

# Slope Stabilization Using Bioengineering on the Encañada Road

Wilder Chuquiruna, Dr.<sup>1</sup>; Eliana Castrejón, Mg.<sup>2</sup>; Joe Ramírez<sup>3</sup>; Alex Ñontol<sup>4</sup>; Jhilder Rodríguez<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, [wilder.chuquiruna@upn.pe](mailto:wilder.chuquiruna@upn.pe)

<sup>2</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, [eliana.castrejon@upn.pe](mailto:eliana.castrejon@upn.pe)

<sup>3</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, [N00324546@upn.pe](mailto:N00324546@upn.pe)

<sup>4</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, [N00315434@upn.pe](mailto:N00315434@upn.pe)

<sup>5</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, [N00309473@upn.pe](mailto:N00309473@upn.pe)

**Abstract:** *This research, a technical analysis of soil bioengineering was conducted as an alternative for slope stabilization and the control of water erosion, frequent problem in civil and geotechnical engineering works. The main objective of the study was to evaluate the influence of vegetation on slope stability, considering both the hydrological and mechanical effects that roots and vegetation cover exert on the soil. We did review and analysis of geotechnical principles related to slope stability, soil classification, and the mechanisms of natural reinforcement provided by vegetation were carried out, as well as their interaction with surface runoff. Likewise, the positive and negative factors associated with the use of plants on slopes were examined, highlighting their contribution to erosion reduction, increased shear strength, and improved soil behavior under rainfall conditions. Finally, it was concluded that soil bioengineering represents a technically viable and environmentally sustainable solution for slope stabilization, provided that it is applied considering soil characteristics, slope geometry, and the type of vegetation used.*

**Keywords:** *soil bioengineering, slope stability, water erosion, vegetation, geotechnics.*

# Estabilización de Taludes Mediante Bioingeniería en la Carretera La Encañada

Wilder Chuquiruna, Dr.<sup>1</sup>; Eliana Castrejón, Mg.<sup>2</sup>; Joe Ramírez<sup>3</sup>; Alex Ñontol<sup>4</sup>; Jhilder Rodríguez<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, wilder.chuquiruna@upn.pe

<sup>2</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, eliana.castrejon@upn.pe

<sup>3</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, N00324546@upn.pe

<sup>4</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, N00315434@upn.pe

<sup>5</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, N00309473@upn.pe

**Resumen—** En la presente investigación se desarrolló un análisis técnico de la bioingeniería de suelos como alternativa para la estabilización de taludes y el control de la erosión hídrica, problemática frecuente en obras de ingeniería civil y geotécnica. El objetivo principal del estudio fue evaluar la influencia de la vegetación en la estabilidad de los taludes, considerando tanto los efectos hidrológicos como mecánicos que las raíces y la cobertura vegetal ejercen sobre el suelo. Para ello, se realizó una revisión y análisis de los principios geotécnicos relacionados con la estabilidad de taludes, la clasificación de suelos y los mecanismos de refuerzo natural proporcionados por la vegetación, así como su interacción con la escorrentía superficial. Asimismo, se examinaron los factores positivos y negativos asociados al uso de plantas en taludes, destacando su aporte en la reducción de la erosión, el incremento de la resistencia al corte y la mejora del comportamiento del suelo frente a condiciones de lluvia. Finalmente, se concluyó que la bioingeniería de suelos representa una solución técnicamente viable y ambientalmente sostenible para la estabilización de taludes, siempre que se aplique considerando las características del suelo, la pendiente y el tipo de vegetación utilizada.

**Palabras Clave:** bioingeniería de suelos, estabilidad de taludes, erosión hídrica, vegetación, geotecnia.

## I. INTRODUCCIÓN

Los procesos de erosión hídrica y los problemas de inestabilidad en taludes constituyen una de las principales amenazas para la infraestructura vial, obras civiles y asentamientos humanos, especialmente en zonas de topografía accidentada y elevada precipitación pluvial [1]. En regiones andinas como Cajamarca, estos fenómenos se ven intensificados por la combinación de pendientes pronunciadas, suelos poco consolidados y una marcada estacionalidad de las lluvias, lo que incrementa la probabilidad de deslizamientos superficiales y pérdidas progresivas de suelo [2]. En este contexto, el análisis de la estabilidad de taludes y la implementación de medidas de control de erosión resultan fundamentales para garantizar la seguridad estructural y la sostenibilidad de las obras de ingeniería [3]. Tradicionalmente, la estabilización de taludes ha sido abordada mediante soluciones de tipo estructural, tales como muros de contención, anclajes, concreto lanzado o geomallas sintéticas [4]. Si bien estas técnicas ofrecen resultados efectivos en términos de resistencia mecánica, suelen implicar

altos costos de ejecución, mantenimiento y un impacto ambiental significativo [5],[6]. En respuesta a estas limitaciones, en las últimas décadas ha cobrado relevancia el enfoque de la bioingeniería de suelos, el cual integra principios de la ingeniería geotécnica y la ecología para el control de la erosión y la estabilización de laderas mediante el uso de vegetación viva [7]. La bioingeniería de suelos se basa en el aprovechamiento de los efectos mecánicos e hidrológicos de las plantas, particularmente de sus sistemas radiculares, los cuales contribuyen al incremento de la resistencia al corte del suelo, la reducción de la escorrentía superficial y la mejora de los procesos de infiltración [8]. Diversos estudios han demostrado que la vegetación adecuadamente establecida puede disminuir de manera significativa las tasas de pérdida de suelo [9], además de favorecer condiciones más estables frente a eventos hidrológicos moderados [10]. Sin embargo, la efectividad de estas técnicas depende en gran medida del tipo de suelo, la pendiente del talud, las condiciones hidrológicas y la especie vegetal empleada [11].

