

Resistencia a la tracción del sistema radicular del vetiver (*vetiveria zizanioides*) plantado en un suelo granular

*Tensile strength of the root system of vetiver (*vetiveria zizanioides*) planted in a granular soil*

*Resistência à tração da raiz do vetiver (*vetiveria zizanioides*) plantada em solo granular*

Luiggi Méndez¹ Williams Rojas² Jesús Torres³ Roberto Torres⁴ Mariana Rada⁵ Rubén Calderas⁶

Recibido: 16-5-14; Aprobado: 20-6-14

RESUMEN	ABSTRACT	RESUMO
<p>Uno de los enfoques más empleados en los últimos tiempos por la ingeniería para la mitigación de deslizamientos y estabilización de taludes es el uso de la bioingeniería, por ser menos costosa y estéticamente agradable. Entre estos métodos destaca la siembra de Vetiver, puesto que sus raíces actúan como anclajes reforzando el suelo. En vista de esto, resulta de gran importancia determinar la resistencia a la tracción del sistema radicular de la gramínea. Para la investigación se diseñó un suelo de características areno-limosas, donde se presume un mayor desarrollo de la planta, se sembraron los especímenes en una serie de recipientes contruidos para favorecer el desarrollo vertical de las raíces, luego de tres meses de desarrollo, las mismas fueron extraídas sin alteraciones y ensayadas en la máquina de tracción. Se obtuvo que la resistencia a la tracción es inversamente proporcional al diámetro de la raíz, con un valor medio de 122 MPa, para un diámetro equivalente a 1,4 mm, adicionalmente exhiben altas deformaciones previo a la rotura, con magnitudes que oscilan entre un 9 % y 23 %.</p> <p>Palabras clave: Carga última, deformación axial, resistencia a la tracción, sistema radicular, vetiver.</p>	<p><i>One of the approaches more often used, in the last years, in landslides mitigation and slope stabilization, is the use of bioengineering, for the low cost and impact. Between these techniques, highlights the Vetiver plantation, since their roots act like anchors and reinforce the soil. For these reason, it is important determinate the tensile strength of the root system. For the investigation, a silty sand soil was designed, where a best development is waited, specimens were planted in a series of containers built to favour the vertical development of the roots, after three months of development, the roots were extracted and, an uniaxial tensile strength test was performed. It was found that the tensile strength is inversely proportional to the diameter of the root, with a mean of 122MPa, for a 1.4 mm diameter; additionally, the roots exhibit between 9 % and 23 % strain before breaking.</i></p> <p>Keywords: Maximum elongation, root system, ultimate tensile strength, Vetiver.</p>	<p>Uma abordagem usada em tempos mais recentes pela engenharia de deslizamentos de terra e estabilização de taludes é o uso de bioengenharia, sendo menos caro e esteticamente agradável. Entre estes salienta plantação métodos vetiver desde raízes atuar como reforço das âncoras de chão. Em vista disso, é de grande importância para determinar a resistência à tração do sistema radicular da grama. Para a investigação, uma das características do solo franco-arenoso, onde, presumivelmente, o desenvolvimento da planta foi projetada, as amostras foram colocadas em uma série de embarcações construídas para favorecer o desenvolvimento vertical das raízes, depois de três meses de desenvolvimento, os estes foram extraídas e analisadas quanto à máquina de tração inalterada. Verificou-se que a resistência à tração é inversamente proporcional ao diâmetro da raiz, com um valor médio de 122 MPa, equivalente a um diâmetro de 1,4 mm, adicionalmente, apresentam uma elevada tensão de rotura antes ter grandezas que variam entre 9% e 23%.</p> <p>Palavras-chave: Carga máxima, deformação axial, resistência à tração, sistemas radiculares, vetiver.</p>

