

Artículo de investigación



Evaluación de la erosión hídrica bajo diferentes coberturas boscosas a través de la captura de sedimentos en la zona centro sur de Chile

Evaluation of water erosion under different forest covers through sediment capture in the south-central zone of Chile

Roberto Pizarro^{1,2,3,4}, Claudia Sangüesa^{1,2}, M. Paulina Fernández^{5,2,6}
Rafael Rubilar^{7,2}, Francisco Balocchi⁸, Alfredo Ibáñez^{1,2}*

*Autor de correspondencia

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recibido 7 Junio 2023
Revisado 7 Julio 2023
Aceptado 29 Julio 2023
Publicado 31 Julio 2023

PALABRAS CLAVE

Erosión, control de la erosión, emisión de sedimentos

KEYWORDS

Erosion measurements, erosion control, sediment emission

Resumen

El transporte de sedimentos en cauces y laderas impacta sobre la biodiversidad, el medioambiente y sobre las obras hidráulicas, además, de alterar las curvas de descargas utilizadas para cuantificar el caudal circulante. Los cambios de uso de suelo pueden incrementar la emisión de sedimentos de las cuencas. Para evaluar este factor, se diseñó un experimento para cuantificar la producción de sedimentos bajo distintas coberturas en la Región del Maule, zona centro sur de Chile. Para evaluar la sedimentación, se instalaron parcelas con tres repeticiones, conteniendo trampas de erosión en la zona baja. En las trampas se instalaron clavos de erosión para medir la altura de los sedimentos acumulados. Se evaluaron cinco condiciones con diferentes coberturas forestales, que fueron las siguientes: a) Pino 2017; b) Pino 1996; c) Eucalipto 2006; d) Post cosecha forestal y e) Suelo desnudo. La zona registró una precipitación de 400 mm durante el experimento con intensidades por bajo lo normal (9.1 mmh⁻¹). Los resultados no mostraron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos, excepto la parcela de post cosecha, que mostró la menor emisión de sedimentos. Esto se debería a que un suelo removido, con mayor porosidad, presencia de materia orgánica y con restos de explotación, define una combinación de factores que reducen la erosión. Las precipitaciones caídas en el periodo 2022 estuvieron 200 mm por debajo de un año normal de la zona. Por ende, esto no permite establecer conclusiones taxativas del efecto de este factor y por lo mismo se debe continuar investigando.

Abstract

Sediment transport in streams and hillsides impacts biodiversity, the environment and hydraulic works, as well as altering the discharge curves used to quantify the circulating flow. Changes in land use can increase sediment emission from watersheds. To evaluate this factor, an experiment was designed to quantify sediment production under different land covers in the Maule Region, central-southern Chile. To evaluate sedimentation, plots with three replicates were installed, containing erosion traps in the lower zone. Erosion nails were installed in the traps to measure the height of accumulated sediment. Five conditions with different forest cover were evaluated: a) Pine 2017; b) Pine 1996; c) Eucalyptus 2006; d) Post forest harvest and e) Bare soil. The area recorded a rainfall of 400 mm during the experiment with intensities below normal (9.1 mmh⁻¹). The results showed no significant differences between the different treatments, except for the post-harvest plot, which showed the lowest sediment emission. This should be due to the fact that a disturbed soil, with higher porosity, presence of organic matter and with the remains of exploitation, defines a combination of factors that reduce erosion. Rainfall in the 2022 period was 200 mm below a normal year for the area. Therefore, it is not possible to draw definitive conclusions about the effect of this factor and further research is needed.

- 1 UNESCO Chair Surface Hydrology, University of Talca, Talca, Chile
- 2 Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD), Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago 7810128, Chile
- 3 Instituto Interdisciplinario para la Innovación, Universidad de Talca, Chile.
- 4 Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile, La Pintana, Santiago.
- 5 Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago 6904411, Chile
- 6 Project "Decision Support for the Supply of Ecosystem Services under Global Change", DecisionES, H2020-MSCA-RISE-2020, grant ID:101007950.
- 7 Cooperativa de Productividad Forestal, Departamento de Silvicultura, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Concepción, Chile
- 8 Ecosystems, Productivity and Climate Change, Bioforest SA, Camino a Coronel km 15, Coronel 413000, Chile

1. INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es el desgaste del suelo provocado por la acción del agua, tanto del agua proveniente de la lluvia, como de la que escurre superficialmente sobre el suelo (Gilley, 2005; McIvor et al., 2014). Este desgaste produce sedimentos aguas abajo lo que genera importantes efectos negativos como inundaciones, daños en infraestructura vial, cortes de caminos y menor fertilidad de los suelos, entre otros (García-Chevesich, 2008; 2015).

Las masas boscosas proveen protección del suelo contra la erosión hídrica interceptando la lluvia y regulando la escorrentía superficial, es decir, regulando el proceso precipitación escorrentía (Unesco, 2019). Así, al caer las precipitaciones, estas se ven disminuidas en su energía cinética por el efecto intercepción provocada por la vegetación, generando una protección sobre el suelo, lo que es muy positivo desde la perspectiva hidrológica y ecosistémica (Unesco, 2019; Pizarro et al., 2022). En este sentido, el complejo suelo-vegetación es preponderante en el comportamiento hídrico de una cuenca, ya que, por ejemplo, un suelo desprovisto de vegetación tendrá una mayor proporción de escorrentía superficial por sobre la infiltración (favoreciendo los procesos erosivos) mientras que un suelo completamente cubierto de árboles mostrará una mayor tasa de infiltración y menor erosión (García-Chevesich, 2008; Neris et al., 2013; Litt et al., 2020; Pizarro et al., 2022). En este ámbito, Berglund et al. (1980) encontraron que la restauración forestal incrementa la estabilidad del suelo e incrementa la infiltración. A su vez, Mongil-Manso et al. (2022) cuantificaron la infiltración en plantaciones de pino, robledales, pastizales y matorrales, encontrando que la tasa de infiltración de la plantación de pino supera a las demás coberturas estudiadas.

