

ARTÍCULO ORIGINAL**Enfoque de bioingeniería para la evaluación de la relación suelo-planta en un contexto de cambio climático en el río Chancay-Lambayeque: Un caso particular en Perú****Bioengineering approach for assessing soil-plant relationships in the context of climate change in the Chancay-Lambayeque river: A particular case in Peru**Luis Villegas¹ **RESUMEN**

El cambio climático está modificando los patrones hidrológicos e hidráulicos en todo el mundo, en ese contexto, la bioingeniería se presenta como una estrategia innovadora para mitigar los efectos negativos del cambio climático, usando plantas locales, para estabilizar márgenes ribereñas. En ese sentido, el objetivo de esta investigación fue estudiar la relación suelo-planta bajo un enfoque de bioingeniería considerando el cambio climático a partir de un modelo global, aplicado en el río Chancay-Lambayeque, específicamente en las inmediaciones del puente Saltur, Región Lambayeque, Perú. Como primer objetivo específico, se tuvo la evaluación del caudal máximo del río Chancay-Lambayeque bajo un evento climático extremo. Mediante el segundo objetivo específico, se analizaron los parámetros hidráulicos del río mediante simulación hidráulica y con el tercer objetivo específico se evaluó el crecimiento de la especie vegetal mediante un modelo logístico que relacionó la materia seca, el período de desarrollo y las condiciones de estrés hídrico. La metodología fue tipo aplicada y diseño experimental, cuyos indicadores característicos del cambio climático fueron el caudal y precipitación. Los resultados permitieron establecer un caudal máximo de 798.23 m³/s, obtenido mediante el modelo climático global del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas, usando su modelo hidrológico LISFLOOD y luego validado con un modelo precipitación-escurrentía para la cuenca Chancay-Lambayeque. Además, se determinaron las características hidráulicas del río, obteniéndose una velocidad de 3.50 m/s y tirante normal de 1.83 m, por lo que a esta altura se ubicó la especie vegetal para su desarrollo natural. Se observaron aumentos significativos en la cohesión (38.09%) y el ángulo de fricción interno del suelo (26.42%), para la altura de la planta requerida. Se concluye que, la técnica de bioingeniería aporta en gran medida al mejoramiento del suelo de la ribera del río estudiado, contribuyendo de esta manera a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Palabras clave: Bioingeniería; caudal; cohesión; planta; río.

ABSTRACT

Climate change is modifying hydrological and hydraulic patterns worldwide. In this context, bioengineering is presented as an innovative strategy to mitigate the negative effects of climate change, using local plants to stabilize riparian margins. In this sense, the objective of this research was to study the soil-plant relationship under a bioengineering approach considering climate change from a global model, applied to the Chancay-Lambayeque river, specifically in the vicinity of the Saltur bridge, Lambayeque Region, Peru. The first specific objective was to evaluate the maximum flow of the Chancay-Lambayeque River under an extreme climatic event. Through the second specific objective, the hydraulic parameters of the river were analyzed through hydraulic simulation, and the third specific objective was to evaluate the growth of the plant species using a logistic model that related dry matter, development period, and water stress conditions. The methodology was applied and experimental design, whose characteristic indicators of climate change were flow and precipitation. The results allowed establishing a maximum flow of 798.23 m³/s, obtained through the global climate model of the European Centre for Weather Forecasts, using its LISFLOOD hydrological model and then validated with a precipitation-runoff model for the Chancay-Lambayeque basin. In addition, the hydraulic characteristics of the river were determined, obtaining a velocity of 3.50 m/s and a normal depth of 1.83 m, so at this height the plant species was located for its natural development. Significant increases in cohesion (38.09%) and internal soil friction angle (26.42%) were noted, for

¹ Universidad Nacional del Santa, Perú. Email: 2021812011@uns.edu.pe

the required plant height. It is concluded that the bioengineering technique greatly contributes to the improvement of the soil of the riverbanks studied, thus contributing to the Sustainable Development Goals.

Keywords: Bioengineering; flow; cohesion; plant; river.

* Autor para correspondencia

INTRODUCCIÓN

La intensificación de actividades humanas ha acelerado la degradación del suelo, generando procesos como la erosión, desertificación y alteraciones hidrológicas, que se ven agravados por el cambio climático (Cui et al., 2021). Frente a este escenario, la bioingeniería surge como una alternativa sostenible que combina vegetación nativa y técnicas tradicionales para restaurar ecosistemas y estabilizar suelos (Ng et al., 2022). En cuencas tropicales estacionales como la del río Chancay-Lambayeque, esta problemática se intensifica debido a la ocurrencia de lluvias extremas asociadas a fenómenos como El Niño, que provocan inundaciones y daños a la infraestructura ribereña. En este contexto, la revegetación y las soluciones bioingenieriles pueden desempeñar un papel clave para mitigar dichos impactos, fortaleciendo la estabilidad del terreno (Maxwald et al., 2020; Tardío & Mickovski, 2023).

Sin embargo, persisten vacíos de conocimiento sobre la eficacia de estas soluciones bajo escenarios climáticos extremos (Mickovski, 2021). Además, la mayoría de estudios no considera integralmente la interacción entre eventos hidrometeorológicos severos y el comportamiento de especies vegetales bajo condiciones naturales. Investigaciones como la de Antônio et al. (2021) destacan que la bioingeniería, al emplear recursos locales, permite reducir costos y minimizar impactos ambientales, pero se requiere mayor evidencia sobre su aplicación en regiones áridas o semiáridas.

