

INFORME

EVIDENCIAS EN REGULACIÓN HÍDRICA EN ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

VARIACIÓN ESTACIONAL DEL CONTENIDO DE
AGUA EN EL SUELO EN ECOSISTEMAS DE PAJONAL
NATURAL E INTERVENIDO, HUARAZ, ÁNCASH



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

VARIACIÓN ESTACIONAL DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO EN ECOSISTEMAS DE PAJONAL NATURAL E INTERVENIDO, HUARAZ, ÁNCASH

Autor:

Helder Mallqui

Subdirector de Investigación e Innovación para la Sostenibilidad de Ecosistemas de Montaña

Con apoyo de:

Blga. Sandra Arroyo Alfaro

Bach. Cristian Quispe Ccajavilca

Editado por:

© Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM)

Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM)

Sede central: Av. Centenario 2656 - Sector Palmira, Independencia, Huaraz - Áncash - Perú

Teléfono: (043) 64 3460

Correo electrónico: diem@inaigem.gob.pe

Fotografías de portada: Archivo INAIGEM - Herbert Valverde Balabarca

Diseño y diagramación: Joan Ramírez Romero

Depósito legal del libro N° XXXXXXXXXXXXX

Código DOI:

Por favor citar la publicación de la siguiente manera:

Mallqui H, (2024). Variación estacional del contenido de agua en el suelo en ecosistemas de pajonal natural e intervenido, Huaraz, Áncash (Informe). Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). (Web publicación online).

VARIACIÓN ESTACIONAL DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO EN ECOSISTEMAS DE PAJONAL NATURAL E INTERVENIDO, HUARAZ, ÁNCASH

Seasonal Variation of Water Content in the Soil in Natural and Intervened Grassland Ecosystems, Huaraz, Áncash

RESUMEN

El objetivo principal del estudio fue evaluar la variación estacional del contenido de agua en el suelo mediante un análisis comparativo del balance hídrico a nivel diario en dos sitios, una zona de pajonal natural intervenida con plantación de *Pinus radiata* y otra intervenida con zanjas de infiltración en los sectores de Tayacoto y Shillquill, respectivamente, en la provincia de Huaraz, región Áncash, Perú. Para ello, se midieron de manera directa las variables de precipitación, temperatura, humedad volumétrica del suelo, evapotranspiración total (*ET*) y percolación (*Per*). Se estimó la precipitación efectiva (*PE*) y la escorrentía superficial (*ES*) mediante el método del número de curva (*NC*). La evapotranspiración de referencia (*ET₀*) se estimó mediante la ecuación FAO Penman-Monteith. Los resultados muestran que en el sector Tayacoto solo el pajonal presentó *Per* durante el periodo de estudio. En el caso del almacenamiento, tanto en el periodo de estiaje como en el húmedo, se evidenciaron diferencias significativas a favor del pajonal. Para el caso del sector Shillquill, no existieron diferencias estadísticas significativas en los valores de *Per* diaria entre zanjas de infiltración y pajonal. El almacenamiento fue mejor en la zanja para el periodo húmedo y el pajonal tuvo un mejor comportamiento durante el estiaje. El almacenamiento de agua en el suelo, así como la formación de agua gravitacional y percolación, ha sido mejor en el pajonal que en los pinos. Asimismo, los resultados no han permitido visualizar el efecto o el impacto esperado de las zanjas infiltración, pues las diferencias encontradas se pueden considerar poco significativas respecto al pajonal.

Palabras clave: *pajonal, humedad volumétrica, almacenamiento, balance hídrico*

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los ecosistemas de montaña han sufrido una creciente presión que ha causado impactos negativos relacionados con el manejo inapropiado de los mismos, pero también debido al cambio climático, que se traduce en una serie de problemas, tanto en los propios ecosistemas como en las personas que habitan o que dependen de los servicios ecosistémicos que estos proveen.

Tales impactos se manifiestan en, por ejemplo, la pérdida de diversidad biológica, la erosión de suelos, la degradación, el deterioro de la calidad del agua para uso humano, el retroceso de los glaciares. Ello ha llevado al creciente deterioro de las condiciones ambientales, sociales y económicas en gran parte de las regiones de montaña del mundo.

Por otro lado, en el Perú, en los últimos años, el cambio de uso del suelo se ha venido dando de manera intensiva en la región andina, donde las zonas ocupadas, principalmente, por el ecosistema pajonal han sido reemplazadas con forestación y ganadería, que son las principales actividades antropogénicas que afectan a los ecosistemas de montaña (Knocke *et al.*, 2014). Las plantaciones de pino y las actividades de pastoreo en estas áreas han originado cambios significativos en las propiedades de los suelos que se relacionan con el agua (López *et al.*, 2005), lo que causa una reducción en el rendimiento hídrico y variaciones en la respuesta hidrológica de las cuencas de los Andes (Ochoa *et al.*, 2016).

En muchas partes del mundo, como en el Perú, se han implementado tecnologías de conservación de agua y suelos, como andenes, cercos vivos, zanjas de infiltración, terrazas de formación lenta, control de cárcavas, reforestación, entre otras, actualmente conocidas como infraestructura natural (Herweg y Ludi, 1999). Entre estas se encuentra, muy difundida y como una práctica habitual, la construcción de zanjas de infiltración en laderas, bajo la premisa de la recolección de agua de lluvia y la recarga de acuíferos (Cotler *et al.*, 2015).

Contradictoriamente, son pocas las investigaciones que dan un soporte técnico-científico a esta intervención y al entendimiento cabal de los procesos que conllevan, así como al conocimiento real de las alteraciones o beneficios que pudieran producir en la provisión de bienes y servicios ecosistémicos. A pesar de las investigaciones, todavía no hay un consenso sobre el verdadero efecto de los impactos antropogénicos sobre los ecosistemas andinos (Quichimbo *et al.*, 2012).

En tal sentido, el entendimiento de las relaciones entre el clima, la cobertura vegetal, su estado, las modificaciones del territorio y las propiedades físicas del suelo es fundamental para comprender las interacciones que permiten la utilización y provisión de agua de los ecosistemas de montaña.

Así, desde 2017, la Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM) del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (Inaigem) ha monitoreado el almacenamiento de agua en el suelo en una parcela de *Pinus radiata* versus una de pajonal natural en el sector Tayacoto, del distrito de Independencia; y el efecto de las zanjas de infiltración versus el pajonal en el sector Shillquill, del distrito de Huanchay, ambos en la provincia de Huaraz, región Áncash. Ello ha permitido tener una data importante de variables biofísicas medidas *in situ*, obtenidas mediante equipos de registro continuo y diversos trabajos de campo.

La presente investigación ha tomado como base esta información, para caracterizar y entender los procesos vinculados al servicio ecosistémico de regulación hídrica del ecosistema de montaña pajonal e intervenciones mediante infraestructura natural que se dan sobre estos espacios (específicamente, zanjas de infiltración y forestación), midiendo la efectividad real de estas intervenciones en términos de cantidad de agua y con la aplicación de una metodología según el estado del arte actual.

Por ello, el objetivo general del trabajo de investigación ha sido evaluar la variación estacional del contenido de agua en el suelo en un ecosistema pajonal y en zonas intervenidas con plantación de pinos y zanjas de infiltración. En tanto, los objetivos específicos fueron determinar el comportamiento de las variables climáticas de precipitación y temperatura durante el periodo de análisis; determinar las propiedades físicas de los suelos y su relación con el contenido de humedad; establecer la influencia de las variables climáticas, suelo y cobertura sobre el contenido de agua entre la plantación forestal-pajonal y zanjas de infiltración-pajonal. Además, estimar y comparar los componentes del balance hídrico entre la plantación forestal-pajonal y zanjas de infiltración-pajonal.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

2.1.1. Parcela de investigación Tayacoto (comparación plantación forestal-pajonal)

Se localiza a 20 km al este de la ciudad de Huaraz (9°29' S y 77°27' O, 3800 m s. n. m.), en la parte baja de la vertiente occidental de la cordillera Blanca (figura 1).

La pendiente en la zona donde se ubica esta parcela es compleja con un rango de 15 a 45 por ciento. La superficie del terreno presenta un manto gravo-pedregoso, fluvio-glaciérico y coluvio-diluvial, conformado por rocas de naturaleza granítica y granodiorítica.

El perfil del suelo es muy similar en cuanto a material parental, secuencia de horizontes, color, clase textural, pero diferente en grosor del epipedón (horizonte superficial) y pedregosidad. Sus rasgos climáticos se enmarcan en la zona de vida de bosque húmedo montano tropical (bh-MT), con estación lluviosa en verano (de diciembre a marzo), 600-1100 mm/año de precipitación anual; y 7°C a 13°C de biotemperatura media anual (Inrena, 1995).

La plantación forestal corresponde a *Pinus radiata* sembrado en 2010, que se encuentra asociado a pastos naturales, con predominancia de Poáceas (*Calamagrostis macrophylla*) y especies arbustivas, como *Baccharis peruviana* y *Senecio alatus*. Esta área de aproximadamente 5 hectáreas se encontraba clausurada con cerco eléctrico ganadero. El pajonal es un área libre, contigua a la parcela de pinos, con predominancia de las mismas especies de pastos y arbustos.

