



Evaluación de la erosión y selección de especies forestales para la rehabilitación de suelos degradados de origen volcánico de Ecuador

Evaluation of erosion and selection of forest species for the rehabilitation of degraded soils of volcanic origin in Ecuador

Martínez, I.^{a, b*}, Pantoja, G.^b, Cancán, E.^b, Limaico, D.^b, Vizcaíno, M.^b, Añazco, M.^b, Uribe, H.^c

^a Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA Remehue. Ruta 5 Norte Km 8-Osorno, Chile.

^b Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Ibarra, Ecuador.

^c Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA Quilamapu, Av. Vicente 515, Chillán, Chile.



ARTICLE INFO

Keywords:

Erosion pins
Soil conservation
Vachellia macracantha

Original Research Article,
Special Issue: Sustainable
Management of Volcanic Ash Soils

*Corresponding author:

Ingrid Martínez

E-mail address:

ingrid.martinez@inia.cl

ABSTRACT

Human activities not only accelerate soil redistribution rates on hillslopes, but also alter patterns of erosion and deposition. The objectives to quantify the surface net erosion (Net erosion= Erosion - Sedimentation) and to assess the establishment of forestry species in soil conservation structures. The surface erosion was quantified with erosion pins located at the upper, middle and lower parts of four hillsides with a slope between 35% and 42%. The establishment of forestry species on contour ploughing considered two phases. During phase I, the following species were established on each hillside: *Schinus molle*, *Caesalpinia spinosa*, and *Vachellia macracantha*, while the fourth hillside (control) was not considered for forestry species. Results after four years showed that net erosion was 102 Mg ha⁻¹ in the middle hillside part, a 36% higher than the upper and lower parts. After 27 months, *V. macracantha* showed a survival of 85%, while in the other species was < 3%. During Phase II the species were replaced by *Morynga oleifera* and *Acacia melanoxylon*. After 9 months, the species showed a survival 30% and 10%, respectively, while *V. macracantha* recorded 58%. Erosion pins can be an inexpensive and a simple technique to quantify net erosion in areas with low coverage and strong slopes. It was concluded that erosion pins are a useful technique to quantify erosive processes over the time. *V. macracantha* showed a higher adaptation to the local conditions and greater tolerance to highly alkaline soils with low fertility.

RESUMEN

Las actividades antrópicas no sólo aceleran las tasas de redistribución del suelo en laderas, también alteran los patrones de erosión y depositación. Los objetivos fueron cuantificar la erosión superficial neta (Erosión neta= Erosión - Sedimentación) y evaluar el establecimiento de especies forestales en estructuras conservacionistas. La erosión superficial se cuantificó mediante redes de clavos de erosión en la parte alta, media y baja de cuatro laderas contiguas con un 35 y 42% de pendiente. El establecimiento de las especies forestales en curvas de nivel consideró dos fases. En la Fase I se estableció en cada ladera: *Schinus molle*, *Caesalpinia spinosa*, *Vachellia macracantha* y la cuarta ladera, como control, no consideró especie forestal. Los resultados de cuatro años indicaron una erosión neta de 102 Mg ha⁻¹ en la parte media de la ladera, siendo superior en un 36% a la registrada en la parte alta y baja. Después de 27 meses, *V. macracantha* presentó una sobrevivencia de un 85%, mientras que en las otras especies fue < 3%. En la Fase II se reemplazaron las especies por: *Morynga oleifera* y *Acacia melanoxylon*. Después de 9 meses, ambas especies presentaron una sobrevivencia de un 30% y 10%, respectivamente; en cambio para *V. macracantha* fue de un 58%. Los clavos de erosión son una herramienta económica y fácil para cuantificar la erosión en zonas de escasa cobertura y fuertes pendiente. *V. macracantha* demostró una mayor adaptación a las condiciones locales y mayor tolerancia a suelos fuertemente alcalinos y de baja fertilidad.

Palabras clave: Clavos de erosión, *Vachellia macracantha*, Estructuras conservacionistas.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la erosión es considerada como uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial, además de estar directamente relacionada a la

pobreza debido a la baja productividad agrícola en suelos afectados por erosión (Bindraban *et al.*, 2012). Globalmente, sólo el 10% de la superficie agrícola está asociadas a programas de conservación de suelos (FAO, 2011). No obstante, la red global WOCAT (World Over-

view of Conservation Approaches and Technologies), ha desarrollado con éxito en 42 regiones del mundo tecnologías de conservación de agua y suelo. Producto de estas experiencias, se consideran como los principales tipos de degradación: la erosión hídrica (36%), la degradación del agua (31%), la degradación química del suelo (26%), la erosión eólica (10%), la degradación física del suelo (8%) y la degradación de la vegetación (7%). Sin embargo, de los casos evaluados sólo el 7% presentó un único tipo de degradación, mientras que el 41% de los casos presenta una combinación de más de un tipo de degradación (WOCAT, 2007).

