



# REVISTA TÉCNICA

## DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada  
que está indizada en las publicaciones  
de referencia y comentarios:

- SCOPUS
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Current Mathematical Publications
- MathSci
- Revencyt
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



# Modelling Tensile Strength of Vetiver Roots Using Artificial Neural Networks

**Barreto Wilmer<sup>1,2\*</sup> , Torres Jesús<sup>1</sup> , Torres Roberto<sup>1</sup> , Gonzalez Leonardo<sup>3</sup>  y Picón Ricardo<sup>1,2</sup> **

<sup>1</sup>Dpto. de Geología y Obras Civiles, Fac.de Ingeniería, Universidad Católica de Temuco, Temuco, 4780000, Chile.

<sup>2</sup>Dpto. de Hidráulica, Decanato de Ing. Civil, Universidad Lisandro Alvarado, Barquisimeto, 3001, Venezuela.

<sup>3</sup>Dpto. de Ciencias Básicas, Universidad Tecnológica de Chile INACAP, Santiago-Chile.

\*Autor contacto: wbarreto@uct.cl

<https://doi.org/10.22209/rt.ve2019a01>

Recepción: 20/06/2019 | Aceptación: 29/10/2019 | Publicación: 01/12/2019

## Abstract

The need for sustainable development requires environmentally friendly solutions; this fact leads engineers from all research areas to seek and employ methodologies that integrate new construction materials. One of these areas of study is the slope stability in rocks and soils. Where traditional materials such as concrete have been substituted for biomaterials, which are few known in terms of mechanical behavior and modeling. The present work trains a model of Artificial Neural Network (ANN) for modeling the tensile strength of the roots of Vetiver plants, considering the diameter of the root, its age and the soil type. A total of 40 ANN models were trained using 100 laboratory tests, selecting the best model according to their mean square error and generalization capacity. The model shows a better fit than the potential type models proposed in the literature; it explaining the variability of the data for diameters smaller than one millimeter. it was found that the resistances for these diameters are inversely proportional to the age of the plant.

**Keywords:** ANN; Vetiver; Tensile Strength; Neural Networks.

## Modelo para el Cálculo del Esfuerzo a la Tracción de las Raíces de Vetiver Empleando Redes Neuronales Artificiales

### Resumen

La necesidad de un desarrollo sostenible requiere soluciones amigables con el ambiente; este hecho lleva a los ingenieros de todas las áreas de investigación a buscar y emplear metodologías que integren nuevos materiales de construcción. Una de estas áreas de estudio es la estabilidad de taludes y pendientes en rocas y suelos. Donde los materiales tradicionales como el concreto han sido sustituidos por biomateriales, los cuales son poco conocidos en términos de comportamiento mecánico y modelado estructural. El presente trabajo entrena un modelo de Red Neural Artificial (RNA) para modelar la resistencia a la tracción de las raíces de las plantas de Vetiver, considerando el diámetro de la raíz, su edad y el tipo de suelo. Se entrenaron un total de 40 modelos RNA utilizando 100 ensayos de laboratorio, seleccionando el mejor modelo de acuerdo con su error medio cuadrático y su capacidad de generalización. El modelo muestra un mejor ajuste que los modelos de tipo potenciales propuestos en la literatura; también explica la variabilidad de los datos para diámetros de raíz menores de un milímetro. Se encontró que las resistencias para estos diámetros son inversamente proporcionales a la edad de la planta.

**Palabras Clave:** RNA; Vetiver; Esfuerzo a la tracción; redes neuronales.

## Introducción

El diseño ingenieril en la actualidad demanda el empleo de soluciones que sean cada vez más amigables con el ambiente. Esto ha hecho que varios países, sobre todo de Europa, adopten el uso de soluciones basadas en la naturaleza o NBS como sus siglas en inglés. Este tipo de soluciones apuntan a que la ingeniería debe intervenir lo menos posible en el ambiente y usar los mecanismos que la propia naturaleza provee para disminuir el impacto de estas intervenciones [1]. El vetiver se ha establecido como una de las gramíneas más importantes y de mayor utilización para resolver problemas de control a la erosión e inestabilidades superficiales en el suelo. Sin embargo, se demanda a la bioingeniería que las técnicas de prevención o mitigación sean igualmente eficientes y seguras como las metodologías clásicas, es por ello que los investigadores estudian como modelar el incremento en la resistencia al cortante en los suelos, producto de la plantación de especies vegetales con distintos tipos de raíces [2] [3].