Diversos estudios han demostrado la efectividad de estas prácticas; en Brasil, Maffra & Sutili (2020) reportaron una mejora del 15% al 20% en la resistencia del terreno mediante técnicas vegetativas combinadas con elementos inertes. Vallarino et al. (2021) documentaron mejoras en el factor de seguridad del 0.25% y un aumento del 12% en cohesión mediante especies arbóreas nativas en taludes tropicales. También la investigación de Von-der-Thannen et al. (2021), destacaron una reducción del 30-40% en huella de carbono frente a métodos tradicionales.

En el Perú, Carrasco et al. (2023) mostraron que técnicas como muros krainer y vetiver pueden aumentar hasta 35% el factor de seguridad. Propuestas integradas desarrolladas por Tardío & Mickovski (2023) y estudios en climas estacionales similares al de río Chancay-Lambayeque, evidencian incrementos del 53-86% en resistencia a tracción usando especies como Elephant Grass (Keybondori et al., 2025).

Esta investigación busca evaluar el caudal máximo del río Chancay-Lambayeque ante eventos extremos, los parámetros hidráulicos para implementar bioingeniería con *Gynerium sagittatum* (Aubl.) P. Beauv.

(Poaceae) (GSABP), denominación de acuerdo con Díaz et al. (2021) y el crecimiento de esta especie en la estabilización del talud. Aunque existen estudios sobre bioingeniería aplicada a la estabilización de suelos, persisten vacíos en su aplicación frente a eventos climáticos extremos en cuencas del Pacífico del norte peruano como la del río Chancay-Lambayeque. Es por ello que el objetivo central de la presente investigación fue estudiar la relación suelo-planta bajo un enfoque de bioingeniería considerando el cambio climático a partir de un modelo global, aplicado en el río Chancay-Lambayeque, específicamente en las inmediaciones del puente Saltur, Región Lambayeque, Perú. Como primer objetivo específico, se tuvo la evaluación del caudal máximo del río Chancay-Lambayeque bajo un evento climático extremo utilizando el Global Flood Awareness System (GloFAS) del Copernicus Emergency Management Service (CEMS). Posteriormente, en el segundo objetivo específico, se analizaron los parámetros hidráulicos del río mediante simulación hidráulica mediante el software HEC-GeoRAS, considerando un caudal de diseño con un período de retorno de 140 años. Finalmente, en el tercer objetivo específico, se evaluó el crecimiento de la especie vegetal GSABP mediante un modelo logístico que relacionó la materia seca, el período de desarrollo y las condiciones de estrés hídrico. Por lo señalado anteriormente, se espera aportar con un sistema replicable para restauración fluvial, criterios técnicos para la selección de especies vegetales y fundamentos para políticas de adaptación climática.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología fue tipo aplicada y diseño experimental, cuyos indicadores característicos del cambio climático fueron el caudal y precipitación. Para lograr el buen desarrollo de esta investigación, en primer lugar, se evaluó el caudal máximo del río Chancay-Lambayeque bajo eventos climáticos extremos, utilizando el GloFAS del CEMS. Este sistema integra datos satelitales, modelos hidrometeorológicos y mediciones in situ para generar pronósticos de inundaciones a corto y largo plazo, considerando escenarios de cambio climático. GloFAS emplea el modelo del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) junto con el modelo hidrológico LISFLOOD para simular caudales en diferentes escalas temporales. Los resultados se validaron mediante el software HEC-HMS, que permitió modelar el comportamiento hidrológico de la cuenca hasta el sector del puente Saltur, utilizando métricas estadísticas, tales como el coeficiente de correlación (r), el criterio de Shultz (D), el criterio de Nash-Sutcliffe (E), el error de balance de masas (m), la eficiencia Kling-Gupta (KGE) y la prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales (p), para garantizar la precisión de las simulaciones.

Posteriormente, se analizaron los parámetros hidráulicos del río mediante el software HEC-GeoRAS, considerando un caudal de diseño con un período de retorno de 140 años. Este análisis determinó niveles de agua, distribución de velocidades, áreas hidráulicas y tipo de flujo en el tramo de estudio. Con estos

datos, se estableció la altura óptima para la implementación de GSABP como parte de las estrategias de bioingeniería. Además, se evaluó el crecimiento de esta especie mediante un modelo logístico que relaciona materia seca, período de desarrollo y condiciones de estrés hídrico, permitiendo cuantificar su influencia en la estabilidad del talud a través de parámetros como la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo.

RESULTADOS

Para el primer objetivo específico, orientado a la evaluación del caudal máximo asociado a eventos climáticos extremos en el río Chancay-Lambayeque, se realizó un análisis de datos hidrometeorológicos. La fase inicial consistió en un inventario detallado de la red de estaciones de monitoreo disponible en la cuenca, mediante la recopilación sistemática de información de las bases de datos oficiales del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Este proceso permitió identificar y georreferenciar 12 estaciones climáticas y 1 estación hidrométrica operativas (Figura 1 y Tabla 1), cuyos registros históricos constituyeron la base para los análisis posteriores.

