

Optimization of Soil Nailing Placement to Increase the Factor of Safety Against Slope Instability in Cliffs

Huertas Pajares, Jose Ulises¹; Pinedo Linarez, Deyvis Javi²; Guillen Leon, Rogelia³

^{1,3}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u202112099@upc.edu.pe, PCGERGUI@upc.edu.pe

²Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, u20211d869@upc.edu.pe

Summary- *The present study evaluates the factor of safety in the cliffs of the Costa Verde, specifically in the Bajada Sucre to Bajada Marbella section of the Magdalena del Mar district, through the application of soil nailing techniques by varying the location of the bars, specifically evaluating whether placing bars only at the top and bottom of the slope is more effective than placing them along the entire slope. Modeling was performed using Slide software, considering the geotechnical conditions of the ground and the structural properties of the nails. The results show a significant increase in the safety factor compared to the natural state of the cliff, reaching values that ensure the global stability of the slope. Regarding the comparison with the use of steel nailing along the entire profile, it was concluded that, since both cases present safety factors with little difference, for the analyzed case it is more effective to place nails only at the top and bottom of the slope rather than in the center, allowing economic savings. Furthermore, the importance of selecting the correct nail locations is highlighted, as some zones are more critical than others. It is concluded that soil nailing systems constitute a technically viable and efficient solution to improve the stability of the Costa Verde cliffs, representing an appropriate alternative to other stabilization methods. In addition, this approach supports practical design decisions, reduces unnecessary material use, and contributes to safer and more cost effective engineering interventions in urban coastal environments under similar geotechnical conditions.*

Keywords - *Slope Stability, Safety factor, soil-nailing, Slide.*

Resumen - *El presente estudio evalúa el factor de seguridad en los acantilados de la Costa Verde, específicamente en el tramo comprendido entre y la Bajada Sucre a Bajada Marbella en el distrito de Magdalena del Mar, mediante la aplicación de la técnica de claveteado de suelo variando la ubicación de las barras, en concreto, evaluando si la colocación de barras solo en la parte superior e inferior del talud es más efectiva que la colocación a lo largo de todo el talud. Se realizó el modelado con el software Slide, considerando las condiciones geotécnicas del terreno y las propiedades estructurales de los clavos. Los resultados evidencian un incremento significativo del factor de seguridad con respecto al estado natural del acantilado, alcanzando valores que garantizan la estabilidad global del talud. Respecto a la comparativa con el uso de claveteado de acero a lo largo de todo el perfil, se concluyó que al representar ambos casos factores de seguridad con poco margen de diferencia, para el caso analizado es más efectivo solo agregar los clavos en la parte superior e inferior del talud y no en el centro para permitir ahorro económico. Por otro lado, se resalta la importancia de la selección de la ubicación correcta de los clavos, teniendo algunas zonas mayor relevancia que otras. Se concluye que el sistema de claveteado de suelo constituye una solución técnicamente viable y*

eficiente para mejorar la estabilidad de los acantilados de la Costa Verde, representando una alternativa adecuada frente a otros métodos de estabilización.

Palabras Clave - *Estabilidad de taludes, Factor de Seguridad, Claveteado de suelo, Slide.*

I. INTRODUCCIÓN

Los acantilados de la Costa Verde presentan condiciones geotécnicas críticas debido a su composición arenosa, alta pendiente y constante exposición a la erosión. Estas características generan riesgos de inestabilidad que amenazan tanto a la población como a la infraestructura vial que bordea el litoral [1]. Entre las diversas soluciones disponibles, el claveteado de suelo (Soil Nailing) se ha consolidado como una alternativa eficiente y adaptable para taludes de gran altura, ofreciendo ventajas constructivas frente a sistemas más rígidos como muros de contención. El objetivo de este trabajo es evaluar el incremento del factor de seguridad en un sector representativo de los acantilados de la Costa Verde - Bajada Sucre - Bajada Marbella mediante la modelación numérica con el programa Slide2, a fin de determinar la viabilidad técnica de esta solución en las condiciones geológicas y geométricas características del área de estudio.

Además, la zona presenta una inestabilidad progresiva debido a las pendientes pronunciadas que se presentan en diversos perfiles y alturas de gran magnitud. Diversos estudios realizados han determinado factores de seguridad críticos que pueden variar de entre 0.85 y 1.05 al considerar efectos sísmicos en algunas zonas, valores que evidencian una condición crítica frente a deslizamientos y erosión [2]. En el tramo comprendido entre la Bajada Sucre y la Bajada Marbella, en el distrito de Magdalena del Mar, se han registrado desprendimientos superficiales que ponen en riesgo la vía auxiliar y las infraestructuras del malecón. Además, posterior al sismo ocurrido el 15 de junio de 2025.

Debido a la gran altura de los taludes, superior a 50 metros, las soluciones convencionales como los muros de contención resultan estructural y económicamente inviables. Asimismo, los métodos de estabilización de taludes que implican gran movimiento de tierras son complicados de ejecutar, tanto por la cercanía de los taludes a las edificaciones como por la topografía de los acantilados. En este contexto, el claveteado de

suelo (Soil Nailing) se presenta como una alternativa técnica viable para mejorar la estabilidad global, al incrementar la resistencia al corte mediante barras de acero dispuestas de forma inclinada en el terreno. Estudios previos han demostrado que esta técnica genera un comportamiento conjunto suelo anclaje que incrementa la rigidez del macizo [3], [4].