El vetiver (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash, o *Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) es una planta perenne originaria de países tropicales a subtropicales del sureste asiático (India, China, Filipinas, entre otros), cuyo sistema radicular ha llamado particularmente la atención de ingenieros por su gran y rápido crecimiento, que puede alcanzar profundidades mayores a 3 metros [4] [5]. Adicionalmente, las raíces del pasto poseen propiedades particulares que mejoran significativamente la resistencia al esfuerzo cortante donde están plantadas [6] [7] [8].

Los modelos más conocidos plantean que el incremento en las propiedades mecánicas son una función de la resistencia a la tracción de la fibra, la cantidad de raíces presentes y un factor de ajuste que depende de la distorsión geométrica respecto al plano de cizalla [9] [3]. Los antecedentes indican que la resistencia a la tracción varía bajo una relación potencial con el diámetro de la raíz, proponiéndose como valores de referencia 75-85 MPa, sin embargo estos pueden alcanzar magnitudes superiores a los 120 MPa [10] [11] [12]. Esta variabilidad en las magnitudes se debe a otros factores que intervienen en el crecimiento de la planta, como lo son características del suelo, edad de la planta, contenido de humedad en la raíz y nutrientes; por lo que una relación dependiente solamente del diámetro de la raíz no es suficiente para la elaboración de un modelo de resistencia a la tracción [13] [14].

Lo anterior expone la necesidad de modelos más complejos, que tomen en cuenta una mayor cantidad de variables que influyen en la resistencia a la tracción de las raíces de las plantas. Estos modelos deben ser capaces de clasificar y modelar la no-linealidad del fenómeno. Metodologías como las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son capaces de reproducir relaciones complejas y no lineales [15], e incluso han sido empleadas para la modelación de estabilidad de taludes [16]. Por ello se plantea generar un modelo basado en RNA que permita establecer los parámetros y comportamiento de estas fibras naturales, tomando como base resultados de ensayos experimenta-

les de plantas desarrolladas bajo condiciones controladas.

## Materiales y Métodos

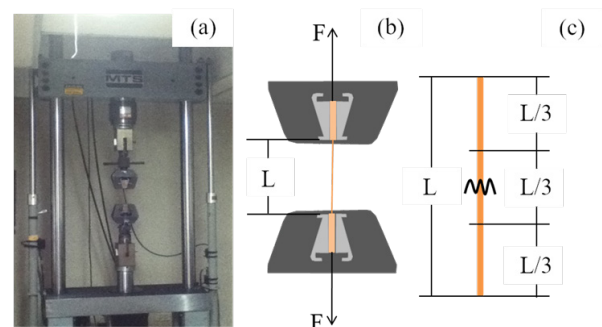
### Ensayo Experimental

La metodología de la investigación inicia con una revisión bibliográfica exhaustiva sobre los modelos de variación de resistencia al corte en suelos con raíces y el efecto de la resistencia a la tracción sobre los mismos. Una vez establecido esto, se procede a evaluar los distintos antecedentes sobre las técnicas y métodos empleados para determinar este parámetro mecánico en raíces, se hace énfasis en aquellos que muestran resultados para vetiver, aunque de igual manera se consideran otras especies.

Las raíces a ensayar derivan de plantas que fueron sembradas en tres tipos de suelo, a saber: Arenas Limosas (SM), Arenas mal gradadas con limos (SP-SM) y Arcillas de baja compresibilidad (CL), según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Las fibras naturales se sometieron a tracción cuando tenían diferentes períodos de siembra para evaluar si el tipo de suelo y la edad de la planta influían de alguna medida en el valor de la resistencia.

Previo a la realización del ensayo de tracción directa, se deben preparar los especímenes según lo propuesto por Mickovski [8]. Para ello, se desarmen los recipientes contenedores y se retira cuidadosamente el suelo, posteriormente se lava teniendo la precaución de no generar rotura ni desgarros. Las raíces son introducidas en un recipiente con agua para mantenerlas hidratadas. Dos horas antes del ensayo son retiradas del agua y secadas superficialmente.