Por otra parte, la presencia de coberturas vegetales manejadas, tales como plantaciones forestales, que se han desarrollado por un tiempo, pueden influir en las características físicas y químicas del suelo, teniendo efectos en las relaciones hidrológicas, así como en la fertilidad de éstos, ya sea por la vía de retener suelo y evitar erosión, además de consumir nutrientes y aportar materia orgánica y estructura al suelo (García-Chevesich, 2008; Unesco, 2019). Así, en

suelos degradados o altamente erosionados se pueden utilizar las plantaciones forestales exóticas para estabilizar y recuperar el suelo de la cuenca (Gómez-Romero et al., 2012).

Sin embargo, dada la importancia del tema existe dificultad en la cuantificación de los procesos erosivos, lo que es relevante a la hora de determinar el efecto hídrico de los distintos tipos de cubiertas arbóreas en el complejo suelo vegetación (Iroume y Huber, 2000). Este problema cobra mayor importancia bajo los efectos de una megasequía (Garreaud et al., 2020) y cambio climático a la hora de definir marcos de actuación estratégica para la sustentabilidad de la actividad forestal, lo que es particularmente importante en Chile.

Chile es un país que inició desde mediados del siglo XX un importante proceso de reforestación de su territorio, especialmente con especies exóticas como es el caso del pino insigne (*Pinus radiata*). Estas plantaciones se ubicaron mayoritariamente en suelos degradados por una agricultura más que centenaria, definiendo que los suelos remanentes posean escasa profundidad y muy baja fertilidad (Bluth, 2013; Camus, 2014; Unesco, 2019). Por ende, poder analizar en terreno el comportamiento de los suelos bajo diferentes coberturas forestales y en lo que respecta a su capacidad de producción de sedimentos, es un objetivo importante en el sentido de poder aportar mayores antecedentes acerca del real rol que juegan estas plantaciones en el fenómeno erosivo a nivel de laderas.

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

Se llevó a cabo un análisis experimental en terreno en la Región del Maule, zona centro sur de Chile, entre las latitudes 36°0'S y 33°03'S. La zona presenta mayoritariamente un clima mediterráneo (csb; Figura 1) con una estación seca prolongada y lluvias en invierno con un rango que varía entre los 720 - 2500 mm anuales (Ibáñez et al., 2021). Los suelos fueron irracionalmente utilizados por una agricultura más que centenaria (Elizalde, 1970; Bluth, 2013). Actualmente estos suelos son ocupados por plantaciones forestales productivas (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de los sitios seleccionados

Sitio	Edad (años)	Densidad (árboles/ha)
Pino 2017	5	1250
Pino 1996	26	700
Eucalipto 2006	16	1500
Post cosecha	-	-
Suelo desnudo	-	-

