

DOI: 10.24850/j-tyca-18-01-08

Artículos

Beneficios de agua y suelo de las coberturas forestales en Heredia, Costa Rica

Water and soil benefits of forest covers in Heredia, Costa Rica

Ana Karen Franco-Ábrego¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8434-8850>

Laura Benegas², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1890-0213>

Ney Ríos³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7785-4413>

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, Panamá,
ana.franco1@utp.ac.pa

²Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba,
Costa Rica, laura.benegas@catie.ac.cr

³Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba,
Costa Rica, ney.rios@catie.ac.cr

Autor para correspondencia: Ana Karen Franco-Ábrego,
ana.franco1@utp.ac.pa



Resumen

La implementación de programas locales de conservación de coberturas forestales en zonas de recarga hídrica y acuífera permite estudiar el ciclo hidrológico y su interacción con la vegetación y el suelo, en términos de cantidad y calidad del agua. Los objetivos de este estudio fueron: a) caracterizar la composición de la vegetación y suelo de tres sistemas de cobertura forestal (bosque, reforestación y plantación establecida), b) estimar los aportes de agua (escorrentía, percolación y evapotranspiración) y la generación de sedimentos de los tres sistemas de cobertura forestal en zona de recarga acuífera y c) evaluar escenarios de cambio de uso de suelo y sus implicaciones en la seguridad hídrica y la gestión de PSAH. Los resultados muestran que, bajo condiciones de conservación, los tres sistemas presentan patrones similares de percolación y evapotranspiración, favorecidos por suelos andisoles con alto contenido de materia orgánica. Sin embargo, los escenarios de cambio de uso de suelo hacia matorral, pradera y suelo desnudo evidencian incrementos sustanciales en la escorrentía superficial y en la generación de sedimentos, lo cual afectaría negativamente la calidad del agua destinada al consumo humano. Estos hallazgos resaltan la importancia de los esquemas de conservación, como el Pago por Servicios Ambientales Hídricos (PSAH), para la protección de zonas de recarga y la sostenibilidad del recurso hídrico en Costa Rica.

Palabras clave: conservación de los bosques, previsión hidrológica, agua subterránea, ciclo hidrológico, escorrentía, uso de la tierra, Heredia, Costa Rica.

Abstract

The implementation of local forest cover conservation programs in water and aquifer recharge zones allows for the study of the hydrological cycle and its interaction with vegetation and soil, in terms of water quantity and quality. The objectives of this study were: a) to characterize the vegetation and soil composition of three forest cover systems (forest, reforestation, and established plantation), b) to estimate water inputs (runoff, percolation, and evapotranspiration) and sediment generation from the three forest cover systems in aquifer recharge zones, and c) to evaluate land-use change scenarios and their implications for water security and the management of water resources. The results show that, under conservation conditions, the three systems exhibit similar percolation and evapotranspiration patterns, favored by Andisol soils with high organic matter content. However, land-use change scenarios toward scrubland, grassland, and bare soil show substantial increases in surface runoff and sediment generation, which would negatively affect the quality of water intended for human consumption. These findings highlight the importance of conservation schemes, such as Payment for Water-Related Environmental Services (PSAH), for the protection of recharge zones and the sustainability of water resources in Costa Rica.

Keywords: forest conservation, hydrological forecasting, groundwater, hydrological cycle, runoff, land use, Heredia, Costa Rica.

Recibido: 14/10/2024

Aceptado: 06/05/2026

Publicado ahead of print: 27/05/2026



1. Introducción

La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), como un enfoque de manejo de los recursos hídricos, brinda oportunidades a través de la protección, conservación y restauración los ecosistemas, el uso sostenible y gestión eficiente del agua, la tierra y otros recursos vinculados asegurando los servicios ecosistémicos del agua (Global Water Partnership [GWP], 2013).

En este estudio, la recarga hídrica se entiende como el proceso superficial de infiltración del agua de lluvia, mientras que la recarga acuífera corresponde al aporte efectivo al acuífero subyacente. La necesidad de cuantificar los beneficios hidrológicos asociados a coberturas forestales en zonas de recarga es particularmente relevante en cuencas destinadas al abastecimiento humano, como la cuenca del río Grande en Costa Rica.

1.1. Programa de Pago por Servicios Ambientales Hídricos

Costa Rica cuenta con una base sólida en la política nacional en materia de gestión del recurso hídrico (Ministerio de Ambiente y Energía [MINAE] *et al.*, 2022) y se desarrollan acciones para garantizar la disponibilidad de los recursos hídricos en el tiempo, implementando instrumentos económicos como el canon de aprovechamiento de aguas (Decreto Ejecutivo N. 32868 Canon Por Concepto de Aprovechamiento de Aguas, 2005), el Programa de Pago por Servicios Ambientales (PPSA) del Fondo de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) del Ministerio de Ambiente y

Energía (MINAE) y la tarifa para la protección del recurso hídrico (TPRH) de la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH).