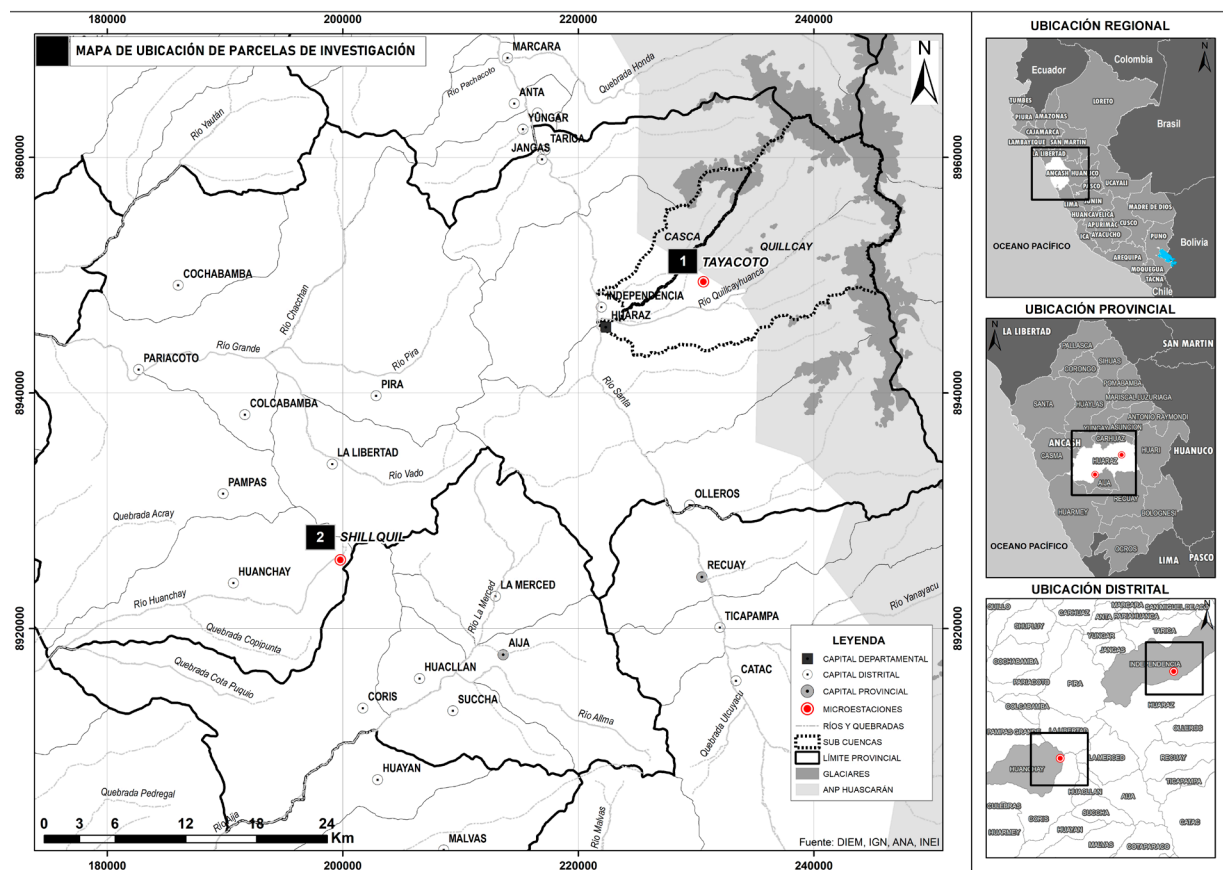


Figura 1. Mapa de ubicación de las parcelas de investigación.

2.1.2. Parcela de investigación Shillquil (comparación zanjas de infiltración-pajonal)

Se ubica a 58 km al oeste de la ciudad de Huaraz (9°42' S y 77°43' O, 4500 m s. n. m.), en la vertiente occidental de la cordillera Negra.

Los suelos provienen de un material parental coluvial volcánico, con una pendiente de 40 a 60 por ciento; con alto porcentaje de fragmentos gruesos en el perfil; alta permeabilidad; drenaje superficial e interno rápido; y con evidencias de erosión severa, por excesiva carga animal, reflejada además en su cobertura vegetal.

Los rasgos climáticos, según el Inrena (1995), se enmarcan en la zona de vida de paramo húmedo subandino tropical (ph-SaT), con estación lluviosa de diciembre a marzo, cuya precipitación anual varía de 300 a 600 mm/año y la biotemperatura media anual de 3°C a 7°C.

En esta zona se construyeron zanjas de infiltración de 40 cm de ancho y 40 cm de profundidad, separadas 10 m, en una superficie de 1,8 ha. En el borde inferior de las zanjas se estableció pasto *Phalaris sp.* Tanto el área de zanjas como el de pajonal se encuentran clausurados con cerco eléctrico ganadero y ocupan juntas, aproximadamente, 5 hectáreas. Asimismo, en el área dominan las especies de pastos naturales, como *Stipa mucronata* y *Calamagrostis longearistata*, ambas *Poaceae*, además de otras especies arbustivas (*Senecio collinus*).

2.2. Métodos y procedimiento

El desarrollo metodológico se ha basado en la medición y estimación de los componentes del balance hídrico del suelo a nivel diario, resaltando su función como reservorio a través de la estimación de su capacidad de almacenamiento; y generador de agua gravitacional susceptible de producir percolación, por su importancia como elemento con potencial de alcanzar niveles más profundos y alimentar el acuífero.

Para ello, se consideró que los puntos de evaluación, tanto para la comparación plantación forestal-pajonal como la de zanjas de infiltración-pajonal, se encontraran muy cercanos, para garantizar su exposición a las mismas condiciones meteorológicas. Además, que los suelos sean muy parecidos, con respecto a sus características físico-químicas. Con ello, se logró que el único factor de generación de cambios en el contenido de agua del suelo fuera el tipo de cobertura asociado o a la respectiva intervención.

2.2.1. Caracterización de suelos

Se realizó mediante la exploración del suelo a través de cinco calicatas, cada una ubicada en el mismo perfil donde se instalaron microestaciones *WatchDog* 1000 con sensores de humedad. En el sector Tayacoto, dos calicatas dentro del área con plantación de *Pinus radiata* (con manejo y sin manejo). Otra, en un área colindante de pajonal. En el sector Shillquil, una debajo del área implementada con zanjas de infiltración. Otra fuera de ella en el área contigua de pajonal. Así, se relacionaron los valores de humedad volumétrica del suelo (θ_v) registrados por los sensores con las propiedades del perfil. Asimismo, de las calicatas se obtuvo el registro detallado de las características físicas y morfológicas del suelo y se tomaron las muestras correspondientes para su análisis físico-químico.

Para obtener datos de la θ_v , se utilizaron sondas de capacitancia SM 100 Spectrum. Para la comparación plantación forestal-pajonal, se determinó el contenido de agua en el suelo a 20, 60 y 100 cm de profundidad; y, para el caso de zanjas de infiltración-pajonal, a 20 y 70 cm, debido a que, por debajo de esta profundidad, no existía suelo, sino un manto de guijarro pedregoso de origen coluvial, que impidió la lectura de datos mediante la sonda de capacitancia.

Otro punto estudiado y relacionado con el agua en el suelo ha sido la humedad a capacidad de campo (θ_{cc}), debido a su importancia por ser el límite superior que define su función como reservorio y cuyo conocimiento es fundamental para comprender los procesos hídricos que ocurren en el suelo.

La θ_{cc} se estimó de manera indirecta a partir del modelamiento de parámetros hidráulicos con el *software* RETC, que tiene una función denominada Rosseta Lite (V1.1), que implementa funciones de pedo-transferencia (FPT) para predecir las curvas de retención y conductividad hidráulica del suelo (Van Genuchten *et al.*, 2009). El ajuste de parámetros se realizó mediante un análisis de redes neuronales para mejorar las predicciones de las FPT empíricas. Los modelos matemáticos que se encuentran cargados en el RETC y que han sido utilizados para estimar los parámetros hidráulicos corresponden a Van Genuchten (1980) y Mualem (1976).

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad K(h) = K_s \frac{[1 - (ah)^{n-1}(1 + (ah)^n)^{-m}]^2}{[1 + (ah)^n]^{ml}}$$

Donde $\theta(h)$ representa la curva de retención ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) en función de la altura de presión h (cm); θ_r y θ_s , a la humedad residual y de saturación ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); α , parámetro empírico; n y m , parámetros de ajuste de la curva; K_s , la conductividad hidráulica en estado de saturación (cm/d); l , un parámetro de la conectividad de poros; y $m = 1 - 1/n$.

A partir de los percentiles de las fracciones arena, limo y arcilla de cada horizonte de suelo, el programa realizó la predicción de los parámetros hidráulicos θ ; θ_s , α , n y K_s . También simuló las curvas de retención, de las cuales se obtuvo la θ_{CC} , considerando la tensión de 33 kPa (Bejar *et al.*, 2020; Van Genuchten *et al.*, 2009; Pineda y Viloria, 2011; Damiano y Taboada, 2000), que —para efectos prácticos— se tomó el valor de ~ 330 cm de columna de agua.

2.2.2. Caracterización de la cobertura

Para la evaluación de la vegetación, asociada a la plantación de pinos y la del pajonal, se estableció subparcelas de $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, tomando como centro la posición de las microestaciones *WatchDog* 1000. Como herramienta, se empleó un cuadrante de fierro corrugado de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, dividido en 100 subcuadrantes de $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$. En la subparcela, se ubicaron cinco puntos de evaluación, colocando el cuadrante en los lugares con vegetación representativa. Posteriormente, se realizó el conteo de estos, tomando en cuenta la presencia de suelo desnudo, roca o piedra, vegetación, mantillo y musgo.

Para los pinos se establecieron, también, dos parcelas de $30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, en las zonas con manejo forestal y sin él, donde se evaluaron todos los árboles, considerando los parámetros dasométricos de altura, diámetro a la altura de pecho (DAP), diámetro de copa y área de cobertura.

2.2.3. Caracterización climática

Para el análisis de precipitación y temperatura, se utilizaron series históricas de datos de las microestaciones *WatchDog* 1000, instaladas en los sectores de Tayacoto (TY-E1) y Shillquil (SH-E1). Estas microestaciones se colocaron en zonas abiertas sin obstáculos y sobre una superficie de cobertura del suelo similar y cercana a las áreas de estudio. Las variables, medidas de manera directa y continua, a nivel horario, fueron la precipitación y la temperatura del aire (media, mínima y máxima).