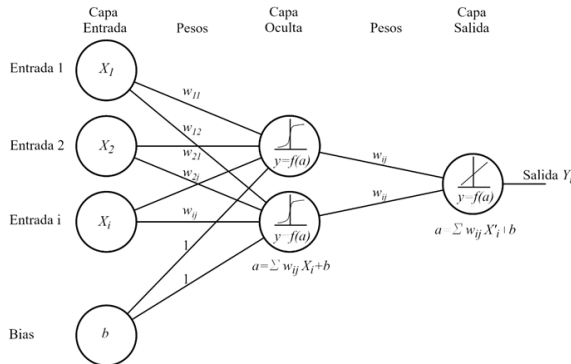
Las raíces se colocan en una máquina de tracción directa, de deformación controlada, para evitar cortes, las mordazas son recubiertas con corcho, previo al ensayo se registra el diámetro. El área se considera circular y constante a lo largo de la fibra. Se lleva a la rotura y se registra la carga última y el esfuerzo máximo. Un ensayo se considera válido si la falla ocurre en el tercio medio de la longitud (Figura 1)



**Figura 1** Ensayo experimental de tracción directa. a) Máquina empleada, b) Esquema de tracción, c) Esquema de rotura.

## Redes Neuronales Artificiales

Las redes neuronales artificiales (RNA) es una de las técnicas empleadas para el aprendizaje de máquinas (*Machine Learning*). Su desarrollo comenzó en los años 50 con el desarrollo del perceptron por Rosenblat [17] y perfeccionado a través de los años hasta formar las redes complejas de perceptrones conocidas como RNA. Entre las RNA más empleadas se encuentra la de alimentación hacia adelante o "Feed Forward" (RNA-FF), esta red consiste en un vector de entrada ( $X_i$ ) que contiene las variables independientes del problema, estas entradas son multiplicadas por una matriz de pesos ( $W_{ij}$ ) para posteriormente ser sumadas y pasadas a través de una función de activación o transferencia  $f(a)$  dentro de cada uno de los perceptrones de la llamada capa oculta. Finalmente, la salida de la capa oculta es de nuevo ajustada con un nuevo set de pesos y pasada por otra función de transferencia para producir la capa de salida ( $Y_i$ ) (Figura 2). Las RNA-FF van ajustando los pesos mediante la comparación de las salidas simuladas con las observadas, a este proceso se le conoce como entrenamiento de la red. El entrenamiento es realizado mediante un algoritmo de optimización basado en el método de Newton, de propagación de errores hacia atrás (backpropagation), incorporando parámetros adicionales para controlar el cambio de los pesos.



**Figura 2.** Red Neuronal Artificial basada en perceptrones

En el presente trabajo se elaboró un modelo, mediante el empleo de RNA-FF, para simular el esfuerzo de resistencia a la tracción de las raíces del vetiver ( $s$ ) en función de las variables: diámetro ( $d$ ), edad de la planta de vetiver ( $e$ ) y el contenido de finos en suelo ( $f$ ). Para la elaboración del modelo se emplearon los datos adquiridos en el laboratorio como se indica en el apartado anterior. En total se utilizaron 100 ensayos, que corresponden a valores de esfuerzo a la tensión entre 79,54 - 327,88 MPa. El diámetro de las raíces osciló entre 0,40 - 3,10 mm, y la edad entre 4-60 semanas. Si bien se empleó el porcentaje

de fino como caracterización del suelo, este fue realizado para 3 tipos de suelo como se indicó anteriormente.