La selección de estas estaciones se fundamentó en criterios técnicos que incluyeron: en primer lugar la cobertura temporal suficiente para caracterizar eventos extremos, en segundo lugar la distribución espacial representativa de la variabilidad climática de la cuenca, y tercer lugar la accesibilidad de datos primarios para el período de estudio. Estas etapas fueron cruciales para garantizar la calidad de la información hidrológica requerida en las modelaciones subsiguientes, particularmente en el contexto de alta variabilidad pluviométrica, que es una de las principales características de las cuencas del Pacífico norte peruano.

Figura 1

Ubicación de estaciones climáticas e hidrométrica de la cuenca Chancay-Lambayeque

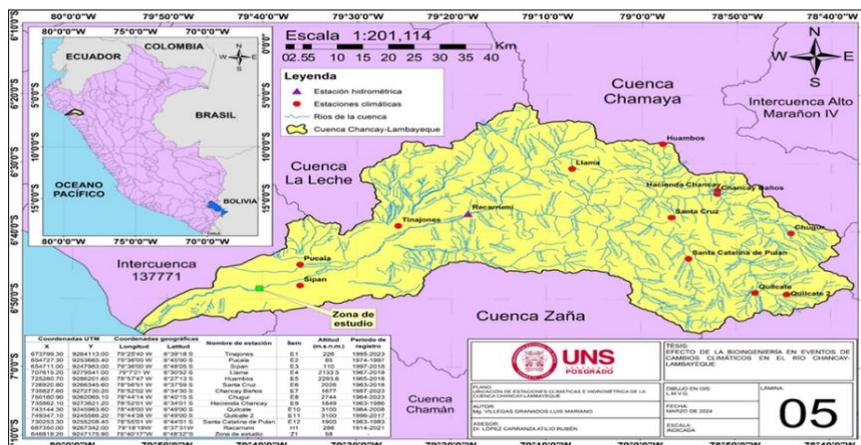


Tabla 1

Estaciones climáticas e hidrométrica de la cuenca Chancay-Lambayeque

| Ítem | Longitud | Latitud | Altitud (m.s.n.m.) | Periodo de registro |
|------|------------|-----------|-------------------------|---------------------|
| E1 | 79°25'40 W | 6°39'18 S | Tinajones | 226 |
| E2 | 79°36'00 W | 6°45'00 S | Pucala | 85 |
| E3 | 79°36'00 W | 6°48'05 S | Sipan | 110 |
| E4 | 79°7'21 W | 6°30'52 S | Llama | 2133.5 |
| E5 | 78°57'47 W | 6°27'13 S | Huambos | 2293.6 |
| E6 | 78°56'51 W | 6°37'59 S | Santa Cruz | 2026 |
| E7 | 78°52'02 W | 6°34'30 S | Chancay Baños | 1677 |
| E8 | 78°44'14 W | 6°40'15 S | Chugur | 2744 |
| E9 | 78°52'01 W | 6°34'01 S | Hacienda Chancay | 1849 |
| E10 | 78°48'00 W | 6°49'00 S | Quilcate | 3100 |
| E11 | 78°44'38 W | 6°49'00 S | Quilcate 2 | 3100 |
| E12 | 78°55'01 W | 6°44'01 S | Santa Catalina de Pulan | 1900 |
| E14 | 79°18'19W | 6°37'31W | Racarrumi | 286 |

Cabe destacar que, conforme a las recomendaciones del SENAMHI y de estudios previos desarrollados por Arriola et al. (2020) y Arriola et al. (2023) sobre el comportamiento hidrológico en las regiones del Pacífico peruano, únicamente se seleccionaron estaciones meteorológicas con un período de registro igual o superior a 15 años. Este criterio fue adoptado como protocolo para asegurar la confiabilidad de los datos utilizados en el análisis. Una vez recopilada la información climática (precipitaciones) e hidrométrica correspondiente, se procedió a localizar la estación hidrométrica Racarrumi en el portal GloFAS (Figura 2), con el fin de evaluar el comportamiento del caudal fluvial en condiciones de cambio climático. Para ello, se empleó la simulación hidrológica basada en el modelo LISFLOOD (Figura 3), el cual permite estimar caudales máximos mediante escenarios proyectados que integran características climáticas estacionales y su impacto sobre el régimen hidrológico de la cuenca Chancay-Lambayeque.