La base de datos revisada y consistente se almacenó y trabajó en el *software* Hydraccess, a partir del cual se generaron reportes, a nivel diario y mensual. El periodo de evaluación, para la comparación plantación forestal-pajonal, fue del 1 de julio de 2018 al 30 de junio de 2020; y, para zanjas de infiltración-pajonal, del 6 de octubre de 2017 al 18 de setiembre de 2018.

Los datos de precipitación diaria fueron sometidos al test de Grubbs, para la identificación de posibles datos aberrantes u *outliers* (Barnett y Lewis, 1984). El estadístico G se verificó con el G crítico, según el tamaño de la muestra y el nivel de significancia seleccionado ($\alpha = 0,05$) y se realizó una prueba de hipótesis.

La precipitación efectiva (*PE*) fue estimada como la diferencia entre la precipitación total (*Pt*) y la escorrentía (*ES*), entendiéndose como *PE* aquella fracción de la *Pt* que ingresa al suelo y puede ser aprovechada por las plantas (FAO, 1978). La *ES* se estimó con el método del Número de Curva (*NC*), desarrollado por el *Soil Conservation Service* (SCS) de Estados Unidos (Chow *et al.*, 1994). Este método se basa en la estimación directa de la *ES* de una lluvia a partir del uso de la tierra, medidas de conservación empleadas, estado de compactación del terreno en relación con su uso, capacidad de infiltración del suelo en atención a su textura y, finalmente, condición previa de humedad del suelo. La *ES* se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$ES = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

Donde: *ES* representa la escorrentía (mm); *P*, la lluvia total acumulada (mm); y $S = 254(100/NC-1)$, en mm.

Con la información de la caracterización del suelo y cobertura se eligió los *NC* adecuados para cada una de las zonas estudiadas. La condición previa de humedad del suelo se determinó a partir de los datos de precipitación diaria, considerando una lluvia antecedente de cinco días.

Para el área de pinos sin manejo (sin poda), no se consideró como variable de análisis la *ES*, debido a que los valores de cobertura de copa eran importantes y, además, con buenas condiciones de cobertura vegetal y mantillo asociado a su superficie. Bajo estas condiciones, el factor de interceptación (*I*) del dosel de los árboles determina la cantidad de agua de lluvia que llega al suelo, por lo que fue mucho más importante estimar, mediante las aproximaciones propuestas por Gómez *et al.* (2019), la precipitación directa (*Pd*) y el escurrimiento fustal (*Ef*), para considerar la suma de estos valores como *PE*. En el área de pinos con manejo (con poda) fue necesario estimar la *ES*, debido a que la cobertura de copa de los árboles ocupaba un porcentaje mucho menor y presentaba zonas con suelos desnudos.

En la zona con zanjas de infiltración (sector Shillquill), se consideró que se retenía toda el agua de lluvia y, por lo tanto, no existía *ES*. Entonces, la *PE* se consideró igual al total de la precipitación observada. Para estimar la evapotranspiración de referencia (*ET₀*), se utilizó el método de Penman-Monteith, con datos de TY-E1 y SH-E1, tomando en cuenta las recomendaciones propuestas en Allen *et al.* (2006), cuando no existen datos de radiación solar, presión de vapor y velocidad del viento. Las ecuaciones utilizadas fueron:

$$e_a = e^o(T_{min}) = 0,611 \exp \left[\frac{17,27T_{min}}{T_{min} + 237,3} \right]$$

$$R_s = K_{RS} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a$$

Donde: e_a es la presión real de vapor (kPa); $e^o(T_{min})$, la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima diaria (kPa); R_s , la radiación solar o de onda corta ($MJ\ m^{-2} \cdot día^{-1}$); K_{RS} , el coeficiente de ajuste (0,16); R_a , la radiación extraterrestre ($MJ\ m^{-2} \cdot día^{-1}$); T_{max} , la temperatura máxima; y T_{min} , la temperatura mínima.

Para la velocidad de viento, se consideraron valores entre $2\ m \cdot s^{-1}$ y $3\ m \cdot s^{-1}$. La estimación de la *ET₀* se realizó utilizando el software *Eto Calculator*.

2.2.4. Balance hídrico del suelo

Se tomó como base el modelo propuesto por Thornthwaite y Mather (Steenhuis y Van der Molen, 1986), haciéndose algunas precisiones importantes, como no haber considerado algunos supuestos referidos a los valores de precipitación efectiva (*PE*) y almacenamiento inicial del suelo (*ST*), que fueron estimados y medidos directamente en campo.

Las consideraciones sobre las cuales se ha sustentado el balance hídrico, y otras modificaciones en el cálculo, por haber tenido un monitoreo diario de las variaciones del contenido de agua en el suelo fueron:

- La capacidad de almacenamiento máxima de agua del suelo (ST_x) ha estado definida por la capacidad de campo (θ_{cc}). El análisis de la humedad se realizó a diversas profundidades, definiendo varias capas, incluida la zona radicular de la vegetación (tabla 2). La humedad se estimó con la siguiente relación (Vásquez *et al.*, 2017):

$$La = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\theta_i(\%)}{100} \right] * Prof_i$$

Donde: *La* es la humedad total (mm); θ_i , el contenido de humedad o humedad a capacidad de campo de la capa *i* (Vol %); *Prof_i*, el espesor de la capa *i* (mm); *n*, el número de capas en que se divide el perfil de suelo analizado.

- En los días que se produjo más entradas que salidas ($P > ET_0$), el agua sobrante pasó a aumentar las reservas del suelo (ST_i); y, cuando las salidas fueron mayores que las entradas, se redujo la ST_i . La variación de la reserva del suelo (ΔST) fue calculada como la diferencia entre la ST_i y la ST_{i-1} .
- Si el suelo tiene una capacidad máxima de retención de agua (ST_x), el agua que llega en exceso se pierde por percolación (*Per*). La *Per* fue calculada como:

$$P_{er} = \sum_{i=1}^n La - ST_x \quad Si\ P_{er} < 0 = 0$$

- En los días del año en que $P > ET_0$ se asumió que la evapotranspiración (*ET*) era igual a la *ET₀*; si $P < ET_0$, entonces $ET_0 > ET$. La *ET*, para estos casos, fue calculada como la diferencia de $PE - (Per + \Delta ST)$.

La discrepancia en el cierre del balance hídrico del suelo se realizó comparando los valores diarios de sus componentes, según la siguiente relación:

$$Pt = ES + ET + P_{er} + \Delta ST$$

Donde: *Pt* es la variable observada; *ES*, una variable modelada; y *ET*, *Per* y ΔST , variables calculadas según datos de humedad del suelo.

A continuación, se describen los índices estadísticos utilizados.

a. Relación de la desviación estándar de las observaciones RMSE (RSR)

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados, siendo el valor observado *Pt. Singh et al.*, citados por *Moriassi et al. (2007)*, presentan una forma para calificar lo que se considera un RMSE bajo en función de la desviación estándar de las observaciones (RSR). Cuanto menor sea el RSR, menor será el RMSE y mejor será el rendimiento de la simulación del modelo.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y})^2}}$$

b. Sesgo porcentual (PBIAS)

El sesgo porcentual (PBIAS) mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grandes o pequeños que los valores observados. Su valor óptimo es cero, que indica una simulación precisa del modelo. Según *Gupta et al. (1999)*, los valores positivos indican sesgo de subestimación y los negativos, sesgo de sobreestimación del modelo.

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$

2.2.5. Análisis estadístico comparativo

El análisis estadístico se ha realizado, básicamente, entre los valores encontrados de *Per*, *ST* y *ET* entre plantación forestal-pajonal y zanjas de infiltración-pajonal, para determinar si existen diferencias estadísticas en estos valores y si estas son significativas.

Se utilizó las pruebas t de Student, para el caso de muestras independientes con distribución normal y la prueba U de Mann-Whitney, no paramétrica, que contrasta si dos poblaciones o muestras independientes son equivalentes en su posición y no supone normalidad.

Por otro lado, se ha realizado una prueba estadística para evaluar la magnitud de las diferencias encontradas o tamaño del efecto, pues, al aplicar una prueba de significancia y establecer el *p-valor*, este solo puede proporcionar información sobre la presencia o ausencia de esta diferencia, dejando de lado su importancia. *Tomczak y Tomczak (2014)* mencionan varios métodos, pero los más usuales tanto para pruebas paramétricas como no paramétricas son:

a. Paramétricas

$$d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2}}$$

Donde: \bar{X}_1 es la media de la muestra 1; \bar{X}_2 , la media de la muestra 2; σ_1^2 , la desviación estándar de la muestra 1; σ_2^2 , la desviación estándar de la muestra 2; d, el tamaño del efecto propuesto por Cohen (1988).

b. No paramétricas

$$r = \left| \frac{Z}{\sqrt{N}} \right|$$

Donde: Z es el valor estandarizado para el U de Mann-Whitney; y N, el número total de observaciones en las que se basa Z. Efecto pequeño de 0,1 – 0,3; efecto mediano de 0,3 – 0,5 y efecto grande mayor o igual 0,5.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de suelos

En general, los suelos de las parcelas de investigación Tayacoto (TY) y Shillquil (SH) son morfológicamente suelos de incipiente desarrollo genético, de perfil tipo A/C y A/AC/Cr, respectivamente.

Se ha observado que la humedad del suelo a capacidad de campo (θ_{cc}) ha sido muy sensible a las diferencias en los valores de los percentiles de arena, limo y arcilla en suelos catalogados en una misma clase textural (tabla 1). Por ejemplo, entre TY-04/A y SH-03/A, pertenecientes a suelos con pajonal y franco arenosos, se observa una diferencia en los valores de θ_{cc} básicamente por diferencias en las cantidades de arena y arcilla; que, finalmente, ha determinado que estos dos horizontes de suelo tengan distintas capacidades de almacenamiento (ST_x), a pesar de tener la misma clase textural.