En el caso específico de los taludes de suelo, su comportamiento está condicionado por parámetros geotécnicos fundamentales como la cohesión, el ángulo de fricción interna, la densidad natural y la permeabilidad [12]. Estos parámetros, junto con la geometría del talud, permiten evaluar su estabilidad mediante el cálculo del factor de seguridad, el cual constituye un indicador clave para determinar la probabilidad de falla [13]. Asimismo, el análisis de la erosión hídrica superficial puede ser abordado a través de modelos empíricos ampliamente aceptados, como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), que permite estimar la magnitud de las pérdidas de suelo bajo determinadas condiciones climáticas, topográficas y de cobertura vegetal [14],[15]. Dentro de las técnicas de bioingeniería, el uso de gramíneas ha mostrado resultados favorables debido a su rápido crecimiento, alta densidad de tallos y capacidad de generar un entramado radicular superficial efectivo. Investigaciones recientes señalan que especies como el pasto Tanzania presentan un comportamiento adecuado frente a la escorrentía superficial, reduciendo la velocidad del flujo y disipando la energía hidráulica que actúa sobre el suelo [16],[17]. No obstante, bajo condiciones hidrológicas severas, el incremento de los esfuerzos cortantes puede generar tensiones que superan la capacidad de anclaje de la

vegetación, provocando el desprendimiento del pasto y, en consecuencia, un aumento en la pérdida de suelo [18],[19].

A pesar de los avances en el estudio de la bioingeniería de suelos, aún existen vacíos de información respecto al comportamiento específico de determinadas especies vegetales bajo condiciones controladas de laboratorio, así como su desempeño frente a distintos caudales de escorrentía y pendientes definidas. En particular, resulta necesario evaluar de manera cuantitativa la eficacia de la cobertura vegetal en la reducción de la erosión y su influencia sobre la estabilidad global del talud, considerando parámetros geotécnicos reales y modelos de estimación de pérdida de suelo [20],[21]. En ese sentido, la presente investigación se enfoca en el análisis de taludes de suelo mediante la caracterización geotécnica, la evaluación de su estabilidad y la aplicación de técnicas de bioingeniería utilizando pasto Tanzania como elemento de protección superficial. Para ello, se realizaron ensayos de clasificación de suelos bajo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), pruebas de densidad natural e infiltración, así como el cálculo del factor de seguridad y los factores involucrados en la ecuación USLE [22],[23],[24]. Asimismo, se evaluó el comportamiento del talud protegido frente a distintos caudales de escorrentía, comparando las pérdidas de suelo obtenidas con aquellas registradas en taludes sin protección vegetal. Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se busca contribuir al conocimiento técnico sobre la efectividad de la bioingeniería de suelos como alternativa sostenible para el control de erosión hídrica y la estabilización de taludes, especialmente en contextos geográficos similares al de la región Cajamarca. De este modo, el estudio pretende aportar criterios técnicos que permitan optimizar el diseño y mantenimiento de obras de protección de taludes, reduciendo costos, impactos ambientales y riesgos asociados a la inestabilidad del terreno [25],[26],[27].

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se basó en el siguiente flujograma Fig. 1, realizándose principalmente 2 etapas, las cuales se detallan a continuación.

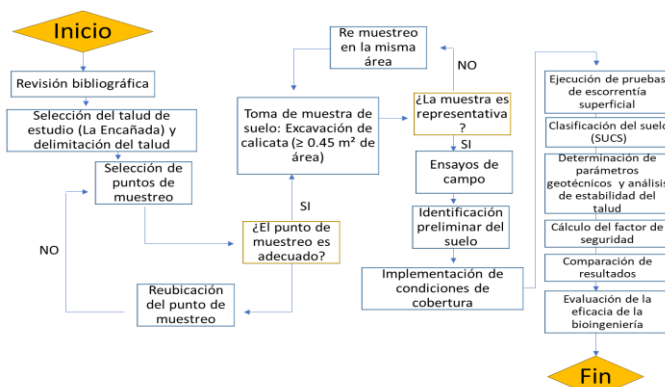


Fig. 1 Flujograma de la metodología empleada en toda la investigación

### A. Etapa de campo

Esta etapa comprendió la ejecución de los trabajos experimentales y la obtención de información geotécnica e hidráulica directamente en el talud de estudio, comprende:

1. Selección y acondicionamiento del talud para la ejecución de las pruebas.
2. Excavación de una calicata para la toma de muestras representativas del suelo e identificación y clasificación preliminar del suelo mediante observación visual y prueba de la botella.
3. Ejecución del ensayo de densidad natural in situ mediante el método de reemplazo de agua.
4. Realización de la prueba de infiltración en campo para evaluar el comportamiento del suelo frente al ingreso de agua.
5. Implementación de las condiciones de cobertura superficial: suelo sin protección, pasto Tanzania, pasto Tanzania con Geoweb y pasto Tanzania con MacMat.
6. Ejecución de las pruebas de escorrentía superficial, controlando el caudal unitario y el tiempo de escurrimiento y medición y registro de la pérdida de suelo generada en cada ensayo experimental.

### B. Etapa de gabinete

En esta etapa se realizó el procesamiento, análisis e interpretación de la información obtenida durante los trabajos de campo.