Cuantificar la erosión superficial en laderas es una tarea compleja, mientras en la parte alta se produce simultáneamente erosión y sedimentación, en la parte baja ocurre mayor sedimentación; esto último indicaría que la cobertura vegetal puede regular la formación de cárcavas (Hancock y Lowry, 2015). Áreas con una cobertura superior a un 40% han demostrado una mayor fertilidad y menor degradación de suelos, mientras que una cobertura menor al 5% favorece la formación de cárcavas en zonas de fuerte pendiente (Jugie *et al.*, 2018; Deng *et al.*, 2015; Martínez *et al.*, 2010). Las cárcavas son la etapa de erosión hídrica más destructiva del suelo, en regiones semiáridas están relacionadas con las características físico-química del suelo, la intensidad de las precipitaciones, la topografía y la cobertura vegetal (Ollobarren *et al.*, 2016; Shrestha *et al.*, 2014; Valentin *et al.*, 2005). Existen diversas metodologías para monitorear las pérdidas de suelo y su redistribución en zonas de diversas condiciones edafoclimáticas. Entre ellas, se consideran los trazadores radioactivos (^7Be , ^{137}Cs), las parcelas de escurrimiento superficial y los clavos de erosión (Wang *et al.*, 2019; Jugie *et al.*, 2018; Kearney *et al.*, 2018). Los clavos de erosión, destacan por ser una alternativa económica y fácil de usar para cuantificar las tasas de erosión y sedimentación en forma anual y/o en eventos de lluvia únicos pero de elevada intensidad (Hancock y Lowry, 2015; Pizarro *et al.*, 2010; Kearney *et al.*, 2018; Sirvent *et al.*, 1997).

Los suelos de origen volcánico tienen diferentes propiedades morfológicas, físicas, químicas y mineralógicas comparadas con otros suelos, sin embargo, las condiciones ambientales específicas de cada lugar resultan en una combinación única de factores y procesos que gobiernan su formación (Zehetner *et al.*, 2003). La mayoría de los estudios en suelos de origen volcánico se ha desarrollado en climas semihúmedos y húmedos; sin embargo, hay pocos estudios desarrollados en climas semiáridos y áridos (Kiliç *et al.*, 2018). En Ecuador, el 30% de los suelos son derivados de cenizas volcánicas, ubicados en zonas planas a nivel del mar hasta los 5.000 m s. n. m. y en pendientes muy inclinadas a abruptas (Espinosa *et al.*, 2018). La región norte se caracteriza por la presencia de montañas que se elevan sobre los 2.000 m s. n. m., que son de naturaleza y ori-

gen volcánico (Espinosa *et al.*, 2018). En esta zona, se encuentra la cuenca del Chota ubicada en el límite de la Provincia Imbabura, que fue cubierta por sedimentos volcánicos contemporáneos (Winkler *et al.*, 2005) y su litología está conformada por brechas volcánicas de afinidad calco-alcalina (Tonnejck *et al.*, 2008).

En el país, la presión del uso de la tierra ha expandido los límites de la frontera agrícola a zonas de fuertes pendientes, lo que ha conducido a una severa erosión, principalmente en suelos derivados de cenizas volcánicas; como resultado, el 47,9% de la superficie nacional se encuentra erosionada (Espinosa *et al.*, 2018). Para evaluar el efecto de prácticas de reforestación para mitigar la erosión en una zona caracterizada por suelos de origen volcánico degradados y de escasa cobertura vegetal, se planteó un ensayo cuyos objetivos fueron: i) cuantificar la erosión superficial neta en la parte alta, media y baja de cuatro laderas contiguas, así como ii) evaluar el establecimiento de especies forestales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El ensayo fue establecido en Enero 2014 al norte de Ecuador, ubicado en la cuenca del Chota, Provincia de Imbabura (0°27' N, 78°2' O; 2300 m s. n. m.), una cuenca interandina de la región altiplánica que alcanza los 4500 m s. n. m. (Figura 1). El sitio experimental abarca una superficie de 0,68 ha con una cobertura vegetal entre 10% a 25% (Martínez *et al.*, 2010), especialmente en el período seco, que se caracteriza por un fuerte riesgo a la erosión hídrica y eólica, con pendientes moderadas a fuertes que fluctúan entre 20% y 50% (Béliveau *et al.*, 2017). El suelo del sitio de estudio es de textura franca (48% arena, 44% limo y 8% arcilla), posee una densidad aparente de 1,4 g cm⁻³, pH fuertemente alcalino, con muy bajos niveles de carbono orgánico y nitrógeno (Cuadro 1). Esta zona se incluye en el ecosistema denominado "Bosques y arbustales xéricos interandinos montano bajos de los Andes del Norte" dominada por especies cactáceas con un crecimiento vigoroso durante la estación húmeda, el cual decrece durante la estación seca, con precipitaciones entre los 480 mm y temperaturas que oscilan entre los 20-25 °C (Portilla, 2018).