¹Ing°Geó°. Libre ejercicio, e-mail: luiggijacson@gmail.com

²Ing°Geó°. Libre ejercicio, e-mail: wjrv26@gmail.com

³Ing°Geó°. MSc. Profesor Universidad de Los Andes (ULA), e-mail: j.torres@ula.ve

⁴Ing°Geó°. Profesor ULA, e-mail: thorj@ula.ve

⁵Ing°Geó°. Libre ejercicio, e-mail: marianaradas@gmail.com

⁶Ing°Civ°. MSc. Profesor ULA, e-mail: calderas@ula.ve

INTRODUCCIÓN

La geotecnia en los últimos años se ha preocupado por formular métodos eficaces y económicos de prevención, mitigación o corrección de inestabilidad que puedan presentar los suelos. Una de las propuestas utilizadas es el uso de barreras vegetales de pasto Vetiver, gramínea capaz de generar estabilidad en el suelo, consecuencia, de las propiedades mecánicas de su sistema radicular.

Existen diversas publicaciones que destacan la alta resistencia a la tracción del sistema radicular del pasto vetiver. Las raíces de la planta actúan como anclajes naturales que modifican el suelo adyacente conformando un sistema complejo (Styczen y Morgan, 1995, en Hengchaovanich, 2003) con propiedades resistentes al corte superiores a ambos materiales aislados.

Las investigaciones de Wu (1976) y Waldron (1977) en Danjon, et al. (2008), que proponen el modelo de Equilibrio Límite, el cual permite determinar el incremento de la resistencia a la cizalla que otorga el desarrollo radicular, basado en propiedades del suelo y características mecánicas y geométricas de la raíz. Este modelo fue puesto a prueba por Wu, et al. (1988) en Mickovski y Van Beek (2009), empleando ensayos de resistencia a la tracción de las raíces de Vetiver obteniendo resultados similares respecto a ensayos de corte directo *in situ*.

Igualmente, Wu (1995) y Nilaweera (1996), en Hengchaovanich (1998), indican que la resistencia media a la tensión de las raíces varía entre 180 y 40 MPa para un rango de diámetro 0,2 a 2,2 mm; correspondiendo su promedio a 75 MPa para un diámetro de raíz de 0,7 a 0,8 mm, valor que se mantiene como referencia para las investigaciones hasta el momento. Por su parte, Hengchaovanich y Nilaweera (1996), proponen una ecuación de la fuerza última y resistencia a la tracción en función del diámetro de la raíz;

adicionalmente demuestran que la resistencia de las raíces de Vetiver es mayor que la de otras especies. Por último, Van Man (2012), establece la resistencia a la tracción de la raíz en 75 MPa; igualmente, señala el amplio desarrollo de las mismas en un corto periodo de tiempo, el cual depende de las condiciones ambientales en las que se desarrolle y el tipo de suelo en que se encuentre plantado.

Como se observa, se estableció un valor referencial de resistencia sin ahondar en los detalles de plantación y desarrollo de la planta. En vista de esto, se plantea obtener la resistencia a la tracción de las raíces de Vetiver en una arenalimosa.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las últimas décadas, la ingeniería se ha preocupado por crear métodos biotecnológicos eficaces, sostenibles y principalmente que reduzcan el impacto ambiental, puesto que durante la ejecución de muchas obras se crean problemas de deforestación y destrucción de la cobertura vegetal que pueden generar inestabilidades y erosión. En la actualidad, muchos de los proyectos que utilizan la técnica del Sistema Vetiver han sido evaluados de forma cualitativa, por lo que resulta necesario realizar estudios mecánicos de su sistema radicular, con la finalidad de establecer relaciones cuantitativas que aporten un grado de certeza dentro del diseño de estabilización. Por tal motivo, se plantea determinar la resistencia a la tracción de las raíces del pasto vetiver plantado en un suelo arenoso de baja cohesión en un tiempo establecido.

METODOLOGÍA

El presente trabajo está regido por una sistemática científica y desarrollada en una serie de etapas que se describen a continuación:

Etapas preliminar

Se basa en la compilación de información sobre las

características del pasto Vetiver, primordialmente la resistencia a la tracción que su sistema radicular puede ofrecer; además, del incremento en las propiedades mecánicas y anclaje que puede conferir a un suelo gracias a su plantación.