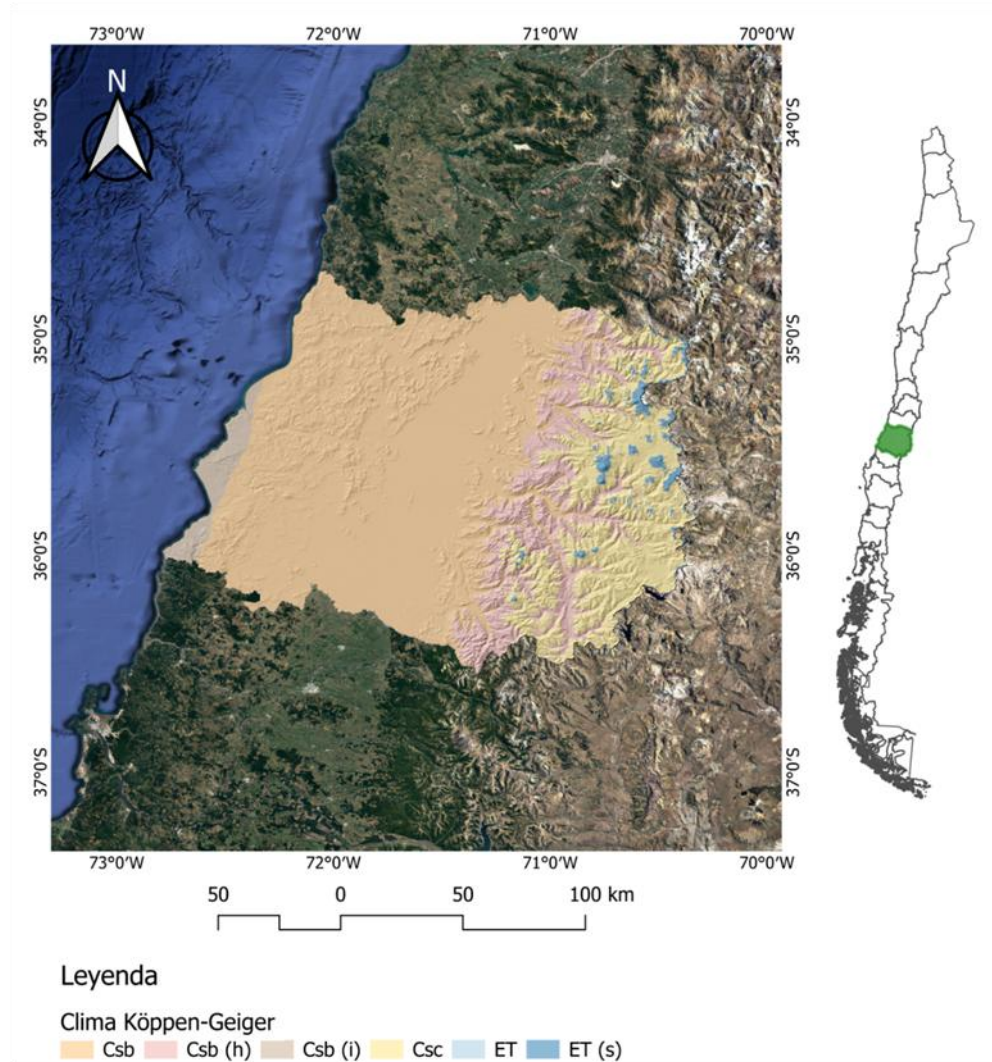


Figura 1. Área de estudio. Realizada con datos de Sarricolea et al. (2017)

2.2 Diseño de las trampas de erosión

Para evaluar la sedimentación, se instalaron trampas de erosión en la comuna de Cauquenes, región del Maule, específicamente en los predios Pajonales y Piedra Hermosa, ambos propiedad de la empresa Forestal Arauco. Estos predios están forestados principalmente con Pino (*Pinus radiata*) y eucalipto (*Eucalyptus globulus*). Otra parcela fue instalada en

las cercanías de ambos predios, en un terreno sin uso forestal (suelo desnudo) del sector Llollehue, que corresponde a una pradera.

El experimento consideró una metodología basada en trampas con clavos de erosión (Unesco, 2010) para cuantificar la producción de sedimentos en suelos con distintas coberturas y usos. Estas consisten en zanjas sin desnivel las que retienen las partículas de suelo

arrastradas por las lluvias que caen desde aguas arriba (Unesco, 2010). En las trampas se disponen clavos de erosión con los cuales se mide la altura de los sedimentos, los que se miden al momento de instalarlos y posterior al periodo de lluvias. El método de las trampas de sedimentos tiene la ventaja de ser de fácil implementación y permite diferenciar la cantidad de sedimentos producidos bajo cada cobertura. Para ello, el área aportante de la trampa se encuentra delimitada y cerrada, impidiendo el ingreso de escorrentía superficial y con ello el arrastre de partículas de suelo desde fuera del área de control. Lo anterior permite cuantificar adecuadamente el efecto de cada cobertura sobre la producción de sedimentos.

En este caso se definió que cada sitio posea tres trampas de sedimentos de cinco metros de largo y un área de impluvio de 50 m² (10x5 m) aguas arriba de

la trampa (Figura 2). En función de lo anterior se instalaron las trampas que capturan la escorrentía superficial generada por la lluvia y su carga de sedimentos proveniente de la ladera aportante (aguas arriba). Después de terminada la temporada de lluvias, los clavos instalados en la trampa de erosión permiten registrar la altura media de los sedimentos arrastrados por las precipitaciones.

Entre los principales criterios para la definición y ubicación de los tratamientos a evaluar, se cuentan, la pendiente entre 20 y 35 %, exposición Sur (en el rango SO y SE), suelo de textura arcillosa, microrrelieve parejo en que la circulación de la escorrentía llegara a la trampa de sedimentos, y la ausencia de sotobosque y de desechos en faja. En las figuras 2 y 3 se presenta un esquema de las trampas de erosión y la ubicación geográfica de las parcelas.

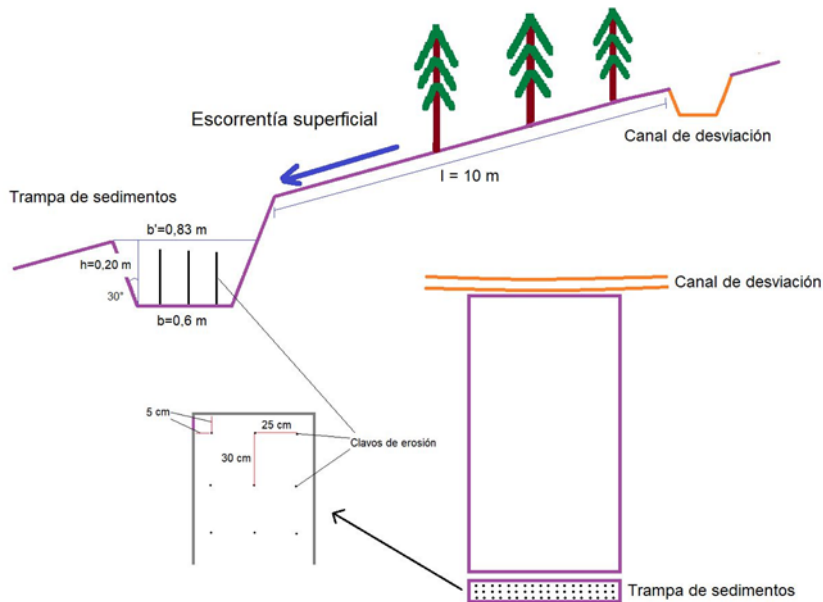


Figura 2. Esquema de una parcela de producción de sedimentos

2.3 Diseño de las trampas de sedimentos

Las trampas de sedimentos deben ser diseñadas en función de las características edafo-climáticas del lugar, con el fin que estas no sean sobrepasadas en volumen líquido y sólido. Es decir, deben ser capaces de capturar la escorrentía proveniente desde la zona alta de la parcela, para que, transcurrido el proceso de