Tabla 1. Contenido de θ_{cc} y ST_x con base en los percentiles de arena, limo y arcilla Piuray Ccorimarca

Perfil	Horizonte	Arena %	Limo %	Arcilla %	θ_{cc} (cm ³ cm ⁻³)	ST_x (mm)
TY-02 Pino con poda	A	56	34	10	0,2012	222
	C	50	26	24	0,2334	
TY-03 Pino sin poda	A	56	36	8	0,2003	217
	C	54	24	22	0,2253	
TY-04 Pajonal	A	60	24	16	0,2063	194
	C	60	32	8	0,1884	
SH-02 Zanjas	A	64	28	8	0,1772	135
	AC	52	30	18	0,2221	
	Cr	-	-	-	-	
SH-03 Pajonal	A	68	24	8	0,1664	112
	AC	72	20	8	0,1526	
	Cr	-	-	-	-	

3.2. Caracterización de la cobertura

El área de estudio Tayacoto presentó similares valores de cobertura vegetal con importantes cantidades de mantillo en los tres puntos de evaluación. Los porcentajes de pedregosidad observados en el área de estudio fueron congruentes con el origen fluvio-glaciárico y coluvio-diluvial de los suelos. La diferencia más importante se dio en los valores de suelo desnudo, siendo mayor en TY-02 (pino con poda) que en TY-04 (pajonal) y no existiendo en TY-03 (pino sin poda).

En el sector Shillquil, la superficie vegetal fue ligeramente mayor en SH-03 (pajonal) que en SH-02 (zanjas). La mayor diferencia se evidenció en la superficie ocupada por el suelo desnudo, teniendo valores altos en la zona con zanjas de infiltración, situación que se asocia al movimiento de suelo propio del establecimiento de esta práctica, que, sumado a la baja superficie de vegetación, propia del lugar, hace que ocupe un área significativa respecto a los otros parámetros evaluados. El gran porcentaje de pedregosidad superficial estuvo asociado también al origen de los suelos de tipo coluvial volcánico, principalmente en SH-03.

Respecto a los parámetros dasométricos del sector Tayacoto, en promedio, la altura de los pinos en TY-02 fue de 3,0 m, IC del 95 por ciento [2,79; 3,22], mientras que en TY-03 de 4,15 m, IC del 95 por ciento [3,96; 4,34]. El área basal según DAP fue, en promedio, en TY-02, de 23,85 cm²; y, en TY-03, de 74,31 cm² con IC del 95 por ciento [19,72; 27,98] y [52,10; 96,52], respectivamente.

Sobre el área de cobertura de copa promedio, el mayor valor, al 95 por ciento de confianza, lo presentó TY-03, con 5,39

m² [4,02; 6,75], cubriendo el 50,3 por ciento (301,6 m²) del área total de la subparcela de evaluación. TY-02 presentó un promedio de cobertura de copa mucho más bajo, 0,89 m² [0,72; 1,07], cubriendo solo el 10,4 por ciento (62,5 m²) de los 600 m² evaluados.

3.3. Caracterización climática

3.3.1. Precipitación

La variación de la precipitación en el sector Tayacoto registrada con TY-E1 presentó el siguiente comportamiento:

- En el periodo 2018-2019 varió de 0,4 mm (julio de 2018) a 163,3 mm (marzo de 2019), concentrándose de noviembre de 2018 a abril de 2019; la precipitación total del periodo fue de 930 mm.
- Para el periodo 2019-2020, la precipitación varió de 0,0 mm (agosto y setiembre de 2019) a 206,4 mm (diciembre del mismo año), concentrándose de diciembre de 2019 a marzo de 2020; la precipitación total del periodo fue de 725 mm.

Para el caso del sector Shillquil, la precipitación registrada en SH-E1 mostró una variación de 175,9 mm (marzo) a 0,4 mm (julio de 2018), concentrándose de diciembre a abril. La precipitación total del periodo de estudio fue de 668 mm. En ninguno de los casos se registraron *outliers* mediante el test de Grubbs.

3.3.2. Temperatura

En el sector Tayacoto, la temperatura máxima media mensual, para el periodo 2018-2019, varió desde 21,9 °C (mayo de 2019) a 17,5 °C (diciembre de 2018), con un valor medio de 20,0 °C. La temperatura mínima media mensual osciló de 0,1 °C (julio de 2018) a 4,8 °C (febrero de 2019), con un valor medio de 2,3 °C. Para el periodo 2019-2020, la temperatura máxima media mensual varió de 21,1 °C (agosto de 2019) a 15,4 °C (diciembre del mismo año), con un valor medio de 17,6 °C. La temperatura mínima media mensual fluctuó de 1,5 °C (agosto de 2019) a 4,8 °C (febrero de 2020), con un valor medio de estudio de 3,1 °C. Se registró días más cálidos de enero a marzo y las más bajas temperaturas, de junio a setiembre, que coincide con el periodo de lluvias y estiaje, respectivamente.

La temperatura máxima media mensual para el sector Shillquil varió de 12,9 °C (noviembre de 2017) a 7,9 °C (marzo de 2018), con un valor medio de 10,3 °C. La temperatura mínima media mensual fluctuó de -1,6 °C (julio de 2018) a 1,3 °C (marzo de 2018), con un valor medio de 0,0 °C. Al igual que en el sector Tayacoto, se observa un comportamiento estacional de la temperatura coincidente con los meses de lluvias (días cálidos) y estiaje (días fríos).

3.3.3. Precipitación efectiva (PE)

La cantidad de PE depende de factores meteorológicos, edafológicos, topográficos y de cobertura (FAO, 1978). Factores como la cantidad y frecuencia de las lluvias; la humedad inicial del suelo; el umbral de escorrentía y la cobertura han tenido influencia directa en los valores estimados en cada punto de evaluación.

En la tabla 2, se muestran los valores de PE y ES estimados por periodo evaluado, donde se observa que en los puntos de estudio del sector Tayacoto son mayores para el periodo de lluvia 2018-2019 que para el 2019-2020, resultado que puede atribuirse a la disminución de la precipitación total entre este último y el primero, del orden de 205 mm. Por otro lado, como ya se mencionó, para el sector Shillquil y SH-02 se ha considerado toda la precipitación observada como PE.

Tabla 2. Valores de PE y ES estimados con el método SCS

Lugar	Periodo	PE (mm)	PE (%)	ES (mm)	ES (%)
TY-02	2018-2019	656,2	70,8	270,5	29,2
	2019-2020	487,0	66,9	241,3	33,1
TY-04	2018-2019	560,0	60,4	366,7	39,6
	2019-2020	407,5	56,0	320,8	44,0
SH-02	2017-2018	668,2	100,0	0,0	0,0
SH-03	2017-2018	401,5	60,1	266,7	39,9

3.3.3. Evapotranspiración de referencia (ET_0)

En el sector Tayacoto, la evapotranspiración de referencia (ET_0) presentó, para el periodo 2018-2019, un valor de 1567 mm.año⁻¹ con una media diaria a un nivel de confianza de 95 por ciento de 4,29 mm.d⁻¹ [4,23; 4,36]; y, para el 2019-2020, 1376 mm.año⁻¹, con una media diaria de 3,76 mm.d⁻¹ [3,69; 3,82], al mismo nivel de confianza.

En Shillquil se estimó como 969,5 mm.año⁻¹; a un nivel de confianza del 95 por ciento, la ET_0 media diaria fue de 2,79 mm.año⁻¹ [2,72; 2,85].

3.4. Balance hídrico

El balance hídrico del suelo se realizó a nivel diario, pero, para mostrar los resultados, se acumuló los valores de los principales componentes a nivel mensual. En la tabla 3 se presentan los resultados para Shillquil y en la tabla 4, para Tayacoto.

Se ha usado la desviación estándar de las observaciones (RSR) y el sesgo porcentual (PBIAS) para evaluar estadísticamente la discrepancia en el cierre del balance hídrico del suelo a nivel diario (tabla 5), obteniéndose valores aceptables.

Tabla 3. Componentes del balance hídrico para el sector Shillquil

Mes	P (mm)	Componentes SH-02 (mm)				Componentes SH-03 (mm)			
		ES	ET	P _{er}	Δ ST	ES	ET	P _{er}	Δ ST
Oct-17	52.8	0.0	33.2	0.0	26.3	0.0	27.0	0.0	5.4
Nov-17	31.2	0.0	38.7	0.0	-9.6	2.9	31.7	0.0	-14.0
Dic-17	62.9	0.0	48.4	0.0	9.0	0.3	46.5	0.0	14.8
Ene-18	148.4	0.0	66.4	68.0	18.6	57.2	51.7	56.2	15.8
Feb-18	85.7	0.0	54.2	8.2	6.5	57.0	41.6	15.1	-5.7
Mar-18	175.9	0.0	61.9	97.4	10.9	139.3	51.9	52.0	8.4
Abr-18	82.8	0.0	62.4	3.7	-24.2	2.7	49.2	1.3	-4.4
May-18	23.6	0.0	47.8	0.0	-25.0	5.7	21.7	0.0	-8.2
Jun-18	1.4	0.0	23.9	0.0	-21.3	0.4	12.6	0.0	-10.0
Jul-18	0.4	0.0	22.3	0.0	-12.4	0.1	22.7	0.0	-22.2
Ago-18	0.7	0.0	16.2	0.0	-11.3	0.2	14.3	0.0	-11.8
Set-18	2.4	0.0	11.1	0.0	-8.3	0.8	11.1	0.0	-9.4

