.26%	0.22%	6.57%	-0.40%	-0.23%	0.29%	-0.06%	-4.12%
12/09/2021	10.63%	-6.28%	9.14%	-1.79%	0.00%	0.20%	-0.42%	-3.02%
25/09/2021	4.04%	2.48%	0.69%	-3.24%	0.78%	0.82%	2.57%	6.74%
10/10/2021	-4.56%	-1.56%	1.10%	-11.56%	-2.24%	3.36%	1.13%	3.02%
23/10/2021	-5.71%	-4.91%	8.56%	-2.43%	-1.43%	6.96%	-0.55%	-2.23%
6/11/2021	5.15%	-7.68%	8.29%	-2.80%	-0.45%	8.49%	-0.16%	-0.06%
20/11/2021	2.38%	-7.74%	0.99%	-3.73%	-2.47%	-1.18%	-1.71%	-1.22%
4/12/2021	2.66%	-10.73%	-0.64%	-3.20%	1.88%	-1.44%	3.77%	N/A
29/01/2022	-7.34%	-10.97%	-4.17%	-2.62%	-1.14%	2.29%	0.35%	-4.15%
10/02/2022	4.04%	-11.35%	-4.14%	-3.05%	-2.92%	-8.10%	6.44%	-4.05%
26/02/2022	-10.23%	-10.94%	-2.32%	-2.47%	-0.81%	6.11%	1.32%	-3.69%

Fecha	% var P1	% var P2	% var P3	% var P4	% var P5	% var P6	% var P7	% var P8
12/03/2022	-8.96%	-10.32%	-3.48%	-2.59%	-1.85%	-7.25%	1.58%	-5.24%
26/03/2022	-3.65%	-9.89%	-5.25%	-2.34%	-0.65%	-1.67%	1.06%	-4.57%
9/04/2022	-6.23%	-9.08%	-1.60%	-3.05%	2.44%	-4.83%	3.89%	-6.31%
23/04/2022	-11.42%	-9.60%	-11.93%	-1.91%	-2.34%	-1.57%	3.86%	1.28%

Como se puede observar, en los perfiles 1,2,3,4,5 y 6 se registraron variaciones negativas al final de la modelación, es decir, hubo un decrecimiento en el factor de seguridad y en los perfiles 7 y 8 hubo una mejoría en el factor de seguridad. Posteriormente, se graficó la tabla 5, con el fin de poder realizar un análisis del comportamiento a lo largo del tiempo.



*Figura 13 Porcentaje de variación del factor de seguridad para parámetros no drenados.*

Los porcentajes muestran un comportamiento mucho más variable de la forma en la cual el factor de seguridad se comporta en el tiempo, a continuación se describirán los comportamientos generales de los perfiles:

**Perfiles 1, 2 y 3:** Se evidencia que estos tres perfiles cuentan con los porcentajes más altos de variación, con valores finales de -11.42% -9.6% y -11.93% respectivamente, los datos indican que estos tres perfiles (en zona no intervenida), presentan una mayor disminución del factor de seguridad con respecto a los otros.

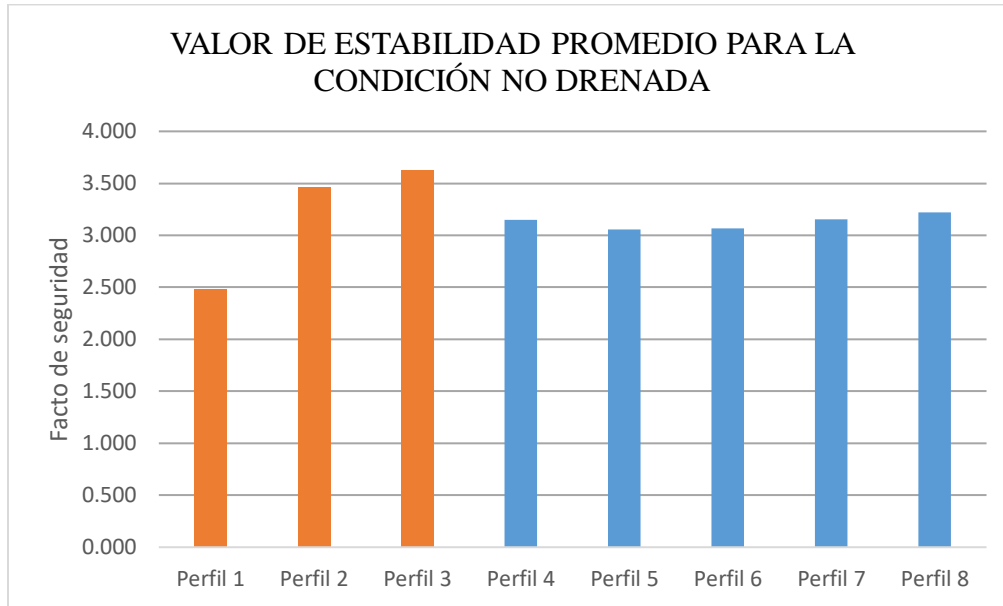


---

**Perfiles 4, 5, y 6:** Estos perfiles presentaron porcentajes de variación negativa muy bajos, con valores de -1.91%, -2.34%, y -1.57% respectivamente, lo que indica que la intervención ha desacelerado la pérdida del factor de seguridad en los taludes.

**Perfiles 7 y 8:** Para estos dos perfiles se presentó un aumento en el factor de seguridad, el comportamiento es anormal debido a que si hubo una pérdida de material, la erosión no aumento el volumen de material, esto indica que más allá de que se pierda material, no se puede asegurar una disminución del factor de seguridad del talud, debido a que los métodos de equilibrio limite dependen mucho de la geometría de las rebanadas, por lo que una disminución de material en una parte del talud, genera una disminución de peso que puede contribuir de manera positiva en el aumento del factor de seguridad.

Es importante mencionar que el primer material que interacciona con el oleaje es un material de tipo arcillolita con propiedades mecánicas muy favorables ante la acción del oleaje, una cohesión alta evita que se propague la erosión. Lo anterior explica porque durante 8 meses la erosión no llevó a cabo una disminución del factor de seguridad de más del 12%. También es relevante mencionar que más allá de que los perfiles 2 y 3 presentaran los mayores factores de seguridad, no quedaron exentos de que el decrecimiento en términos porcentuales sea mucho mayor, siendo aproximadamente 3 veces mayor a las zonas intervenidas. En la figura 14 se presenta la estabilidad promedio de los diferentes perfiles, en naranja se ven los perfiles no intervenidos y en azul los intervenidos, es preciso mencionar que los perfiles 2 y 3 presentan los mayores valores de estabilidad y el perfil 1, el menor valor de estabilidad. Sin embargo, estos valores son engañosos, debido a que perfiles que fueron completamente intervenidos como del 4 al 8, presentan menores valores de estabilidad que el 2 y 3, pero a la hora de presentarse una disminución, porcentualmente es mucho mayor en los perfiles no intervenidos.



*Figura 14 Valor de estabilidad promedio para la condición no drenada*

**4.2. Resultados de modelación a largo plazo (parámetros drenados).**

En la tabla 6 se presentan los resultados de las modelaciones de todos los perfiles para la condición en la cual la presión de poros se ha disipado. Como se puede evidenciar, todos los taludes presentan factores de seguridad menores a 1.6. El perfil 1, al igual que en para la condición a corto plazo, presenta un valor mucho más bajo que los demás, en este caso se cuenta con valores menores a 1, indicando que para una condición de largo plazo el perfil 1 es inestable.