1. Organización y sistematización de los datos experimentales obtenidos en campo.
2. Clasificación definitiva del suelo bajo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).
3. Determinación de los parámetros geotécnicos del suelo utilizados en el análisis de estabilidad.
4. Evaluación de la estabilidad del talud mediante análisis de equilibrio límite, aplicando el método de Bishop con el software Slide de Rocscience.
5. Cálculo del factor de seguridad del talud en condición inicial.
6. Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) para la estimación de la erosión hídrica.
7. Comparación entre las pérdidas de suelo estimadas teóricamente y las obtenidas experimentalmente.
8. Evaluación de la bondad de ajuste de los modelos hidráulicos empleados para las distintas condiciones de cobertura.

La investigación se desarrolló mediante un enfoque experimental aplicado, orientado a evaluar la eficacia de técnicas de bioingeniería de suelos en la reducción de la erosión hídrica superficial en taludes de suelo fino, bajo condiciones controladas de escorrentía. El área de estudio corresponde a un talud experimental ubicado en el distrito de La Encañada, Cajamarca (ver fig. 2), seleccionado por presentar características geomorfológicas representativas de



taludes intervenidos en zonas andinas, así como condiciones climáticas favorables para el crecimiento de cobertura vegetal [1],[12]. El talud analizado según fig.3, presentó una pendiente aproximada de (2V:1H) y un suelo de naturaleza limo–arcillosa, condición que lo hace susceptible a procesos erosivos inducidos por escorrentía superficial [5],[25].

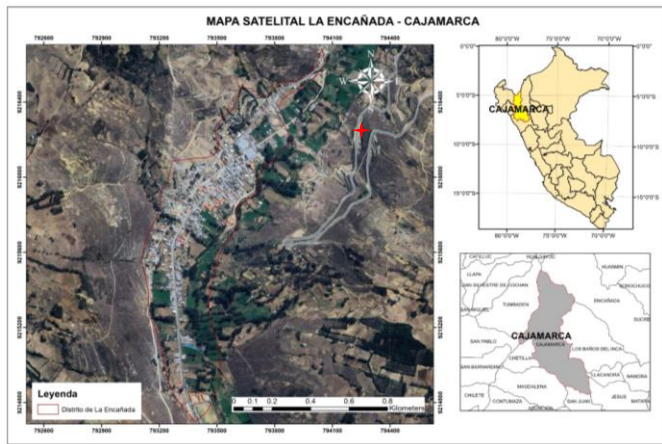


Fig. 2 Ubicación del área de estudio.

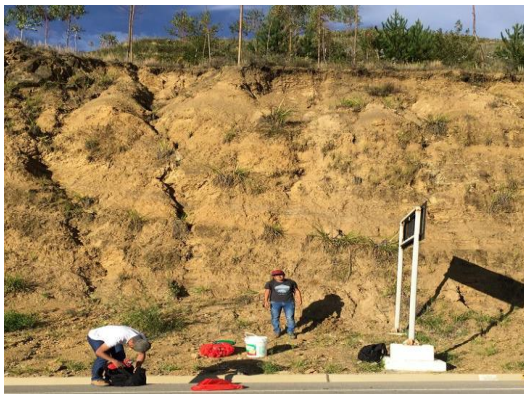


Fig. 3 Talud aplicado al estudio.

Tabla 1. Condiciones del talud N°1 en suelos

| Talud N°1            |            |             |          |  |
|----------------------|------------|-------------|----------|--|
| Altura               | 14 m       |             |          |  |
| Distancia Horizontal | 6 m        |             |          |  |
| Pendiente            | Porcentaje | Grado       | Relación |  |
|                      | 233.33%    | 82°34'6.93" | 14/6     |  |

Tabla 2. Condiciones del suelo del talud

| Composición | SUCS                   | Descripción                 |
|-------------|------------------------|-----------------------------|
| Grava       | 5% (Fina)              | Arcilla de alta plasticidad |
| Arena       | 35% (Fina a Gruesa)    |                             |
| Finos       | 60% (Alta Plasticidad) |                             |



Fig. 4 Prueba de la botella para ver la composición del suelo

Previamente a la ejecución de las pruebas de erosión, se realizó la caracterización geotécnica del suelo mediante ensayos de campo y laboratorio. La clasificación del suelo se efectuó empleando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), complementada con pruebas de identificación visual, prueba de la botella y límites de consistencia, con el objetivo de determinar su comportamiento frente a la acción del agua [9],[22]. Asimismo, se ejecutó el ensayo de densidad natural in situ mediante el método de reemplazo de agua, técnica ampliamente utilizada para suelos finos cuando las irregularidades del hueco dificultan la aplicación del cono de arena, permitiendo obtener valores representativos de densidad húmeda y seca del terreno [11],[18].



Fig. 5 Calicata realizada para la toma de muestras de suelo y ejecución de ensayos de campo.



Fig. 6 Ensayo de densidad natural ejecutado mediante el método de reemplazo de agua en el talud N°1 para la obtención de la densidad del suelo.

Tabla 3. Datos del ensayo de densidad natural por reemplazo de agua del talud

| Datos del Ensayo        |             |       |
|-------------------------|-------------|-------|
| Material Extraído       | 16.4        | Kg    |
| Volumen de agua al pozo | 10.540      | Litro |
| Densidad                | 1.56 Kg/lit |       |

La permeabilidad del suelo se determinó mediante una prueba de infiltración en campo, a fin de evaluar la capacidad del terreno para permitir el paso del agua y su influencia directa en la generación de escorrentía superficial. Estos parámetros resultan fundamentales para el análisis posterior de la erosión hídrica y para la estimación del factor de erosionabilidad del suelo dentro del modelo USLE [6],[20].