Tabla 4. Componentes del balance hídrico para el sector Tayacoto

Mes	P (mm)	Componentes TY-02 (mm)				Componentes TY-03 (mm)				Componentes TY-04 (mm)			
		ES	ET	P _{er}	Δ ST	ES	ET	P _{er}	Δ ST	ES	ET	P _{er}	Δ ST
Jul-18	0.4	0.0	28.1	0.0	-27.7	0.0	19.4	0.0	-14.9	0.0	25.9	0.0	-30.7
Ago-18	7.0	0.0	26.3	0.0	-16.5	0.0	16.0	0.0	-6.6	0.0	21.0	0.0	-16.7
Set-18	19.4	0.0	30.0	0.0	-5.7	0.0	26.0	0.0	-4.6	0.0	25.2	0.0	-12.2
Oct-18	97.7	0.0	66.9	0.0	39.3	0.0	63.4	0.0	14.6	1.7	52.0	0.0	37.6
Nov-18	117.9	25.1	96.4	0.0	4.4	0.0	78.4	0.0	9.4	46.0	69.3	16.7	13.8

Mes	P (mm)	Componentes TY-02 (mm)				Componentes TY-03 (mm)				Componentes TY-04 (mm)			
		ES	ET	P _{er}	ΔST	ES	ET	P _{er}	ΔST	ES	ET	P _{er}	ΔST
Dic-18	90.7	0.2	79.1	0.0	6.8	0.0	70.8	0.0	16.1	4.3	71.3	0.0	-1.9
Ene-19	148.4	44.5	110.3	0.0	8.8	0.0	110.6	0.0	23.7	70.5	82.1	0.0	8.3
Feb-19	136.4	79.9	76.1	0.0	24.9	0.0	95.0	0.0	68.0	99.2	65.4	12.7	3.1
Mar-19	163.3	119.2	105.6	0.0	6.1	0.0	132.5	0.0	40.0	136.4	64.9	66.1	4.7
Abr-19	111.0	1.6	93.6	0.0	12.9	0.0	122.9	0.0	-27.8	8.6	50.9	74.4	-8.3
May-19	34.5	0.0	52.8	0.0	-20.2	0.0	101.7	0.0	-55.5	0.0	47.6	0.0	-15.9
Jun-19	3.2	0.0	44.0	0.0	-40.4	0.0	26.9	0.0	-19.8	0.0	23.2	0.0	-24.7
Jul-19	0.4	0.0	15.4	0.0	-6.4	0.0	4.4	0.0	-1.7	0.0	13.1	0.0	-5.3
Ago-19	0.0	0.0	10.0	0.0	-8.2	0.0	7.0	0.0	-5.5	0.0	25.4	0.0	-32.3
Set-19	0.0	0.0	5.7	0.0	5.7	0.0	5.1	0.0	-1.2	0.0	10.8	0.0	-5.7
Oct-19	16.1	0.0	21.0	0.0	16.6	0.0	17.1	0.0	3.2	0.1	15.6	0.0	22.2
Nov-19	74.6	6.0	59.4	0.0	10.5	0.0	69.2	0.0	1.1	17.5	57.0	0.0	5.1
Dic-19	206.4	29.9	99.8	0.0	51.8	0.0	127.0	0.0	47.2	54.6	81.9	22.2	44.0
Ene-20	73.1	35.8	74.6	0.0	-8.8	0.0	99.8	0.0	-29.4	47.5	63.1	0.0	-13.5
Feb-20	134.8	85.4	81.4	0.0	6.6	0.0	89.5	0.0	13.3	103.1	69.0	10.4	-5.8
Mar-20	113.6	84.1	88.5	0.0	21.1	0.0	101.2	0.0	-15.7	95.8	62.3	0.0	21.7
Abr-20	46.5	0.0	71.9	0.0	-34.6	0.0	51.5	0.0	-9.6	0.1	56.2	0.0	-33.2
May-20	59.0	0.0	60.9	0.0	-3.1	0.0	50.9	0.0	-1.7	2.0	44.6	0.0	-0.6
Jun-20	0.6	0.0	25.2	0.0	-22.8	0.0	7.2	0.0	-3.9	0.1	28.3	0.0	-33.4

Tabla 5. Desempeño del cierre del balance hídrico del suelo

Lugar	RSR	PBIAS
TY-02	B	S
TY-03	MB	MB
TY-04	B	B
SH-02	MB	MB
SH-03	B	MB

Desempeño: S (satisfactorio), B (bueno) y MB (muy bueno).

3.5. Análisis estadístico comparativo

Este análisis se realizó para establecer las diferencias estadísticas existentes entre los valores diarios de *Per*, *ST* y *ET* en las áreas de estudio.

3.5.1. Percolación (*Per*)

No se efectuó el análisis estadístico para *Per* en el sector Tayacoto, debido a que solo el pajonal presentaba valores

de esta variable, siendo entonces evidente su diferencia con los puntos de evaluación correspondientes a la plantación de pinos (figuras 2-4).

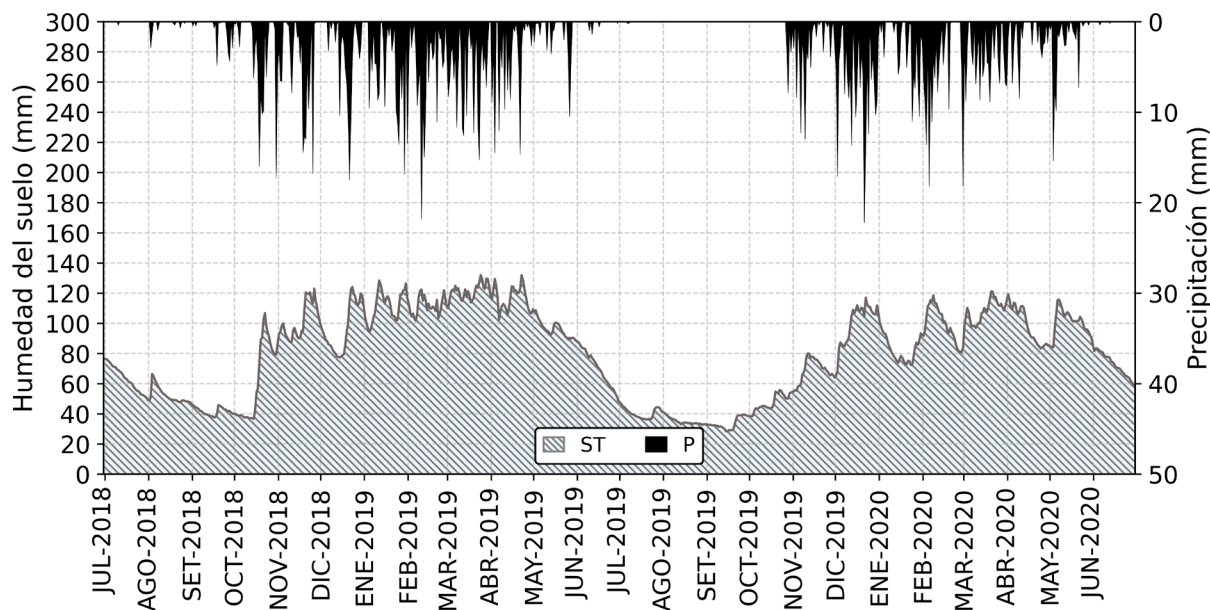


Figura 2. Variación del almacenamiento en TY-02

La ausencia de agua gravitacional o percolación (*Per*) en los puntos de evaluación asociados a la plantación de pinos se ajustan a lo observado por Huber *et al.* (2007), a través de estudios realizados en Chile, donde se concluye que los valores de percolación en plantaciones de *Pinus radiata* pueden ser muy variables en función de la edad, el manejo y la condición de sitio, encontrando valores entre 0 y 54 por ciento. Lee, Papakyriakou y McCaughey, citados por Echeverría *et al.* (2007), indican, también, que el mayor consumo hídrico y la menor cantidad de agua de percolación estarían asociados a los bosques.