Etapas de diseño y ensayos de calibración

Comienza con el diseño y preparación de un suelo friccionante de baja cohesión, en donde se asume que el sistema radicular del Vetiver ofrece un mejor desarrollo, y en el cual será plantada dicha gramínea. Seguido de la caracterización del mismo mediante el análisis granulométrico (AASHTO T 88, ASTM D 422), límites de consistencia (AASHTO T 89-90, ASTM D 4318), peso específico relativo de los sólidos (Casteletti, 1996) y corte directo (ASTM D 3080, AASHTO T 236).

Posteriormente, se fabrican una serie de recipientes con la finalidad de evitar alteraciones y propiciar el alto desarrollo de su sistema radicular de forma vertical. Se procede a plantar la gramínea, seleccionando esquejes con sus hojas bien desarrolladas y colocando al menos tres vástagos por recipiente; después de haber sido plantado, se procede a cortar sus hojas para favorecer el desarrollo de las raíces (Truong *et al.*, 2008). Las plantas son sometidas a un monitoreo constante durante un periodo de desarrollo de tres meses, en el cual se trata de minimizar la variabilidad de luz y humedad con el fin de presentar un crecimiento equitativo por parte del sistema radicular.

Etapas experimental

Transcurridas las doce semanas desde la plantación, cuarenta raíces del sistema Vetiver fueron seleccionadas y extraídas de los ejemplares, cada una oscilaba entre 40–50 cm de longitud y 0.7–2.2 mm de diámetro.

Para la extracción, se desarmó el recipiente seguido de un lavado con agua de manera tal que no se crearan fisuras, roturas o

desgarres en las muestras a ensayar (Mickovski y Van Beek, 2009).

Para la ejecución del ensayo de tensión, las mordazas sujetadoras son cubiertas por una lámina de corcho de 3 mm de espesor, con el fin de minimizar daños en las raíces durante la prueba y al mismo tiempo proporcionar un mejor agarre.

La máquina de resistencia a la tracción se programa para un área transversal circular y a una velocidad controlada, para luego determinar la carga última soportada por la raíz. Los diámetros de las raíces se registran e introducen antes de cada ensayo. Se define la resistencia a la tracción de la raíz, como la máxima fuerza de tensión de la raíz dividida por el área de corte transversal de la raíz no tensionada (Wu (1995) y Nilaweera (1996), en Hengchaovanich, 1998).

Se registran la deformación lineal y carga última alcanzada; una prueba se considera válida si la raíz se rompe dentro del tercio medio de su longitud inicial (Mickovski y Van Beek, 2009). Se realizan ensayos con alambre semidulce a modo de control y comparación de la resistencia.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Caracterización del suelo final utilizado

La muestra diseñada para la siembra fue clasificada como una arena limosa (SM, según el SUCS y A-2-4(0) de la AASHTO), tal como se muestra en la tabla I.

Evaluación de la resistencia a la tracción de las raíces de pasto Vetiver

De los cuarenta ejemplares seleccionados para la medición de la resistencia a la tensión, un 50 % cumplieron con los requerimientos de rotura. En la tabla II se muestra el resumen de los resultados obtenidos en el ensayo.

Las raíces exhiben diámetros variables entre 0,7 y 2,2 mm, con elongaciones máximas que oscilaron entre 2,2 y 4,9 cm, lo cual representa deformaciones entre un 9 % y 23,6 % que pone de manifiesto la elevada elasticidad de estas fibras naturales.

Correlacionando la deformación axial, previa a la rotura, y el diámetro no tensionado de la raíz (Figura 1) se observa que existe una relación exponencial entre ellas, donde el incremento de la última permite una mayor deformación.

Considerando la carga máxima a la tensión soportada por las raíces

resulta evidente que ésta es directamente proporcional a su diámetro (Figura 2). Se observa un comportamiento potencial que viene dado por la ecuación:

$$F_{ult} = 295,2d^{1,385} \quad \text{Ec. 1.}$$

Donde F_{ult} es la carga máxima soportada y d es el diámetro de la raíz.