infiltración de agua en el suelo, se produzca la decantación de los sedimentos en la trampa. Las trampas de sedimentos son zanjas que deben capturar la escorrentía proveniente del área de impluvio, esto es el terreno aguas arriba de la trampa, por lo tanto, su diseño debe cumplir la siguiente desigualdad:

$$V_{ai} \leq V_{cz} + V_{in} \quad (1)$$

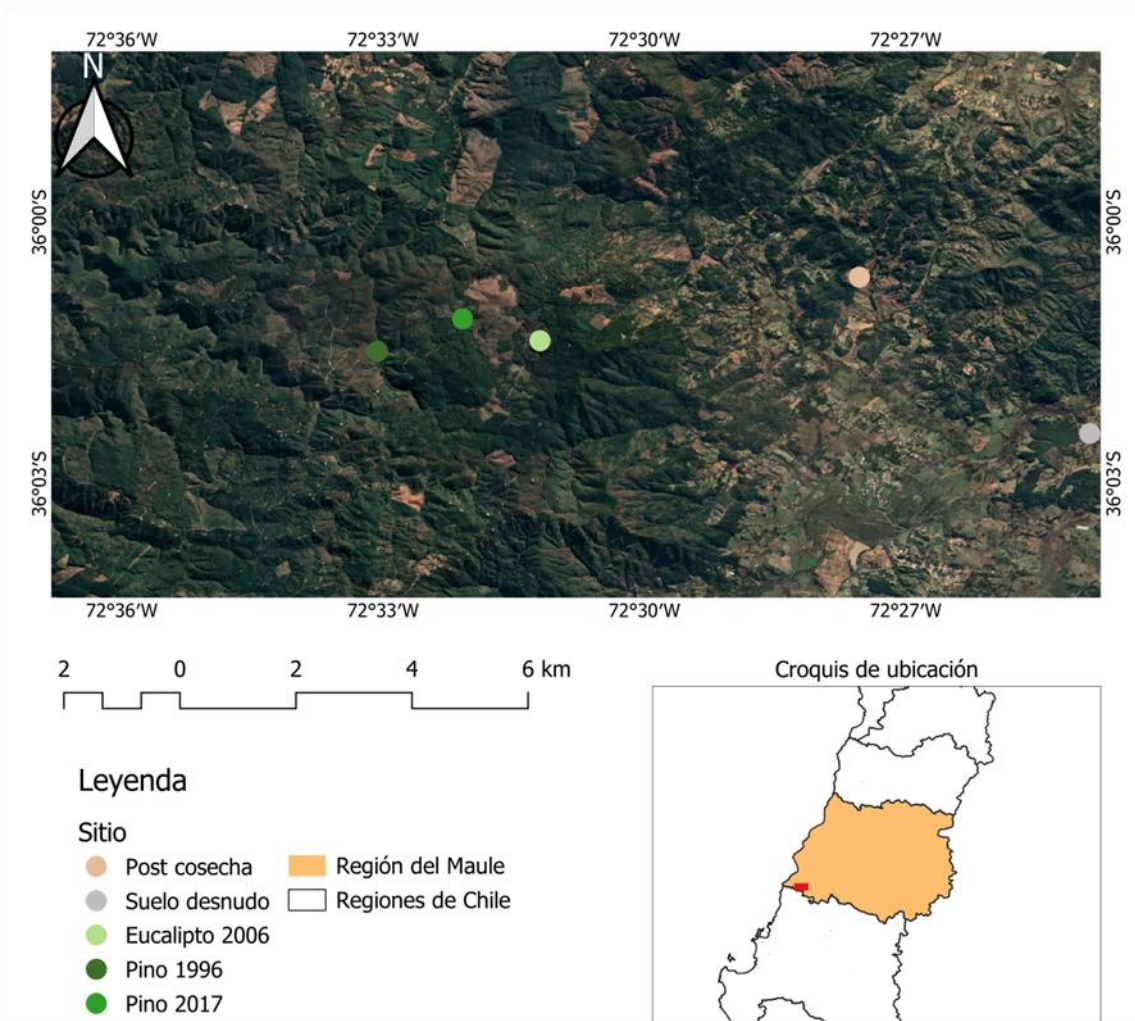


Figura 3. Ubicación de los sitios donde se instalaron las parcelas de erosión. Datum WGS84, Huso 19S.

En el óptimo, esa desigualdad se transforma en una igualdad (Pizarro et al., 2004; Pizarro, 2005; Pizarro et al., 2008; Unesco, 2010). Donde V_{ai} es el volumen aportado por la zona de impluvio; V_{cz} es el volumen capturado por la trampa de sedimentos y V_{in} es el volumen infiltrado. La sección de la trampa puede ser rectangular o trapezoidal, dependiendo de las características del suelo, principalmente en su susceptibilidad al desmoronamiento del talud. En el presente estudio se diseñó para una sección trapezoidal. Así, las expresiones que definen cada una de las variables son las siguientes, según (Pizarro et al., 2008):

$$V_{ai} = I * dh * l * c \quad (2)$$

$$V_{cz} = l(h^2 tg(\alpha) + bh) \quad (3)$$

$$V_{in} = \vec{v} * b * l \quad (4)$$

Donde: I es la intensidad de precipitación máxima anual en 1 hora (mh^{-1}); l es el largo de la trampa (m); dh: distancia horizontal entre líneas de zanjas (m); c es el coeficiente de escorrentía; b: es la base de la zanja (m); h: es la altura de la zanja (m); \vec{v} es la velocidad de infiltración (mh^{-1}).