A partir de las condiciones geotécnicas del tramo Bajada Sucre - Bajada Marbella, este estudio propone la aplicación del sistema de claveteado de suelos como medida principal de estabilización. Sin embargo, a diferencia de los enfoques convencionales que distribuyen los clavos a lo largo de todo el talud, la presente investigación plantea evaluar distintas configuraciones y ubicaciones de los elementos de refuerzo con el fin de identificar las zonas donde su incorporación genera mayor incremento en el factor de seguridad. Para ello, se desarrolló un modelado en Slide que permite analizar el comportamiento del talud ante la variación vertical del patrón de clavos.

El aporte principal de esta investigación consiste en demostrar que la eficiencia del claveteado de suelo no depende únicamente de la cantidad de clavos instalados, sino de su correcta ubicación dentro del talud. Los resultados revelan que algunos perfiles requieren refuerzo únicamente en los metros superiores, mientras que otros presentan zonas críticas en los estratos inferiores o en franjas intermedias. Este hallazgo permite optimizar técnica y económicamente el diseño del sistema, evitando reforzar áreas que no lo requieren y proponiendo esquemas de refuerzo específicos para taludes coluviales de gran altura.

II. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

A. Ubicación del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en el litoral de la Costa Verde, específicamente en el tramo comprendido entre la Bajada Sucre y la Bajada Marbella, en el distrito de Magdalena del Mar, Lima. Este sector forma parte del sistema de acantilados costeros que bordean la capital peruana y constituye una de las zonas más representativas de inestabilidad geotécnica debido a su geometría pronunciada y su exposición directa a la erosión marina y atmosférica.



Fig 1. Ubicación de la zona de estudio

El tramo evaluado incluye doce perfiles distribuidos a lo largo del acantilado, con alturas que superan los 50 metros y pendientes que alcanzan entre 70° y 80°.

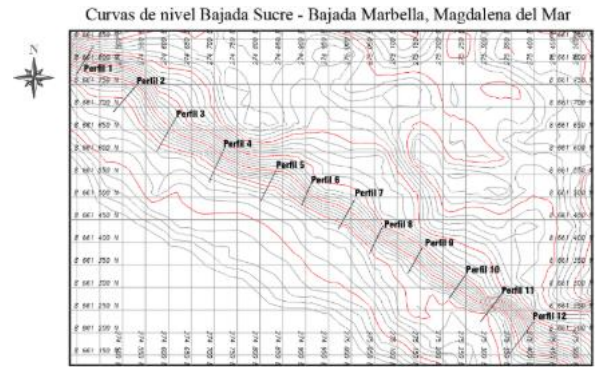


Fig 2. Trazos de los 12 perfiles de análisis.

B. Estratos del suelo

Los parámetros geotécnicos empleados en los modelos se obtuvieron a partir de una investigación previa [5]. A partir de esa información se definieron 12 perfiles representativos distribuidos a lo largo del acantilado. Para cada perfil se asignaron propiedades por estrato (valores resumidos y usados en Slide2):

- Estrato 1 (0-5 m): arena limosa - $\phi = 45^\circ$, $c = 5$ kPa, $\gamma = 21.39$ kN/m³.
- Estrato 2 (5-12 m): grava con matriz arenosa - $\phi = 48^\circ$, $c = 40$ kPa, $\gamma = 21.58$ kN/m³.
- Estrato 3 (>12 m): depósitos coluviales densos - parámetros similares al Estrato 2.

C. Análisis de estabilidad de taludes en estado natural

La estabilidad del talud en condición natural fue evaluada mediante modelación numérica en el software Slide2, se utilizaron los métodos de equilibrio límite de Bishop Simplified, Janbu y Morgenstern-Price. Los métodos comparan las fuerzas o momentos deslizantes con las fuerzas resistentes del sistema y se evalúa el equilibrio de fuerzas en superficies potenciales de falla con geometrías circulares, poligonales e irregulares [6].

En condición estática, los factores de seguridad obtenidos para los perfiles analizados se encuentran en el rango de 1.12 a 1.59, encontrándose en una estabilidad limitada. Los perfiles más críticos corresponden al perfil 8 (FS=1.149) y al perfil 11 (FS=1.125) cuyos valores se acercan al equilibrio límite (FS=1).

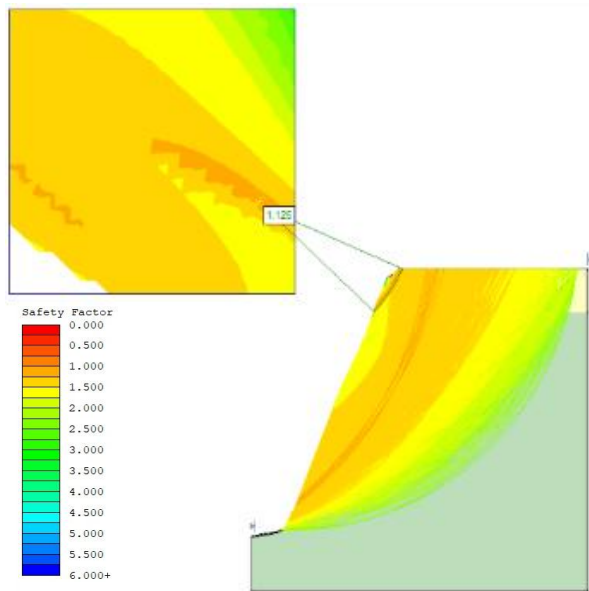


Fig 3. Resultado del perfil más crítico (11) del acantilado en estado natural.