*Tabla 6 Factor de seguridad para los perfiles en condición DRENADA*

Factor de seguridad para los perfiles en condición DRENADA								
Fecha	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Perfil 8
14/08/2021	0.863	1.552	1.622	1.32	1.240	1.247	1.289	1.299
28/08/2021	0.871	1.549	1.665	1.318	1.259	1.271	1.283	1.226
12/09/2021	0.936	1.426	1.648	1.299	1.252	1.252	1.279	1.24
25/09/2021	0.884	1.503	1.706	1.267	1.264	1.258	1.283	1.387
10/10/2021	0.815	1.446	1.694	1.212	1.201	1.301	1.267	1.345
23/10/2021	0.806	1.465	1.661	1.296	1.245	1.287	1.281	1.278
6/11/2021	0.884	1.387	1.628	1.282	1.247	1.302	1.280	1.304
20/11/2021	0.866	1.321	1.635	1.259	1.221	1.235	1.267	1.28

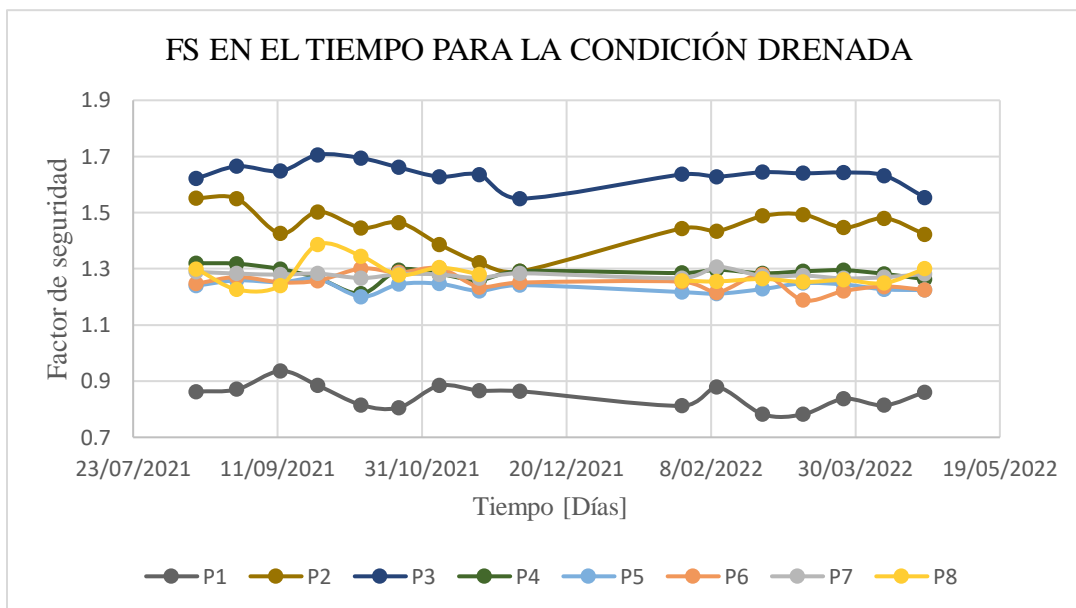
Fecha	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Perfil 8
4/12/2021	0.864	1.291	1.55	1.292	1.242	1.251	1.284	N/A
29/01/2022	0.812	1.444	1.636	1.285	1.217	1.254	1.267	1.258
10/02/2022	0.879	1.434	1.628	1.297	1.211	1.216	1.307	1.255
26/02/2022	0.782	1.488	1.644	1.284	1.228	1.279	1.274	1.264
12/03/2022	0.782	1.493	1.64	1.291	1.249	1.188	1.276	1.253
26/03/2022	0.837	1.447	1.643	1.295	1.244	1.221	1.266	1.26
9/04/2022	0.814	1.48	1.632	1.282	1.227	1.237	1.270	1.249
23/04/2022	0.861	1.423	1.554	1.263	1.224	1.225	1.282	1.3

En la figura 15, se graficaron los datos en cuestión, con el fin de observar el patrón en el tiempo, existe una tendencia a la baja del factor de seguridad en el tiempo, se evidencian comportamientos diferentes en algunos perfiles, a continuación se mencionará el comportamiento general de los perfiles:

**Perfil 1:** Cuenta con la mayor pendiente y no contó con ninguna intervención por parte del proyecto, el valor de estabilidad inicial fue de 0.863 y valor al finalizar el análisis fue de 0.861, teniendo una reducción en la estabilidad de 0.002, que en un periodo de 8 meses, y por la variación que pueden tener los ensayos, los suelos y otras variables, 0.002 indicaría que no existió una variación en el factor de seguridad, lo que indica que una modificación en la geometría de este perfil no influyó en mayor medida el comportamiento a largo plazo del talud, puesto a que ya se encuentra en un estado de inestabilidad. Es importante mencionar que aunque se presentó un factor de seguridad menor a la unidad (lo que indicaría una falla), lo cual aún no ocurre, está es una condición de largo plazo, lo que indica que el talud podría fallar cuando se de un drenaje total.

**Perfiles 2 y 3:** Se tienen los dos perfiles con mayores factores de seguridad, en ambos casos se cuentan con las pendientes menos inclinadas, sin embargo, en los dos casos se presentó una reducción del factor de seguridad, en el segundo perfil paso de 1.552 a 1.423, reduciéndose -0.129 y en el tercer perfil pasó de tener 1.622 a 1.554, con una reducción de -0.068. En ambos casos, el factor de seguridad se redujo muy poco, algo muy diferente a lo que sucedía en el caso de los parámetros no drenados, indicando de este modo que a largo plazo la pérdida de material individual que se presentó en los perfiles no tiene la misma influencia que a corto plazo.

**Perfiles 4,5,6,7 y 8:** Se presentan 5 perfiles, los cuales se encuentran en la zona de total intervención, con pendientes de 15° y 35°, se evidencia que en los perfiles del 4 al 7, disminuyó y el 8 aumentó su factor de seguridad, sin embargo, los valores que disminuyeron (el 4, 5, 6, 7) y el que aumento (el 8), fueron muy bajos, con valores de -0.057, -0.016, -0.022, -0.007 y 0.001, respectivamente. Del mismo modo que en los anteriores taludes, los datos indican que la variación del factor de seguridad a raíz del cambio en la topografía en el largo plazo no es representativa, por lo que a largo plazo los parámetros geotécnicos juegan un papel más relevante en la estabilidad.



*Figura 15 Factor de seguridad en el tiempo para la condición drenada*

Al analizar los resultados de la figura 15, se evidencian algunas variaciones individuales entre los diferentes perfiles, sin embargo, se procedió a calcular el porcentaje de variación entre el primer resultado y los siguientes, para que de este modo se pudiese distinguir de manera más notoria las modificaciones porcentuales en el factor de seguridad. En la tabla 7, se puede observar el porcentaje de variación en el tiempo para parámetros drenados.