Fig. 7 Ensayo de prueba de infiltración del talud N°1

Tabla 4. Datos obtenidos en el ensayo de infiltración del talud

| Datos de la prueba de Infiltración |         |        |
|------------------------------------|---------|--------|
| Nº                                 | t (min) | H (cm) |
| 1                                  | 0       | 20     |
| 2                                  | 0.5     | 14.5   |
| 3                                  | 1       | 11     |
| 4                                  | 1.5     | 8      |
| 5                                  | 2       | 5.5    |
| 6                                  | 2.5     | 3.8    |
| 7                                  | 3       | 2.2    |
| 8                                  | 3.5     | 0.5    |
| 9                                  | 4       | 0      |

De manera complementaria, se evaluó la estabilidad del talud mediante un análisis de equilibrio límite utilizando el software Slide de Rocscience, aplicando el método de Bishop, ampliamente empleado en estudios de estabilidad de taludes por su confiabilidad en superficies de falla circulares y condiciones geotécnicas homogéneas. Para ello, se consideraron los parámetros resistentes del suelo, como la

cohesión y el ángulo de fricción interna, obtenidos a partir de valores característicos reportados para suelos limo-arcillosos y materiales derivados de lutitas y areniscas, representativos de las condiciones geológicas del área de estudio y su comportamiento mecánico esperado [7],[14].

El factor de seguridad calculado permitió verificar que el talud se encontraba en condiciones estables antes de la aplicación de las pruebas hidráulicas, garantizando que los procesos observados correspondieran principalmente a fenómenos de erosión superficial inducidos por escorrentía y no a fallas globales de estabilidad del macizo rocoso-suelo [2],[23].

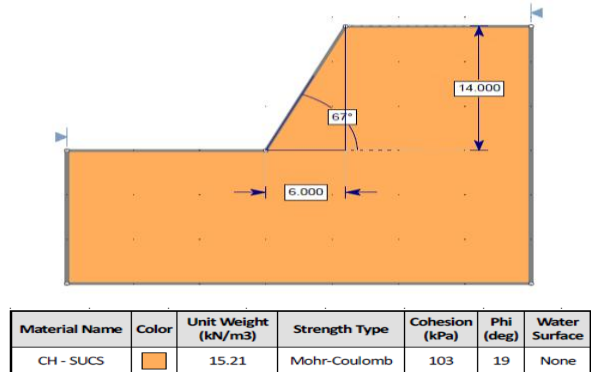


Fig. 8 Esquema y propiedades del suelo que contiene el talud N°1

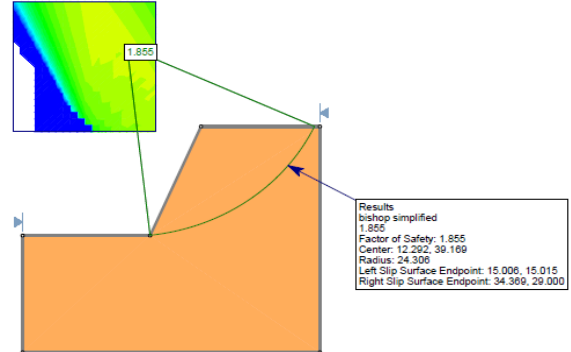


Fig. 9 Factor de seguridad mínimo – Método de Bishop del talud N°1

La fase experimental se desarrolló en cuatro etapas, evaluando distintas técnicas de bioingeniería de suelos sobre un mismo talud. Inicialmente se realizaron ensayos en suelo desnudo para establecer una condición base de erosión. Posteriormente, se aplicó cobertura vegetal con pasto Tanzania (*Panicum maximum*), seleccionado por su rápido establecimiento y capacidad de refuerzo radicular [4],[13]. Finalmente, la cobertura vegetal se combinó con sistemas de refuerzo superficial tipo Geoweb y geomantas MacMat, a fin de analizar el efecto conjunto de la vegetación y los elementos estructurales en la reducción de la erosión hídrica [16],[17].





Fig. 10 Esquema del talud N.º 1 con cobertura vegetal de pasto Tanzania (*Panicum maximum*) y con sistemas de refuerzo superficial tipo Geoweb y geomantas MacMat.

Para el desarrollo de las pruebas hidráulicas se diseñó una matriz experimental en la que se consideraron como variables principales el caudal unitario de escorrentía y el tipo de cobertura aplicada. Se ejecutaron un total de 22 pruebas, variando el caudal entre 1 y 25 L/s/m, manteniendo un tiempo de escurrimiento constante de 10 minutos por ensayo. El caudal fue controlado mediante un vertedero triangular, mientras que la carga hidráulica aguas arriba del talud fue monitoreada durante cada prueba [3],[15].

Tabla 5. Matriz de prueba

| Fase | Prueba | Caudal Unitario (L/s)/m | Cobertura           |
|------|--------|-------------------------|---------------------|
| I    | 1-1    | 0.51                    | Sin protección      |
|      | 1-2    | 1.04                    |                     |
|      | 1-3    | 1.55                    |                     |
|      | 1-4    | 3.11                    |                     |
| II   | 2-1    | 1.04                    | Tanzania            |
|      | 2-2    | 2.09                    |                     |
|      | 2-3    | 3.18                    |                     |
|      | 2-4    | 6.01                    |                     |
|      | 2-5    | 8.37                    |                     |
|      | 2-6    | 20.64                   |                     |
| III  | 3-1    | 1.30                    | Tanzania con Geoweb |
|      | 3-2    | 2.07                    |                     |
|      | 3-3    | 3.06                    |                     |
|      | 3-4    | 7.87                    |                     |
|      | 3-5    | 16.25                   |                     |
|      | 3-6    | 27.38                   |                     |
| IV   | 4-1    | 1.24                    | Tanzania con MacMat |
|      | 4-2    | 2.06                    |                     |
|      | 4-3    | 3.11                    |                     |
|      | 4-4    | 7.77                    |                     |
|      | 4-5    | 15.54                   |                     |
|      | 4-6    | 25.91                   |                     |