Evaluaciones

Erosión superficial neta

Se evaluó la erosión superficial neta en cuatro laderas contiguas, en la parte alta (A), media (M) y baja (B) (Figura 2). En cada ladera se establecieron tres redes de clavos de erosión (4 m ancho x 10 m largo), cada red constaba de 40 clavos. Un total de 480 clavos de 30 cm de longitud fueron establecidos y enterrados a 15 cm

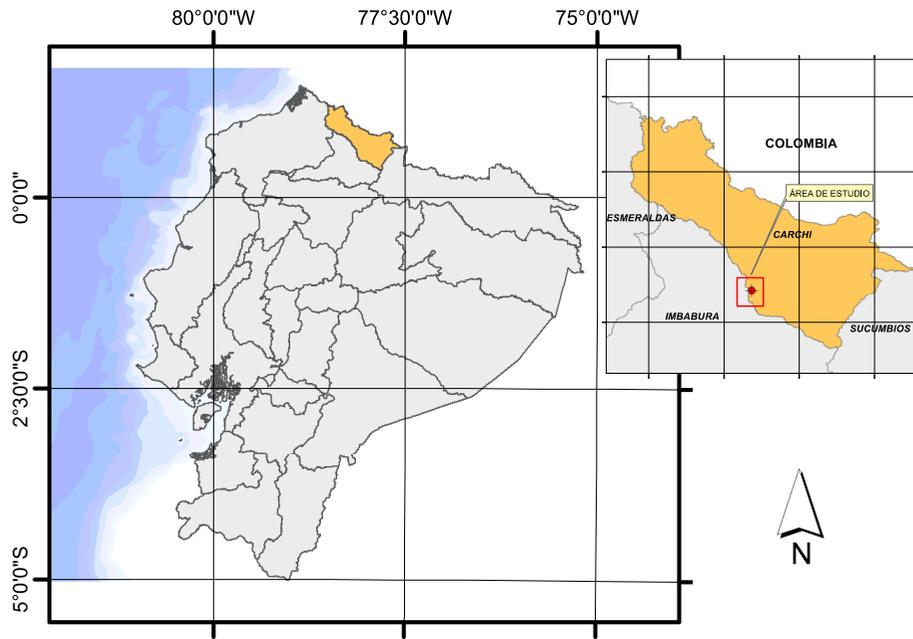


Figura 1. Mapa de Ecuador y ubicación del area de estudio.

Figure 1. Map of Ecuador and location of the study area.

Cuadro 1. Propiedades química de los suelos entre los 0-20 cm de profundidad en el sitio de estudio al comienzo del experimento (2014).

Table 1. Soil chemical properties at 0-20 cm depth of the study site beginning experiment (2014).

Propiedades químicas	Valor
pH H ₂ O	9,20
C.O. (g kg ⁻¹)	0,79
N-NH ₄ (mg kg ⁻¹)	4,10
P (mg kg ⁻¹)	13,00
K (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	1,30
Ca (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	20,10
Mg (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	1,20
Zn (mg kg ⁻¹)	0,40
Cu (mg kg ⁻¹)	3,40
Fe (mg kg ⁻¹)	82,70
Mn (mg kg ⁻¹)	2,50
B (mg kg ⁻¹)	1,50

C.O.: carbono orgánico

de profundidad. En los clavos de erosión se cuantificó la erosión (pérdida de suelo) o sedimentación (acumulación de suelo), usando la metodología descrita por Pizarro *et al.* (2010) y Kearney *et al.* (2018):

$$X (\text{Mg ha}^{-1}) = Y \times D_a \times 10$$

donde X es el suelo erosionado o sedimentado (Mg ha⁻¹), Y es la altura media de suelo erosionado o sedimentado (mm) y D_a es la densidad aparente del suelo (Mg m⁻³). De esta fórmula se determinó la erosión y la sedimentación, para finalmente obtener la erosión neta (EN= Erosión - Sedimentación). Se realizaron evaluaciones en dos fases en el sitio de estudio. La Fase I, considera mediciones desde enero 2014 hasta enero 2015, con evaluaciones cada 60 días. La Fase II, considera mediciones desde junio 2016 hasta septiembre 2017, con evaluaciones más distanciadas con el fin de ver el efecto de la erosión neta a largo plazo. Los resultados fueron analizados mediante prueba t-student para determinar si existen diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

Sobrevivencia de los árboles

Las especies fueron seleccionadas de acuerdo a las características edafoclimáticas de la zona de estudio y fueron establecidas en curvas de nivel usando un nivel en A (Figura 2). En las especies forestales se evaluó la altura y el diámetro de tronco, sin embargo, sólo se presenta la variable de sobrevivencia ya que fue la más interesante. Debido al bajo porcentaje de sobrevivencia de las especies, el estudio contempla dos fases. En la Fase I se establecieron tres especies: *Schinus molle* L., *Caesalpinia spinosa* Kuntze y *Vachellia*