*Tabla 7 Porcentaje de variación de seguridad para los perfiles en condición DRENADA*

Porcentaje de variación de seguridad para los perfiles en condición DRENADA								
Fecha	% var P1	% var P2	% var P3	% var P4	% var P5	% var P6	% var P7	% var P8
14/08/2021	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
28/08/2021	0.93%	-0.19%	2.65%	-0.15%	1.53%	1.92%	-0.47%	-5.62%
12/09/2021	8.46%	-8.12%	1.60%	-1.59%	0.97%	0.40%	-0.78%	-4.54%
25/09/2021	2.43%	-3.16%	5.18%	-4.02%	1.94%	0.88%	-0.47%	6.77%
10/10/2021	-5.56%	-6.83%	4.44%	-8.18%	-3.15%	4.33%	-1.71%	3.54%
23/10/2021	-6.60%	-5.61%	2.40%	-1.82%	0.40%	3.21%	-0.62%	-1.62%
6/11/2021	2.43%	-10.63%	0.37%	-2.88%	0.56%	4.41%	-0.70%	0.38%
20/11/2021	0.35%	-14.88%	0.80%	-4.62%	-1.53%	-0.96%	-1.71%	-1.46%
4/12/2021	0.12%	-16.82%	-4.44%	-2.12%	0.16%	0.32%	-0.39%	N/A
29/01/2022	-5.91%	-6.96%	0.86%	-2.65%	-1.85%	0.56%	-1.71%	-3.16%
10/02/2022	1.85%	-7.60%	0.37%	-1.74%	-2.34%	-2.49%	1.40%	-3.39%
26/02/2022	-9.39%	-4.12%	1.36%	-2.73%	-0.97%	2.57%	-1.16%	-2.69%
12/03/2022	-9.39%	-3.80%	1.11%	-2.20%	0.73%	-4.73%	-1.01%	-3.54%
26/03/2022	-3.01%	-6.77%	1.29%	-1.89%	0.32%	-2.09%	-1.78%	-3.00%
9/04/2022	-5.68%	-4.64%	0.62%	-2.88%	-1.05%	-0.80%	-1.47%	-3.85%
23/04/2022	-0.23%	-8.31%	-4.19%	-4.32%	-1.29%	-1.76%	-0.54%	0.08%

Como se puede observar, en los perfiles 1,2,3,4,5, 6 se registraron variaciones negativas de más del 1%, es decir, hubo un decrecimiento en el factor de seguridad. Por otro lado, en los perfiles 7 y 8 hubo una variación del factor de seguridad menor al 1%, una disminución de solo 0.54% y un aumento de solo 0.08% no son valores representativos, por lo cual se puede afirmar que para estos casos, no hubo variación en el factor de seguridad.

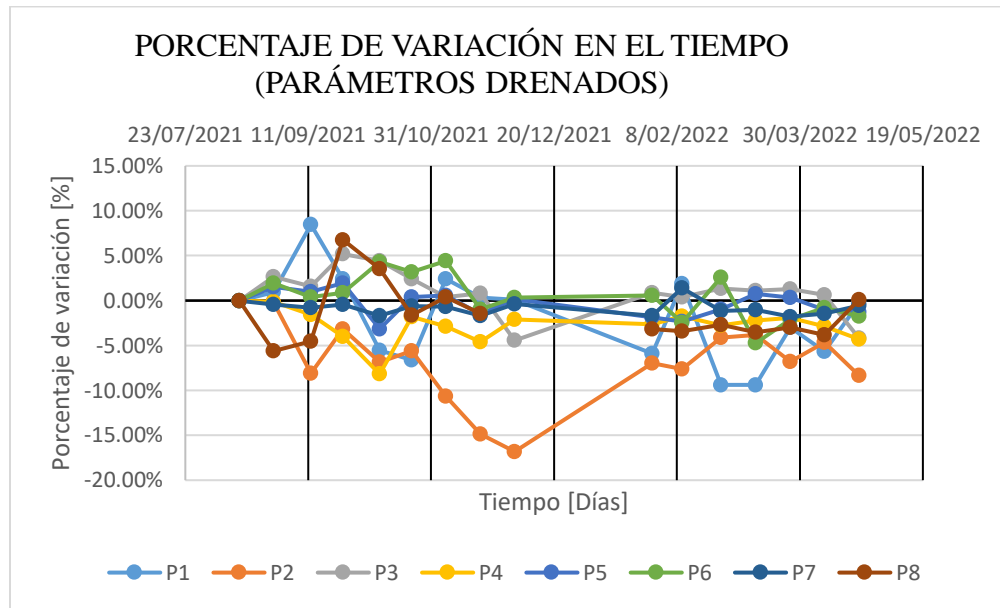


Figura 16 Porcentaje de variación del factor de seguridad para parámetros drenados.

En general, las variaciones en a largo plazo presentan una tendencia más estable, 7 de los 8 perfiles no superaron un porcentaje de variación mayor al 5%, y para el caso del perfil 2, se tuvo una tendencia de alto decrecimiento en el 2021 y posteriormente terminó en un valor cercano a los otros perfiles. A continuación se hace un análisis más detallado del comportamiento de los perfiles.

**Perfiles 1, 5, 6, 7 y 8:** Se evidencia que estos 5 perfiles cuentan con los porcentajes de variación más bajos, ninguno superó el 2% de variación, lo que indica que perfiles intervenidos como lo son del 5 al 8, cuentan con poca variación del factor de seguridad, y con respecto al perfil 1, se puede afirmar que debido a que este perfil ya se encuentra en un estado inestable, su variación no se hace representativa sobre un análisis comparativo con respecto a los perfiles que si fueron intervenidos.

**Perfil 2:** Es el perfil que más variación presentó, al final del análisis se tiene un porcentaje de -8.31, es importante mencionar que este es un perfil no intervenido, y con una pendiente muy baja, posiblemente el hecho de que cuenta con esa pendiente tan baja, favorece que, a largo plazo, el cambio sea más grande. Otro factor que podría contribuir es el hecho de que los parámetros geotécnicos de ese punto específico favorezcan la erosión costera. Es importante mencionar que

entre agosto y diciembre del 2021, el descenso fue mucho más alto, llegando a niveles aproximados del -16%.

**Perfiles 3 y 4:** Estos perfiles presentan una variación media, que no supera el 5%, sin embargo, se evidencia que no sufrieron etapas de descenso o ascenso abruptas, a diferencia del perfil 2, el comportamiento fue de manera similar al resto de los perfiles, con la diferencia que en el resultado final se tuvo una diferencia mayor.

Es importante mencionar que la intervención realizada evidencia valores significativamente menores de variación con respecto a los taludes que no fueron intervenidos, lo que indica que a largo plazo la intervención es muy efectiva.

**4.2.1 Evaluación de la probabilidad de falla**

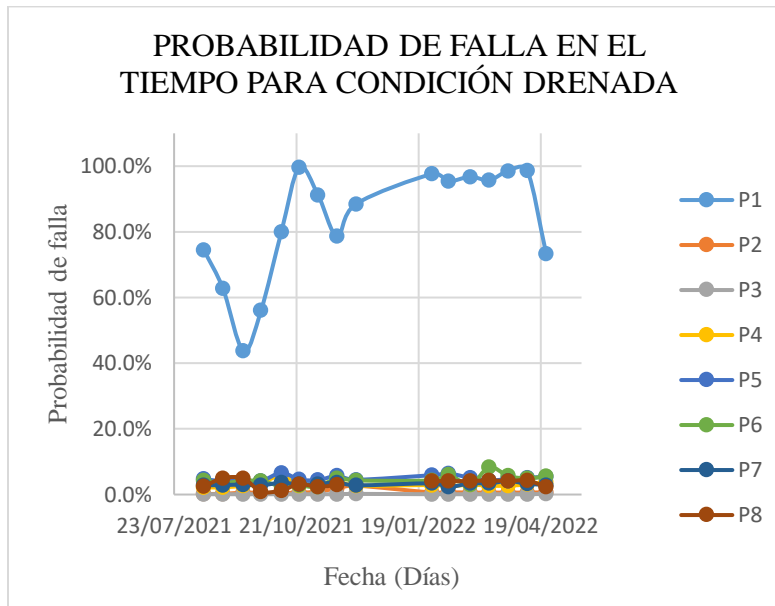
En la condición no drenada (corto plazo) se tuvo grandes factores de seguridad, por lo que la probabilidad de falla era cero en todos los casos. Sin embargo, en este caso, los factores de seguridad son de un orden que permiten tener una probabilidad de falla variable; debido a lo anterior, se llevó a cabo un muestreo de la probabilidad de falla en la condición drenada. A continuación se presentan los resultados de la probabilidad de falla.