Figura 2

Vista general de la extracción de datos del portal electrónico GloFAS

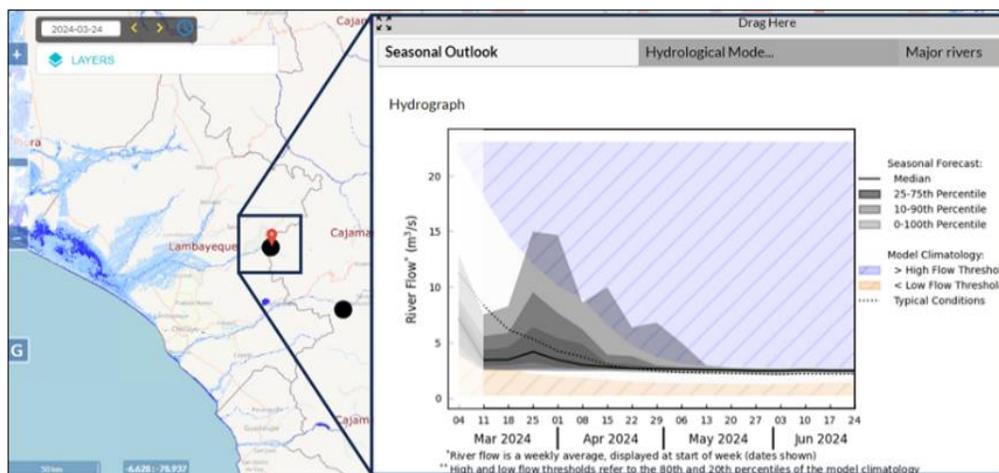
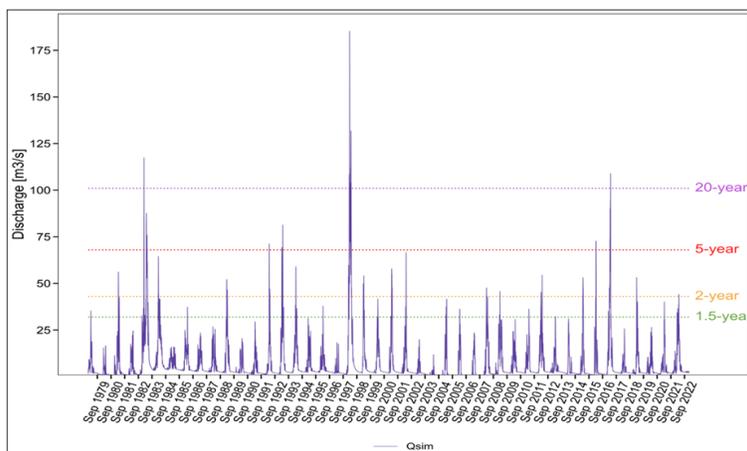


Figura 3

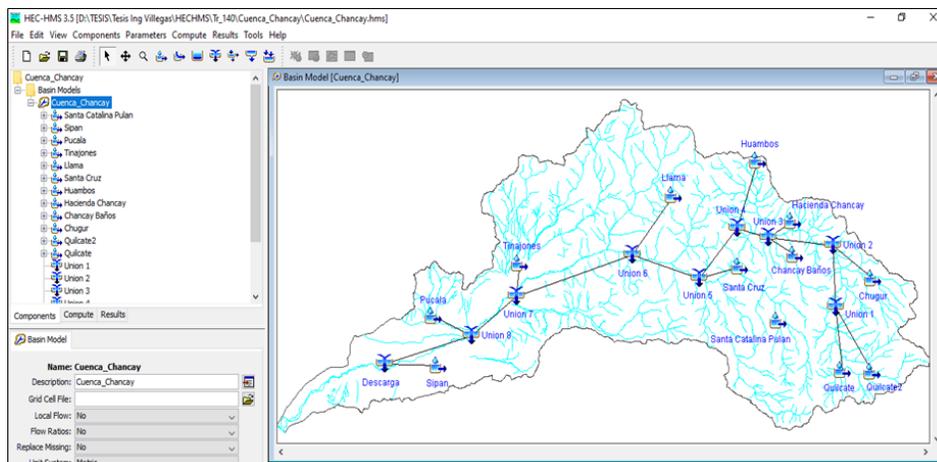
Caudales máximos obtenidos mediante simulación en LISFLOOD de GloFAS



Posteriormente, con el objetivo de correlacionar adecuadamente los caudales máximos estimados mediante el modelo LISFLOOD en la plataforma GloFAS, se desarrolló un modelo hidrológico de la cuenca Chancay-Lambayeque utilizando el software HEC-HMS. Este modelo fue configurado hasta el punto de control correspondiente al sector del puente Saltur, ubicado en la zona de estudio, tal como se ilustra en la Figura 4.

Figura 4

Modelo hidrológico de la cuenca Chancay-Lambayeque con HEC-HMS



Para garantizar la confiabilidad de las simulaciones, se realizó una validación cruzada entre los caudales modelados con LISFLOOD y HEC-HMS, contrastando sus resultados mediante análisis gráfico y evaluación cuantitativa con métricas estadísticas estandarizadas (Tabla 2). Estas métricas, son ampliamente reconocidas en la literatura hidrológica (Onyutha, 2022; Caicedo et al., 2022; Lujano et al., 2025), entre las que destacan, el coeficiente de correlación (r): Que evalúa la correlación entre ambas series de datos. El criterio de Nash-Sutcliffe (E): Para medir la eficiencia predictiva del modelo. La eficiencia de Kling-Gupta (KGE): indicador de bondad de ajuste ampliamente utilizado para comparar simulaciones versus observaciones de diversas variables hidrológicas.

En la Tabla 2 demostraron un ajuste satisfactorio entre ambos modelos, lo que valida su consistencia para simular caudales extremos en la cuenca. Esta concordancia refuerza la robustez metodológica del estudio y respalda el uso combinado de LISFLOOD (para proyecciones climáticas) y HEC-HMS (para respuestas hidrológicas detalladas) en cuencas áridas con alta variabilidad pluviométrica.

Tabla 2

Métricas estadísticas de comparación de los modelos hidrológicos

| Ítem | Parámetros | Valor | Valor óptimo |
|---|------------|-------|--------------|
| Coficiente de correlación | r | 0.980 | 1 |
| Criterio de Schultz | D | 0.523 | 0 |
| Criterio de Nash-Sutcliffe | E | 0.951 | 1 |
| Error de balance de masas | m | 0.006 | 0 |
| Eficiencia Kling-Gupta | KGE | 0.865 | 1 |
| Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales | p | 0.994 | 1 |

En relación con el segundo objetivo específico, se procedió a la evaluación de los parámetros hidráulicos del río Chancay-Lambayeque con fines de aplicación de técnicas de bioingeniería, considerando la especie vegetal GSABP. Esta evaluación partió de la estimación previa del caudal máximo, obtenida mediante el modelo climático ECMWF, a través del portal GloFAS, utilizando el modelo hidrológico LISFLOOD para un período de retorno de 140 años. Adicionalmente, se empleó el software HEC-GeoRAS para definir los parámetros hidráulicos correspondientes a la sección transversal del tramo de estudio (Figura 5), cuyos valores finales se presentan en la Tabla 3.