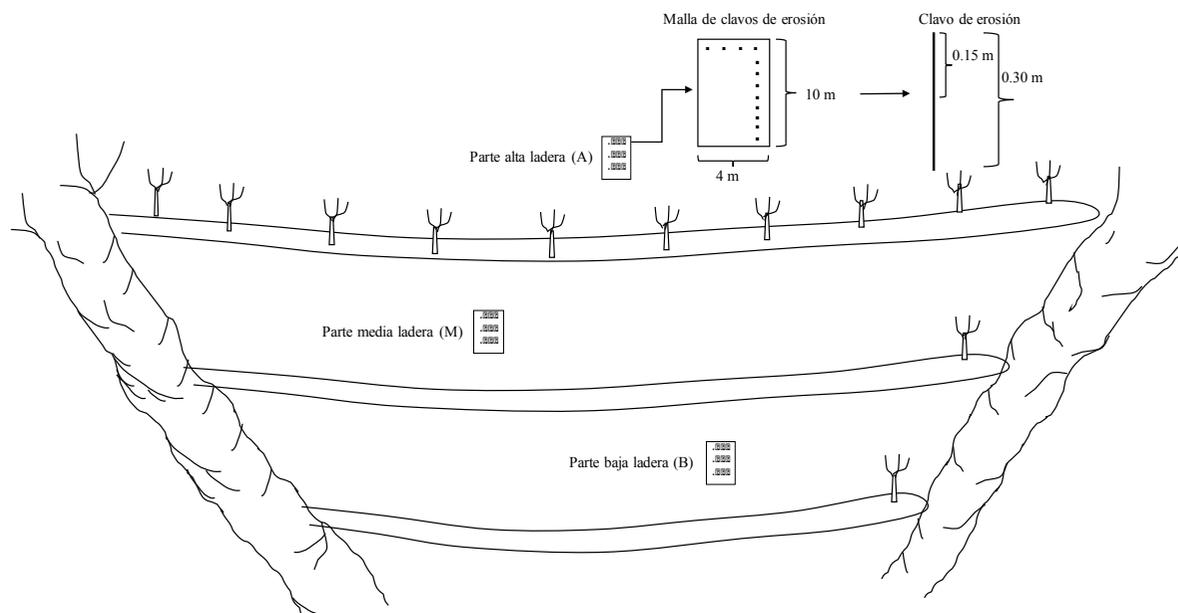


Figura 2. Ensayo experimental y distribución de los clavos de erosión en la ladera: (A) parte alta, (M) media y (B) baja de la pendiente.

Figure 2. Experimental site and the locations of erosion pins in the hillslope: (A) upper, (M) middle and (B) lower slope.

macracantha en 3 laderas contiguas y se consideró una cuarta ladera como un tratamiento testigo desprovista de especies forestales. En la plantación se aplicó a cada individuo 1 L de agua incluyendo 7 g de hidrogel hidratado (HidroKeeper®) como retenedor de agua y 1 kg de estiércol de bovino. Durante el primer año de establecimiento de las especies forestales, se evaluó la sobrevivencia cada 2 meses, y luego a los 27 meses. Al finalizar este periodo (Fase I), *S. molle* y *C. spinosa* no prosperaron, las que fueron reemplazadas en la Fase II por *Moringa oleifera* y *Acacia melanoxylon*. La Fase II tuvo una duración de nueve meses y las mediciones se realizaron cada 90 días. Los resultados fueron analizados estadísticamente mediante prueba t-student para determinar si existen diferencias significativas ($p \leq 0,05$), para ello se empleó el software estadístico InfoStat (versión 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Erosión superficial neta

Las evaluaciones de los clavos de erosión durante cuatro años permitieron cuantificar la erosión neta del suelo y su redistribución en laderas. Durante este periodo se observaron variaciones, demostrando que de un año a otro se pueden producir importantes cambios entre la ganancia vs. pérdida de suelo. Asimismo, al medir la altura en los clavos de erosión, en algunos se observó erosión y luego sedimentación, tal como lo in-

dican Kearney *et al.* (2018). Al finalizar la Fase I se observó un aumento en la erosión neta durante el primer año de estudio, sin efecto significativo independiente de la ubicación de los clavos de erosión (Figura 3). Sin embargo, se observó una tendencia a una mayor pérdida de suelo en la parte baja de la ladera (34 Mg ha^{-1}) siendo superior a la observada en la parte alta y media (promedio 25 Mg ha^{-1}). Estos resultados fueron similares a los obtenidos por Vásquez y Tapia (2011), con valores de $45 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de erosión en pendientes de 18% a 40%. Kearney *et al.* (2018) encontraron valores de erosión de $75 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en suelos de baja cobertura, la que disminuyó significativamente en un 60% en sitios de densa cobertura $> 50\%$ (Martínez *et al.*, 2010).