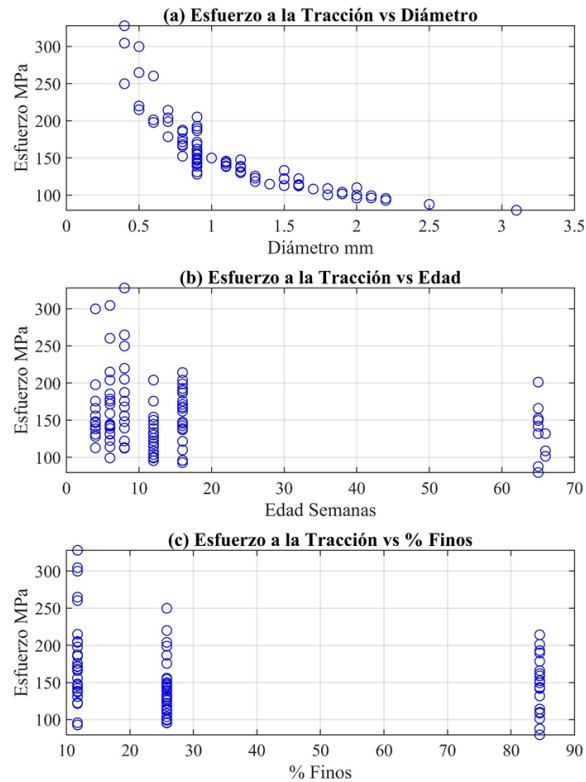
Los datos son divididos en tres (3) sets o agrupaciones, donde el 70% de los datos se utilizaron para entrenar la red, 15% para la fase de validación cruzada y otro 15% para la verificación del modelo. Para medir la bondad de la RNA se debe seleccionar una medida de error, la cual se va minimizando durante la fase de entrenamiento y sirve como indicador de cuando detener el proceso de optimización. El error medio cuadrático (*EMC*) fue el valor empleado como medición de la bondad de la red, a menor valor de *EMC*, mejor se puede considerar la red entrenada y mejor el modelo de simulación. El criterio de parada de la optimización de los pesos, se realiza con la medición del *EMC* para los datos de validación cruzada, esto para asegurar una suficiente generalización en el modelo y evitar así que RNA sufra de sobre-aprendizaje, conduciendo a modelos sin generalización y que son incapaces de operar con datos diferentes a los empleados en el entrenamiento.

Para el entrenamiento de la RNA se utilizó el software MATLAB®, para ello se elaboró un script para entrenar la red, usando como criterio de bondad el *EMC*. Se entrenaron varios modelos que tienen como entrada el diámetro de la raíz, la edad de la planta y el porcentaje de finos, como salida se tiene el esfuerzo a la tracción de la raíz. En total se entrenaron 40 modelos variando el número de perceptrones en la capa oculta. El número de perceptrones en la capa oculta es importante, ya que si emplean muchos de ellos es más fácil para la RNA ajustarse, perdiendo así generalización el modelo. Los perceptrones en la capa oculta se variaron desde 1 a 4, entrenando 10 modelos por cada cambio de nodos en la capa oculta. Además del *EMC*, se analiza el número de "Epochs", este proporciona el número de veces que se le presenta el set de entrenamiento a la RNA para alcanzar el mejor valor de ajuste (*EMC*).

## Resultados y Discusión

La Figura 3 muestra los resultados experimentales, se observa que existe una marcada correlación entre el esfuerzo a la tracción y el diámetro de la raíz (Figura 3a). Sin embargo, se observa una alta dispersión para los diámetros menores de 0.90 mm. Por otro lado, no existe una relación aparente entre la edad de la raíz y su esfuerzo a la tracción o entre el tipo de suelos y la tracción (Figura 3 b y c). Sin embargo, además de la evidente relación con el diámetro, algunos autores sugieren que el factor tipo suelo y edad de la planta debería influenciar en el esfuerzo a la tracción en la raíz.





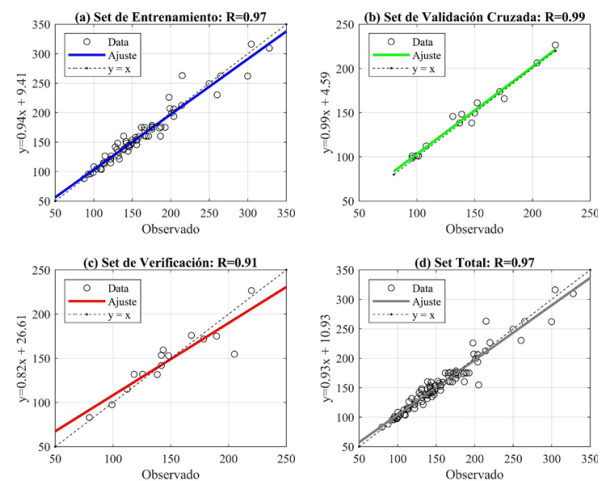
**Figura 3.** Correlación entre esfuerzo a la tracción y variables independientes