Asimismo, debido a la naturaleza sísmica de la zona de estudio (Costa Peruana), para el análisis también se consideró la condición pseudoestática del acantilado. La condición pseudoestática es un enfoque simplificado para el análisis de estabilidad de taludes en solicitaciones sísmicas, en esta condición los efectos dinámicos del sismo se representan mediante fuerzas inerciales equivalentes constantes que son aplicadas al sistema. Para el análisis, las fuerzas sísmicas fueron calculadas por el software como el peso de cada dovela analizada multiplicada por los coeficientes sísmicos k_h y k_v que se calculan como una fracción de la máxima aceleración del suelo durante un sismo.

En la condición pseudoestática, los factores de seguridad experimentaron una disminución significativa, alcanzando valores que oscilaron entre 0.768 y 1.139. Los perfiles 2, 8 y 11 destacaron como los más vulnerables, con factores de seguridad de 0.847, 0.795 y 0.768 respectivamente (según Janbu). Estos valores se ubican por debajo del mínimo exigido por la normativa peruana ($FS \geq 1.25$) [7]. Lo que evidencia una alta susceptibilidad a fallas ante la ocurrencia de eventos sísmicos.

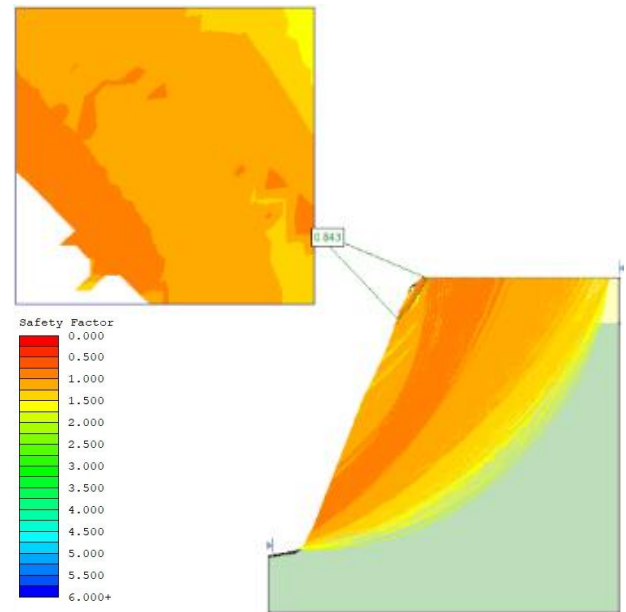


Fig 4. Resultado del perfil más crítico (11) del acantilado en estado natural pseudoestático (FS=0.843).

La comparación entre los métodos de análisis mostró una variación mínima entre los resultados obtenidos por Bishop Simplified, Janbú y Morgenstern-Price, lo cual confirma la consistencia de los modelos generados para el terreno natural. A continuación, se presentan los factores de seguridad obtenidos para cada perfil en condiciones estáticas y pseudoestáticas.

En la Tabla I se presentan los factores de seguridad en condición estática para los diferentes perfiles analizados. Se observa que todos los valores son mayores a 1.0, lo cual indica que los taludes se encuentran en condición estable bajo cargas estáticas. Sin embargo, algunos perfiles, como el perfil 11 (FS mínimo = 1.120) y el perfil 8 (FS mínimo = 1.149), presentan valores cercanos al límite de estabilidad, lo que sugiere condiciones marginales de seguridad.

TABLA I.
FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS PARA LOS
PERFILES EN ESTADO NATURAL – CASO ESTÁTICO.

Perfil	Bishop	Janbú	Morgenstern-Price	Mínimo
1	1.480	1.446	1.475	1.446
2	1.246	1.227	1.239	1.227
3	1.586	1.552	1.579	1.552
4	1.316	1.286	1.307	1.286
5	1.355	1.344	1.353	1.344
6	1.530	1.524	1.529	1.524
7	1.590	1.549	1.581	1.549
8	1.183	1.149	1.174	1.149
9	1.303	1.293	1.301	1.293
10	1.442	1.409	1.433	1.409
11	1.127	1.120	1.125	1.120
12	1.359	1.333	1.351	1.333

En la Tabla II se muestran los factores de seguridad bajo condiciones pseudoestáticas, considerando la acción sísmica. A diferencia del caso estático, varios perfiles presentan factores de seguridad menores a 1.0, como los perfiles 2, 8 y 11, lo que indica condiciones de inestabilidad ante solicitaciones sísmicas. En general, se observa una reducción significativa de los factores de seguridad en todos los perfiles respecto al caso estático, evidenciando la influencia crítica de las cargas sísmicas en la estabilidad del talud.

TABLA II.
FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS PARA LOS
PERFILES EN ESTADO NATURAL –
CASO PSEUDOESTÁTICO.