El segundo año se caracterizó por precipitaciones inferiores a la media anual del área de estudio (250 mm). Durante este periodo que no se realizaron mediciones, se observó que no hubo un aumento en la erosión neta al comenzar las mediciones de la Fase II. En climas semiáridos los procesos erosivos son atribuidos a eventos de lluvia intensos, que no ocurren todos los años (Martínez *et al.*, 2012). En la Fase II, los resultados indican un incremento continuo en la erosión neta, sin embargo, se observa una redistribución del suelo en la ladera, indicando una mayor erosión neta en la parte media con valores de 102 Mg ha^{-1} , siendo superior en un 36% a la parte alta y baja de la ladera (Figura 3). Como indican Arabameri *et al.* (2019) este aumento se podría asociar a un año más lluvioso (578 mm) y a la

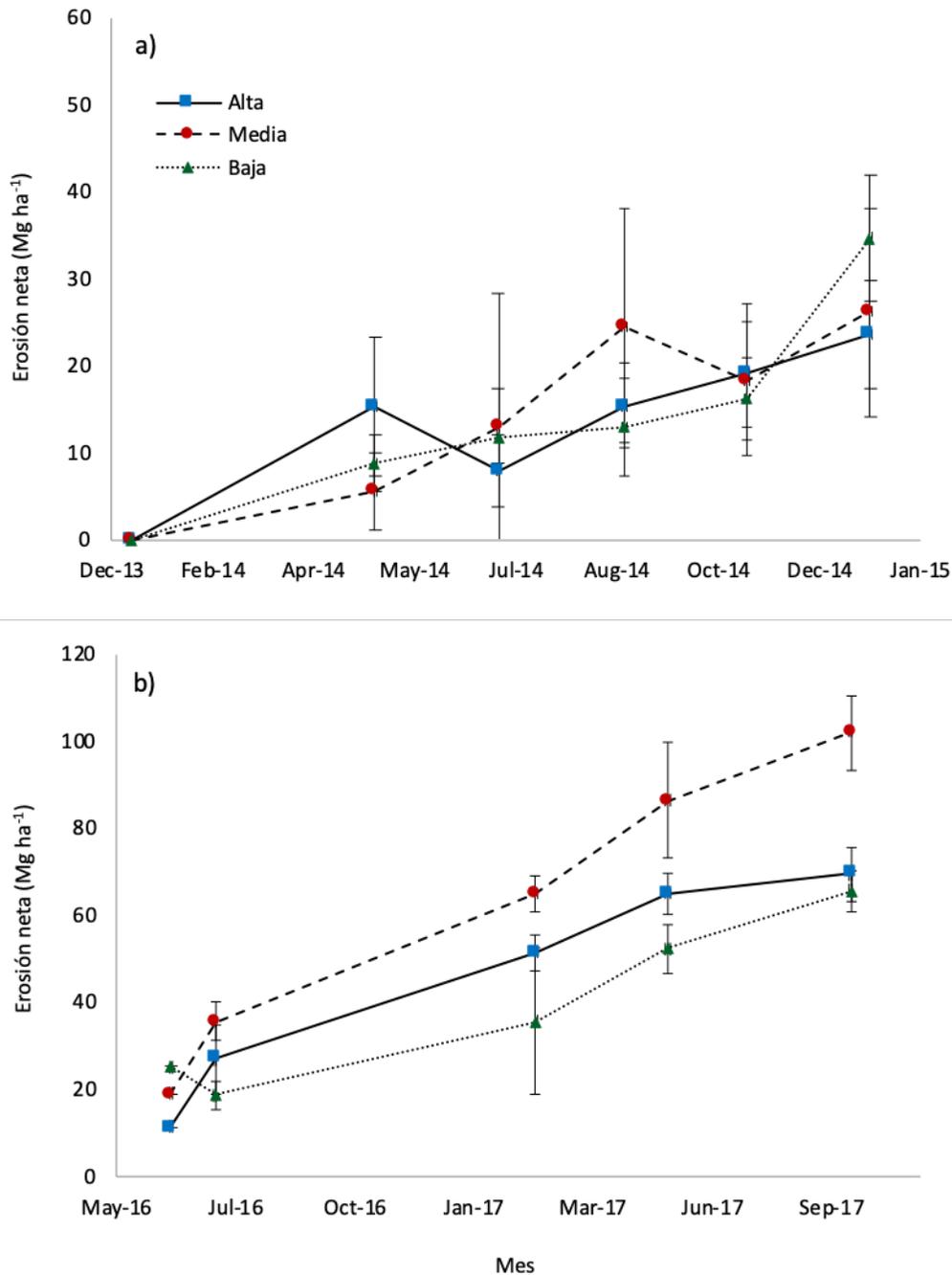


Figura 3. Evolución de la erosión neta en la parte alta, media y baja de la ladera. a) Fase I: enero 2014 a enero 2015 y b) Fase II: junio 2016 a septiembre 2017. Las barras de error indican la desviación estándar (n= 160).

Figure 3. Evolution of net erosion in the upper, middle and lower part of the slope. a) Phase I: January 2014 to January 2015 and b) Phase II: June 2016 to September 2017. Error bars indicate standard deviation (n= 160).

fuerte pendiente de la ladera. Aunque el incremento de la erosión neta podría ser atribuido a la intensidad de las precipitaciones, sin embargo, en esta zona la erosión eólica es un factor importante a considerar, aunque difícil estimar con los clavos de erosión qué tipo de degradación predominó en los resultados obtenidos (Barnes *et al.*, 2016).