Finalmente, la estimación cuantitativa de la pérdida de suelo se realizó aplicando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), considerando los factores de erosión de la lluvia (R), erosión del suelo (K), longitud y pendiente del talud (LS), cobertura vegetal (C) y prácticas de conservación (P). El factor R se adoptó a partir de valores representativos para la zona de estudio, mientras que el factor K fue calculado en función de la textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad del suelo. Los factores C y P se definieron según el tipo de cobertura aplicada y la ausencia de prácticas adicionales de conservación [8],[28],[29]. Este enfoque permitió comparar los resultados experimentales con las estimaciones teóricas del modelo, validando la efectividad del pasto Tanzania y de los sistemas de refuerzo superficial en la reducción de la erosión hídrica en taludes [26],[27].

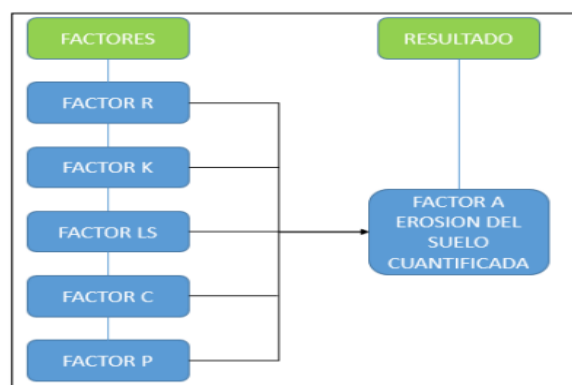


Fig. 11 Modelo conceptual de la cuantificación de la erosión hídrica

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten analizar el comportamiento del talud frente a la acción de la escorrentía superficial bajo condiciones controladas, así como la influencia de la cobertura vegetal aplicada mediante técnicas de bioingeniería. Las profundidades de erosión medidas experimentalmente evidencian variaciones significativas entre las distintas pruebas realizadas, lo que refleja la sensibilidad del suelo frente al flujo hidráulico y la importancia de los mecanismos de protección superficial. La pérdida de suelo registrada responde tanto a la intensidad del caudal aplicado como a las condiciones físicas del talud, comportamiento que ha sido reportado de manera consistente en estudios recientes sobre erosión hídrica en laderas y taludes artificiales [10],[21],[30]. El análisis comparativo de las profundidades de erosión muestra que, aun bajo geometrías similares del talud, la magnitud de la pérdida de suelo no es uniforme, lo que confirma que la erosión superficial es un proceso altamente dependiente de la interacción entre el flujo, el material del suelo y las condiciones de superficie [2].

Estos resultados concuerdan con investigaciones actuales que señalan que los suelos limo-arcillosos presentan una elevada susceptibilidad a la erosión cuando son sometidos a

escorrentías concentradas, especialmente en pendientes moderadas a pronunciadas [23]. La información obtenida constituye la base experimental para la evaluación posterior de los factores involucrados en la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) [19].

Tabla 6. profundidades de erosión para cada prueba en el talud

| Prueba | Cobertura            | Caudal unitario (l/s/m) | Prof. de erosión (m) |
|--------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| 1-1    | Sin protección       | 0.51                    | 0.032                |
| 1-2    | Sin protección       | 1.04                    | 0.049                |
| 1-3    | Sin protección       | 1.55                    | 0.080                |
| 1-4    | Sin protección       | 3.11                    | 0.158                |
| 2-1    | Tanzania             | 1.04                    | 0.000                |
| 2-2    | Tanzania             | 2.09                    | 0.001                |
| 2-3    | Tanzania             | 3.18                    | 0.003                |
| 2-4    | Tanzania             | 6.01                    | 0.003                |
| 2-5    | Tanzania             | 8.37                    | 0.004                |
| 2-6    | Tanzania             | 20.64                   | 0.007                |
| 3-1    | Tanzania con Geoweb® | 1.30                    | 0.000                |
| 3-2    | Tanzania con Geoweb® | 2.07                    | 0.001                |
| 3-3    | Tanzania con Geoweb® | 3.06                    | 0.001                |
| 3-4    | Tanzania con Geoweb® | 7.87                    | 0.001                |
| 3-5    | Tanzania con Geoweb® | 16.25                   | 0.002                |
| 3-6    | Tanzania con Geoweb® | 27.38                   | 0.004                |
| 4-1    | Tanzania con MacMat™ | 1.24                    | 0.000                |
| 4-2    | Tanzania con MacMat™ | 2.06                    | 0.001                |
| 4-3    | Tanzania con MacMat™ | 3.11                    | 0.002                |
| 4-4    | Tanzania con MacMat™ | 7.77                    | 0.002                |
| 4-5    | Tanzania con MacMat™ | 15.54                   | 0.002                |
| 4-6    | Tanzania con MacMat™ | 25.91                   | 0.005                |

A partir de los resultados experimentales presentados en la Tabla 6, es posible cuantificar el impacto de las distintas coberturas evaluadas. En condición sin protección, la profundidad de erosión alcanza valores de hasta 0.158 m para caudales relativamente bajos (3.11 l/s/m), mientras que con cobertura de pasto Tanzania, estos valores se reducen drásticamente a un rango entre 0.000 y 0.007 m, lo que representa una disminución superior al 95% en la pérdida de suelo. En el caso de combinaciones con Geoweb® y MacMat™, la erosión máxima registrada fue de 0.004 m y 0.005 m respectivamente, evidenciando mejoras adicionales en la eficiencia del sistema.