Perfil	Bishop	Janbú	Morgenstern-Price	Mínimo
1	1.041	1.006	1.039	1.006
2	0.883	0.847	0.878	0.847
3	1.135	1.090	1.130	1.09
4	0.948	0.899	0.941	0.899
5	0.953	0.926	0.949	0.926
6	1.060	1.044	1.057	1.044
7	1.139	1.087	1.136	1.087
8	0.852	0.795	0.847	0.795
9	0.917	0.891	0.913	0.891
10	1.031	0.983	1.027	0.983
11	0.797	0.768	0.843	0.768
12	0.969	0.934	0.964	0.934

III. METODOLOGÍA

Respecto a la metodología a seguir, se desarrolló un modelamiento numérico en Slide de los perfiles de estudio con el cual se obtuvo el factor de seguridad de cada uno por diversos métodos de equilibrio límite. Posterior a ello, se plantearon dos casos comparativos, uno en el que se insertaban los clavos a lo largo de todo el talud y otro en el que solo se colocan en la parte superior, inferior o en ambas de manera estratégica. Por último, se compararon los resultados obtenidos en los factores de seguridad de ambos casos, obteniendo además cuánto aporta en promedio cada clavo al factor de seguridad y la cantidad de clavos que se ahorran.

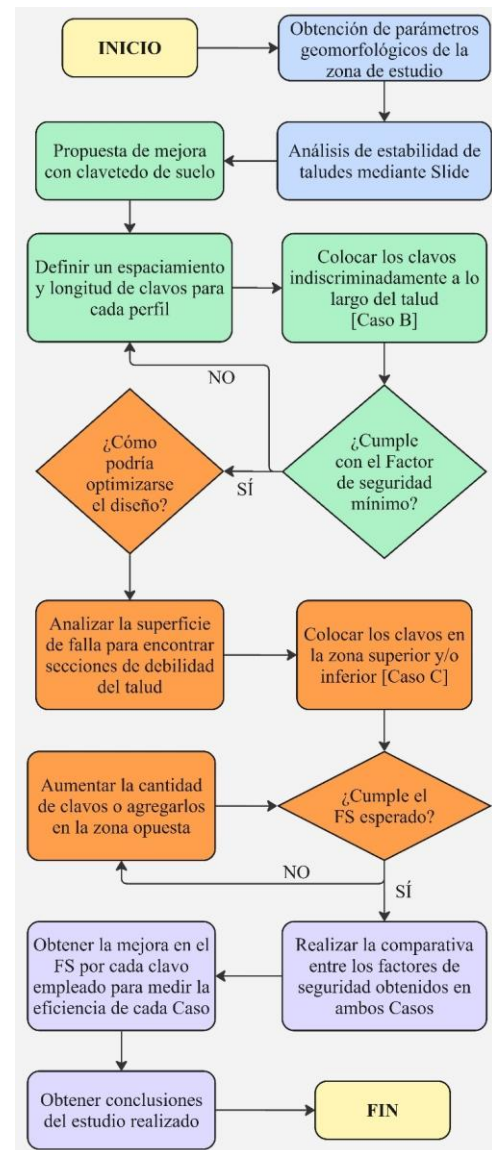


Fig 5. Flujograma de la metodología realizada en el estudio

D. Modelamiento en Slide

Se realizaron un total de 36 modelados de Slide, en los que se encontraron los tres casos planteados para los 12 perfiles de interés. En estos modelados se agregó la topografía obtenida de cada perfil y los estratos de suelo mencionados, a una profundidad constante. A su vez, se agregó un coeficiente sísmico horizontal (kh) igual a 0.225 y un coeficiente sísmico vertical (kv) igual a 0.1125 para simular el caso pseudoestático con un PGA acorde a la normativa técnica nacional del lugar de estudio (0.45g) [8].

E. Ecuaciones

La ecuación principal para el análisis de estabilidad de taludes parte del método de equilibrio límite por dovelas [9].

$$FS = \frac{\sum [c' b \sec \alpha + (W \cos \alpha - ub \sec \alpha) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha} \quad (1)$$

Donde:

FS: Factor de seguridad por el método de equilibrio límite.
 α : Ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada. (°)
b: Ancho de la dovela (m)
 ϕ' : Ángulo de fricción interna del suelo de la dovela (°)
 c' : Cohesión efectiva (kPa)
W: Peso total de cada tajada. (N)
u: Presión de poros. (kPa)

$$FS_{sin} = \frac{c' \cdot L + (W \cdot \cos \beta - U) \cdot \tan \phi'}{W \cdot \sin \beta} \quad (2)$$

Donde:

FS_{sin}: Factor de seguridad del talud sin reforzar.
 c' : Cohesión efectiva del suelo (Kpa)
L: Longitud del plano de falla (m)
W: Peso del bloque de falla (KN)
 β : Inclinação del plano de falla (°)
U: Fuerza ascensional (presión de poros) (KN)
 ϕ' : Ángulo de fricción efectiva (°)

$$FS_{con} = \frac{c' \cdot L + (W \cdot \cos \beta) \cdot \tan \phi' + \sum (T_i \cdot \cos \alpha_i)}{W \cdot \sin \beta - \sum (T_i \cdot \sin \alpha_i)} \quad (3)$$

Donde:

FS_{con}: Factor de seguridad del talud reforzado
 T_i : Fuerza axial movilizable en el clavo i (kN)
 α_i : Ángulo del clavo con la horizontal (°)

F. Configuración de Claveteado de Suelo

La configuración del sistema de claveteado se definió siguiendo el Geotechnical Engineering Circular No. 7: Soil Nail Walls) mediante el método de esfuerzos admisibles (ASD), considerando los modos de falla de tracción, adherencia suelo grout, corte y compresión [4].