Por su parte, la resistencia a la tracción disminuye a medida que aumenta el diámetro (Figura 3), recordando que se trata de un esfuerzo, el cual es inversamente proporcional al área que resiste la carga. La relación entre estos parámetros es una curva potencial cuya ecuación está dada por:

$$Rt = 36,84d^{-0,61} \quad \text{Ec. 2.}$$

Donde Rt es la resistencia a la tracción de la raíz, d es el diámetro.

Los resultados indican que existen relaciones no lineales entre la carga última, resistencia a la tracción, deformaciones axiales y los diámetros de las raíces, con coeficientes de correlaciones que

Tabla I. Clasificación y características de la muestra de suelo utilizada.

Granulometría (%)	Límites de consistencia (%)		Clasificación		C (kg/cm ²)	φ (°)
Gravas	0,57	LL	23,72	SUCS	0,008	28,61
Arenas	66,78	LP	19,85	SM		
Limos	16,88	IP	2,88	AASHTO		
Arcillas	15,77			A-2-4 (0)		

Tabla II. Resultados del ensayo de tracción.

Ensayo	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Longitud Inicial (cm)	ΔL (cm)	Carga Max.(kg)	Esfuerzo Max. (MPa)
1	0,19	0,0284	27,7	4,1	30	103,69
2	0,14	0,0154	24,8	3,1	18	114,59
3	0,17	0,0227	25,2	3,5	25	107,94
4	0,13	0,0133	27,0	2,6	16	118,13
5	0,10	0,0079	26,5	2,4	12	149,73
6	0,09	0,0064	22,0	2,3	10	154,05
7	0,20	0,0314	23,3	4,3	32	99,82
8	0,12	0,0113	24,3	2,7	16	138,64
9	0,08	0,0050	19,8	2,3	9	175,47
10	0,11	0,0095	21,7	2,5	14	144,37
11	0,13	0,0133	26,7	3,2	17	125,52
12	0,18	0,0254	25,2	3,8	26	100,13
13	0,07	0,0038	17,6	2,2	8	203,72
14	0,12	0,0113	25,0	2,8	16	138,64
15	0,10	0,0079	21,0	2,3	12	149,73
16	0,12	0,0113	20,0	3,4	15	129,98
17	0,22	0,0380	22,7	4,9	37	95,39
18	0,21	0,0346	22,0	4,8	35	99,03
19	0,15	0,0177	19,5	4,6	24	133,10
20	0,15	0,0177	17,5	4,1	22	122,00
Máximo	0,22	0,0380	27,7	4,9	37	203,72
Media	0,14	0,0166	22,98	3,3	19,7	130,18
Minimo	0,07	0,0038	17,5	2,2	8	95,39
Alambre	0,14	0,0154	32,5	7,3	164	1044,06

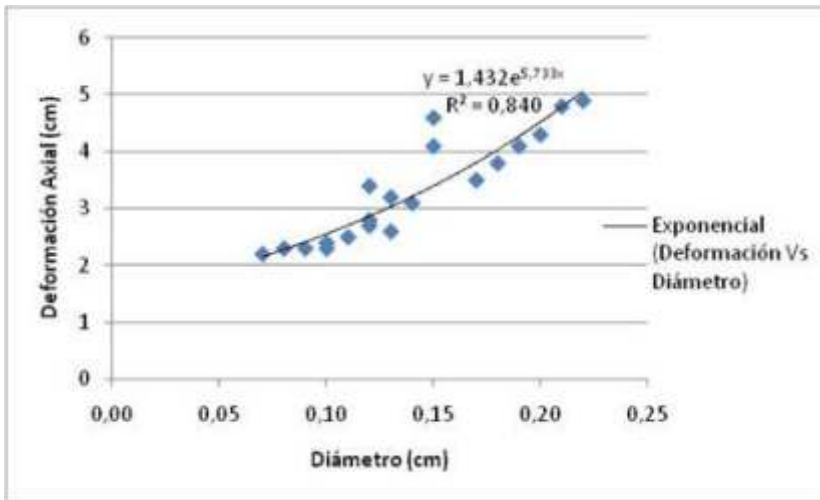


Figura 1. Relación entre deformación axial y diámetro de la raíz.