Esta reducción implica una menor degradación del suelo y una disminución en el transporte de sedimentos, lo cual contribuye a la conservación de la calidad del agua en sistemas naturales. La reducción de la erosión se traduce en menores costos asociados a mantenimiento, limpieza de cunetas y rehabilitación de taludes, especialmente en infraestructura vial. Estos resultados permiten evidenciar que la bioingeniería no solo es efectiva técnicamente, sino que

genera beneficios medibles en términos de sostenibilidad y eficiencia operativa.

De manera complementaria, se evaluaron las características geométricas del pasto Tanzania utilizado como cobertura vegetal, considerando su altura y densidad de tallos como parámetros fundamentales para el análisis hidráulico. Los datos obtenidos evidencian que la vegetación presenta una configuración favorable para incrementar la rugosidad superficial del talud, lo que se traduce en una reducción de la velocidad del flujo y, por ende, en una disminución de la capacidad erosiva del agua. Este comportamiento coincide con estudios recientes que destacan el rol de la vegetación en la disipación de energía hidráulica y en el refuerzo mecánico superficial del suelo mediante su sistema radicular [4],[13],[24].

Durante los ensayos, se observó que el pasto se inclina en la dirección del flujo, permitiendo un escurrimiento más uniforme sobre la superficie del talud. Este fenómeno explica la variación del coeficiente de Manning en función del caudal aplicado y refuerza la necesidad de considerar modelos que incorporen el esfuerzo cortante efectivo del flujo. Investigaciones contemporáneas indican que, bajo estas condiciones, la vegetación actúa simultáneamente como elemento hidráulico y mecánico, reduciendo la erosión superficial sin comprometer la estabilidad global del talud [7],[8],[14].

En el caso del suelo sin protección, la acción del flujo superficial genera esfuerzos cortantes que superan la resistencia al desprendimiento de partículas, favoreciendo procesos de erosión progresiva. En contraste, la presencia de cobertura vegetal incrementa la rugosidad hidráulica, reduciendo la velocidad del flujo y, por ende, el esfuerzo cortante aplicado sobre la superficie del suelo.

Es importante considerar que los resultados obtenidos presentan cierto grado de variabilidad inherente a las condiciones experimentales. Factores como la heterogeneidad del suelo, la distribución no uniforme de la cobertura vegetal y las pequeñas variaciones en el control del caudal pueden influir en los valores de erosión registrados [21]. Asimismo, aunque se ejecutaron múltiples ensayos bajo diferentes condiciones hidráulicas, la repetibilidad de los resultados podría fortalecerse mediante un mayor número de réplicas por condición experimental.

En este sentido, si bien los resultados muestran tendencias claras y consistentes, estos deben interpretarse dentro del contexto de las condiciones controladas del estudio. La extrapolación a condiciones reales de campo debe considerar posibles variaciones en parámetros como intensidad de lluvia, propiedades del suelo y estado de la vegetación, lo que constituye una línea futura de investigación para mejorar la robustez y transferibilidad de los resultados.

Tabla 7. Datos del pasto

| Prueba | Cobertura            | Fecha de siembra (dd/mm/aa) | Fecha de prueba (dd/mm/aa) | Edad del pasto (días) | Densidad (tallos/m <sup>2</sup> ) | Altura del pasto (m) |
|--------|----------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 1-1    | Sin protección       | --                          | 29/11/24                   | --                    | --                                | --                   |
| 1-2    | Sin protección       | --                          | 07/12/24                   | --                    | --                                | --                   |
| 1-3    | Sin protección       | --                          | 12/12/24                   | --                    | --                                | --                   |
| 1-4    | Sin protección       | --                          | 15/12/24                   | --                    | --                                | --                   |
| 2-1    | Tanzania             | 17/12/24                    | 25/01/25                   | 39                    | 2814                              | 0.19                 |
| 2-2    | Tanzania             | 17/12/24                    | 27/01/25                   | 41                    | 2814                              | 0.19                 |
| 2-3    | Tanzania             | 17/12/24                    | 27/01/25                   | 41                    | 2814                              | 0.19                 |
| 2-4    | Tanzania             | 17/12/24                    | 01/02/25                   | 45                    | 2814                              | 0.20                 |
| 2-5    | Tanzania             | 17/12/24                    | 01/02/25                   | 45                    | 2814                              | 0.20                 |
| 2-6    | Tanzania             | 17/12/24                    | 02/02/25                   | 46                    | 2814                              | 0.21                 |
| 3-1    | Tanzania con Geoweb® | 21/12/24                    | 27/01/25                   | 37                    | 4105                              | 0.20                 |
| 3-2    | Tanzania con Geoweb® | 21/12/24                    | 28/01/25                   | 38                    | 4105                              | 0.21                 |
| 3-3    | Tanzania con Geoweb® | 21/12/24                    | 28/01/25                   | 38                    | 4105                              | 0.22                 |
| 3-4    | Tanzania con Geoweb® | 21/12/24                    | 03/02/25                   | 44                    | 3997                              | 0.22                 |
| 3-5    | Tanzania con Geoweb® | 21/12/24                    | 04/02/25                   | 45                    | 3997                              | 0.23                 |
| 3-6    | Tanzania con Geoweb® | 21/12/24                    | 04/02/25                   | 45                    | 3997                              | 0.23                 |
| 4-1    | Tanzania con MacMat™ | 30/12/24                    | 14/02/25                   | 46                    | 2921                              | 0.20                 |
| 4-2    | Tanzania con MacMat™ | 30/12/24                    | 14/02/25                   | 46                    | 2921                              | 0.21                 |
| 4-3    | Tanzania con MacMat™ | 30/12/24                    | 16/02/25                   | 48                    | 2921                              | 0.21                 |
| 4-4    | Tanzania con MacMat™ | 30/12/24                    | 17/02/25                   | 49                    | 2983                              | 0.21                 |
| 4-5    | Tanzania con MacMat™ | 30/12/24                    | 18/02/25                   | 50                    | 2983                              | 0.22                 |
| 4-6    | Tanzania con MacMat™ | 30/12/24                    | 18/02/25                   | 50                    | 2983                              | 0.22                 |