El refuerzo estuvo compuesto por barras de acero ASTM A615 Gr. 60 inyectadas con grout e instaladas con una inclinación de 15° respecto a la horizontal. Los clavos se dispusieron en una malla triangular con un espaciamiento vertical de 1.25 m y horizontal entre 1.50 y 2.50 m, según cada perfil.

Las longitudes finales variaron entre 6 y 8 m, garantizando una adecuada penetración en la zona pasiva. El sistema se complementó con un revestimiento de shotcrete de 150 mm reforzado con malla electrosoldada.

Esta configuración fue implementada en los modelos numéricos de Slide2 para evaluar su influencia en la estabilidad del talud.

G. Casos de análisis

Para cada uno de los doce perfiles del tramo Bajada Sucre - Bajada Marbella se evaluaron distintos escenarios de reforzamiento con el fin de determinar la configuración más eficiente del sistema de claveteado de suelo. Los casos modelados fueron:

Caso A: Estado natural: Modelo base sin reforzamiento, utilizado para identificar los factores de seguridad iniciales y la trayectoria de la superficie de falla crítica.

Caso B: Talud reforzado con una disposición de clavos no optimizada, donde los clavos se instalan de manera uniforme a lo largo de todo el perfil sin considerar la necesidad específica por estratos o sectores. Este caso permite evaluar el efecto de aplicar una solución generalizada frente a un diseño racional y optimizado.

Caso C: Configuración optimizada de clavos por perfil. En este escenario se ajustó la ubicación, longitud y número de clavos según el plano de falla de cada perfil.

- Perfiles con falla predominante en la parte superior (2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 y 12): Se reforzó únicamente la zona alta del talud con clavos de 6 m.
- Perfiles con falla que atraviesa la parte superior e inferior (1, 8, 10 y 11): Se aplicó reforzamiento doble en ambas zonas con clavos de 6-8 m.

Esta clasificación permitió analizar el desempeño del sistema de claveteado según la geometría del talud y la profundidad de la superficie de falla, optimizando el uso de elementos de refuerzo.

H. Criterios de evaluación

Para evaluar la efectividad de cada caso se tomaron en cuenta 4 criterios de evaluación que tienen en consideración tanto la estabilidad del talud como factor económico, buscando disminuir la cantidad y longitud de los clavos.

- Si el factor de seguridad del caso C es al menos un 95% del caso B y cumple con el FS mínimo establecido por la normativa nacional, se considera un perfil óptimo.
- Si en el caso B el aumento del FS entre cada barra es menor a 0.05, se considera que es un perfil mal optimizado.
- Se considera adecuada la ubicación del refuerzo cuando la disposición de clavos (superior, inferior o doble) intercepta directamente la superficie de falla crítica obtenida en el análisis del estado natural.
- Si tanto el caso B como el caso C cumplen con un FS mayor a 2 en caso estático y cumplen con el mínimo establecido para análisis pseudoestático se considera que el caso C es el óptimo, incluso si no consigue llegar al 95% del FS del caso 3.

IV. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se presentan de manera organizada para evaluar el desempeño del talud bajo diferentes configuraciones de reforzamiento. En primer lugar, se comparan los factores de seguridad obtenidos para cada caso analizado. Posteriormente, se examina la optimización en la ubicación y cantidad de clavos, así como su influencia directa en la eficiencia del refuerzo aplicado. Finalmente, se cuantifica la mejora del factor de seguridad aportada por cada clavo adicional, lo que permite determinar el diseño de reforzamiento más eficiente.

Factores de seguridad obtenidos

Antes de evaluar la eficiencia del reforzamiento, se presenta en la Tabla III el factor de seguridad obtenido para cada perfil bajo el Caso B en condición estática. Estos valores permiten identificar la respuesta inicial del talud frente al refuerzo propuesto y sirven como línea base para comparar las configuraciones posteriores.

TABLA III.
FACTORES DE SEGURIDAD CASO B ESTÁTICO.

Perfil	Bishop	Janbú	Morgenstern-Price	Mínimo
1	2.074	1.862	2.064	1.862
2	2.652	2.302	2.627	2.302
3	2.171	1.961	2.157	1.961
4	2.075	1.855	2.053	1.855
5	2.363	2.115	2.347	2.115
6	2.070	1.905	2.052	1.905
7	2.019	1.857	2.002	1.857
8	2.257	1.989	2.231	1.989
9	2.389	2.094	2.364	2.094
10	2.135	1.923	2.110	1.923
11	2.658	2.356	2.624	2.356
12	2.084	1.861	2.064	1.861

La Tabla IV muestra los factores de seguridad para el Caso B bajo análisis pseudoestático, considerando la influencia de solicitaciones sísmicas. Esta información es clave para determinar la reducción del desempeño del talud frente a cargas horizontales y para evaluar la estabilidad mínima alcanzada en cada perfil.

TABLA IV.
FACTORES DE SEGURIDAD CASO B
PSEUDOESTÁTICO.

Perfil	Bishop	Janbú	Morgenstern-Price	Mínimo
1	1.454	1.281	1.461	1.281
2	1.882	1.602	1.885	1.602
3	1.557	1.358	1.558	1.358
4	1.495	1.294	1.495	1.294
5	1.701	1.468	1.702	1.468
6	1.472	1.307	1.473	1.307
7	1.436	1.271	1.438	1.271
8	1.571	1.350	1.570	1.350
9	1.712	1.443	1.710	1.443
10	1.506	1.303	1.505	1.303
11	1.805	1.521	1.793	1.521
12	1.508	1.296	1.508	1.296

El perfil con menor factor de seguridad para el caso B resultó ser el perfil 7.