### Modelo RNA

Como se explicó, se construyeron 40 modelos diferentes, variando la semilla de entrenamiento y el número de perceptrones en la capa oculta. Los resultados se pueden observar en la Tabla 1. La tabla muestra como los valores promedios del *EMC* disminuyen al incrementar el número de perceptrones en la capa oculta, variando desde 440,07 para 1 nodo hasta 242,03 para 4 nodos en la capa oculta. Como se puede observar los mejores modelos se presentan para las redes con 4 perceptrones o nodos, para un *EMC* promedio de 242,03 y un número de “Epochs” promedios de 45. Se observa que el mejor modelo, entre los 40 entrenados, corresponde al modelo N° 2 de la RNA con 4 nodos en la capa oculta, presentando un *EMC* de 140,69 para 67 “Epochs” en la fase de entrenamiento.

La Figura 4 muestra los resultados de la fase de entrenamiento para el mejor modelo (Modelo N°2 con 4 nodos en la capa oculta). Se puede observar que se ha ob-

tenido un modelo con muy buen ajuste, presentando una correlación de 0,97 tanto para el total de la data (Figura 4d) como para los datos empleados en el entrenamiento (Figura 4a). En cuanto la validación cruzada, se tiene un coeficiente de correlación de 0,99 y 0,91 para la verificación (Figura 4b y Figura 4c). Si bien la verificación tiene un valor más bajo que los otros indicadores, este aun representa un valor alto, lo que confirma que el modelo obtuvo un grado de generalización excelente.

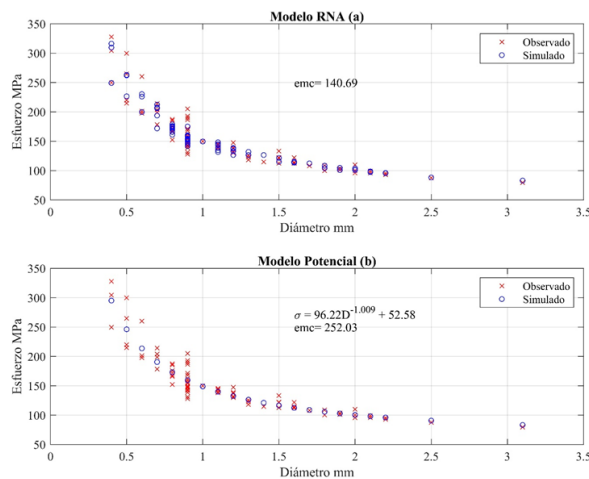


**Figura 4.** Resultados del entrenamiento de la RNA modelo N° 2 y 4 nodos

En la Figura 5 se observa una comparación entre los valores del esfuerzo a la tracción de las raíces versus el diámetro de la misma. Como se mencionó en la revisión del estado del arte, el modelo hasta ahora propuesto corresponde a una función de tipo potencial como se puede ver en la Figura 5b, la cual fue ajustada empleando el método de los mínimos cuadrados y que es función del diámetro de la raíz. Se puede observar que el modelo potencial se ajusta bien para diámetros mayores de 1.0 mm pero no explica la variabilidad de diámetros menores. Al comparar este modelo potencial con los resultados del modelo RNA entrenado, que toma en cuenta la edad y el tipo de suelo, se observa como este último si muestra la dispersión observada en los datos medidos para diámetros menores de 1mm, además de reproducir también los valores mayores a un milímetro. Lo anterior nos hace argüir que la influencia de la edad y tipo de suelo es importante en los diámetros pequeños. También se observa que el modelo RNA es superior, no solo explicando la dispersión en los diámetros pequeños, sino que presenta un *EMC* de 140,69 contra un 252,03 para el modelo potencial, confirmando un ajuste superior para la RNA.

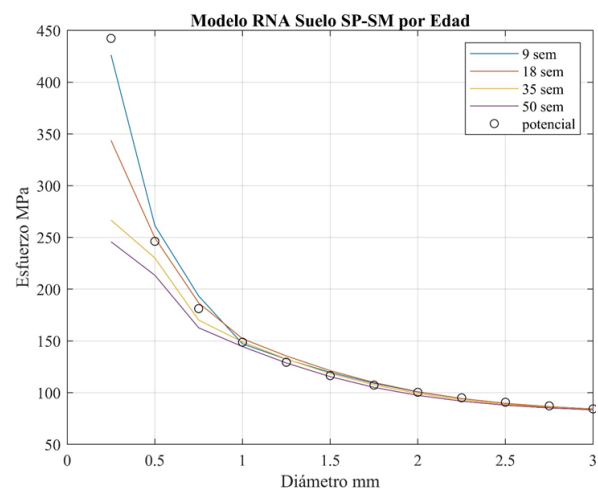
**Tabla 1.** Bondad de los modelos RNA entrenados