En el diseño de las trampas se utilizó la estación pluviográfica Parral, que es la más cercana al área de estudio y que cuenta con las curvas IDF (Unesco, 2013).

$$I = \frac{99.619 \times T^{0.161}}{D^{0.482}} \quad (5)$$

Donde: I es la intensidad de precipitación (mmh^{-1}); T es el período de retorno (años) y D es la duración (minutos). Se utilizó un periodo de retorno de 20 años y una duración de 60 minutos, obteniendo una intensidad de diseño de 22.4 mm.

Para determinar la velocidad de infiltración se consideraron los antecedentes suministrados por la empresa Arauco, dueña del sitio experimental, que consistió en las clases texturales del suelo del predio. Con ello, se utilizó el método de Horton, el cual tiene la siguiente expresión matemática:

$$f = fc + (fmax - fc) * e^{-at} \quad (6)$$

Donde: f es la capacidad mínima de infiltración del suelo en cmh^{-1} asociada al flujo laminar y que se alcanza cuando el suelo está totalmente saturado; t es el tiempo transcurrido desde el inicio de la tormenta; a es el coeficiente de disminución, cuyo valor, de

forma aproximada, puede ser 0.00115 y $f_{\text{máx}}$ es la capacidad máxima de infiltración del suelo (cmh^{-1}). Para estimar el valor de los parámetros fc y $f_{\text{máx}}$ se utilizaron las siguientes tablas:

Tabla 2. Valores del parámetro fc para tipos del suelo (UPM, 1995).

Clase de Suelo	fc (cm h^{-1})
A	1.143 – 0.762
B	0.762 – 0.381
C	0.381 – 0.127
D	0.127 – 0

Tabla 3. Valores del parámetro $f_{\text{máx}}$ para distintas texturas del suelo (UPM, 1995)

f máx.	Poca vegetación	Vegetación densa
Secos arenosos	12.7	25.4
Secos limosos	7.6	15.2
Secos arcillosos	2.5	5.0
Húmedo arenoso	4.2	8.5
Húmedo limoso	2.5	5.0
Húmedo arcilloso	0.8	3.6

La textura del suelo corresponde a arcillo-limoso y los valores utilizados son: $fc=0.381$ y $f_{\text{máx}}=6$. Reemplazando estos valores en la ecuación (6) se obtiene una velocidad de infiltración igual a 0.06 mh^{-1} .

En la siguiente tabla se muestran los valores utilizados a partir de un conocimiento previo de la zona y experiencia en el diseño de obras, y se definieron los siguientes parámetros para las zanjas:

Tabla 4. Valores predefinidos

Variable	Valor
α°	30
Coefficiente de escorrentía	0.9*
Largo del área de impluvio (m)	10
Ancho del área impluvio (m)	5
Área impluvio (m ²)	50
Base de la trampa (m)	0.6

*Se seleccionó un coeficiente de escorrentía elevado (0.9) como un factor de seguridad, generando así un escenario desfavorable y por lo mismo es menos probable que la obra se vea sobrepasada.

Los clavos de erosión se instalaron en cada trampa a un distanciamiento de 25 x 30 cm, con una distancia de 5 cm de los bordes (Figura 2). Dada las diferencias en las dimensiones de las trampas se instalaron distintas cantidades de clavos, como se muestra en la tabla 5.

Una vez instalados los clavos se les midió la altura sobre la superficie utilizando una regla metálica graduada en mm. La altura registrada es la medición inicial que será comparada con la altura final, tomada en verano, después de la temporada de lluvias. La medición inicial y final de una parcela debe ser hecha

por la misma persona con el fin de mantener el mismo procedimiento y disminuir errores.

Pero por norma general, la regla se ubica al lado derecho del clavo. Para la medición se registra el nombre del(a) medidor(a) y a los clavos se les asigna coordenadas de tal forma de identificar la altura inicial y final de cada clavo en particular. En la figura 2 se muestra un ejemplo de las coordenadas de los clavos y de la disposición de las trampas. La tabla 5 muestra una síntesis de los parámetros de cada sitio y parcela instaladas.