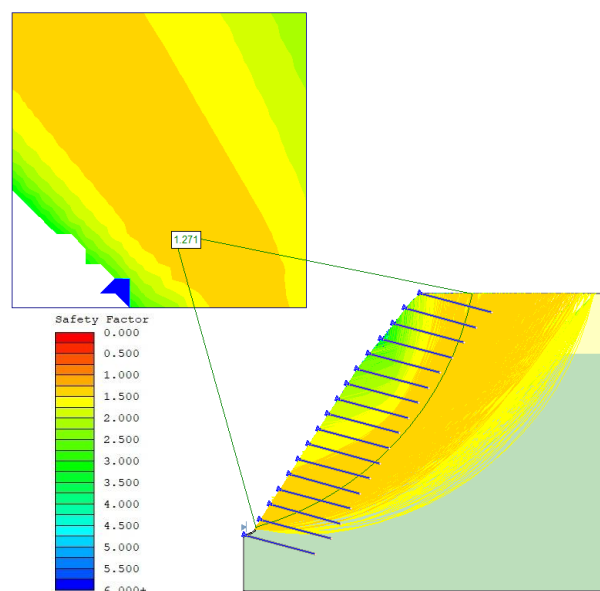


Fig 6. Perfil 7 con menor FS para el caso B pseudoestático (FS=1.271).

En la Tabla V se presentan los factores de seguridad correspondientes al Caso C en condición estática. Este conjunto de resultados permite evaluar el efecto del reforzamiento combinado sobre la estabilidad global del talud, comparándolo directamente con la solución basada únicamente en soil nailing.

TABLA V.
FACTORES DE SEGURIDAD CASO C ESTÁTICO.

Perfil	Bishop	Janbú	Morgenstern-Price	Mínimo
1	1.935	1.849	1.935	1.849
2	2.362	2.166	2.351	2.166
3	2.000	1.876	1.987	1.876
4	1.949	1.845	1.936	1.845
5	2.156	2.013	2.144	2.013
6	1.936	1.803	1.924	1.803
7	1.987	1.842	1.972	1.842
8	1.973	1.841	1.958	1.841
9	2.020	1.890	2.009	1.890
10	1.936	1.803	1.924	1.803
11	1.779	1.924	1.970	1.779
12	1.936	1.803	1.924	1.803

La Tabla VI resume los factores de seguridad para el Caso C en escenario pseudoestático. Estos resultados permiten observar el comportamiento del talud bajo solicitaciones sísmicas cuando se implementa la solución optimizada, destacando los perfiles donde se presentan mejoras significativas respecto al Caso B.

TABLA VI.
FACTORES CASO C PSEUDOESTÁTICO.

Perfil	Bishop	Janbú	Morgenstern-Price	Mínimo
1	1.350	1.263	1.366	1.263
2	1.685	1.514	1.692	1.514
3	1.436	1.308	1.441	1.308
4	1.391	1.282	1.394	1.282
5	1.532	1.402	1.540	1.402
6	1.408	1.280	1.408	1.280
7	1.405	1.265	1.406	1.265
8	1.409	1.259	1.406	1.259
9	1.467	1.325	1.470	1.325
10	1.433	1.266	1.431	1.266
11	1.307	1.286	1.315	1.286
12	1.401	1.267	1.402	1.267

A continuación, se aprecia el modelado realizado para el caso C con el factor de seguridad más bajo (Perfil 8 en pseudoestático).

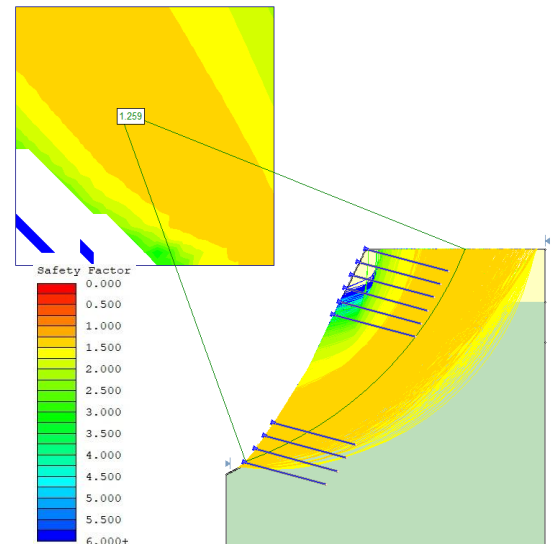


Fig 7. Perfil 8 con menor FS para el caso C pseudoestático (FS=1.259).

Optimización y ubicación de los clavos

La Tabla VII presenta la configuración final seleccionada para cada perfil, definida mediante un proceso iterativo en Slide2, evaluando ubicación, longitud y cantidad de clavos hasta alcanzar factores de seguridad adecuados con el menor consumo de refuerzo.

En los perfiles donde la superficie crítica inicial se concentró en la zona superior, se priorizó el reforzamiento alto del talud. Sin embargo, en algunos casos, al estabilizar dicha zona se generaron nuevas superficies potenciales de falla más profundas o cercanas al pie del talud. Por este motivo, fue necesario incorporar clavos adicionales en la parte inferior, logrando una mejora global de la estabilidad.