Establecimiento de los árboles

La temperatura y la precipitación influyen en la heterogeneidad del paisaje, así como en el reciclaje de nutrientes como consecuencia de la relación directa entre la cobertura de los árboles y el microclima generado que podría contribuir a la fertilidad del suelo (Martínez

et al., 2010). La escasa cobertura de la zona de estudio se relaciona con los bajos niveles de fertilidad del suelo (Cuadro 1), que se caracteriza por altos niveles de pH, baja materia orgánica y un alto contenido de calcio intercambiable, condición similar a suelos volcánicos desarrollados zonas semiáridas de otras regiones (Kiliç et al., 2018). El aumento de la frecuencia de periodos secos disminuyó la disponibilidad hídrica, afectando el crecimiento y supervivencia de los árboles, siendo uno de los factores claves a entender en planes de refores-

tación (Zhu et al., 2018). En la Fase I de este estudio, los resultados indicaron que las especies forestales durante los 12 meses de establecido el ensayo presentaron una supervivencia del 47%, 64% y 98%, para *S. molle*, *C. spinosa* y *V. macracantha*, respectivamente (Figura 4). La altura de los árboles fue de 29,4 cm, 39,8 cm y 22,0 cm para *S. molle*, *C. spinosa* y *V. macracantha*, respectivamente. Sin embargo, a los 27 meses de establecido el ensayo (jul-16), la mortalidad aumentó y los resultados indicaron que *S. molle* y *C. spinosa* tuvieron una escasa

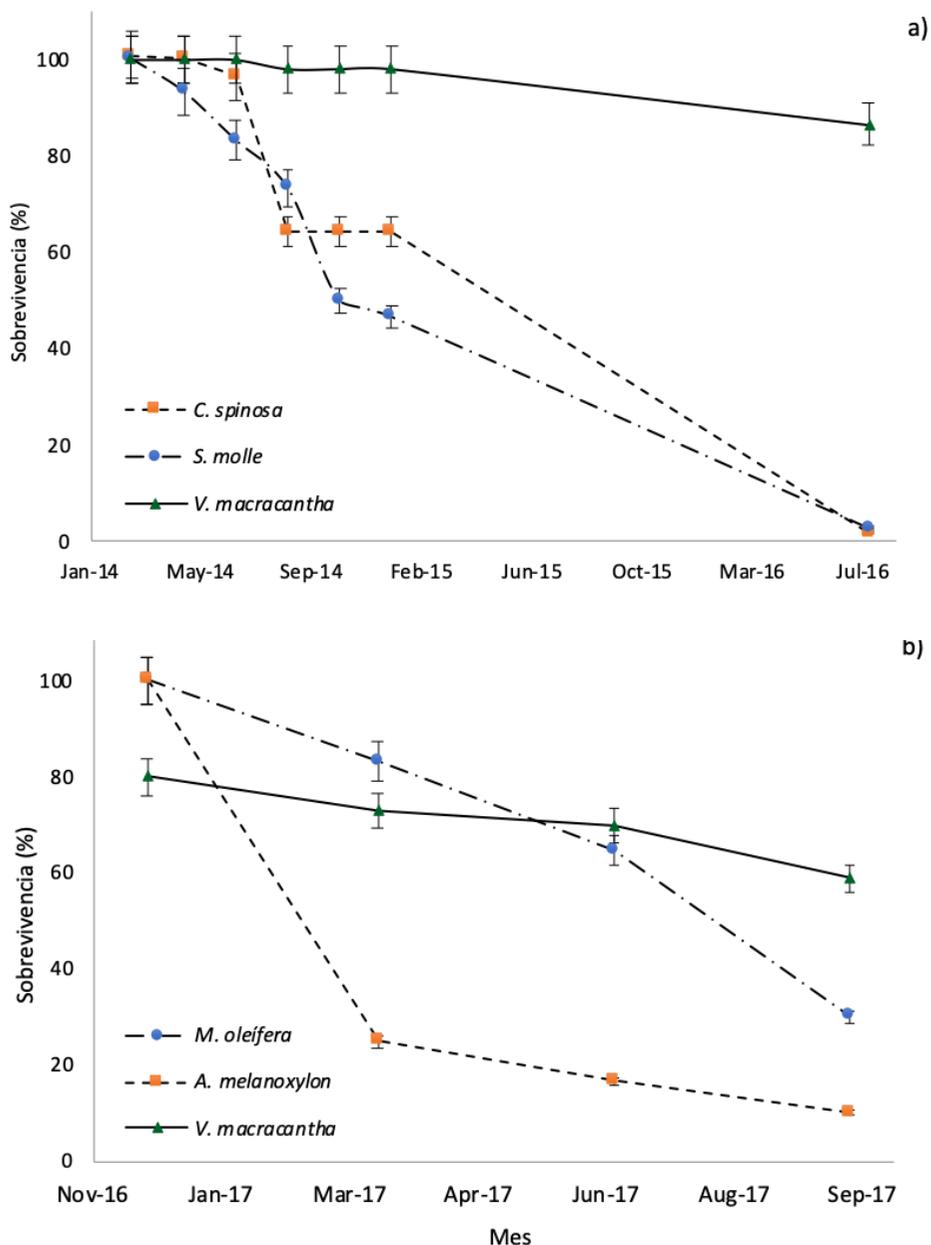


Figura 4. Supervivencia de las especies forestales establecidas. a) Fase I: marzo 2014 a julio 2016 y b) Fase II: diciembre 2016 a septiembre 2017. Letras distintas indican medias estadísticamente diferentes.