Tabla 5. Tratamientos definidos y características físicas de las parcelas de cada tratamiento

Punto	Cobertura	Año	Edad	Parcelas	Predio	Pendiente	Exposición	Nº clavos
1	Pino	2017	5	A		28%	S	48
				B		27%	S	45
				C		31%	S	46
2		1996	26	A	Pajonales	24%	SE	43
				B		24%	SE	48
				C		26%	SE	51
3	Eucalipto	2006	16	A		25%	SE	45
				B		26%	SE	51
				C		26%	SE	48
4	Postcosecha	2021	-	A	Piedra Hermosa	22%	S	45
				B		22%	S	48
				C		22%	S	45
5	Suelo Desnudo	-	-	A	Llollehue	23%	S	48
				B		23%	S	51
				C		23%	S	54

2.4 Intervalos de confianza y comparación

Finalmente, para comparar si existían diferencias significativas en la producción de sedimentos para las coberturas evaluadas, se estimaron los intervalos de confianza para los promedios de altura de sedimentación para un nivel de confianza del 95% (Molina Arias, 2013). Estos intervalos se calcularon, por medio de un *bootstrap* (Efron, 1979). Esta técnica al ser no paramétrica puede ser utilizada en datos donde no se conoce la distribución poblacional (Kulesa et al., 2015). Para esto, se generan nuevas

muestras a partir de un remuestreo aleatorio con remplazo (Paliz et al., 2021). Este proceso se repite 1000 veces obteniendo así, la distribución de los parámetros poblacionales y sus intervalos de confianza (López-Aguilar et al., 2017).

3. RESULTADOS

En función de la metodología propuesta, se obtuvieron los siguientes valores para las siguientes variables:

Tabla 6. Valores calculados para el diseño de las trampas

Variable	Valor
Velocidad de infiltración (mh^{-1})	0.06
Intensidad de Pp (mh^{-1})	0.0224
Volumen de infiltración (m^3)	0.036
Altura de la trampa h (m)	0.227
Base superior (m)	0.862

Después de una temporada de lluvias acaecida durante el año 2022 y donde las mediciones pluviométricas consideraron los meses invernales, se obtuvo un total de 694 mm de lluvia caída. Las mayores intensidades llegaron a 9.1 mmh^{-1} . A continuación, en la figura 6 se presenta un ejemplo de una trampa construida al interior de las parcelas. Los resultados de las mediciones, al final de la temporada de lluvias, arrojaron los siguientes valores expresados en altura promedio de sedimento acumulado en las trampas instaladas (Figura 7). A nivel macro, los resultados muestran que las parcelas que poseían

cobertura de pino (Pino 2017 y Pino 1996), con eucalipto 2006 y suelo desnudo, no presentaron diferencias significativas desde un punto de vista estadística, lo que se verifica en los intervalos de confianza. La parcela de pino 2017, supera los valores promedio de erosión de los otros puntos analizados (Figura 7), aunque la diferencia y como se ha señalado, no es significativa. Sin embargo, la parcela de post cosecha (Piedra Hermosa), presenta diferencias medias significativas al compararlo con los otros sitios, alcanzando los menores valores de pérdida de suelo registrados (Figura 7).



Figura 6. Trampa de erosión construidas en el estudio.

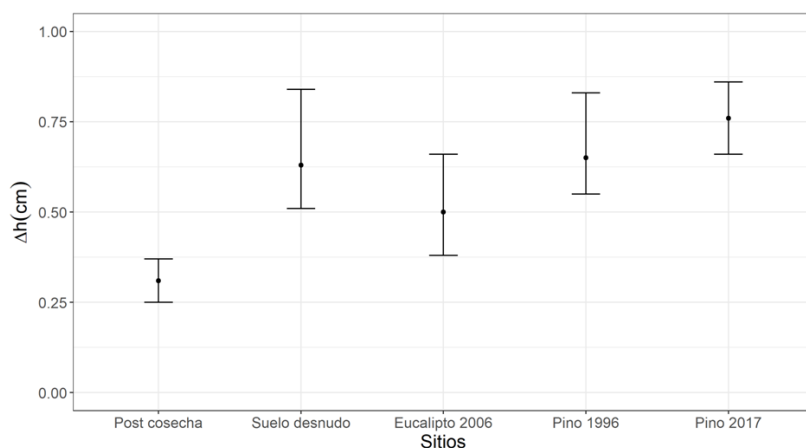


Figura 7. Intervalos de confianza para la sedimentación promedio

4. DISCUSIÓN

La zona con residuos forestales presentes en Piedra Hermosa (post cosecha) posterior a faenas de explotación forestal, presenta los menores valores de erosión. Esto podría ser explicado porque el año 2022 resultó ser un periodo con precipitaciones menores a la normal en un 33%. Además, las intensidades para una hora (9.1 mmh^{-1}) por bajo los valores promedio de la zona, (15 mmh^{-1} , datos de Unesco (2013)). Por ende, al ser un suelo roturado por las faenas forestales, y conteniendo sobre sí los residuos de la explotación forestal, como medida de prevención contra fenómenos erosivos, se dio un escenario favorable para que estas zonas pudiesen capturar, retener e infiltrar el agua caída y de ahí sus resultados más favorables y que lo diferencian del resto. A esto se suma la presencia de materia orgánica sobre el suelo, como residuo de la explotación forestal, que aporta elementos de protección y favorece un comportamiento coloidal de las partículas de suelo (Litschert y MacDonald, 2009).

Un estudio similar realizado por Aburto et al. (2021) muestra que existen diferencias en los montos de sedimentación al comparar plantaciones exóticas con bosque nativo. Sus resultados muestran que en términos generales el bosque nativo y el suelo recién cosechado presentan los menores montos de sedimentación.