Por tanto, la disposición superior, inferior o combinada mostrada en la Tabla VII corresponde a la alternativa más eficiente para cada perfil, considerando seguridad y reducción de cantidad de clavos. El proceso para encontrar la alternativa más eficiente fue un proceso iterativo en el que se colocaron los clavos atravesando la superficie de falla y aumentando la cantidad hasta conseguir el factor de seguridad deseado. En algunos casos, se presentaron nuevas superficies de falla al agregar clavos en la superficie de falla previa, lo que obligó a agregar clavos en una nueva ubicación. De esta forma, en los perfiles 1, 8, 10 y 11 se requirieron clavos en la sección superior e inferior del talud.

TABLA VII.
TABLA CON UBICACIÓN DE LOS CLAVOS
OPTIMIZADOS.

Perfil	Ubicación	Long.	Esp. vertical	Clavos caso B	Clavos caso C
1	Superior e inferior	8 m	1.25 m	18	64
2	Superior	6 m	1.25 m	12	4
3	Superior	6 m	1.25 m	17	4
4	Superior	6 m	1.25 m	16	9
5	Superior	6 m	1.25 m	13	4
6	Superior	6 m	1.25 m	14	7
7	Superior	6 m	1.25 m	15	8
8	Superior e inferior	8 m	1.25 m	17	64
9	Superior	6 m	1.25 m	17	4
10	Superior e inferior	8 m	1.25 m	18	74
11	Superior e inferior	8 m	1.5 m	20	64
12	Superior	6 m	1.25 m	18	7

V. DISCUSIÓN

A. Análisis de resultados

Los factores de seguridad obtenidos se evaluaron en función de la mejora porcentual respecto al factor de seguridad del terreno natural.

TABLA VIII.
MEJORA PORCENTUAL APLICANDO CADA CASO
RESPECTO AL TERRENO NATURAL.

Perfil	ESTÁTICO		PSEUDOESTÁTICO	
	CASO B	CASO C	CASO B	CASO C
1	128%	129%	126%	127%
2	177%	188%	179%	189%
3	121%	126%	120%	125%
4	143%	144%	143%	144%
5	150%	157%	151%	159%
6	118%	125%	123%	125%
7	119%	120%	116%	117%
8	160%	173%	158%	170%
9	146%	162%	149%	162%
10	128%	136%	129%	133%
11	159%	210%	167%	198%
12	135%	140%	136%	139%

A su vez, se comparó el factor de seguridad obtenido para el Caso C (tabla V y VI) respecto al caso B (tabla III y IV) en

porcentaje (Caso C/Caso B) y numérico (Caso B-Caso C) en cada perfil.

TABLA IX.
MEJORA PORCENTUAL Y NUMÉRICA DEL FACTOR
DE SEGURIDAD DEL CASO B RESPECTO AL CASO C.

Perfil	ESTÁTICO		PSEUDOESTÁTICO	
	Porcentual	Número	Porcentual	Número
1	99%	0.013	99%	0.018
2	94%	0.136	95%	0.088
3	96%	0.085	96%	0.05
4	99%	0.01	99%	0.012
5	95%	0.102	96%	0.066
6	95%	0.102	98%	0.027
7	99%	0.015	99%	0.006
8	93%	0.148	93%	0.091
9	90%	0.204	92%	0.118
10	94%	0.12	97%	0.037
11	76%	0.577	85%	0.235
12	97%	0.058	98%	0.029

- Mejora del factor de seguridad por cada clavo añadido

En la Tabla X se presenta el valor promedio de aumento en el Factor de Seguridad respecto al estado natural para cada clavo. Los resultados mostrados en la Tabla X se obtuvieron mediante la siguiente expresión:

$$\text{Aumento del FS por clavo} = \frac{FS_{\text{mejorado}} - FS_{\text{natural}}}{N^{\circ} \text{Clavos}}$$

TABLA X.
AUMENTO PROMEDIO DEL FS EN CADA CASO POR
CADA CLAVO RESPECTO AL ESTADO NATURAL

Perfil	Estático B	Pseudoestático B	Estático C	Pseudoestático C
1	0.0231	0.0153	0.0403	0.0257
2	0.0896	0.0629	0.2348	0.1668
3	0.0241	0.0158	0.0810	0.0545
4	0.0356	0.0247	0.0621	0.0426
5	0.0593	0.0417	0.1673	0.1190
6	0.0272	0.0188	0.0399	0.0337
7	0.0205	0.0123	0.0366	0.0223
8	0.0494	0.0326	0.0692	0.0464
9	0.0471	0.0325	0.1493	0.1085
10	0.0286	0.0178	0.0358	0.0257
11	0.0618	0.0377	0.0659	0.0518
12	0.0293	0.0201	0.0671	0.0476

Este resultado permite evaluar el rendimiento del refuerzo en cada perfil. Cabe señalar que este valor corresponde a un incremento promedio por clavo y no a una evolución incremental del FS conforme se adiciona cada elemento.