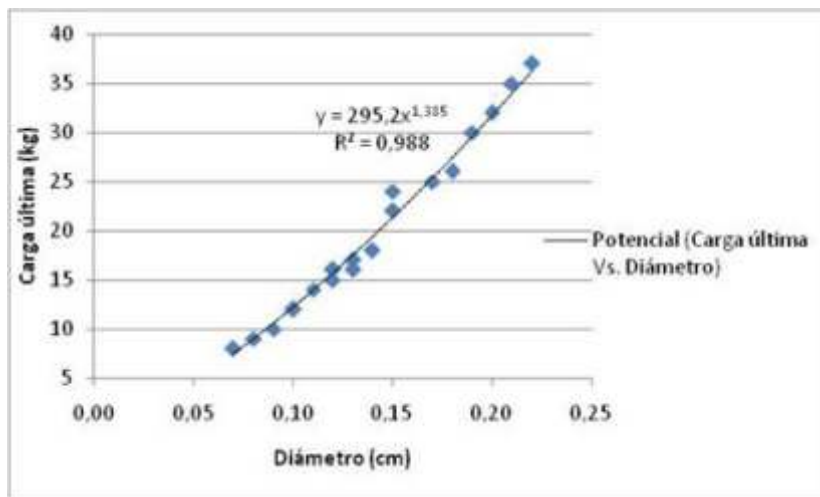


Figura 2. Relación entre la fuerza última y el diámetro de las raíces.

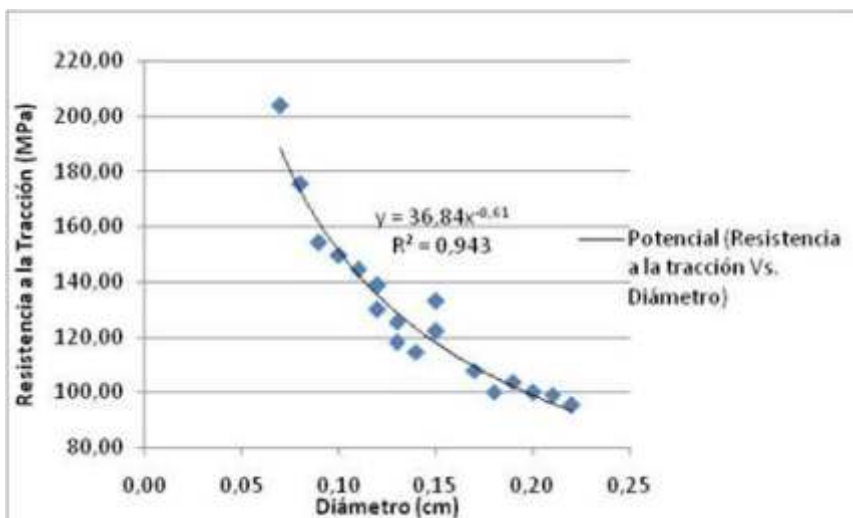


Figura 3. Relación entre la resistencia a la tracción y el diámetro de las raíces.

superan los obtenidos en investigaciones previas como Wu (1995), Nilaweera (1996) (en Hengchaovanich, 1998) y Hengchaovanich y Nilaweera (1996).

Para un diámetro promedio de 1,4 mm se obtienen valores de resistencia a la tracción promedio de 122 MPa, que resultó ser un octavo de la resistencia a la tensión promedio del alambre acerado semidulce del mismo diámetro. Sin embargo, las resistencias obtenidas son superiores a las reportadas por Wu (1995), Nilaweera (1996) (en Hengchaovanich, 1998) y Van Man (2012), para un diámetro equivalente.

Existen algunos modelos empíricos que han sido utilizados para calcular las variaciones en la resistencia al esfuerzo cortante de suelos impregnados con raíces de plantas, como el propuesto por Wu (1976) y Waldron (1977), en Danjon, F. *et al.* (2008), denominado Equilibrio Límite; con los resultados obtenidos en esta investigación, y aplicándolos en dicho modelo, se puede calcular el aumento de la resistencia a la cizalla de un suelo plantado con vetiver.