En cuanto a la estabilidad del talud, el análisis realizado a partir de ensayos de campo y parámetros geotécnicos característicos indica que este presenta condiciones claramente estables. El suelo fue clasificado como CH según el sistema SUCS, con valores representativos de cohesión, ángulo de fricción interna y densidad natural, los cuales fueron incorporados en el análisis de equilibrio límite mediante el software Slide, considerando un coeficiente pseudoestático de 0.4. El factor de seguridad obtenido fue de 1.856, valor que confirma la estabilidad del talud bajo las condiciones evaluadas, permitiendo asegurar que los procesos observados durante los ensayos corresponden principalmente a fenómenos de erosión superficial y no a fallas globales de estabilidad [3], [18].

Tabla 8. Datos del talud

| Nº        | SUCS | Altura (m) | Distancia Horizontal (m) | Cohesión (kPa) | Seudo $\phi$ | K Estático (cm/seg) | Dens. Suelo (g/cm <sup>3</sup> ) | FS         |
|-----------|------|------------|--------------------------|----------------|--------------|---------------------|----------------------------------|------------|
| Talud Nº1 | CH   | 14         | 6                        | 103            | 19           | 0.4                 | 0.00158                          | 1.55 1.856 |

Finalmente, el análisis de la bondad de ajuste de los modelos empleados mostró que la ecuación que incorpora el esfuerzo cortante efectivo del flujo presenta un mejor desempeño en la estimación de los parámetros hidráulicos asociados a superficies vegetadas. Los resultados indican que, si bien los modelos evaluados permiten describir el comportamiento general del flujo, la precisión del ajuste depende de la cantidad y rango de datos experimentales disponibles. Este hallazgo coincide con investigaciones recientes que resaltan la necesidad de ampliar los rangos de caudal ensayados para mejorar la representatividad estadística de los modelos aplicados en estudios de erosión hídrica [5], [15], [27].

Tabla 9. Resumen de resultados según bondad de ajuste

| Ecuación             | Dubouys            | O'brien y Rindlaub  | Temple              |
|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Protección           |                    |                     |                     |
| Sin Protección       | 0.59<br>Mal ajuste | 0.99<br>Buen ajuste | 0.99<br>Buen ajuste |
| Tanzania             | --                 | 0.98<br>Buen ajuste | 0.99<br>Buen ajuste |
| Tanzania Con Geoweb® | --                 | 0.93<br>Buen ajuste | 0.99<br>Buen ajuste |
| Tanzania Con Macmat™ | --                 | 0.61<br>Mal ajuste  | 0.96<br>Buen ajuste |



#### IV. CONCLUSIONES

El análisis geotécnico de los taludes estudiados permitió determinar la composición y clasificación del suelo mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), lo cual hizo posible la obtención de parámetros fundamentales como la cohesión y el ángulo de fricción interna. Asimismo, la ejecución de ensayos de densidad natural por reemplazo de agua y pruebas de infiltración permitió caracterizar las condiciones del terreno *in situ*, proporcionando información clave para el cálculo del factor de seguridad del talud y la posterior aplicación del análisis de bioingeniería, incluyendo la determinación de los factores de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE).

Los resultados obtenidos evidencian que, bajo las condiciones de laboratorio establecidas, un talud con pendiente (2V:1H) protegido con pasto Tanzania de entre 40 y 50 días de edad y con una densidad aproximada de 2800 a 2900 tallos/m<sup>2</sup> presenta una reducción significativa de la pérdida de suelo frente a la acción de la escorrentía superficial. Al someter estos taludes a caudales comprendidos entre 1 y 25 L/s/m, se registró un rango de pérdida de suelo entre 1% y 1.5% en comparación con taludes sin protección de similar morfología, lo que demuestra la efectividad de la cobertura vegetal como medida de control de erosión.

Sin embargo, el estudio también evidenció que, bajo condiciones hidrológicas más severas, los esfuerzos de corte hidráulico generados en el suelo se transmiten como esfuerzos de tensión hacia el sistema radicular del pasto. En situaciones críticas, estos efectos pueden provocar el desprendimiento de la cobertura vegetal, favoreciendo procesos erosivos más intensos y aumentando los costos asociados a la fase de mantenimiento de las obras. En este contexto, se determinó que la protección con pasto Tanzania resulta efectiva hasta caudales menores a 20 L/s/m, ya que, al superar este umbral, se producen pérdidas de pasto que originan las mayores pérdidas de suelo observadas.

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que la aplicación de técnicas de bioingeniería genera impactos cuantificables tanto en términos ambientales como económicos. La reducción de la pérdida de suelo en más del 95% respecto a taludes sin protección implica una disminución significativa en los procesos de degradación, sedimentación y mantenimiento de infraestructura. Este comportamiento posiciona a la bioingeniería como una alternativa no solo técnicamente viable, sino también sostenible y costo-eficiente para su implementación en zonas andinas con alta susceptibilidad a la erosión.

Se concluye que la aplicación de técnicas de bioingeniería de suelos, combinadas con un adecuado análisis geotécnico e hidrológico, constituye una alternativa eficiente para la estabilización de taludes afectados por escorrentía superficial.