Figure 4. Plant survival of the forestry species established. a) Phase I: march 2014 to july 2015 and b) Phase II: december 2016 to september 2017. Different letters indicate statistically different means.

sobrevivencia, alcanzando valores de 3% y 2%, respectivamente. La baja sobrevivencia coincide con un año de escasas precipitaciones, demostrando que la baja adaptación de estas especies estuvo más relacionada a la falta de agua que a las condiciones del suelo. Sin embargo, *V. macracantha* alcanzó una sobrevivencia de un 87%, lo que demuestra la adaptación de esta especie a suelos con un alto nivel de degradación y zonas de bajas precipitaciones. Estos resultados concuerdan con el estudio de Isacás (2008), que en condiciones similares observó un 100% de sobrevivencia para *V. macracantha* a los 12 meses de plantación. La capacidad de fijación de nitrógeno de *V. macracantha* con un sistema radical que le permite obtener agua de las capas profundas del suelo, demuestra su capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales, así como su potencial para reforestación (Cordero *et al.*, 2016). En la Fase II, las especies que no sobrevivieron (*S. molle* y *C. spinosa*) fueron reemplazadas por *M. oleifera* y *A. melanoxylon*. En esta Fase de 9 meses, los resultados indicaron una sobrevivencia de un 30% y 10%, para *M. oleifera* y *A. melanoxylon*, respectivamente. Aunque *V. macracantha*, aumentó su mortalidad, presentó una sobrevivencia de un 60%, demostrando que aunque se adapta a suelos de baja fertilidad y a zonas áridas, periodos prolongados de bajas precipitaciones puede afectar su sobrevivencia.

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio pueden ser usados como guía para estimar el potencial de rehabilitación de la zona de estudio, extrapolando con cautela estos datos a condiciones ambientales similares. Debido a la escasa cobertura vegetal (< 25%) y fuerte pendiente, se registró al final del periodo una erosión neta de 102 Mg ha⁻¹ en la parte media de la ladera, siendo superior en un 36% a la registrada en la parte alta y baja. En las especies forestales, durante la Fase I después de 27 meses de establecimiento, las especies *S. molle* y *C. spinosa* presentaron una sobrevivencia inferior al 3%, mientras que para *V. macracantha* fue de un 85%. En la Fase II, *M. oleifera* y *A. melanoxylon* presentaron una sobrevivencia de un 30% y 10%, respectivamente, en cambio para *V. macracantha* fue de un 60%. *V. macracantha* demostró una mayor adaptación a las condiciones locales. Sin embargo, los resultados indicaron que esta especie, aunque presenta más tolerancia a suelos fuertemente alcalinos, de baja fertilidad y climas semiáridos, periodos prolongados de sequía afectan su sobrevivencia.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Proyecto PROMETEO, Senescyt, Gobierno del Ecuador.