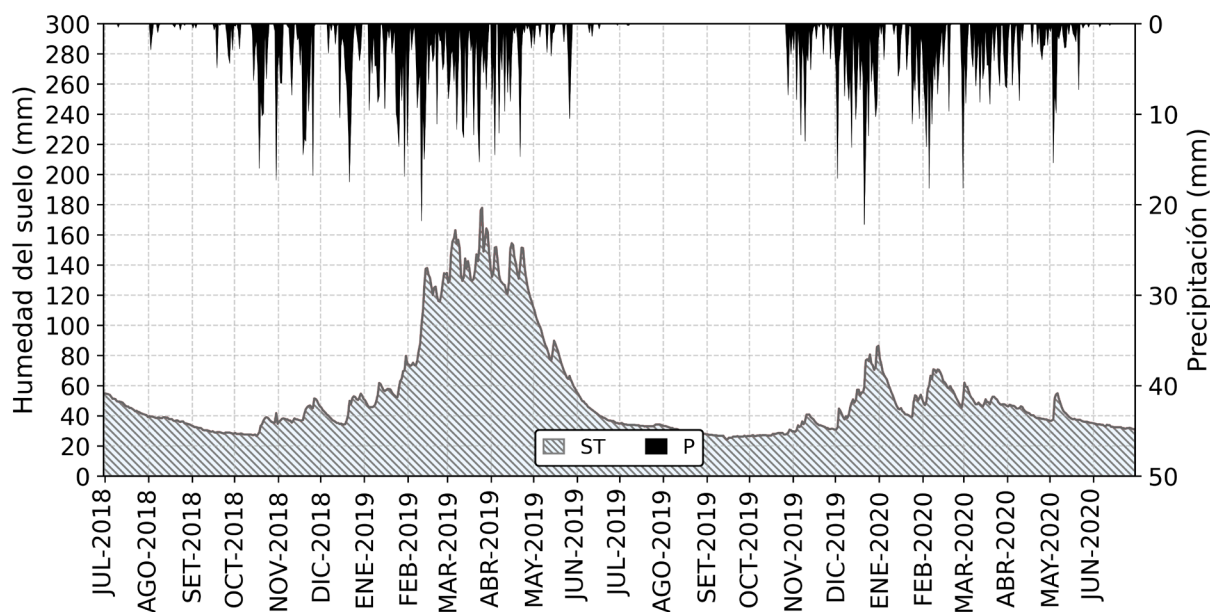


Figura 3. Variación del almacenamiento en TY-03

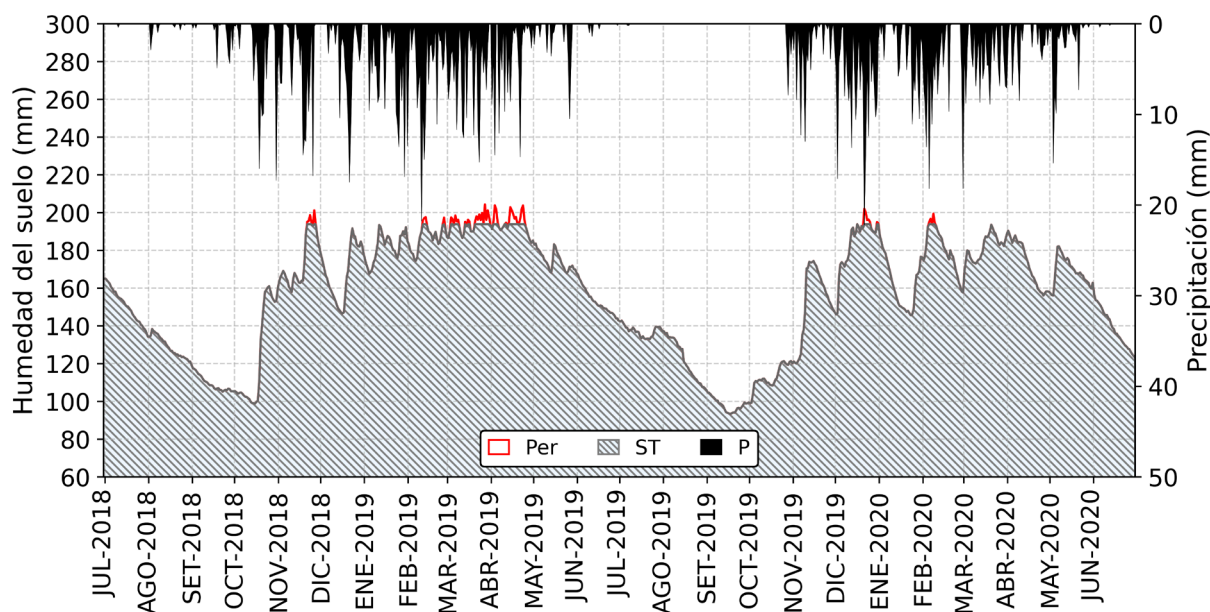


Figura 4. Variación del almacenamiento en TY-04

Por otro lado, la percolación (*Per*) se concentra en TY-04 (pajonal), principalmente, en los meses más húmedos del periodo 2018-2019, con 170 mm acumulados, que, si se escala a una superficie de referencia de una hectárea, equivaldría a 1700 m³/ha. No ocurre lo mismo para el periodo 2019-2020, donde se evidencia que la disminución de la precipitación tuvo influencia en la humedad del suelo, de tal manera que no pudo llegar a su máxima capacidad de almacenamiento, ocasionando una disminución drástica de la *Per* (33 mm o 330 m³/ha). Al respecto, Huber *et al.* (1985) y Echeverría *et al.* (2007) observaron en sus investigaciones que las mayores tasas de percolación correspondieron a las de pradera nativa, en comparación con una plantación de *Pinus radiata* y bosque de roble-olivillo, siendo congruente estos resultados con los obtenidos en el presente estudio.

Para el sector Chillquil (figuras 5-6), no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($t(54) = 1,74$; $p = 0,087$; $d = 1,60$; $d \text{ Cohen} = 0,43$; IC 95% [-0,24; 3,44]) en los valores de *Per* diaria entre SH-02 ($M = 5,37$; $DE = 4,45$) y SH-03 ($M = 3,77$; $DE = 2,83$). Se evidenció la presencia de percolación durante los meses húmedos, siendo para SH-02 (zanja de infiltración), 177 mm; y 125 mm, para SH-03 (pajonal). Es importante resaltar que la mayor cantidad de percolación de SH-02 ocurrió a pesar de que el suelo tenía una mayor capacidad de almacenamiento, situación que podría evidenciar que esta práctica es un medio que mejora la infiltración durante la época lluviosa. Sin embargo, es importante puntualizar que, en SH-03, existe un porcentaje de agua que no ingresa al suelo y se pierde por *ES*, haciendo que la *PE* sea menor. Esta situación hace suponer que si se mejoraran las condiciones de cobertura (mayor porcentaje de vegetación), podría tener un efecto positivo en las tasas de infiltración y *PE* y, por tanto, aumentaría los valores de *Per*.

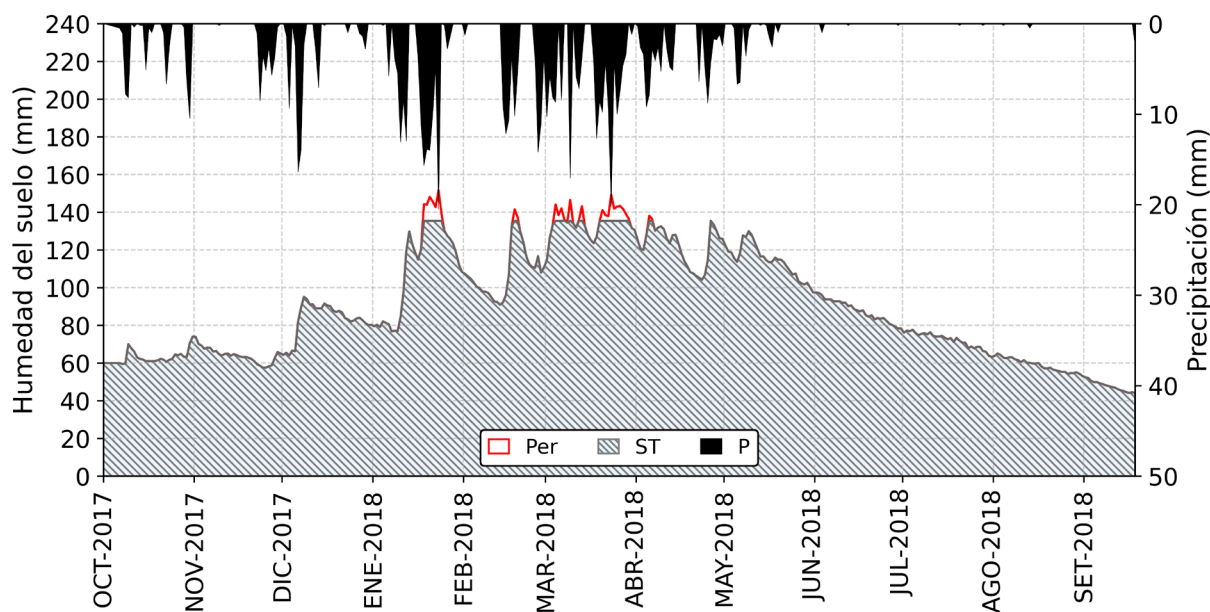


Figura 5. Variación del almacenamiento en SH-02

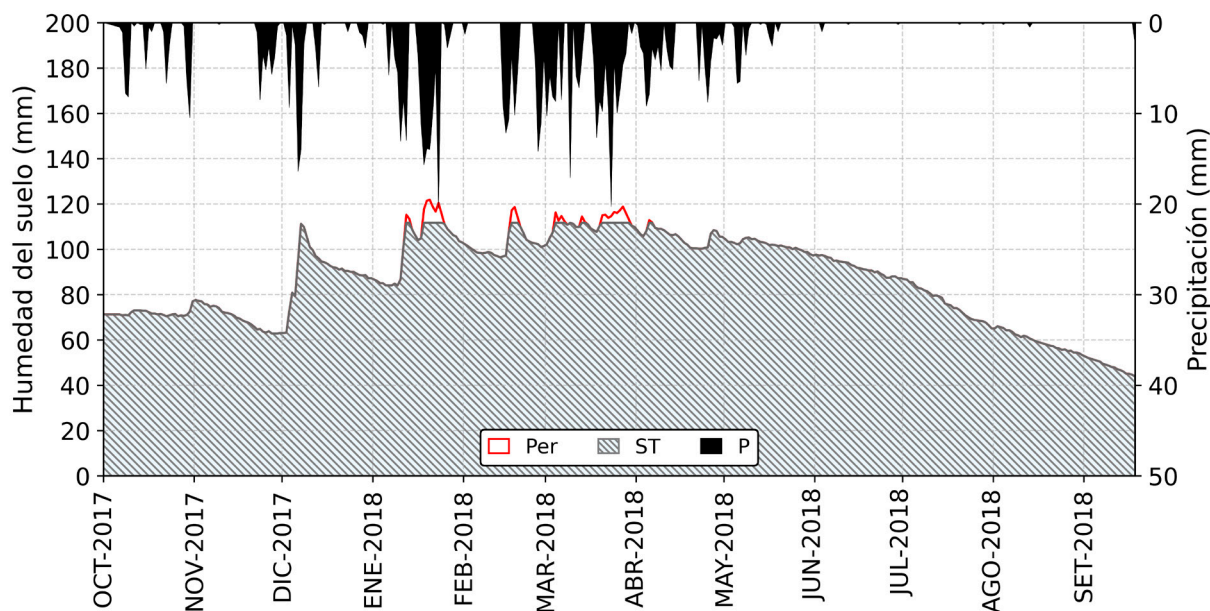


Figura 6. Variación del almacenamiento en SH-03

3.5.2. Almacenamiento (ST)

El almacenamiento mostró diferencias estadísticamente significativas durante la época de estiaje con un efecto grande ($r = 0,56$), donde la puntuación de TY-02 (Mdn = 51,85; Rango = 87,40) fue mayor que la de TY-03 (Mdn = 33,90; Rango = 85,74); $U = 24216$; $p < 0,001$).