Por otra parte, llama la atención que zonas bajo protección forestal presenten erosión similar a la zona con suelo desnudo y sin diferencias significativas. Sin embargo, estos suelos presentan la característica singular que durante décadas fueron sometidos a explotación agrícola, hasta que las condiciones de productividad marginal determinaron su abandono

con evidentes muestras de deterioro edáfico, compactación del mismo, por ejemplo, y con una decapitación de los horizontes superiores, más fértiles y con mayor disponibilidad de materia orgánica. Por tanto, la cobertura forestal que no es total, por el desarrollo de las copas de los árboles, debe proteger un suelo eminentemente deteriorado y en donde la expresión erosiva es similar. Sin embargo, cabe preguntarse qué ocurriría en condiciones normales de lluvia, es decir con mayores montos e intensidades de precipitación. La misma pregunta surge si esos montos superan la media o si las intensidades se acercan a valores con probabilidades de excedencia del 10 o el 15%. Desgraciadamente el experimento se llevó a cabo en un periodo con montos e intensidades de precipitación por bajo lo normal y eso determina condicionantes diferentes. Ellies (2000) señala que la intensidad de precipitación es el factor que condiciona la cantidad de sedimentación producida por las laderas y esta puede alcanzar hasta 100 ton ha^{-1} en cuencas desprovistas de protección.

Pizarro y Cuitiño (2002) utilizaron parcelas de clavos de erosión para estimar la erosión en dos sitios con suelos desnudos de la región del Maule (cordillera andina y valle central), encontrando que la pendiente es el principal factor en la erosión de estas laderas y estos se producen en el periodo de mayor precipitación. En función de lo anterior, es recomendable proteger y restaurar las cuencas con suelos desnudos para mitigar los aportes de sedimentos y la implementación de vegetación es una forma de reducir la producción de sedimentos en laderas y cuencas (Unesco, 2019; Pizarro et al., 2020).

En general, en las parcelas con vegetación se visualiza un aporte de las plantaciones principalmente en materia orgánica, hecho muy positivo para las variables físicas del suelo que tienen relación con los procesos erosivos. Desde esta perspectiva, parece ser necesario incorporar una mayor cantidad de años al estudio, porque una sola temporada de análisis parece no ser suficiente para detectar posibles diferencias significativas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las principales conclusiones referidas al estudio son las siguientes: El análisis de intervalos de confianza de las medias no muestra diferencias significativas entre los diferentes tratamientos analizados a excepción del terreno post cosechado. Las precipitaciones caídas en el periodo 2022 estuvieron 200 mm por debajo de un año normal de la zona, y esto determina que esa altura de precipitación distribuida en diferentes eventos no permitió establecer diferencias significativas entre los tratamientos analizados. A modo de ejemplo en 2023 al mes de junio, la zona llevaba acumulados más de

600 mm de lluvia y se estaba iniciando el invierno, periodo de mayor cantidad de lluvias en la zona centro sur de Chile. Un aspecto relevante es que la zona con menor producción de sedimentos fue aquella sometida a explotación forestal. De esto se concluye que un suelo removido, con mayores niveles de espacios intersticiales, con presencia de materia orgánica y con el efecto positivo de los restos de explotación que ponen freno a la erosión, es una combinación positiva para la retención de sedimentos, con montos de lluvia por bajo el promedio y en el experimento analizado. De lo anterior se desprende la necesidad de repetir el experimento, pero estableciendo periodos más largos, con el fin de poder someter las parcelas o tratamientos a montos e intensidades más altas, en busca de diferencias significativas si las hubiese.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto ANID BASAL FB210015. A Forestal Arauco por el uso de sus predios, y al Centro de Investigaciones Forestales Bioforest.

REFERENCIAS

- Aburto, F., Cartes, E., Mardones, O., y Rubilar, R. (2021). Hillslope soil erosion and mobility in pine plantations and native deciduous forest in the coastal range of south-Central Chile. *Land Degradation & Development*, 32(1), 453–466. <https://doi.org/10.1002/ldr.3700>
- Berglund, E. R., Ahyoud, A., y Tayaa, M. (1980). Comparison of soil and infiltration properties of range and afforested sites in northern Morocco. *Forest Ecology and Management*, 3, 295–306. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(80\)90030-4](https://doi.org/10.1016/0378-1127(80)90030-4)
- Bluth, A. (2013). *El aporte de la ingeniería forestal al desarrollo del país: Una reseña histórica de la profesión forestal en Chile* (1ª ed.). Colegio de Ingenieros Forestales A.G. <https://cifag.cl/wp-content/uploads/2015/07/El-aporte-de-la-ingenier%C3%ADa-forestal.pdf>
- Camus, P. (2014). De la panacea a la tragedia. Bosques, erosión y forestación en Chile. Siglos XIX y XX. *Revista de Historia Iberoamericana*, 7(2). <https://doi.org/10.3232/RHI.2014.V7.N2.01>
- Efron, B. (1979). Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, 7(1). <https://doi.org/10.1214/aos/1176344552>
- Elizalde, R. (1970). *La sobrevivencia de Chile: La conservación de sus recursos naturales renovables* (2ª ed.). Ministerio de Agricultura Servicio Agrícola Ganadero.
- Ellies, A. (2000). Soil erosion and its control in Chile-An overview. *Acta Geológica Hispánica*, 35(3), 279–284.
- García-Chevesich, P. (2008). *Procesos y Control de la Erosión*. Outskirts Press. Denver, Colorado, Estados Unidos.
- García-Chevesich, P. (2015). *Control de la erosión y recuperación de suelos degradados*. Outskirts Press. Denver, Colorado, Estados Unidos.

- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., y Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Gilley, J. E. (2005). EROSION Water-Induced. En *Encyclopedia of Soils in the Environment* (pp. 463–469). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00262-9>
- Gómez-Romero, M., Soto-Correa, J., Blanco-García, J., Sáenz-Romero, C., Villegas, J., y Lindig-Cisneros, R. (2012). Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia*, 46(8).
- Ibáñez, A., Vallejos, C., Mendoza, R., Sangüesa, C., y Pizarro, R. (2021). Desafíos en torno al uso del agua de la Región del Maule. En A. Gartenlaub-González y F. Tello-Navarro (Eds.), *El Maule hoy: Perspectivas y aproximaciones socio-históricas, económicas y medioambientales del Valle Central* (1ª ed.). Universidad Autónoma de Chile. <https://doi.org/10.32457/UA.118>
- Iroume, A., y Huber, A. (2000). Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile. *Bosque*, 21(1), 45–56. <https://doi.org/10.4206/bosque.2000.v21n1-05>
- Kulesa, A., Krzywinski, M., Blainey, P., y Altman, N. (2015). Sampling distributions and the bootstrap. *Nature Methods*, 12(6), 477–478. <https://doi.org/10.1038/nmeth.3414>
- Litschert, S. E., y MacDonald, L. H. (2009). Frequency and characteristics of sediment delivery pathways from forest harvest units to streams. *Forest Ecology and Management*, 259(2), 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.038>
- Litt, G. F., Ogden, F. L., Mojica, A., Hendrickx, J. M. H., Kempema, E. W., Gardner, C. B., Bretfeld, M., Regina, J. A., Harrison, J. B. J., Cheng, Y., y Lyons, W. B. (2020). Land cover effects on soil infiltration capacity measured using plot scale rainfall simulation in steep tropical lowlands of Central Panama. *Hydrological Processes*, 34(4), 878–897. <https://doi.org/10.1002/hyp.13605>
- López-Aguilar, B. M., Vilalta-Alonso, J. A., Vaquero-Puerta, C., y Vilalta-Alonso, G. (2017). Técnicas estadísticas en una alternativa de apoyo a la toma de decisiones con muestras pequeñas: Una contribución basada en Bootstrap. *DYNA*, 84(203), 316–321. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.60910>
- McIvor, I., Youjun, H., Daoping, L., Eyles, G., y Pu, Z. (2014). Agroforestry: Conservation Trees and Erosion Prevention. En *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (pp. 208–221). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00247-3>
- Molina Arias, M. (2013). El significado de los intervalos de confianza. *Pediatría Atención Primaria*, 15(57), 91–94. <https://doi.org/10.4321/S1139-76322013000100016>
- Mongil-Manso, J., Navarro-Hevia, J., y San Martín, R. (2022). Impact of Land Use Change and Afforestation on Soil Properties in a Mediterranean Mountain Area of Central Spain. *Land*, 11(7), 1043. <https://doi.org/10.3390/land11071043>
- Neris, J., Tejedor, M., Rodríguez, M., Fuentes, J., y Jiménez, C. (2013). Effect of forest floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain). *CATENA*, 108, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.04.011>
- Paliz, C., Perugachi, N., Martínez, J., Moreno, M., Yaucán, C., y Palaguachi, R. (2021). Análisis estadístico de datos de las precipitaciones usando métodos robustos y bootstrap. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 12(2), 52–61. <https://doi.org/10.29166/revfig.v12i2.3515>
- Pizarro, R. (2005). *Elementos de ingeniería hidrológica para el mejoramiento de la productividad silvícola*. Ed. Universidad de Talca.
- Pizarro, R., y Cuitiño, H. (2002). Método de evaluación de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos en Chile. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 13, 165–170.

- Pizarro, R., Flores, J. P., Sangüesa, C., Martínez, E., y León, L. (2008). Diseño hidrológico de zanjas de infiltración en el secano costero e interior de las regiones semiáridas de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 29(2).
<https://doi.org/10.4067/S0717-92002008000200006>
- Pizarro, R., Flores Villanelo, J. P., Sangüesa Pool, C. B., Martínez Araya, E., y García Rodríguez, J. L. (2004). *Diseño de obras para la conservación de aguas y suelos*.
- Pizarro, R., García-Chevesich, P., Pino, J., Ibáñez, A., Pérez, F., Flores, J. P., Sharp, J. O., Ingram, B., Mendoza, R., Neary, D. G., Sangüesa, C., y Vallejos, C. (2020). Stabilization of stage–discharge curves following the establishment of forest plantations: Implications for sediment production. *River Research and Applications*, 36(9), 1828–1837. <https://doi.org/10.1002/rra.3718>
- Pizarro, R., Valdés-Pineda, R., García-Chevesich, P. A., Ibáñez, A., Pino, J., Scott, D. F., Neary, D. G., McCray, J. E., Castillo, M., y Ubilla, P. (2022). The Large-Scale Effect of Forest Cover on Long-Term Streamflow Variations in Mediterranean Catchments of Central Chile. *Sustainability*, 14(8), 4443.
<https://doi.org/10.3390/su14084443>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., y Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66–73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Unesco. (2010). *Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas* (D. Brea y F. Balocchi, Eds.; Vol. 1). UNESCO Office Montevideo.
- Unesco. (2013). *Curvas Intensidad Duración Frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Intensidades desde 15 minutos a 24 horas*. PHI-LAC.
- Unesco. (2019). *Antecedentes de la relación masa forestal y disponibilidad hídrica en Chile*.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000370891.locale=en>
- UPM. (1995). *Curso de Ingeniería de recursos naturales: Una gestión de Ordenación del territorio*. Tragsatec.

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización.



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0 license