Figura 5

Vista de la sección transversal típica en HEC-GeoRAS del tramo de estudio

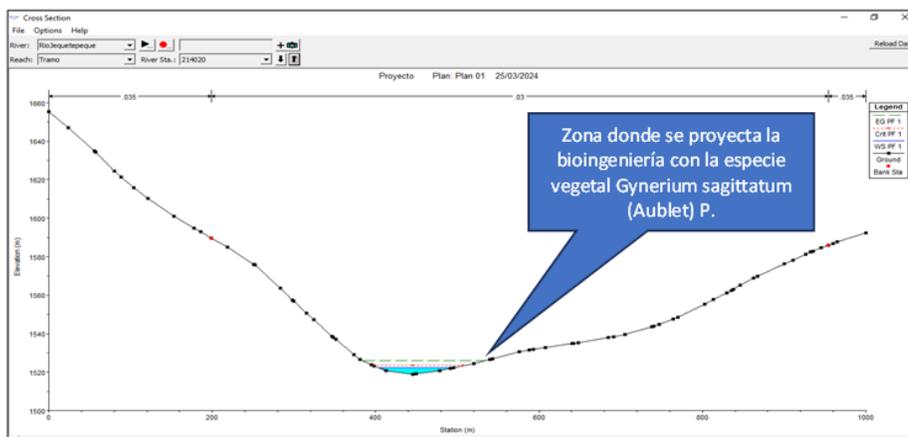


Tabla 3*Parámetros hidráulicos obtenidos del tramo de estudio*

| Ítem | Unidad | Valor |
|---------------------------|-------------------|--------|
| Caudal | m ³ /s | 798.53 |
| Coefficiente de rugosidad | Adimensional | 0.05 |
| Tirante normal | m | 1.85 |
| Área hidráulica | m ² | 253.69 |
| Perímetro mojado | m | 174.15 |
| Radio hidráulico | m | 1.46 |
| Espejo de agua | m | 174.05 |
| Velocidad | m/s | 3.15 |
| Número de Froude | Adimensional | 0.83 |

Con los hallazgos previamente obtenidos, se procedió al desarrollo del tercer objetivo específico, el cual consistió en evaluar el crecimiento de la especie vegetal GSABP y su influencia en la estabilización del talud del río Chancay-Lambayeque. Para comprender adecuadamente el desarrollo de esta especie bajo condiciones naturales, se implementó un modelo matemático basado en una ecuación logística, con el fin de predecir su crecimiento y rendimiento. Esta especie fue sembrada en el talud de la sección del río, con un total de 13 muestras, con el objetivo de contribuir a la estabilización del terreno (Figura 6).

Cabe señalar que el rendimiento del follaje obtenido por planta presentó variabilidad, con un rango de 0.032 kg a 5.25 kg para diámetros basales comprendidos entre 0.85 cm y 27.65 cm. En condiciones secas, los rendimientos oscilaron entre 0.022 kg y 4.23 kg, como se observa en las características de crecimiento mostradas en la Figura 6.

Figura 6*Condiciones actuales del crecimiento y rendimiento de la especie vegetal GSABP*

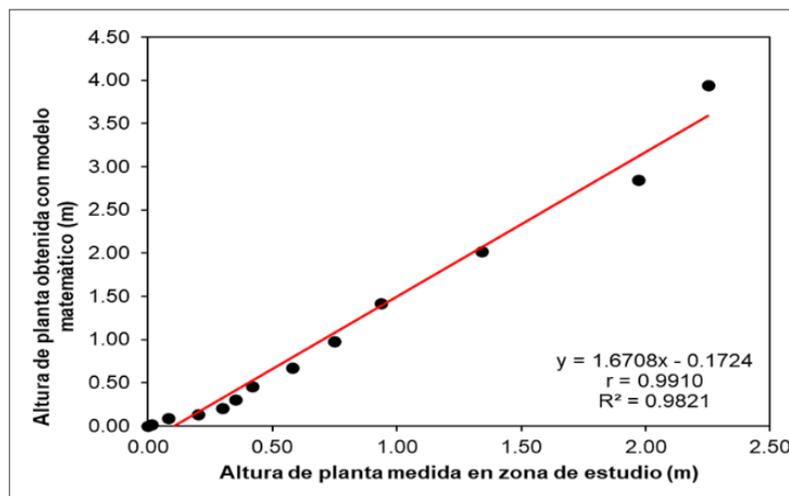
El modelo matemático utilizado para estimar el crecimiento de la planta se fundamentó en las ecuaciones propuestas por Cao et al. (2019) y Mancilla-Morales et al. (2019). De dichas formulaciones, se determinó que la Ecuación (1), de tipo logístico, presenta el mejor ajuste para representar adecuadamente el comportamiento de crecimiento de la especie bajo estudio.

$$Altura = \frac{DMP_i * d}{d + (d + DMP_i) * e^{(-m*t)}} \quad (1)$$

Los análisis de regresión no lineal aplicados al modelo de crecimiento logístico permitieron determinar los coeficientes característicos para GSABP, obteniéndose valores de 4.50 para el parámetro de crecimiento máximo (d) y 0.02 para la tasa intrínseca de crecimiento (m). Estos parámetros, fundamentales en la modelización del desarrollo vegetal, reflejan la capacidad adaptativa de la especie bajo las condiciones ambientales del área de estudio. Complementariamente, la Figura 7 muestra las relaciones de estas variables, mediante análisis de correlación, donde se evidencia una fuerte dependencia ($R^2 > 0.95$) entre las variables de crecimiento evaluadas.