*Tabla 8 Probabilidad de falla para perfiles en condición drenada*

Probabilidad de falla para los perfiles en condición DRENADA								
Fecha	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Perfil 8
14/08/2021	74.4%	0.2%	0.1%	2.2%	4.7%	4.3%	2.8%	2.5%
28/08/2021	62.7%	0.2%	0.1%	2.2%	4.1%	3.5%	2.9%	5.0%
12/09/2021	43.7%	0.6%	0.1%	2.7%	4.3%	4.2%	3.0%	4.9%
25/09/2021	56.0%	0.5%	0.1%	3.5%	4.1%	4.1%	2.8%	0.9%
10/10/2021	80.0%	0.5%	0.1%	5.7%	6.6%	2.6%	3.6%	1.2%
23/10/2021	99.6%	0.6%	0.1%	2.7%	4.6%	2.8%	3.1%	3.2%
6/11/2021	91.2%	0.9%	0.1%	3.1%	4.4%	2.3%	3.2%	2.3%
20/11/2021	78.6%	1.9%	0.1%	4.1%	5.7%	5.0%	3.7%	3.0%
4/12/2021	88.5%	2.7%	0.2%	2.7%	4.5%	4.3%	2.8%	N/A
29/01/2022	97.6%	0.6%	0.1%	2.9%	5.9%	4.3%	3.4%	4.1%

Fecha	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Perfil 8
10/02/2022	95.4%	0.7%	0.1%	2.5%	6.4%	6.0%	2.3%	4.1%
26/02/2022	96.8%	0.6%	0.1%	3.0%	5.1%	3.0%	3.4%	4.1%
12/03/2022	95.8%	0.6%	0.1%	2.7%	4.3%	8.3%	3.4%	4.3%
26/03/2022	98.6%	0.6%	0.1%	2.7%	4.7%	5.7%	4.1%	4.1%
9/04/2022	98.7%	0.6%	0.1%	3.1%	5.1%	4.9%	3.3%	4.3%
23/04/2022	73.3%	0.7%	0.2%	3.8%	5.4%	5.6%	2.9%	2.3%

Posteriormente se llevó a cabo la gráfica de las probabilidades en el tiempo, como se puede ver a continuación:



*Figura 17 Probabilidad de falla de los perfiles 1 al 8 para la condición drenada.*

En la figura 17 se puede evidenciar el comportamiento en el tiempo de la probabilidad de falla. Es importante mencionar que esta grafica no hace sentido para perfiles diferentes al primero, puesto que la magnitud de los resultados es muy diferente, es por esto por lo que para realizar un análisis específico de los perfiles, en la figura 18 se quita la probabilidad del perfil 1.



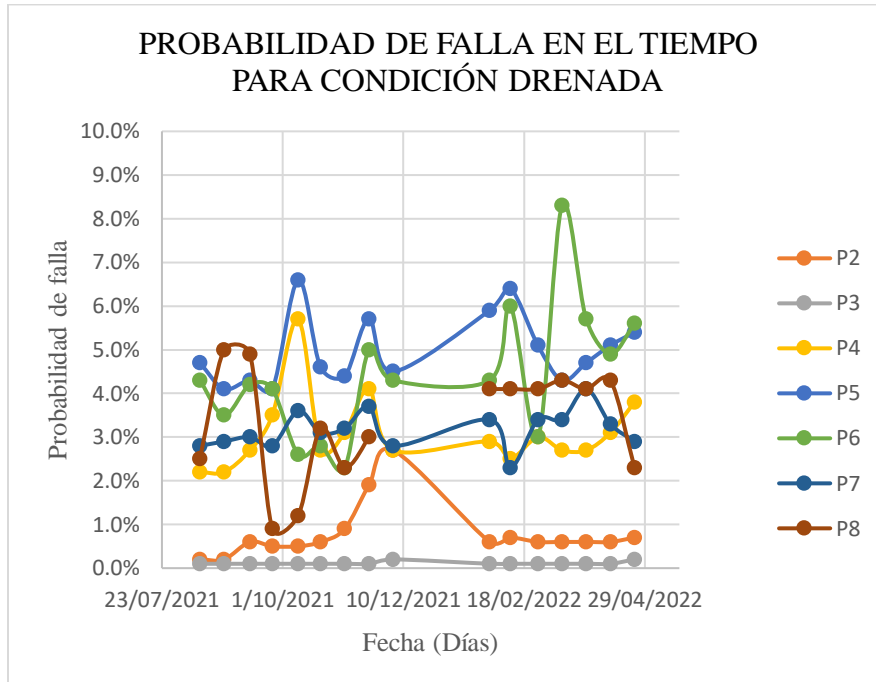


Figura 18 Probabilidad de falla de los perfiles 2 al 8 para la condición drenada.

Con base en las gráficas anteriores se analizarán de manera general los perfiles:

**Perfil 1:** Es el perfil que cuenta con la mayor probabilidad de falla, este resultado concuerda con lo visto en términos de factor de seguridad, cuando se tienen factores de seguridad menores a 1 es usual que la probabilidad llegué a un valor cercano al 100%, debido a que cuando un talud es inestable se considera que su falla es inminente. Por el momento es importante mencionar que el talud que existe en la zona del perfil 1 no ha fallado, existen diferentes razones que explicarían por qué sucede esto. La más evidente sería con base en los parámetros geotécnicos tenidos en cuenta, como se mencionó previamente, los datos fueron obtenidos a partir de la aproximación de diferentes sondeos ubicados en el área del lote, posiblemente las características geotécnicas del perfil 1 en específico tengan mejores propiedades mecánicas que las promedio del área del lote, lo que implicaría que el factor de seguridad tienda a ser superior a 1 y del mismo modo, la probabilidad de falla sea similar a las que tienen los otros perfiles.

---

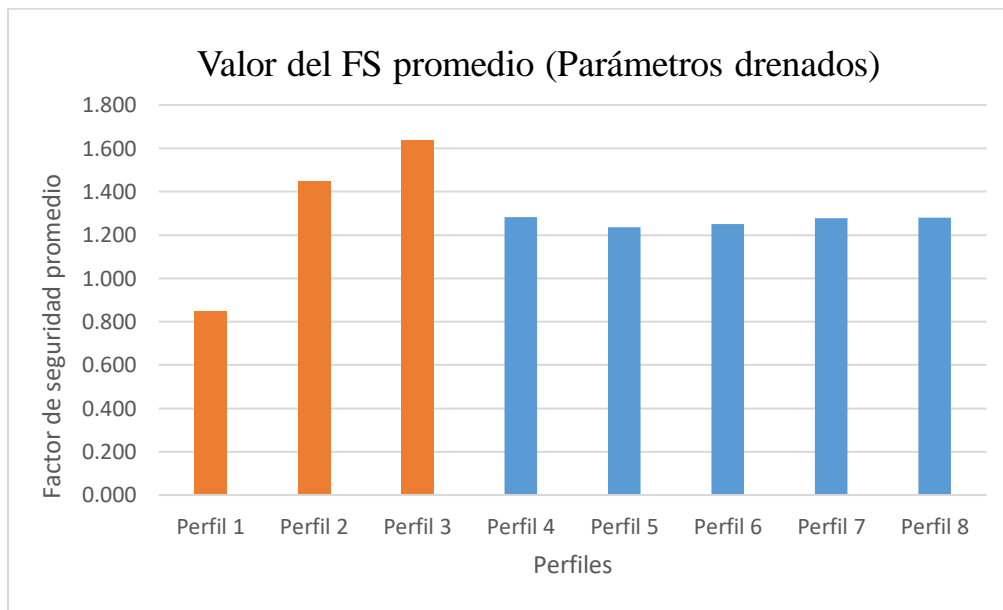
**Perfil 2:** En este perfil, sucedió un fenómeno inusual, en el 2021, el perfil tenía una tendencia a aumentar su probabilidad de falla (o disminuyendo su factor de seguridad), posteriormente entre diciembre y enero pasó de tener una disminución en su estabilidad a un aumento de la misma, es importante mencionar que el periodo de tiempo entre el último dato del 2021 y el primero del 2022 para todos los perfiles, fue más prolongado que en los otros casos, por ser temporada de final e inicio de año.