Durante la época lluviosa se encontraron las mismas diferencias, con un efecto un poco más bajo que el periodo de estiaje en el rango de mediano ($r = 0,48$), siendo también la puntuación mayor en TY-02 (Mdn = 105,95; Rango = 76,95) que en TY-03 (Mdn = 51,00; Rango = 148,56); $U = 29184$; $p < 0,001$). El descenso en el efecto podría estar indicando que durante esta época las diferencias en el almacenamiento son algo menores respecto al periodo de estiaje.

Al resultar TY-02 con la mejor puntuación, se comparó con TY-04 (Mdn = 134,41; Rango = 90,21), con diferencias estadísticamente significativas ($U = 1783,5$; $p < 0,001$) a favor de este último con un efecto muy grande, con un valor de $r = 0,84$ en el periodo de estiaje.

Durante la época lluviosa ocurrió la misma situación, pero con un efecto algo mayor ($r = 0,86$), pero menor que el esperado, donde TY-04 presentó, también, la mejor puntuación (Mdn = 181,95; Rango = 73,80); $U = 213$; $p < ,001$). El pequeño incremento del efecto puede deberse a que en el periodo húmedo el suelo en el pajonal llega por un tiempo más prolongado a su capacidad máxima de almacenamiento o muy cerca de este valor.

En la figura 7 se compara el comportamiento del almacenamiento durante el periodo de estudio, donde es evidente las diferencias entre los valores encontrados en TY-02 y TY-04.

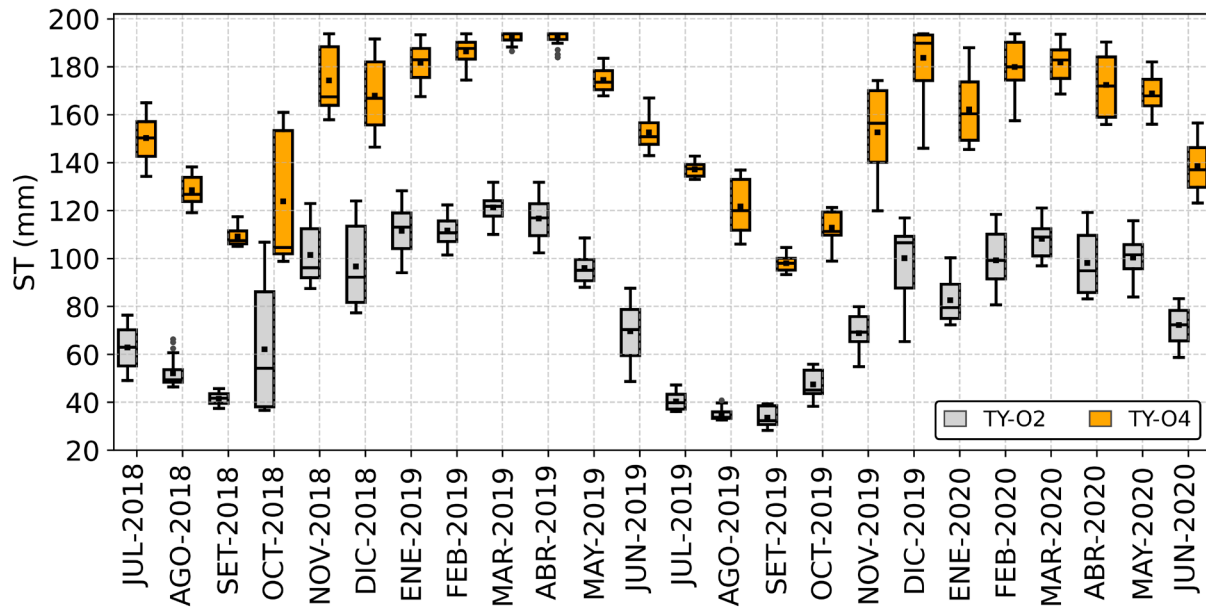


Figura 7. Comparación de la variación del almacenamiento entre TY-02 y TY-04

Se ha observado que el almacenamiento en el pajonal es, considerablemente, mayor que el de la plantación de pinos, pues la profundidad del sistema radicular de esta cubierta vegetal permite restringir la desecación del suelo, principalmente, en la superficie; mientras que, en la plantación de pinos, su profundidad de enraizamiento es el factor principal que determina la menor humedad disponible en el perfil edáfico (Huber *et al*, 1985).

En el sector Shillqui, existen diferencias significativas ($U = 17070,5$; $p = 0,039$) con un efecto pequeño ($r = 0,10$) en el almacenamiento durante la temporada de estiaje, teniendo mejor puntuación SH-03 (Mdn = 72,20; Rango = 61,40) que SH-02 (Mdn = 66,30; Rango = 85,80).

En la temporada húmeda, también, se presentaron diferencias significativas ($U = 8107$; $p < 0,001$), pero la mejor puntuación fue de SH-02 (Mdn = 114,79; Rango = 71,35) y no de SH-03 (Mdn = 104,80; Rango = 48,65). En esta última comparación el efecto es, también, pequeño ($r = 0,25$), que permite establecer la mejor funcionalidad de las zanjas durante el periodo de lluvias; y, en términos generales, que las diferencias en el almacenamiento son pequeñas en los dos puntos de evaluación en ambos periodos.

En la figura 8, se muestra la variación del almacenamiento durante el periodo de estudio en los puntos de evaluación SH-02 y SH-03.

La mayor capacidad de almacenamiento, sumado a las mayores tasas de *ET*, en las zanjas de infiltración podría estar jugando un papel importante para que la percolación no sea mucho mayor que los valores encontrados; indicando, además, que estas dos variables podrían ser importantes de considerar al momento de establecer criterios técnicos para el establecimiento de esta práctica en un espacio determinado.

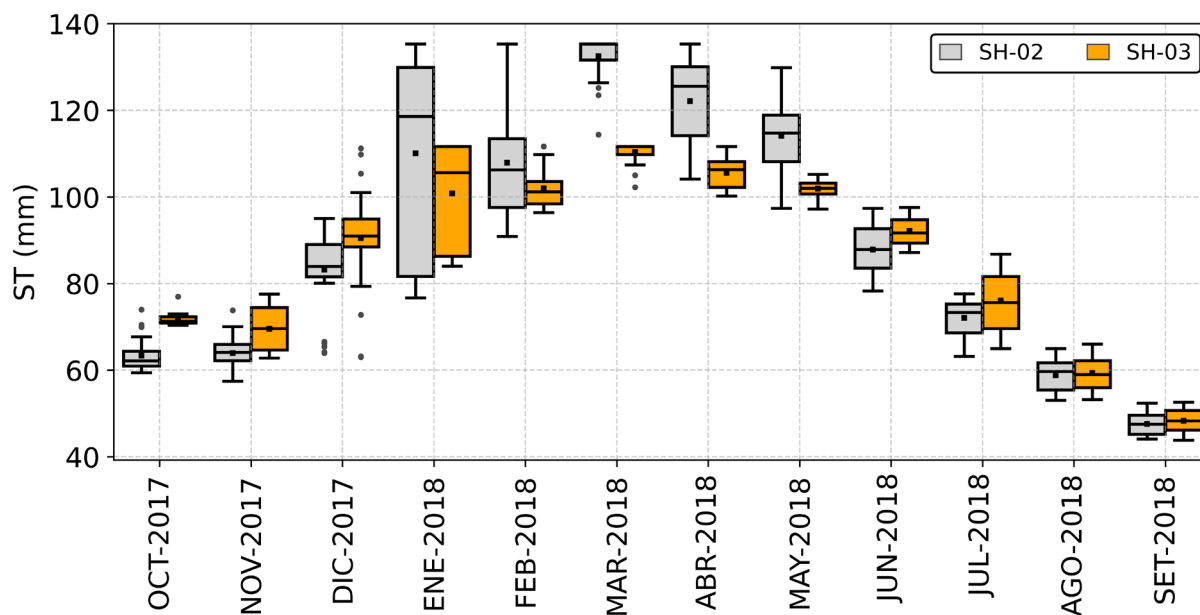


Figura 8. Comparación de la variación del almacenamiento entre SH-02 y SH-03

3.5.3. Evapotranspiración (ET)

Se encontraron diferencias significativas en la ET en la mayoría de casos, pero con tamaño del efecto pequeño, a excepción de la comparación entre TY-02 y TY-04, donde no existieron diferencias significativas en la temporada de estiaje (tabla 6).

Tabla 6. Aplicación de la prueba U de Mann-Whitney en el sector Tayacoto

Temporada	TY-02	TY-03	Z	U	p	r
	Mdn (Rango)	Mdn (Rango)				
Estiaje	0,70 (5,20)	0,36 (6,24)	-3,57	57572,5	,001	0,13
Lluvias	3,10 (6,10)	3,46 (6,96)	-2,85	57844,5	,004	0,11
	TY-02	TY-04				
Estiaje	0,70 (5,20)	0,74 (4,32)	-0,68	65767	,498	0,02
Lluvias	3,10 (6,10)	2,45 (4,81)	-6,69	47002	,001	0,25
	TY-03	TY-04				
Estiaje	0,36 (6,24)	0,74 (4,32)	-4,09	56050	,001	0,15
Lluvias	3,46 (6,96)	2,45 (4,81)	-7,84	43749	,001	0,29

En los resultados, destaca, principalmente, la significancia entre TY-02 y TY-03 respecto a TY-04 en el periodo lluvioso, teniendo mayor puntuación los dos primeros, evidenciándose así el mayor consumo que tendría la plantación de pinos respecto al pajonal.

En el periodo de estiaje, lo mencionado podría estar ocasionando que el suelo tenga menos reservas de agua, de tal manera que las tasas de ET de la plantación de pinos se muestren menores al del pajonal (especialmente en la comparación TY-03 con TY-04). A pesar de esto, y desde un sentido práctico, no habría suficientes evidencias para afirmar categóricamente, la existencia de diferencias en los valores de ET diaria en este periodo.