Figura 7

Correlación de la altura de crecimiento del cultivo



Análisis estadístico

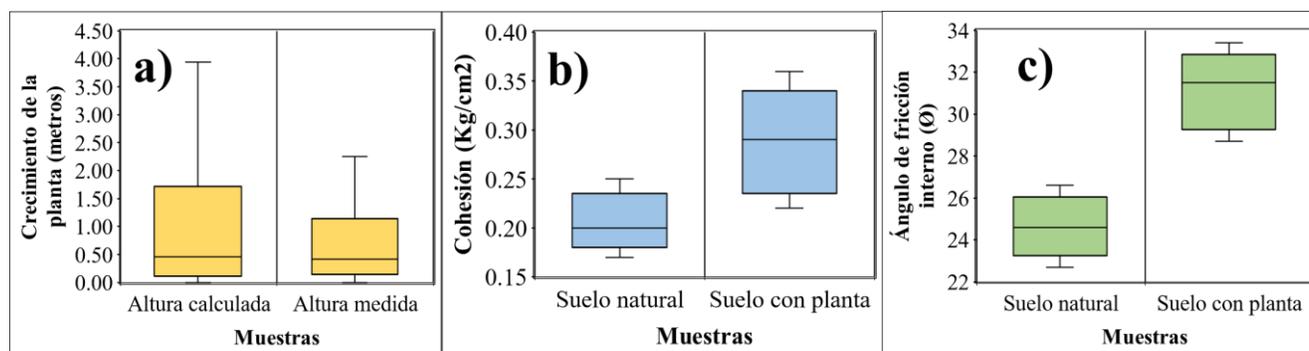
La validación del modelo de crecimiento (Ecuación 1) para GSABP mostró una alta correlación entre alturas calculadas y medidas ($r=0.99$; $R^2=0.98$), tal como se indica en la Figura 7 y mediante el análisis ANOVA, se confirmó que no existen diferencias significativas de las 13 muestras ($p=0.456$; $F=0.456 < F_{crítico}=4.259$), validando la precisión del modelo (Figura 8a). En cuanto a la estabilización del suelo, los ensayos de corte directo revelaron que el enraizamiento incrementa significativamente las propiedades mecánicas: la cohesión (Figura 8b), presentó diferencias estadísticas ($p=0.019$; $F=8.405 >$

$F_{crítico}=5.318$), al igual que el ángulo de fricción interna ($p=0.0003$; $F=36.136 > F_{crítico}=5.318$) en la Figura 8c. Estos resultados demuestran que la presencia de la planta mejora la resistencia del suelo, coincidiendo con hallazgos previos por Karimzadeh et al. (2022). Cabe indicar que el valor medio de la cohesión del suelo natural fue de 0.21 Kg/cm^2 , mientras que la cohesión del suelo con la planta GSABP fue de 0.29 Kg/cm^2 . En tanto, el ángulo de fricción del suelo normal alcanzó 24.60° , sin embargo, dicho ángulo de fricción con la especie GSABP logró un valor medio de 31.10° . Por lo tanto, la variación de la cohesión, aumentó en un 38.09% y el ángulo de fricción interno del suelo en un 26.42%, lo que evidencia un impacto significativo positivo de la relación suelo-planta.

Así mismo, los datos obtenidos, detallan que el análisis de varianza para los valores de altura del cultivo mostró que no existen diferencias significativas entre grupos ($p = 0.456 > 0.05$), con un valor F de 0.574 inferior al valor crítico F de 4.259. El análisis de varianza para los valores de cohesión mostró diferencias estadísticamente significativas entre grupos, con un valor F de 8.405, superior al valor crítico F de 5.318, y una probabilidad p de 0.019, menor a 0.05. Asimismo, para el ángulo de fricción interna, el análisis evidenció diferencias altamente significativas, con un valor F de 36.136 y una probabilidad p de 0.0003, ambas muy por debajo del valor crítico F de 5.318. Estos resultados indican que los tratamientos aplicados influyeron significativamente en ambas propiedades del suelo (Figuras 8), evidenciando tanto la confiabilidad del modelo de crecimiento como el efecto bioestabilizador de la GSABP en taludes fluviales.

Figura 8

Diagrama de cajas: (a) Distribución de crecimiento de la planta, (b) cohesión y (c) ángulo de fricción.