CONCLUSIONES

La resistencia a la tracción para las raíces de pasto Vetiver ensayado es elevada, variando entre 95 y 203 MPa, con un valor medio de 122 MPa, para 2,2, 0,7 y 1,4 mm de diámetro, respectivamente, lo que indica que el sistema radicular de la planta puede ser un método de estabilización muy eficaz, pues la penetración de sus raíces incrementa la resistencia de suelos.

Los resultados de resistencia obtenidos son mayores a los propuestos por Wu (1995), Nilaweera (1996) (en Hengchaovanich, 1998) y Van Man (2012), lo que posiblemente indica que la planta tenga un mejor desarrollo en climas ecuatoriales y suelos

granulares.

La relación existente entre la resistencia a la tracción de la raíces y su diámetro, establece que las variables son inversamente proporcionales, corroborando lo propuesto por Hengchaovanich y Nilaweera (1996) y Danjon, et al. (2008), pero con coeficientes de correlación superiores a ellos.

El sistema radicular del vetiver ayuda a extender el límite de la deformación plástica del suelo, dado que la resistencia a la tensión de las raíces supera la carga última de los suelos, siendo ésta una propiedad de notable significado en términos de mecanismos de falla.

REFERENCIAS

- AASHTO T 88-00, ASTM D 422. (2008). *Análisis Granulométrico de Suelos por Tamizado*. Universidad Técnica Particular de Loja, Unidad de Ingeniería Civil, Geología y Minas, Loja, Ecuador.
- AASHTO T 88-00, ASTM D 422. (2008). *Análisis Granulométrico por Medio del Hidrómetro*. Universidad Técnica Particular de Loja, Unidad de Ingeniería Civil, Geología y Minas, Loja, Ecuador.
- AASHTO T 90, ASTM D 4318. *Límite Plástico*. Presentación, Universidad Técnica Particular de Loja, Competencias Técnicas de Laboratorista en Vialidad, Loja, Ecuador.
- AASHTO T-89; ASTM D-4318. *Determinación del Límite Líquido*. Universidad Técnica Particular de Loja, Competencias Técnicas de Laboratorista en Vialidad, Loja, Ecuador.
- ASTM D 3080, AASHTO T 236. *Ensayo de Corte Directo*. Presentación, Universidad Técnica Particular de Loja, Competencias Técnicas de Laboratorista en Mecánica de Suelos, Loja,

Ecuador.

- Casteletti L., J. I. (1996). *Nociones de Mecánica de Suelos*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.
- Danjon, F., Barker, D. H., Drexhage, M., y Stokes, A. (2008). Using Three-dimensional plant root architecture in models of shallow-slope stability. *Annals of botany*, 101 (8), 1281-1293.
- Hengchaovanich, D. (1998). *El Pasto Vetiver En La Estabilización De Pendientes y El Control De La Erosión (con énfasis especial en las aplicaciones de ingeniería)*. Recuperado el 18 de marzo de 2013. Disponible: http://www.vetiver.org/LAVN_elpasto.htm
- Hengchaovanich, D. (2003). Vetiver system for slope stabilization. *Ponencia presentada en el 3rd International Vetiver Conference*, (págs. 301-309). Bangkok, Tailandia.
- Hengchaovanich, D., y Nilaweera, N. S. (1996). An assessment of strength properties of Vetiver grass roots in relation to slope stabilization. *Ponencia presentada en el First International Conference on Vetiver*, (págs. 153-158). Chain Kai, Tailandia.
- Mickovski, S. B., y Van Beek, L. P. (2009). *Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (Vetiveria zizanioides) plants grown in semi-arid climate*. *Plant and Soil*, 324 (1/2), 43-56.
- Truong, P., Van, T. T., y Pinners, E. (2008). *Vetiver System Applications*. Technical Reference Manual. The Vetiver Network International.
- Van Man, T. (2012). *Slope Stabilization and the Shear Strength improvement of Soil by Vetiver* Construction Advanced Technology, Vietnam Vetiver Network.



MAGISTER SCIENTIARUM EN RECURSOS NATURALES