La evapotranspiración total (*ET*) de TY-04 durante el periodo de estudio fue de 1126 mm, mientras que, en TY-02, 1423 mm; y en TY-03, de 1493 mm. Comparando con la principal contribución de agua al sistema, estos valores equivalen al 68, 85 y 90 por ciento de la precipitación total, que se puede considerar como cantidades reintegradas a la atmósfera por evapotranspiración. Es importante mencionar que los altos porcentajes de *ET* en los puntos con plantación de pinos no se debería solo a este, sino habría un aporte de la vegetación asociada, que corresponde a pastos naturales con predominancia de *Poáceas* y varias especies arbustivas.

Al comparar estos resultados con los de Gómez *et al.* (2019) y Huber *et al.* (1985), se observa diferencias en los valores de *ET* en el *Pinus radiata*, que se deberían, principalmente, a la gran dependencia que existe con los distintos regímenes pluviométricos de cada zona de estudio.

Debido al aumento de la recarga de agua en el suelo, por la frecuencia e intensidad de la precipitación, las mayores tasas de *ET* se dan en los meses húmedos; mientras que las mayores demandas ocurren en los meses de estiaje.

En el sector Shillquil, no se encontraron diferencias significativas en los valores de *ET* diaria en el periodo de estiaje. Por el contrario, en el periodo húmedo con un efecto pequeño, la mejor puntuación la obtuvo SH-02 (tabla 7). Esta situación se podría deber a que las zanjas de infiltración no solo tienen un componente evaporativo importante, sino, al mismo tiempo, el componente de transpiración suma a este efecto debido a la vegetación establecida junto a la zanja (*Phalaris sp.*).

Tabla 7. Aplicación de la prueba U de Mann-Whitney en el sector Shillquil

Temporada	SH-02	SH-03	Z	U	p	r
	Mdn (Rango)	Mdn (Rango)				
Estiaje	0,78 (4,00)	0,40 (4,00)	-1,89	17283	0,059	0,10
Lluvias	2,20 (3,90)	1,90 (3,60)	-3,16	9006	0,002	0,18

Por otro lado, en el sector Shillquil, la *ET* fue de 487 mm en SH-02 y de 382 mm en SH-03, que equivalen al 73 y 57 por ciento de la precipitación total registrada durante el periodo de estudio.

Debido a las características propias de la cobertura en estos dos puntos de evaluación (cobertura vegetal máxima de 35 por ciento), se puede inferir que el mayor porcentaje de *ET* correspondería al componente de evaporación. Esto estaría ocurriendo, principalmente, en las zanjas de infiltración, asociado al movimiento de tierra propio del establecimiento de esta práctica sobre la superficie del terreno, donde queda un porcentaje importante de suelo desnudo susceptible a evaporación en temporada de estiaje y un espejo de agua en temporada de lluvias.

CONCLUSIONES

La variación temporal de los componentes del balance hídrico en la plantación de pinos y el pajonal ha tenido las mismas tendencias entre los periodos 2018-2019 y 2019-2020. Es decir, el almacenamiento de agua en el suelo, así como la formación de agua gravitacional y percolación, ha sido mejor en TY-04, que corresponde al pajonal, que en TY-02 y TY-03 con plantación de pinos.

En el área de estudio Tayacoto, el reemplazo del pajonal natural por una cubierta distinta está produciendo cambios importantes en los aportes de agua de precipitación que infiltran al suelo y en la cantidad de agua involucrada en la evapotranspiración y percolación, trayendo con esto impactos poco favorables en la regulación hídrica.

En el sector Shillquil, los resultados no han permitido comprobar, en el punto evaluado con zanjas de infiltración, el efecto o impacto teóricamente esperado sobre el almacenamiento de agua en el suelo y la percolación, pues, a pesar de haberse observado algunas diferencias favorables en los valores de estas variables, se consideran estadísticamente poco significativas respecto a los del pajonal.

Ha sido evidente en SH-02 una mejor respuesta en el pasaje del agua de precipitación al suelo durante la época húmeda, que ha generado flujo gravitacional y mejores tasas de percolación, aunque durante el periodo de estiaje el componente almacenamiento ha sido menor que en SH-03.

El volumen de agua de lluvia captada en las zanjas o la que llega al suelo con cierta cobertura, dependen del volumen de las intervenciones, su distribución espacial y el estado de conservación o degradación de la vegetación asociada; y, principalmente, se ha observado en este estudio, una gran dependencia con la capacidad de almacenamiento del suelo y la pluviometría.

Se puede establecer, según los hallazgos, que la cobertura vegetal natural ha resultado más eficiente como parte de los procesos de infiltración y almacenamiento de agua en el suelo. En tal sentido, su conservación o recuperación beneficiaría hidrológicamente a las demás áreas no intervenidas de los ámbitos de estudios.

Los resultados de este estudio aún no se pueden generalizar, pues obedecen a condiciones locales, faltando evaluaciones similares en otras áreas con condiciones distintas que permita conocer en mayor detalle el comportamiento de las variables analizadas según la variabilidad espacio-temporal de las propiedades físicas del suelo, la vegetación y el clima. Pese a ello, este estudio da luces sobre la complejidad que puede encerrar los procesos hidrológicos que se dan en los ámbitos de montaña, y hace ver la importancia de definir cuáles son las condiciones que sustenten el cambio de la cobertura natural del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *FAO Riego y Drenaje Boletín*, nro. 56. FAO. Roma. ISBN 92-5-304219-2.
- Barnett, V. y Lewis, T. (1984). *Outliers in Statistical Data*. Wiley, Nueva York, tercera edición.
- Bejar, P.; Cantú, I.; Yáñez, M. y Luna, E. (2020). Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(59), 31-50. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.666>
- Chow, V. T.; Maidment, D. y Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Santa Fe de Bogotá, Colombia. Mc GrawHill.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Segunda edición. Lawrence Erlbaum Associates.
- Cotler, H.; Cram, S.; Trinidad, S. M. y Bunge, V. (2015). Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera. *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía. (88), 6-18.
- Damiano, F. y Taboada, M. (2000). Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. Instituto de Clima y Agua. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). *Ciencia del Suelo*, 18 (2).
- Echeverría, C.; Huber, A. y Taberlet, F. (2007). Comparative Study of Water Balance Components in a Native Forest and a Meadow in Southern Chile. *Bosque Valdivia*, 28(3), 271-280. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002007000300013>
- Gómez, F.; Tarabini, M.; Buduba, C.; Von Müller, A. y La Manna, L. (2019). Balance hídrico en plantaciones de *Pinus radiata* en el NO de la Patagonia argentina. *Ecología Austral*, 29(2), 261-271. www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1667-782X2019000200008&lng=es&tlng=es.
- Gupta, H. V.; Sorooshian, S. y Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *J. Hydrologic Eng.* 4(2), 135-143.
- Herweg, K. y Ludi, E. (1999). The Performance of Selected Soil and Water Conservation Measures Case Studies from Ethiopia and Eritrea. *Catena*, 36(1), 99-114.
- Huber, A.; Iroumé, A. y Bathurst, J. (2007). Effect of *Pinus Radiata* Plantations on Water Balance in Chile. *Hydrological Processes* 22(1), 142-148. <https://doi.org/10.1002/hyp.6582>.
- Huber, A.; Oyarzún, C. y Ellies, A. (1985). Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata* y una pradera. II: Humedad del suelo y evapotranspiración. *Bosque* 6(2), 74-82. <https://doi.org/10.4206/bosque.1985.v6n2-02>.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales (Inrena) (1995). *Mapa ecológico del Perú. Guía explicativa*. Ministerio de Agricultura. Lima.
- Knoke, T.; Bendix, J.; Pohle, P.; Hamer, U.; Hildebrandt, P.; Roos, K.; Gerique, A.; Sandoval, M. L.; Breuer, L. y Tischer, A. (2014). Afforestation or Intense Pasturing Improve the Ecological and Economic Value of Abandoned Tropical Farmlands. *Nat. Commun.* 5, 5612.
- López, M.; Veldkamp, E. y De Koning, G. H. J. (2005). Soil Carbon Stabilization in Converted Tropical Pastures and Forests Depends on Soil Type. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69, 1110-1117.
- Moriasi, D.; Arnold, J.; Van Liew, M.; Bingner, R.; Harmel, R. D. y Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the Asabe*. 50. 10.13031/2013.23153.

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (1978). *Effective Rainfall in Irrigated Agriculture*. Project Coordinator Indian Agricultural Research Institute New Delhi. ISBN 92-5-100272-X. www.fao.org/3/X5560E/X5560E00.htm#Contents
- Pineda, M. y Vilorio, J. (2011). Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la cuenca del lago de Valencia. www.researchgate.net/publication/279689530
- Steenhuis, T. S. y Van der Molen, W. H. (1986). The Thornthwaite-Mather Procedure as a Simple Engineering Method to Predict Recharge. *J. Hydrol.*, 84: 221-229.
- Thornthwaite, C. W. y Mather, J. R. (1955). *The Water Balance. Publications in Climatology*. Nueva Jersey, Drexel Institute of Technology.
- Tomczak, M. y Tomczak, E. (2014). The Need to Report Effect Size Estimates Revisited. An overview of Some Recommended Measures of Effect Size.
- Van Genuchten, M.; Leij, F. y Yates, S. R. (1991). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soil. U.S. Salinity Laboratory. Riverside: U.S. Department of Agricultural, Agricultural Research Service.
- Van Genuchten, M.; Simunek, J.; Leij, F. y Sejna, M. (2009). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, [en línea], no. RECT versión 6.2, Inst. US Salinity Laboratory, USDA, ARS., SEPA, Riverside, California, www.hydrus3d.com.
- Vásquez, A.; Vásquez, I.; Vásquez, C. y Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de la ingeniería de riegos*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.