DISCUSIÓN

De acuerdo con los hallazgos obtenidos, el caudal máximo determinado a partir de los procedimientos expuestos en la sección de resultados consideró la influencia directa de las precipitaciones asociadas a eventos de cambio climático. Si bien existen estudios relevantes en la cuenca Chancay-Lambayeque, como los realizados por Arriola et al. (2020), Vásquez et al. (2021) y Arriola et al. (2022), estos se han

centrado únicamente en estimaciones de caudales extremos sin incorporar eventos climáticos específicos en sus análisis. Por esta razón, se resalta la necesidad de integrar los efectos combinados del cambio climático en los estudios hidrológicos, particularmente en escenarios donde las actividades de infraestructura y expansión urbana continúan intensificándose, lo cual incrementa el riesgo de inestabilidad de taludes e inundaciones (Cui et al., 2021; Qin et al., 2022). En este contexto, la aplicación del modelo climático ECMWF a través de GloFAS y su integración con el modelo hidrológico LISFLOOD resulta adecuada y metodológicamente sólida para la estimación de caudales máximos y de diseño.

En cuanto a los resultados obtenidos mediante este enfoque, se logró caracterizar con precisión las condiciones geométricas e hidráulicas del tramo de estudio, lo que permitió evaluar la factibilidad de implementar soluciones de bioingeniería con especies vegetales. Tal como lo afirman Ni et al. (2024), las técnicas de bioingeniería promueven una ingeniería sostenible basada en la interacción dinámica entre el suelo, las plantas y el entorno climático, aspecto clave para el éxito de proyectos de estabilización fluvial.

De manera complementaria, Yazdani et al. (2024) destacan que una correcta caracterización del sitio y la adecuada selección de parámetros de diseño son determinantes para optimizar el desempeño estructural y geomecánico de la vegetación utilizada. En línea con estos planteamientos, investigaciones recientes subrayan la necesidad de comprender este sistema como una red integrada, donde las propiedades del suelo, el tipo y profundidad del sistema radicular, la especie vegetal seleccionada y la precipitación condicionan directamente la efectividad de las soluciones bioingenieriles (Ng et al., 2022; Zhang et al., 2025).

Respecto al rendimiento del cultivo de GSABP, el modelo matemático empleado mostró una alta correlación con las alturas reales registradas en campo, lo que respalda su idoneidad para condiciones climáticas extremas y un período de retorno de 140 años. No obstante, como lo sugieren Maffra & Sutili (2020) y Holanda et al. (2021), es imprescindible implementar un sistema de monitoreo continuo que permita ajustar parámetros frente a variaciones hidrológicas, geomorfológicas, térmicas y climáticas. A pesar de su potencial, la bioingeniería sigue siendo una tecnología emergente cuya consolidación requiere integrar conocimientos ecológicos y validar sus efectos mediante ensayos físicos y pruebas in situ (Ni et al., 2024).

CONCLUSIONES

Se concluye que la integración de modelos climáticos e hidrológicos (ECMWF/GloFAS, LISFLOOD y HEC-HMS) permitieron estimar con precisión el caudal máximo el cual fue de 798.23 m³/s, asociado a eventos extremos de cambio climático en la cuenca del río Chancay-Lambayeque.

Asimismo, se identificaron condiciones hidráulicas subcríticas ($v = 3.50$ m/s; $h = 1.83$ m) adecuadas para la implementación de soluciones de bioingeniería con GSABP, lo que facilita su establecimiento en taludes fluviales.

El crecimiento de dicha especie sigue un modelo logístico, y su incorporación mejora significativamente la cohesión del suelo y el ángulo de fricción interna, fortaleciendo la estabilidad del talud.

Se propone un modelo integral y replicable que vincula hidrología, hidráulica y vegetación para implementar estrategias de bioingeniería adaptadas a cuencas áridas del Pacífico sur, con potencial de ser adoptado en políticas de gestión del riesgo y adaptación al cambio climático.

Los resultados pueden ser utilizados por autoridades locales y regionales para diseñar soluciones basadas en la naturaleza en zonas vulnerables a inundaciones, optimizando la selección de especies vegetales y reduciendo procesos erosivos en ríos estacionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antônio, G., Holanda, F., Santos, L., Mendonça, B., de-Jesus, R., & Silva, P. (2021). Evaluation of efficiency of the implementation of soil bioengineering technique. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(6), 3422-3436. doi:10.26848/RBGF.V14.6.P3417-3432
- Arriola, G., Villegas, L., & Sotomayor, G. (2020). Análisis de las curvas de infiltración para determinar caudales máximos en zonas de escasa información ante eventos extremos. *Revista Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 7(1). doi:10.26495/icti.v7i1.1352
- Arriola, G., Villegas, L., Fernandez, J., Vallejos, J., & Idrogo, C. (2023). Assessment of parameters of the generalized extreme value distribution in rainfall of the Peruvian North. *Revista Politecnica*, 52(2), 99-112. doi:10.33333/rp.vol52n2.10
- Arriola, G., Villegas, L., Marín, N., Idrogo, C., Piedra, J., & Arbulú, J. (2022). Assessment of climatic aggressiveness and precipitation concentration in the Chancay-Lambayeque basin, Peru. *Revista Politecnica*, 50(2), 15-22. doi:10.33333/rp.vol50n2.02
- Caicedo, M., Villegas, L., Arriola, G. C., García, J., & Marín, N. (2024). Generation of flows applying a simple method of flood routing to monthly level in La Leche basin, Peru. *Revista Politecnica*, 53(1), 99-110. doi:10.33333/rp.vol53n1.09
- Cao, L., Shi, P., Li, L., & Chen, G. (2019). A new flexible sigmoidal growth model. *Symmetry*, 11(2). doi:10.3390/sym11020204