El esquema de la TPRH permite su inversión en múltiples tipos de proyectos (Centro de Derecho Ambiental y los Recursos Naturales [CEDARENA] & Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos [ARESEP], 2019), siendo estos, el Pago por Servicios Ambientales Hídricos (PSAH) para la protección y conservación de bosques, áreas en regeneración natural, reforestación y plantaciones establecidas, también la adquisición de fincas para protección, estudios hidrológicos e hidrogeológicos, entre otros, en zonas de recarga hídrica (Empresa de Servicios Públicos de Heredia [ESPEH], 2020; Solano, 2010).

A pesar de la amplia implementación de esquemas de conservación en Costa Rica, aún se requiere evidencia local que relacione las características del suelo y la estructura de la vegetación con la regulación del caudal, la recarga acuífera y la generación de sedimentos. Este estudio contribuye a cerrar esa brecha, apoyando la toma de decisiones en la gestión de cuencas y la seguridad hídrica.

1.2. Sistemas evaluados

Los sistemas evaluados fueron: bosque, reforestación y plantaciones establecidas (Figura 1). Las principales características de los sistemas se describen a continuación: El sistema bosque (195.93 ha) bajo conservación, conformado por fragmentos de bosques secundarios. El sistema de reforestación (8.37 ha) con 15 años de antigüedad, reforestadas con las especies Jaúl (*Alnus acuminata*), Ciprés (*Cupressus lusitánica*) y Gravilea (*Grevillea robusta*). El sistema de plantaciones

(41.95 ha) con 12 años de establecimiento con la especie Ciprés (*Cupressus lusitánica*).



Figura 1. Vistas de los sistemas evaluados en las microcuencas del río Ciruela y río Segundo, Heredia, Costa Rica.

2. Metodología

2.1. Sitios de muestreo

Durante el 2022 se realizó campaña de muestreo en fincas ubicadas en la zona de recarga acuífera de las microcuencas río Ciruelas y río Segundo, cuenca del río Grande de Tárcoles, Heredia (Figura 2). La zona de recarga acuífera se encuentra desde los 1500 m s. n. m. hasta los límites del Parque Nacional Braulio Carrillo (Ramírez Chavarría, 2014).