**Perfil 3:** Fue el perfil donde se presentaron las probabilidades de falla más bajas, y del mismo modo fue el único perfil que presentó factores de seguridad mayores a 1.5. Es interesante analizar este resultado desde el punto de vista geométrico en términos de erosión, porque como se puede ver en la tabla 3, este perfil presentó la segunda mayor erosión de los taludes, pero a su vez, la menor variación a largo plazo en términos de probabilidad de falla, que no es completamente equivalente a lo que se encontró en el factor de seguridad a largo plazo, en el cual tuvo la tercera disminución de factor de seguridad más grande, pero en términos de probabilidad de falla, es la más baja probabilidad en el tiempo.

**Perfiles 4, 5, 6, 7 y 8:** Estos perfiles presentaron una variación similar en el tiempo, siendo los perfiles 5 y 6 los que mayores probabilidades de falla tuvieron, sin embargo, todos mantienen la tendencia al aumento en la probabilidad de que el talud sufra una falla. El perfil 8 no presentó una diferencia significativa (0.2%), por lo que se puede afirmar que ese perfil no tuvo variación representativa en el tiempo. También es importante mencionar que los perfiles intervenidos tuvieron un promedio de erosión más bajo que los perfiles no intervenidos y que a su vez en términos de factor de seguridad, los intervenidos tuvieron un factor de seguridad más alto (comparados con el primer perfil) y más bajo (comparados con los perfiles 2 y 3), esto indica que más allá de que se presente un fenómeno de erosión, más o menos a largo plazo, la pendiente original con la que cuente un talud influye en mayor medida sobre la estabilidad propia de las secciones de análisis. Sin embargo, lo anterior no tiene en cuenta que más allá de que se haya perdido material por la erosión costera, el hecho de que el primer estrato de suelo fuese una arcillolita favoreció en la resistencia ante la erosión, debido a que la cohesión es un parámetro que

permite a las partículas mantenerse unidas en mayor medida cuando se encuentran sometidas a grandes agentes externos como lo es el oleaje y el viento.

Por otro lado, al realizar el análisis a largo plazo, es importante revisar el comportamiento promedio de cada perfil, y el comportamiento promedio de cada mes. A continuación se presentarán ambos gráficos para los parámetros drenados:



*Figura 19 Valor de estabilidad promedio en condición drenada*

En la figura 19 se presenta la estabilidad promedio de los diferentes perfiles en condición drenada, es decir, a largo plazo, en naranja se presentan los perfiles no intervenidos y en azul los intervenidos. Se puede observar que el perfil que menor factor de seguridad promedio presenta es el perfil 1, el cual es un perfil de alta pendiente y sin intervención. Por otro lado, los perfiles 2 y 3 presentan los mayores factores de seguridad, estos al igual que el perfil 1, no fueron intervenidos, sin embargo, son los perfiles que cuentan con las pendientes más bajas, caso distinto al visto en los perfiles que si fueron intervenidos (del 4 al 8), perfiles que cuentan con factores de seguridad promedio menores a los de los perfiles 2 y 3, pero que presentan con porcentajes de variación mucho más bajos, lo que indica que el comportamiento promedio a corto y a largo plazo, es muy

similar, con los perfiles intervenidos siendo los que menores porcentajes de variación tuvieron, por lo que se los datos indican un mejor comportamiento derivada de la intervención realizada por el proyecto PIMECLA.

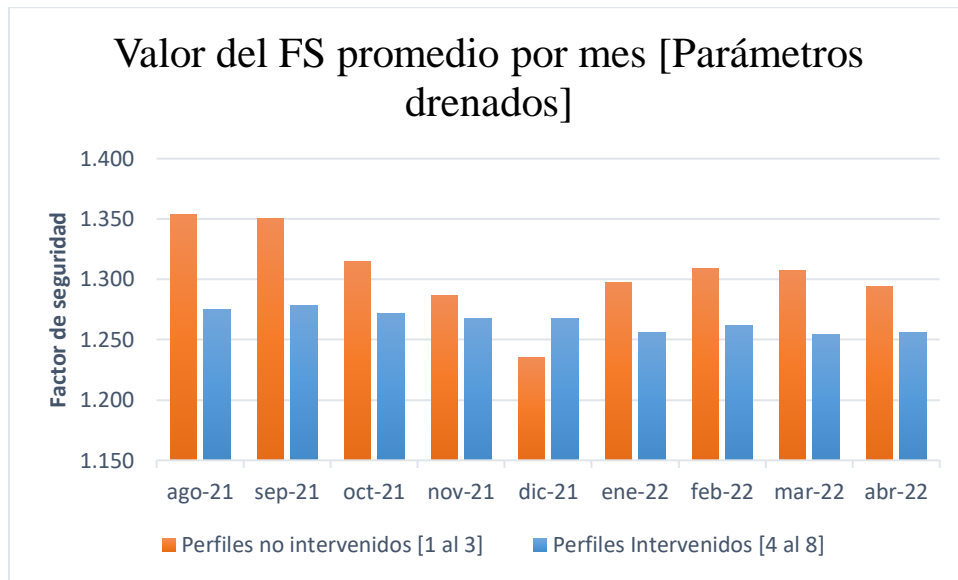


Figura 20 Estabilidad promedio por mes en condición drenada.

En la figura 20, se observa el valor promedio de estabilidad de todos los perfiles por mes, en la condición de los parámetros drenados, en naranja se observan los perfiles que se encuentran en la zona sin intervención por parte del proyecto, y en azul se encuentran los perfiles que fueron intervenidos mediante las pendientes de 15° y 35°. Se puede apreciar que los perfiles que no fueron intervenidos cuentan con un mayor promedio por mes de estabilidad, esto se debe a lo mencionado previamente, en los perfiles 2 y 3, las pendientes son mucho más bajas que en cualquier otro perfil, generando ese factor de seguridad tan elevado; entre el primer mes y el último, los perfiles no intervenidos en general presentan una disminución del factor de seguridad, pasando de 1.354 en agosto de 2021 a 1.294 en abril de 2022 (-4.41%). Por otro lado, los perfiles intervenidos presentan factores de seguridad menores a los de los taludes no intervenidos, sin embargo, la disminución de este fue menor en el tiempo, pasando de 1.271 en agosto de 2021 a 1.256 en abril de 2022 (-1.51%). El comportamiento mensual de los taludes intervenidos es concordante con lo visto en los análisis previos, los taludes intervenidos presentan un mejor comportamiento ante la erosión costera.

El hecho de que se cuenten con factores de seguridad mayores no indica un mejor comportamiento, puesto a que el porcentaje de disminución del FS es mayor cuando no se realiza un perfilamiento, de este modo la intervención desde un punto de vista geotécnico se puede ver como una remoción controlada de los suelos con un alto potencial de deslizamiento, por lo que aunque se evidencia una disminución del FS, en el tiempo presenta menores fluctuaciones ante la remoción constante del oleaje.