REFERENCIAS

- Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, K., Conoscenti, C., 2019. Gully erosion susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis techniques. *Catena* 180, 282–297.
- Barnes, N., Luffman, I., Nandi, A., 2016. Gully erosion and freeze-thaw processes in clay-rich soils, northeast Tennessee, USA. *GeoResJ* 9, 67–76.
- Béliveau, A., Lucotte, M., Davidson, R., Paquet, S., Mertens, F., Passos, C., Romana, C., 2017. Reduction of soil erosion and mercury losses in agroforestry systems compared to forests and cultivated fields in the Brazilian Amazon. *Journal of Environmental Management* 203, 522–532.
- Bindraban, P., van der Velde, M., Ye, L., van den Berg, M., Mate-rechera, S., Innocent, D., Tamene, L., Vala, K., Jongschaap, R., Hoogmoed, M., Hoogmoed, W., van Beek, C., van Lynden, G., 2012. Assessing the impact of soil degradation on food production. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4, 478–488.
- Cordero, I., Ruiz-Díez, B., Caba de la Peña, T., Balaguer, L., Lucas, M.M., Rincón, A., Pueyo, J.J., 2016. Rhizobial diversity, symbiotic effectiveness and structure of nodules of *Vachellia macracantha*. *Soil Biology & Biochemistry* 96, 39–54.
- Deng, Q., Qin, F., Zhang, B., Wang, H., Luo, M., Shu, C., Liu, H., Liu, G., 2015. Characterizing the morphology of gully cross-sections based on PCA: A case of Yuanmou Dry-Hot Valley. *Geomorphology* 228, 703–713.
- Espinosa, J., Moreno, J., Bernal, G., 2018. *The Soils of Ecuador*. Springer World Soils Book Series. Ed. Hartemink, A. Springer Nature, Cham, Switzerland.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2011. *The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) - Managing systems at risk*. The Food and Agriculture of the United Nations and Earthscan, London.
- Hancock, G.R., Lowry, J.B.C., 2015. Hillslope erosion measurement – a simple approach to a complex process. *Hydrological Processes* 29, 4809–4816.
- Isacás, F.A., 2008. Alternativas de protección de suelos en la microcuenca de Yahuarcocha mediante la plantación de las especies *Caesalpinia spinosa*, *Acacia macracantha*, *Schinus molle* en zanjas de infiltración (Tesis de pregrado inédita), Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador. 177 p.
- Jugie, M., Gob, F., Virmoux, C., Brunstein, D., Tamisier, V., Le Coeur, C., Grancher, D., 2018. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and erosion pins. *Journal of Hydrology* 563, 418–434.
- Kearney, S.P., Fonte, S.J., García, E., Smukler, S.M., 2018. Improving the utility of erosion pins: absolute value of pin height change as an indicator of relative erosion. *Catena* 163, 427–432.
- Kiliç, K., Yalçın, H., Durak, A., Dogan, H.M., 2018. Andisols of Turkey: An example from the Cappadocian Volcanic Province. *Geoderma* 313, 112–125.
- Martínez, I., Zagal, E., Ovalle, C., Coûteaux, M.M., Stolpe, N., Valderrama, N., 2010. Litter decomposition of *Acacia caven* (Molina) Molinda and *Lolium multiflorum* Lam. in

- mediterranean climate ecosystems. *Chilean Journal of Agricultural Research* 70, 454–464.
- Martínez, I., Prat, C., Ovalle, C., del Pozo, A., Stolpe, N., Zagal, E., 2012. Subsoiling improves conservation tillage in cereal production of severely degraded Alfisols under Mediterranean climate. *Geoderma* 189-190, 10–17.
- Ollobarren, P., Capra, A., Gelsomino, A., La Spada, C., 2016. Effects of ephemeral gully erosion on soil degradation in a cultivated area in Sicily (Italy). *Catena* 145, 334–345.
- Pizarro, R., Morales, C., Vega, L., Valdés, R., Olivares, C., Balocchi, F., 2010. Evaluation of surface water erosion in arid and semi-arid zones of central Chile. *Aqua-LAC* 2, 1–11.
- Portilla, F., 2018. *Agroclimatología del Ecuador*. 1ra edición. Editorial Univertaria Abya-Yala, Quito, Ecuador.
- Shrestha, D.P., Suriyaprasit, M., Prachansri, S., 2014. Assessing soil erosion in inaccessible mountainous areas in the tropics: The use of land cover and topographic parameters in a case study in Thailand. *Catena* 121, 40–52.
- Sirvent, J., Desir, G., Gutierrez, M., Sancho, C., Benito, G., 1997. Erosion rates in badland areas recorded by collectors, erosion pins and profilometer techniques (Ebro Basin, NE-Spain). *Geomorphology* 18, 61–75.
- Tonneijck, F., Hageman, J.A., Sevink, J., Verstrate, J.M., 2008. Tephra stratification of volcanic ash soils in Northern Ecuador. *Geoderma* 144, 231–247.
- Valentin, C., Poesen, J., Li, Y., 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena* 63, 132–153.
- Vásquez, A., Tapia, M., 2011. Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la Sierra Peruana. *Revista INGENIERÍA UC (Venezuela)* 18 (3), 42–50.
- Wang, X., Xue, B., Yao, S., Yang, H., Gu, Z., Yang, B., Zhang, M., Zhu, Y., 2019. ^{137}Cs estimates of soil erosion rates in a small catchment on a channelized river floodplain in the lower reaches of Yangtze River, China. *Journal of Environmental Radioactivity* 208-209, 106008.
- Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R., Abegglen, P., Tobler, St., Egüez, A., 2005., The Chota basin and its significance for the interception and tectonic setting of the inter-Andean depression in Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences* 19, 5–19.
- World Overview of Conservation Approaches and Technologies (WOCAT), 2007. Where the land is greener – case studies and analysis of soil and water conservation initiatives worldwide. Hanspeter Liniger and William Critchley, Tajikistan.
- Zehetner, F., Miller, W.P., West, L.T., 2003. Pedogenesis of Volcanic Ash Soils in Andean Ecuador. *Soil Science Society of America Journal* 67, 1797–1809.
- Zhu, S., He, P., Li, R., Fu, S., Lin, Y., Zhou, L., Cao, K., Ye, Q., 2018. Drought tolerance traits predict survival ratio of native tree species planted in a subtropical degraded hilly area in South China. *Forest Ecology and Management* 418, 41–46.