VI. LIMITACIONES

La presente investigación presentó como principal limitación la imposibilidad de realizar ensayos geotécnicos directos en el área de estudio, debido a la elevada pendiente de los acantilados, las condiciones geométricas del terreno y la falta de autorización para el ingreso a la zona. Por esta razón, los parámetros geotécnicos utilizados en los modelos fueron obtenidos a partir de estudios previos desarrollados en sectores cercanos de la Costa Verde. Asimismo, la ausencia de ensayos in situ y de laboratorio específicos para cada perfil limita la precisión en la caracterización del suelo. Finalmente, el análisis se basó únicamente en modelaciones numéricas mediante métodos de equilibrio límite, por lo que no se consideraron efectos asociados a cambios hidrogeológicos, procesos de degradación progresiva ni comportamiento no lineal del sistema suelo clavo.

VII. CONCLUSIONES

El estudio evaluó el desempeño del claveteado de suelo en los acantilados del tramo Sucre - Marbella mediante diferentes configuraciones de refuerzo. Tanto el en caso B como en el caso C, se presentó un incremento del factor de seguridad de al menos un 26% y se alcanzó un factor de seguridad mayor al aceptable por la normativa nacional (1.25).

La comparación entre el Caso B (disposición uniforme) y el Caso C (configuración optimizada) evidenció mejoras sustanciales: el Caso B alcanzó incrementos del FS entre 118% y 177% en condición estática, mientras que el Caso C logró mejoras mayores entre 120% y 210%. Además, el aporte del FS por clavo fue considerablemente superior en el Caso C, llegando a valores de hasta 0.2348 (estático) y 0.1668 (pseudostático), lo que representa una eficiencia individual notablemente mayor que en la distribución uniforme.

El análisis de superficies de falla mostró que, en 8 de los 12 perfiles, concentrar los clavos en la parte superior del talud es suficiente para interceptar la trayectoria crítica, permitiendo eliminar refuerzos innecesarios en zonas intermedias.

Un total de 4 perfiles requirieron refuerzo en dos niveles debido a la inestabilidad global presente en el talud. Con esto, el Caso C permitió reducir entre un 50% y 75% el número total de clavos por perfil, manteniendo factores de seguridad iguales o superiores al 95% del Caso B en la mayoría de los casos y siempre por encima de 1.25 en condición pseudostática, cumpliendo la normativa peruana.

Respecto a los criterios de evaluación en 7 de los 12 perfiles analizados (58.33% de perfiles) el caso C logró alcanzar al menos un 95% del caso B. En el caso B, en 11 de

los 12 perfiles en análisis pseudostático (91.67% de perfiles) y en 9 de 12 perfiles (75% de perfiles) para el análisis estático no se alcanzó el aumento del factor de seguridad por clavo especificado 0.005. Se consiguió un refuerzo adecuado, especialmente en el caso optimizado gracias a colocar estratégicamente los clavos atravesando la superficie de falla principal. Los perfiles 2 y 5 alcanzaron factores de seguridad mayores a 2 para el caso estático y a su vez cumplen con el factor de seguridad mínimo establecido para el caso pseudostático.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a su asesora, Guillén León Rogelia, por su orientación constante y acompañamiento durante el desarrollo de la investigación. Asimismo, se agradece a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas por el financiamiento otorgado, así como por brindar el entorno académico y los recursos necesarios para la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET), L. Fidel, S. Núñez, L. Albínez, B. Quispe, C. Chiroque, A. Gamonal, K. Valencia, L. Agurto, D. Arriola, W. Vásquez, A. Benites, D. Romero, D. Portocarrero, R. Zavaleta, V. Aquino, and F. Díaz, *Caracterización geológica, hidrogeológica, evaluación de peligros geológicos por movimientos en masa e identificación de zonas de depósitos antropogénicos en la Costa Verde. Distritos de Barranco, Chorrillos, Miraflores, San Isidro, Magdalena del Mar y San Miguel, provincia de Lima*, Lima, Perú, 2023
- [2] Municipalidad Metropolitana de Lima, *Plan de prevención y reducción del riesgo de desastres de la Costa Verde*, Lima, Perú, 2023.
- [3] M. F. Ayazi, A. Tangri, and S. Jalota, "Soil nailing - a review," *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2020.
- [4] Federal Highway Administration, *Geotechnical engineering circular no. 7: soil nail walls - reference manual* (FHWA-NHI-14-007), U.S. Department of Transportation, Washington, DC, USA, 2015.
- [5] Diaz, M., Sergio, B., Quispe, T., & Andres, V. (2025). Evaluación de la estabilidad del acantilado de la Costa Verde mediante los sistemas Terramesh, anclajes y micropilotes. Caso Edificio Multifamiliar Altea, Magdalena del Mar.
- [6] L. W. Abramson, T. S. L. Parsons, H. M. Macdonald, and G. M. B. Parsons, *Slope stability and stabilization methods*, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2001.
- [7] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), *Norma técnica E.050: suelos y cimentaciones*, Reglamento Nacional de Edificaciones, Lima, Perú, 2018.
- [8] I. Jeldes and E. Drumm, "Preliminary static and seismic stability of steep slopes in reclaimed mine lands constructed with low compaction in Appalachia, USA," *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2011.
- [9] A. A. Aguilar Goenaga and C. E. Zúñiga Romero, *Análisis comparativo de estabilidad de taludes mediante los métodos de equilibrio límite aplicado a taludes o laderas aledañas al Cerro de la Popa, casco urbano de Cartagena*, Univ. de Cartagena, Cartagena, Colombia, 2015.