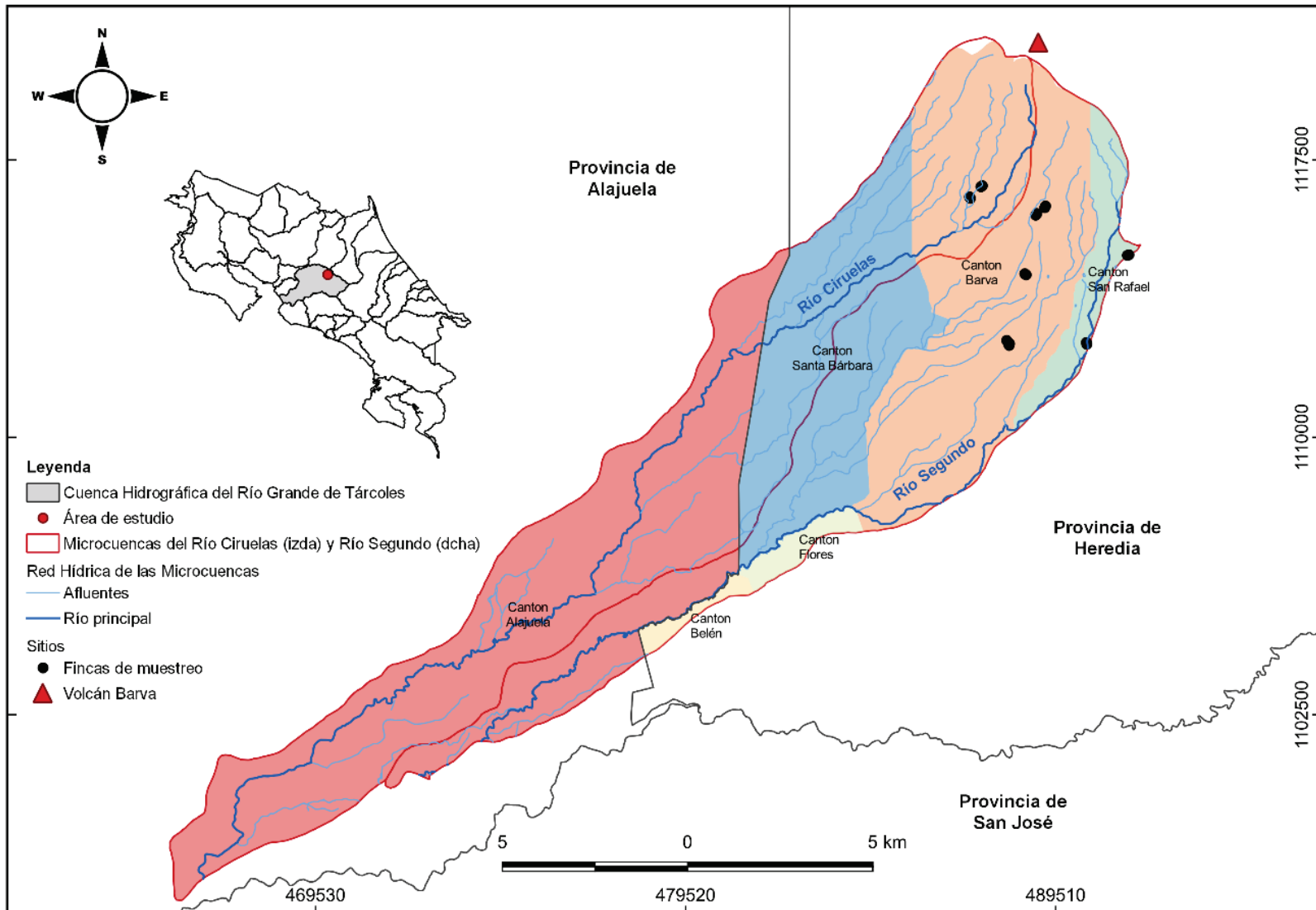


Figura 2. Mapa de ubicación de las fincas de muestreo bajo el programa de pago por servicios ambientales hídricos de la ESPH S.A.

La precipitación media anual varía entre 3 000 - 4 000 mm con época seca que va de diciembre - abril y la lluviosa que comprende los meses de mayo - noviembre, con un veranillo a finales de junio o principios de julio. La temperatura media anual varía desde 14 -18 °C.

Los suelos predominantes son de orden andisoles con rocas ígneas volcánicas, coladas de lava, lahares y cenizas volcánicas del Cuaternario. Presenta una baja susceptibilidad de deslizamiento (Ramírez Chavarría, 2014; Rojas, 2011) con pendientes de 20 a 30%. Según la clasificación de las zonas de vida de Holdridge se presenta un bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB) (Rojas, 2011).

Los sistemas evaluados fueron: bosque, reforestación y plantaciones establecidas. Para cada sistema se seleccionaron aleatoriamente 3 fincas donde se evaluaron variables de cobertura forestal y suelo en parcela de 50 x 50 m (1000 m²) y está dividida en subparcelas de 100 m² con muestreo sistemático (Figura 3).

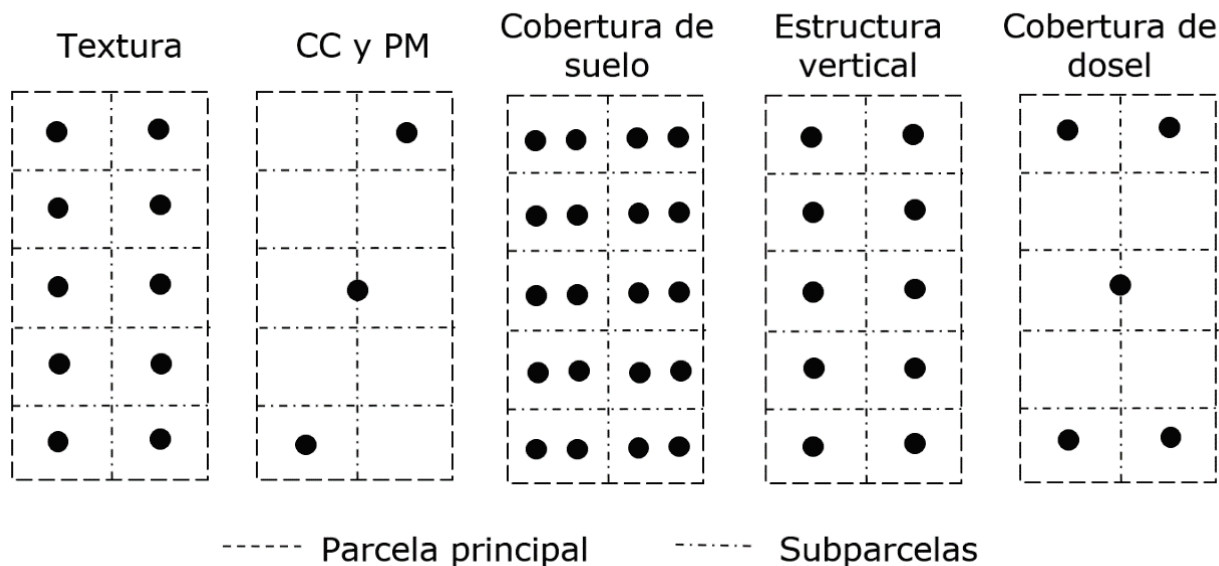


Figura 3. Diseño muestral de las parcelas para los parámetros de vegetación y suelo.