### **4.3 Análisis comparativo con variables climatológicas**

Con el fin de realizar una comparación entre la estabilidad y las condiciones climatológicas, se llevaron a cabo las gráficas del viento promedio (resultante del viento en la dirección  $u$  sumado al viento en la dirección  $v$ ) y de precipitación, los valores en el periodo de tiempo se establecieron a partir de datos climatológicos provenientes de la base de datos internacional conocida como ERA5, esta base de datos pertenece al programa COPERNICUS de la Unión Europea. Los datos cuentan con una escala climatológica global ( para la la fecha de análisis, 2022, ERA5 no cuenta con datos de escala regional, solo globales), los cuales tienen una resolución aproximada de  $0.5^\circ$ , las coordenadas de la celda son  $8^\circ 45' 00'' N, 76^\circ 30' 00'' W$ , como se muestra en la figura 21. Es importante mencionar que al ser tan grande la celda, toda la zona de la parte alta de Urabá, al igual que el área de estudio, entran en una sola celda en el dominio de los datos.



*Figura 21 Ubicación de los datos de reanálisis. Fuente: Google Earth Pro*

**Relación velocidad del viento-estabilidad.**

En la figura 22, se puede apreciar la velocidad promedio de la resultante del viento ( $u+v$ ), los datos son tomados a la altura más baja posible de reanálisis (10m de altura), es posible observar que en el 2021 los datos presentan una estabilidad entre 1m/s y 4m/s, con un pico el 25 de agosto de 5.7m/s. Para el 2022 es posible ver que en la época de enero y febrero (temporada seca), se presenta un aumento de velocidad, que posteriormente empieza un descenso en marzo y abril.

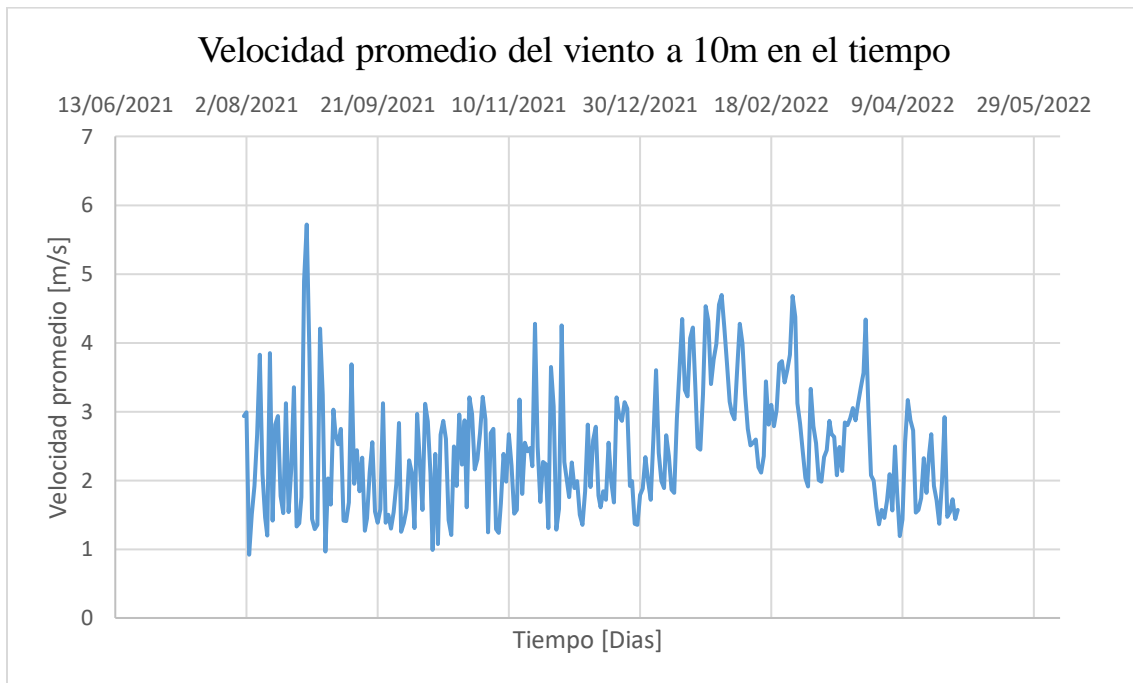


Figura 22 Velocidad promedio del viento a 10m. Datos extraídos de: ERA5.

Determinar un comportamiento a simple vista, cuando se tiene una serie de datos tan robusta, es muy complicado, por esto se llevó a cabo un promedio por mes del valor de estabilidad. En la figura 23 se evidencia el comportamiento mes a mes de la velocidad promedio del viento, se puede ver en esta un comportamiento concordante con las épocas climáticas del país, siendo notorio que en agosto al permanecer una época seca, la velocidad promedio del viento será mayor, en septiembre, octubre y noviembre se tiene una disminución y que se sostiene en diciembre (a pesar que en diciembre empieza otra temporada seca), aumentando nuevamente en enero y febrero (temporada seca), para posteriormente disminuir después de marzo (temporada húmeda).

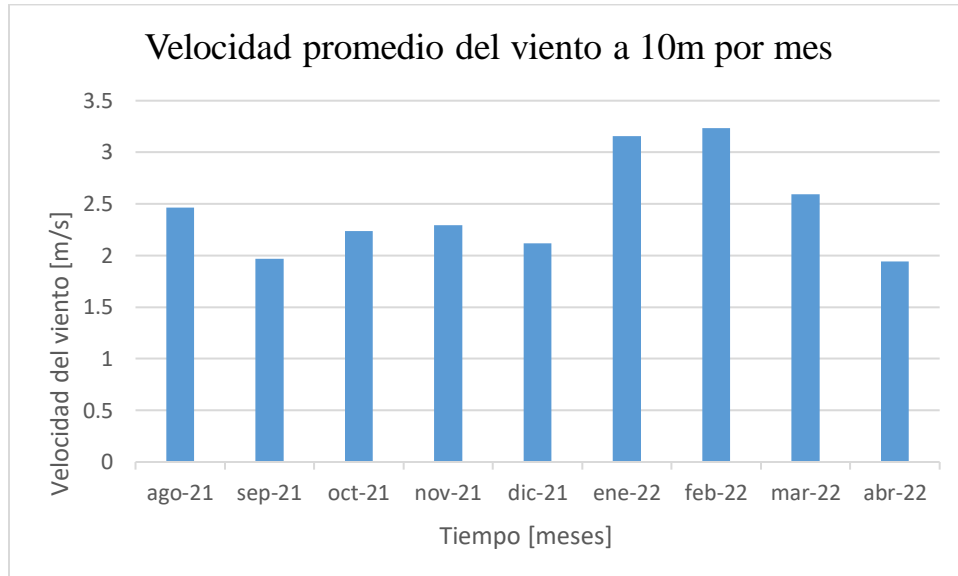


Figura 23 Velocidad promedio mes a mes del viento. Datos extraídos de: ERA5.

Al comparar la figura 20 de la estabilidad mes a mes con la figura 23 de la velocidad promedio mes a mes, se puede sugerir una relativa correlación del viento con la estabilidad del talud. A continuación se explica:

La tendencia que tiene el viento con respecto al FS de los taludes no intervenidos e intervenidos es similar, en el mes de agosto se evidencia que al tenerse un valor de velocidad alto, el FS también lo es, en el mes de septiembre aunque disminuye el valor del viento notoriamente, no disminuye al mismo ritmo el valor de estabilidad, ni en taludes intervenidos, ni en los taludes no intervenidos, sin embargo, entre octubre y diciembre el viento si disminuye y del mismo modo el FS alcanza su pico más bajo para ambas zonas (intervenidas y no intervenidas), estos resultados no dan un buen indicio sobre la relación en tiempo real, puesto que al tenerse valores más bajos de viento, el oleaje alcanza sus puntos más bajos, por lo que el FS debería aumentar y no disminuir tan dramáticamente.