- Carrasco, G., Vargas, M., & Vargas, E. (2023). “¿Cómo la bioingeniería influye en la estabilización de laderas y en la mitigación de la erosión hídrica? *Perfiles de Ingeniería*, 19(20), 73-92. doi:10.31381/perfilesingenieria.v19i20.6313
- Cui, P., Peng, J., Shi, P., Tang, H., Ouyang, C., Zou, Q., & Lei, Y. (2021). Scientific challenges of research on natural hazards and disaster risk. *Geography and Sustainability*, 2(3), 216-223. doi:10.1016/j.geosus.2021.09.001
- Díaz, C., Padrón, E., & Alvarez, A. (2021). Micropropagation of arrow cane, *Gynerium sagittatum* (Aubl.) P. Beauv. Cv. Criolla, Criolla 1, and Martinera, in a double-phase medium. *Ciencia Tecnología Agropecuaria*, 22(2). doi:10.21930/RCTA.VOL22_NUM2_ART:1821
- Holanda, F., Filho, R., Pedrotti, A., Wilcox, B., Marino, R., & Santos, L. (2021). Soil bioengineering in northeastern Brazil: An overview. *Revista Ambiente e Agua*, 16(4). doi:10.4136/ambi-agua.2650
- Karimzadeh, A., Leung, A., & Gao, Z. (2022). Shear strength anisotropy of rooted soils. *Geotechnique*, 74(10), 1033-1046. doi:10.1680/jgeot.22.00103
- Keybondori, S., Abdi, E., Deljouei, A., Cislighi, A., Shakeri, Z., & Etemad, V. (2025). Soil-bioengineering to stabilize gravel roadside slopes in the steep Hyrcanian Forests of Northern Iran. *Ecological Engineering*, 214. doi:10.1016/j.ecoleng.2025.107569
- Lujano, E., Diaz, R., Lujano, R., Sanchez-Delgado, M., & Lujano, A. (2025). Hydrological performance of gridded meteorological products in Peruvian Altiplano basins. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 30. doi:10.1590/2318-0331.302520240068
- Maffra, C., & Sutili, F. (2020). The use of soil bioengineering to overcome erosion problems in a pipeline river crossing in South America. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(1). doi:10.1007/s41062-020-0273-5
- Mancilla-Morales, J., Tornero-Campante, M., & López-Cruz, I. (2019). Evaluation of a mathematical model to predict growth and nitrogen content in tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouse conditions. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 11(2), 111-125. doi:10.5154/r.inagbi.2018.06.013
- Maxwald, M., Crocetti, C., Ferrari, R., Petrone, A., Rauch, H., & Preti, F. (2020). Soil and water bioengineering applications in central and South America: A transferability analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1-31. doi:10.3390/su122410505
- Mickovski, S. (2021). Re-thinking soil bioengineering to address climate change challenges. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6). doi:10.3390/su13063338
- Ng, C., Zhang, Q., Zhou, C., & Ni, J. (2022). Eco-geotechnics for human sustainability. *Science China Technological Sciences*, 65(12), 2809-2845. doi:10.1007/s11431-022-2174-9
- Ni, J., Xiao, Y., Shi, J., & He, J. (2024). Soil bioengineering using vegetation under climate change. *Biogeotechnics*, 2(1). doi:10.1016/j.bgtech.2023.100067
- Onyutha, C. (2022). A hydrological model skill score and revised R-squared. *Hydrology Research*, 53(1), 51-64. doi:10.2166/NH.2021.071

- Qin, M., Cui, P., Jiang, Y., Guo, J., Zhang, G., & Ramzan, M. (2022). Occurrence of shallow landslides triggered by increased hydraulic conductivity due to tree roots. *Landslides*, *19*(11), 2593–2604. doi:10.1007/s10346-022-01921-8
- Tardio, G., & Mickovski, S. (2023). A novel integrated design methodology for nature-based solutions and soil and water bioengineering interventions: The Tardio&Mickovski methodology. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(4). doi:10.3390/su15043044
- Vallarino, R., Mejía, G., Centella, D., & Grajales, F. (2021). Bioingeniería de taludes: Evaluación del uso de árboles y arbustos como posible mecanismo para incrementar el factor de seguridad. *Revista de Iniciación Científica*, *7*(2), 26-38. doi:10.33412/rev-ric.v7.2.3336
- Vásquez, A., Vasquez, A., Piedra, J., & Arriola, G. (2021). Evaluación de la ecuación general del USBR para el diseño de aliviaderos tipo Creager de descarga libre. *Revista Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, *8*(1), 106-120. doi:10.26495/icti.v8i1.1542
- Von-der-Thannen, M., Hoerbinger, S., Muellebner, C., Biber, H., & Rauch, H. (2021). Case study of a water bioengineering construction site in Austria. Ecological aspects and application of an environmental life cycle assessment model. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, *12*(4), 599-609. doi:10.1007/s40095-021-00419-8
- Yazdani, F., Sadeghi, H., AliPanahi, P., Gholami, M., & Leung, A. (2024). Evaluation of plant growth and spacing effects on bioengineered slopes subjected to rainfall. *Biogeotechnics*, *2*(2). doi:10.1016/j.bgtech.2024.100080
- Zhang, W., Huang, R., Xiang, J., Zhang, N., Ciantia, M., Liu, L., . . . Qin, C. (2025). Role of root morphological and architectural traits: Insights into root-inspired anchorage and foundation systems. *Biogeotechnics*, *3*(1). doi:10.1016/j.bgtech.2024.100107