Nº	Numero de nodos en la capa oculta							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	<i>EMC</i>	<i>#Epochs</i>	<i>EMC</i>	<i>#Epochs</i>	<i>EMC</i>	<i>#Epochs</i>	<i>EMC</i>	<i>#Epochs</i>
1	259,20	175	282,20	10	241,00	20	198,95	26
2	292,50	133	255,67	22	342,10	3	<b>140,69</b>	<b>67</b>
3	272,60	11	602,16	9	351,30	10	281,20	40
4	257,70	191	508,96	9	357,20	6	292,73	7
5	269,00	6	499,85	8	184,90	50	219,21	193
6	292,60	15	296,40	7	425,20	7	185,25	52
7	294,20	7	259,19	50	292,40	8	342,20	8
8	267,90	143	273,44	5	335,90	2	279,01	11
9	259,90	88	444,21	9	274,40	9	234,69	6
10	1935,10	5	198,98	39	255,60	34	246,42	46
<b>Promedio</b>	<b>440,07</b>	<b>77,40</b>	<b>362,11</b>	<b>16,80</b>	<b>306,00</b>	<b>14,90</b>	<b>242,03</b>	<b>45,60</b>

**Figura 5.** Esfuerzo a la tracción de las raíces simulado y observado para modelos RNA y Potencial

Como ultima verificación de la bondad y capacidad de generalizar del modelo RNA, se elaboró un set de datos generados artificialmente. Para ello se varió el diámetro de las raíces entre 0.25 a 3 mm, para un suelo seleccionado tipo SP-SM (11,75% de finos) y las edades se seleccionaron de forma tal que no coincidiera con las edades empleadas en el entrenamiento de la RNA a saber: 9, 18, 35 y 50 semanas. Los resultados se muestran en la Figura 6, se puede observar como el modelo RNA puede interpolar y extrapolar los resultados a datos no empleados en su entrenamiento, lo que confirma el grado de generalización en el modelo RNA.

El modelo RNA es capaz de clasificar los resultados según la edad de la planta para los diámetros menores de 1 mm y comportándose en forma convergentes a una función de tipo potencial para diámetros mayores a un milímetro. En la figura también se observa como las raíces de plantas más jóvenes poseen mayor resistencia a la tracción que las plantas adultas. Existen estudios que demuestran que el contenido de celulosa en las raíces aumenta la resistencia a la tracción de las mismas [18], y este factor podría estar asociado a la edad de la planta.

**Figura 6.** Validación del modelo RNA con datos no vistos

## Conclusiones

Se ha logrado elaborar un modelo para la simu-

lación del esfuerzo a la tracción de las raíces de las plantas de Vetiver, usando redes neuronales artificiales (RNA). El modelo está orientado a ser empleado en el cálculo de estabilidad de taludes y pendientes naturales mediante modelos numéricos. La metodología empleada para el entrenamiento de la RNA, logro ajustar el modelo con mejores indicadores que los modelos potenciales propuestos hasta ahora, siendo capaz de explicar la variabilidad para diámetros menores de un milímetro, que no se explican con el modelo de tipo potencial.

La edad de las plantas es un factor que influye de forma inversamente proporcional a la resistencia a la tracción, sobre todo en diámetros de raíz menores a un milímetro. Si bien el modelo RNA entrenado es capaz de clasificar y simular esta condición, no explica a profundidad la causa. Se recomienda en las investigaciones futuras realizar mediciones de algunos parámetros de tipo biológicos en las plantas, como son contenido de celulosa y nutrientes.