En enero y febrero, se presenta un aumento muy notorio en el viento (meses con mayores velocidades), que posteriormente disminuye en los meses de marzo y abril; Para el caso de los taludes no intervenidos, el FS también presenta un aumento en enero, febrero y una disminución en marzo y abril. Sin embargo, para el caso de los intervenidos, el FS entre enero y febrero

disminuye y se mantiene estable entre marzo y abril. Lo anterior indica que para los taludes no intervenidos, puede existir un rezago, en la influencia del viento sobre la estabilidad, pero para los taludes intervenidos los datos no concuerdan con los datos de vientos. Los datos presentan dos comportamientos distintos en cuanto al comportamiento del FS con el viento, es importante mencionar que el factor que puede provocar esta discordancia es lo robusto de los datos de viento, puesto a que son datos globales, no cuentan con una escala espacial lo suficientemente fina como para mostrar un valor muy aproximado, los datos fueron los únicos con la misma escala temporal que se pudieron encontrar debido a la cercanía entre el procesamiento de esta información y la actualización de las bases de datos. Finalmente se puede decir que parece existir una influencia del viento, pero no es posible afirmarlo estadísticamente sin contar con información más refinada y/o in-situ.



### Relación precipitación-estabilidad.

En la figura 24 se aprecia la precipitación diaria en el tiempo, esta información proviene de la base de datos de ERA5, al igual que la información de viento. Los datos indican una correspondencia directa con la precipitación anual del Caribe colombiano: entre septiembre-noviembre es la época húmeda, en la cual se tienen precipitaciones de magnitudes mucho más altas, posteriormente entre diciembre-febrero se genera un descenso asociado a la época seca, para posteriormente ir subiendo entre marzo-abril. Es importante mencionar que la forma en la cual la precipitación incide sobre el factor de seguridad se da de varios modos, una primera sería generando una erosión superficial, la cual sumada a la erosión por viento y por oleaje, generaría un ambiente de erosión muy desfavorable; otro factor es la infiltración, factor de suma importancia pero que no es posible medirlo y/o evaluarlo actualmente, se tendría que realizar ensayos de infiltración y medidas regulares del nivel freático para conocer este comportamiento.

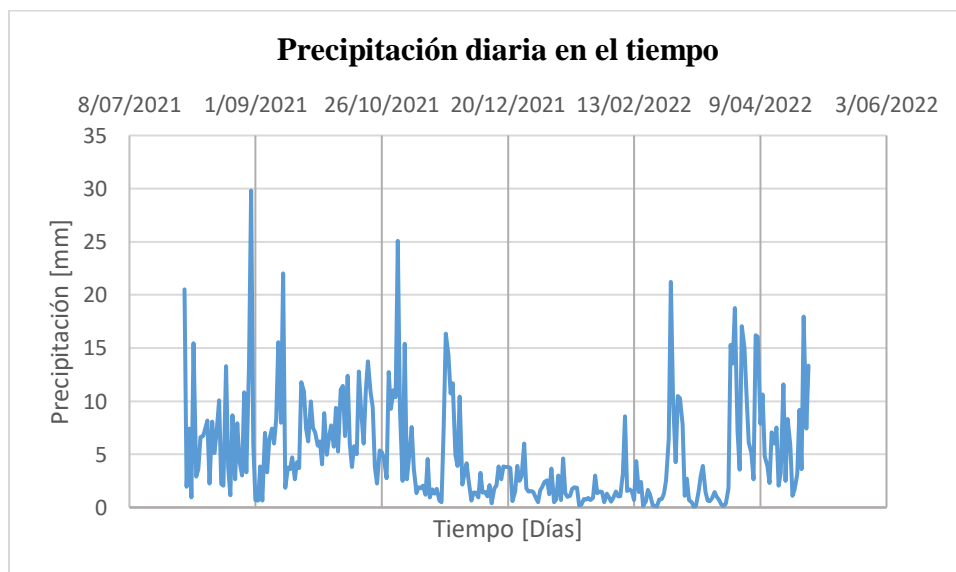
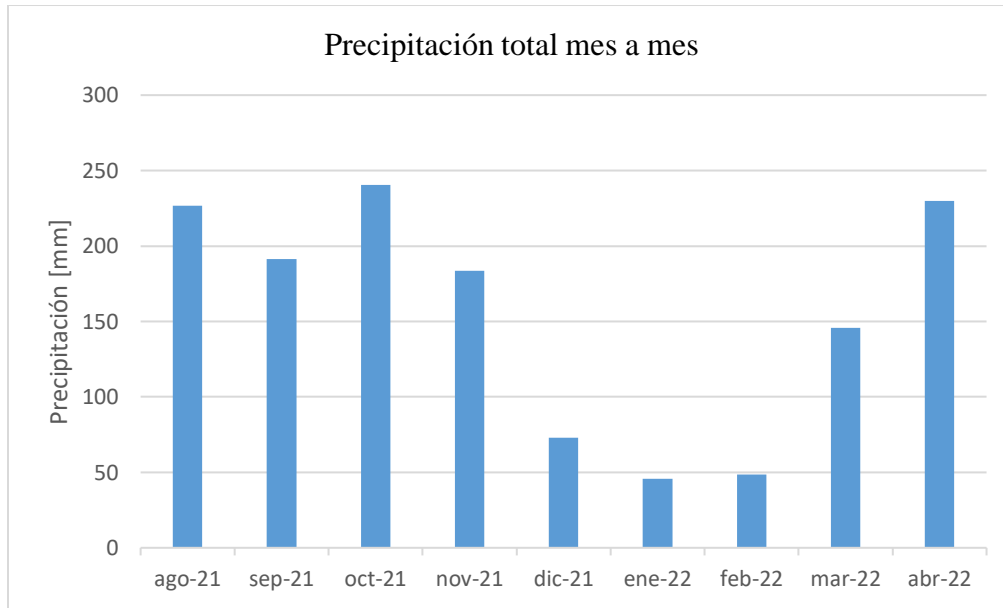


Figura 24 Precipitación diaria en el tiempo

Al igual que sucedió con el viento ( la figura 22), no es fácil observar de manera grafica el comportamiento de los datos mes a mes, por lo que se procedió a llevar a cabo una gráfica de resumen de cada mes. Sin embargo, para el caso de la precipitación no se obtendrá la precipitación promedio, puesto que es más importante para el análisis de la estabilidad del talud relacionar la

cantidad total de agua en la zona (a la cual se sometió el talud) que el dato del promedio de precipitación. A continuación, en la figura 25, se podrá visualizar el comportamiento de la precipitación total, mes a mes.



*Figura 25 Precipitación total mes a mes*

La precipitación presenta un comportamiento similar al presentado por el viento, sin embargo, existen variaciones que al compararse con el comportamiento del FS para zonas intervenidas y no intervenidas, muestran resultados distintos. En los meses de agosto, septiembre y octubre, los valores de precipitación fueron muy altos, al igual que con los valores del FS en agosto y septiembre, sin embargo, en el mes de octubre el FS disminuye, cuando el valor de precipitación aumenta drásticamente, sugiriendo una primera relación con respecto al comportamiento de la precipitación.

Posteriormente, en el mes de noviembre, la precipitación disminuye, pero sigue siendo alta, y el factor de seguridad sigue disminuyendo (a simple vista no se puede afirmar que si disminuye la precipitación en un mes, ese mismo mes debería disminuir el factor de seguridad, puesto a que el comportamiento del FS podría estar sufriendo un rezago con respecto al comportamiento de la precipitación).