No obstante, su desempeño depende directamente de las condiciones hidráulicas del entorno, por lo que resulta fundamental considerar estos factores en el diseño y mantenimiento de obras de estabilización para garantizar su sostenibilidad y eficiencia a largo plazo.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Privada del Norte por darnos la oportunidad de trabajar este paper y poder presentarlo para su publicación.

#### REFERENCIAS

- [1] J. Wang, L. Zhang y Y. Li, "Numerical analysis of vegetation root reinforcement on rainfall-induced slope instability," *Scientific Reports*, vol. 15, pp. 1–13, 2025.
- [2] S. Ghestem, K. Sidle y J. Stokes, "The influence of plant root systems on slope stability," *Geotechnical Engineering Journal*, vol. 51, no. 4, pp. 213–227, 2019.
- [3] J. Stokes et al., "Eco-engineering for slope stabilization," *Ecological Engineering*, vol. 164, pp. 1–12, 2021.
- [4] B. Chen, W. Shui, Y. Liu y R. Deng, "Analysis of slope stability with different vegetation types under rainfall conditions," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 17, pp. 1–16, 2023.
- [5] M. A. Rahardjo, A. Satyanaga y E. C. Leong, "Vegetation effects on slope stability under rainfall infiltration," *Engineering Geology*, vol. 289, pp. 1–12, 2021.
- [6] J. M. Vanacker et al., "Vegetation controls on slope stability in humid tropics," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 20, pp. 1–14, 2020.
- [7] FAO, *Soil erosion and conservation techniques*, Rome, Italy, 2020.
- [8] M. A. Fullen y J. C. F. Booth, "Vegetation and erosion control," *Soil Use and Management*, vol. 36, pp. 1–10, 2020.
- [9] J. Fan, Y. Wu y Z. Chen, "Mechanical contribution of plant roots to slope stability," *Computers and Geotechnics*, vol. 150, pp. 1–11, 2022.
- [10] M. Pollen-Bankhead y A. Simon, "Advances in root-reinforcement models," *Geomorphology*, vol. 350, pp. 1–11, 2020.
- [11] D. Teku y M. Workie, "Soil erosion dynamics using the RUSLE model integrated with GIS," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 12, pp. 1–14, 2025.
- [12] X. Zhang, Y. Fu, Q. Pei, J. Guo y S. Jian, "Study on root characteristics and soil reinforcement effects of slope-protection vegetation," *Forests*, vol. 15, no. 3, pp. 1–18, 2024.
- [13] H. Zhang y X. Wang, "Effects of vegetation coverage on runoff and soil erosion," *Catena*, vol. 202, pp. 1–10, 2021.
- [14] M. Rickson, "The use of vegetation for slope stabilization," *Ecological Engineering*, vol. 148, pp. 1–9, 2020.
- [15] H. Tang et al., "Rainfall infiltration and slope failure mechanisms," *Engineering Geology*, vol. 276, pp. 1–14, 2020.
- [16] Y. Liu, H. Xu y J. Zhao, "Hydro-mechanical effects of vegetation on slope stability: A review," *Science of the Total Environment*, vol. 928, pp. 1–21, 2024.
- [17] A. K. Saha, R. Singh y P. Sharma, "Soil erosion control using vegetative measures," *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 75, no. 4, pp. 1–9, 2020.
- [18] L. Li, J. Yang y H. Liu, "Effect of vegetation on infiltration and slope stability under rainfall," *Journal of Hydrology*, vol. 603, pp. 1–12, 2021.
- [19] J. Wang y L. Zhang, "Stability analysis of vegetated slopes using FEM," *KSCCE Journal of Civil Engineering*, vol. 26, pp. 1–12, 2022.
- [20] R. Bordoni et al., "Rainfall-induced shallow landslides and vegetation: A review," *Geomorphology*, vol. 351, pp. 1–15, 2020.
- [21] J. Fan y Y. Wu, "Root-soil interaction and its influence on slope stability," *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 59, no. 2, pp. 83–92, 2022.

- [22] L. Soto-Juscamayta y J. C. Mayorga-Rojas, "Validation of slope stabilization using Kikuyo grass to improve soil shear resistance," *Modelling, Measurement and Control*, vol. 111, no. 1, pp. 87–96, 2024.
- [23] M. Bordonì, A. Meisina y C. Valentino, "Bioengineering techniques for shallow landslide mitigation," *Land Degradation & Development*, vol. 32, pp. 1–13, 2021.
- [24] J. Gonzalez-Ollauri y J. Mickovski, "Plant–soil reinforcement interaction," *Geotechnical Research*, vol. 7, no. 3, pp. 155–167, 2020.
- [25] J. Reubens et al., "Root reinforcement of soils: Review and modeling," *Earth-Science Reviews*, vol. 203, pp. 1–15, 2020.
- [26] A. Coppin y I. Richards, *Use of Vegetation in Civil Engineering*, 2nd ed., London: ICE Publishing, 2019.
- [27] M. Bordonì y A. Meisina, "Vegetation and slope stability under climate change," *Geosciences*, vol. 11, no. 5, pp. 1–16, 2021.
- [28] Y. Huang et al., "Effect of vegetation on soil shear strength," *Soil & Tillage Research*, vol. 207, pp. 1–10, 2021.
- [29] R. Bathurst et al., "Mechanisms of shallow slope failures and vegetation effects," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 57, pp. 1–14, 2020.
- [30] A. K. Mishra y R. Rai, "Bio-engineering techniques for erosion control," *Environmental Earth Sciences*, vol. 80, pp. 1–13, 2021.