### Referencias Bibliográficas

- [1] Nesshöver C., Assmuth T., Irvine K.N., Rusch G.M., Waylen K.A., Delbaere B., Haase D., Jones-Walters L., Keune H., Kovacs E., Krauze K., Kùlvik M., Rey F., van Dijk J., Vistad O.I., Wilkinson M.E., Wittmer H.: "The science, policy and practice of nature-based solutions: an interdisciplinary perspective". *Sci. Total Environ.*, Vol. 579, (2017), 1215–1227.
- [2] De Baets S., Poesen J., Reubens B., Wemans K., De Baerdemaeker J., Muys B.: "Root tensile strength and root distribution of typical mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength". *Plant Soil*, Vol. 305, No. 1–2 (2008), 207–226.
- [3] Bennett S.J., Simon A.: "Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology", American Geophysical Union, Washington, D. C., 2004.
- [4] Truong P.N.: Vetiver grass technology for land stabilisation, erosion and sediment control in the Asia Pacific region, In: *Proc First Asia Pacific Conf. Gr. Water Bioeng. Eros. Control Slope Stabilisation*, Manila, (1999), 72–84.
- [5] Ke C., Feng Z., Wu X., Tu F.: Design principles and engineering samples of applying Vetiver ecoengineering technology for landslide control and slope stabilization of riverbank, In: *Proc. Third Int. Conf. Vetiver*, (2003), 349–357.
- [6] Ali F.H., Osman N.: "Shear strength of a soil containing vegetation roots". *Soils Found.*, Vol. 48, No. 4 (2008), 587–596.
- [7] Truong P., Tan Van T.: "Vetiver System Applications-Technical Reference Manual", 2008.
- [8] Mickovski S.B., van Beek L.P.H.: "Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate". *Plant Soil*, Vol. 324, No. 1–2 (2009), 43–56.
- [9] Wu T.H., McOmber R.M., Erb R.T., Beal P.E.: "Study of soil-root interaction". *J. Geotech. Eng.*, Vol. 114, No. 12 (1988), 1351–1375.
- [10] Cheng H., Yang X., Liu A., Fu H., Wan M.: A Study on the Performance and Mechanism of Soil-reinforcement by Herb Root System, In: *Proc. 3rd Int. Vetiver Conf., Guangzhou*, (2003), 403–410.
- [11] Mendez L., Rojas W., Torres J., Torres R., Rada M., Calderas R.: "Resistencia a la tracción del sistema radicular del vetiver (*vetiveria zizanioides*) plantado en un suelo granular". *Geominas*, Vol. 42, No. 64 (2014), 165–170.
- [12] Noorasyikin M.N., Zainab M.: "A tensile strength of bermuda grass and vetiver grass in terms of root reinforcement ability toward soil slope stabilization". *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 136, No. 1 (2016), 012029.
- [13] Loades K.W., Bengough A.G., Bransby M.F., Hallett P.D.: "Effect of root age on the biomechanics of seminal and nodal roots of barley (*hordeum vulgare* L.) in contrasting soil environments". *Plant Soil*, Vol. 395, No. 1–2 (2015), 253–261.
- [14] Yang Y., Chen L., Li N., Zhang Q.: "Effect of root moisture content and diameter on root tensile properties". *PLoS One*, Vol. 11, No. 3 (2016), 1–17.
- [15] Abiodun O.I., Jantan A., Omolara A.E., Dada K.V., Mohamed N.A., Arshad H.: "State-of-the-art in artificial neural network applications: a survey". *Heliyon*, Vol. 4, No. 11 (2018), 1–41.
- [16] Sakellariou M.G., Ferentinou M.D.: "A study of slope stability prediction using neural networks". *Geotech. Geol. Eng.*, Vol. 23, No. 4 (2005), 419–445.
- [17] Rosenblatt F.: "The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain". *Psychol. Rev.*, Vol. 65, No. 6 (1958), 386–408.
- [18] Genet M., Stokes A., Salin F., Mickovski S.B., Fourcaud T., Dumail J.F., Van Beek R.: "The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots". *Plant Soil*, Vol. 278, No. 1–2 (2005), 1–9.



UNIVERSIDAD  
DEL ZULIA

---

## REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Volumen Especial, 2019, No. 1, pp. 154 - 262\_\_\_\_\_

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada  
en Diciembre de 2019, por el **Fondo Editorial Serbiluz**,  
Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

[www.luz.edu.ve](http://www.luz.edu.ve)  
[www.serbi.luz.edu.ve](http://www.serbi.luz.edu.ve)  
[www.produccioncientificaluz.org](http://www.produccioncientificaluz.org)