En el mes de diciembre se presenta algo, aparentemente, contradictorio, disminuye drásticamente la precipitación pero el factor de seguridad no aumenta, contrario a esto, disminuye (esto lleva a pensar que no es posible afirmar que la influencia de la lluvia se da en el mismo mes). Luego de esto, en enero y febrero, continua a la baja la precipitación, pero en estos casos si aumenta el factor de seguridad (se puede interpretar nuevamente como que la influencia que tiene la precipitación está generando una variación rezagada de los datos). Finalmente, en los meses de marzo y abril, aumenta la precipitación drásticamente y en marzo el FS se sostiene, pero en abril comienza a disminuir (como se esperaría).

---

## **6 Conclusiones**

Con base en los objetivos planteados, la metodología y los resultados previamente discutidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los taludes intervenidos por parte del proyecto PIMECLA presentan una mejor respuesta ante la erosión costera que los taludes no intervenidos en un rango de 8 meses. A corto plazo (parámetros no drenados), los taludes no intervenidos presentan un promedio de variación de -10.98% y los taludes intervenidos cuentan con una variación de -0.13%. A largo plazo (parámetros drenados), la variación en los taludes no intervenidos es en promedio de -4.25% y para los taludes intervenidos es de -1.57%, lo que indica que, a corto y largo plazo, la intervención generó una mitigación correcta de la inestabilidad.
- Se estableció de manera adecuada un modelo geotécnico de estabilidad, en el cual se pudo describir de forma correcta el comportamiento real de los taludes intervenidos y no intervenidos, sin embargo, la falta de información *in-situ*, como más sondeos geotécnicos, valores de nivel freático y climatología local, son un limitante que no se puede dejar pasar, puesto a que el comportamiento no está evidenciando una similitud en todos los taludes, que podría explicarse por la falta de información.
- El mes del año donde los taludes sin intervención presentaron el menor valor promedio de estabilidad fue en diciembre, y para los taludes intervenidos fue en enero; ambos meses se encuentran en la temporada seca, los datos indicarían que el aumento del viento, y a su vez del oleaje, influyen negativamente sobre la estabilidad de los taludes, sin embargo, como se mencionó previamente, sin una información climatológica mas refinada, no se puede afirmar estadísticamente.

- La época del año juega un papel fundamental en la estabilidad de los taludes, los datos indican que sí existe una relación entre variables climatológicas como el viento y la precipitación, con el factor de seguridad. La relación viento y factor de seguridad muestra que existe una correspondencia en tiempo real, sin embargo, la relación que existe entre la precipitación y el factor de seguridad muestra un comportamiento rezagado. A su vez, el hecho que no se cuenten con valores en una escala, al menos regional, no permite establecer estadísticamente una relación entre el comportamiento del factor de seguridad y la estabilidad de los taludes. Por otra parte, al no contar con datos oceanográficos locales o *in-situ* que presenten el mismo dominio temporal, no es posible analizar de manera conjunta diferentes parámetros climatológicos.

## **7 Recomendaciones**

Con base en las conclusiones de este trabajo, para trabajos futuros se dan las siguientes recomendaciones:

- Es necesario realizar toma de datos *in-situ* para variables climatológicas como el viento, la precipitación, el nivel freático, el oleaje y la marea. Del mismo modo es necesario tomar más sondeos, con el fin de describir de manera adecuada distribución de las características geotécnicas.
- Se recomienda que también en las modelaciones se considere de manera adecuada la variación del nivel freático y los procesos de infiltración, esto con el objetivo de analizar caso por caso de manera real el comportamiento.
- Es importante continuar con el monitoreo constante de la topografía del talud, al aumentar el dominio temporal, un análisis estadístico con variables climatológicas será adecuado.
- En este periodo de tiempo, la estabilidad del talud se sostuvo de manera adecuada, sin embargo, el primer estrato de arcillolita no podrá sostenerse al largo plazo, esto implica que sea necesario proteger le pie del talud y/o regenerar con material similar la zona.

---

## Referencias

- Álvarez Balbín, C (2022, 17 de julio). Todos los caminos conducirán a los puertos en el Golfo de Urabá. El Colombiano. <https://www.elcolombiano.com/especiales/el-nuevo-milagro-antioqueno/capitulo-cuatro/puertos-en-el-uraba-antioqueno-que-se-activaran-con-autopistas-4gu-EP18064716>.
- Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá, Colombia.
- Budhu, M. (2007), “Soil mechanics and foundation”, 2° Ed. Estados Unidos de América: John Wiley and Sons, New York.
- Cámara de comercio de Medellín para Antioquia. (2021). Perfil socioeconómico de la subregión de Urabá. Recuperado de: <https://www.camaramedellin.com.co/>.
- Caro, H. D. (1984). Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecimiento del terreno SinúSan Jacinto en el noroccidente de Colombia. Boletín Geológico, 27(2), 2-29. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol27.2.1984.153>.
- Climate change widespread, rapid, and intensifying – Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). Consultado en mayo 18 del 2022, de [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC\\_WGI-AR6-Press-Release\\_en.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release_en.pdf).
- Correa, I. D., & Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo) costa caribe colombiana. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR, 33(1), 07-28.
- Dam Safety, Coastal & Flood Protection | NYS Dept. of Environmental Conservation. Consultado en junio 01 del 2022, de <https://www.dec.ny.gov/lands/311.html>.
- Estabilidad de taludes | GeoStru (2022), Consultado en junio 02 del 2022, de <https://www.geostru.eu/blog/2016/06/13/estabilidad-de-taludes/?lang=es>.
- Factsheet: People and Oceans | United Nations (2017), Consultado en mayo 17, 2022, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2017/05/Ocean-factsheet-package.pdf>.
- Gallardo, R. J. (2014). Aplicación del método de los factores de valuación en los fenómenos de remoción en masa del barrio San Fermin, municipio de Ocaña y selección de obras de mitigación. (Tesis de maestría). Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia.
- Gobernación de Antioquia (DAGRAN) y Universidad de Antioquia. (2021). ANÁLISIS GEOTÉCNICO DEL TALUD LABORATORIO COSTERO. Programa integral para el monitoreo y mitigación de la erosión costera en el litoral antioqueño.

---

Gobernación de Antioquia (DAGRAN) y Universidad de Antioquia. (2022). Componente de Topografía (Informe final). Programa integral para el monitoreo y mitigación de la erosión costera en el litoral antioqueño.

Montoya Orozco, Audini. (2009). "Confiableabilidad en estabilidad de taludes". (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/74485>.

PLAN MAESTRO DE EROSION COSTERO DE COLOMBIA | MINAMBIENTE (2016), Consultado en mayo 28 del 2022, de [https://acmineria.com.co/acm/wp-content/uploads/normativas/plan\\_manejo\\_eroci\\_n\\_costera.pdf](https://acmineria.com.co/acm/wp-content/uploads/normativas/plan_manejo_eroci_n_costera.pdf).

Posada, P., Blanca Oliva y Henao P., William, 2008. Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe Colombiano. INVERMAR, Serie Publicaciones Especiales No.13, Santa Marta, 200 páginas.

Ricaurte-Villota, C., Coca-Domínguez, O., González, M.E., Bejarano-Espinosa, M., Morales, D.F., Correa-Rojas, C., Briceño-Zuluaga, F., Legarda, G.A. y Arteaga, M.E. 2018. Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia: enfoque regional para la gestión del riesgo. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés” – INVEMAR–. Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR # 33. Santa Marta, Colombia. 268 p.

Suarez Días, J. “Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales”, cap. 4 . Colombia: Ingeniería de Suelos Ltda.

Thomas, Y. F., Cesaraccio, M., Garc, C., & Ménanteau, L. (2007). Contribución de la hidrografía histórica al estudio de la cinemática de los fondos marinos: evolución del golfo de Urabá, Colombia. Boletín Científico CIOH, (25), 110-119.