2.2. Cobertura forestal

Se calculó el índice promedio de cobertura forestal en 5 estratos (0-2 m, 2-9 m, 10-20 m, 20-30m, >30m) con una escala de valores 0, 1, 2, o 3 si el porcentaje de cobertura era de 0, 1-33, 34-66 y 67-100%, según la metodología descrita por (Thiollay, 1992).

La cobertura del dosel fue estimada utilizando un densiómetro esférico convexo, donde se sumaron la cantidad de puntos iluminados con un máximo de 96 y multiplicados por 1.04 para obtener el porcentaje de área no ocupada por dosel, la diferencia es el porcentaje estimado de la cobertura del dosel (Lemmon, 1957).

2.3. Suelo

Muestras de suelo fueron colectadas utilizando una pala, consistió en hacer un hoyo en forma de V con una profundidad de 20 cm eliminando el material de los bordes de la pala y almacenadas en bolsas plástica para el análisis de la textura y granulometría con el método de laboratorio Bouyoucos.

Para el cálculo de la capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PM) se tomaron muestra de suelo utilizando un cilindro metálico de diámetro interno de 4.758 cm e insertándolo en suelo desnudo, se utilizó el método de análisis de retención de humedad a 0.33 y 15 Bares de presión por 48 horas de muestras saturadas por 24 horas y secado posterior en el horno por 24 horas a 105 °C.

La cobertura de suelo fue estimada utilizando un marco con dimensiones de 0.5 m x 0.5 m, se estimó el porcentaje promedio de cobertura de suelo desnudo, rocas, hojarascas, materia vegetal y musgos

de la parcela. El porcentaje de materia orgánica (MO), material parental y clasificación taxonómica de la USDA fueron extraídos de la base de datos de calicatas y mapa de suelos de Costa (Universidad de Costa Rica [UCR], & Centro de Investigaciones Agronómicas [CIA], 2013).

2.4. Cuantificación de Beneficios Hidrológicos de Intervenciones en Cuencas (CUBHIC)

Se utilizó la metodología CUBHIC “Forestación y protección de bosque” para el cálculo de los beneficios potenciales en el caudal base (balance hídrico) y reducción de sedimentos en cada sistema (Figura 4), la misma herramienta fue utilizada para la evaluación de los tres escenarios de cambio de uso de suelo hacia la degradación siendo estos matorral, pastizales y suelo desnudo.

Quantificación de Beneficios Hidrológicos



Sistema Escenarios

1. Recopilación de datos de entrada

1.1 Datos de entrada específicos del sitio

- Precipitación
- Temperatura (máximas y mínimas)



1.2 Datos de entrada específicos del intervalo de tiempo

- Características del suelo que influyen en los procesos de contenido de humedad y en la erosión de los suelos
- Características de la vegetación que influyen en la evapotranspiración, la escorrentía y la erosión de los suelos

NumCur
Soil Water Characteristics



2. Cálculos de cuantificación diario

2.1 Ecuación de balance hídrico

$$P = Q + ET + p + \Delta R$$

- Escorrentía superficial (Q)
- Evapotranspiración (ET)
- Percolación (p)
- Contenido de humedad (ΔR)

2.2 Ecuación de pérdida de suelo

$$A = R * K * L * S * C$$

- Pérdida de suelo (A)

3. Resultados de beneficios anual

- Precipitación
- Escorrentía superficial
- Evapotranspiración
- Percolación
- Pérdida de sedimentos

Figura 4. Proceso para el análisis de los beneficios de los proyectos de conservación con la metodología CUBHIC.

Los datos de entrada de CUBHIC relacionados con el suelo y tipo de cobertura forestal fueron estimados mediante la utilización de programas, fórmulas y revisión bibliográfica. Los datos de precipitación y temperatura fueron suministrados por las estaciones meteorológicas de la ESPH S.A. en la zona de estudio.



La CC y PM fueron reestimados con el programa Soil Water Characteristics versión 6.02.74 (Saxton & Rawls, 2022), el factor K de USLE fue estimado utilizando la ecuación de Williams, citado por (Wawer *et al.*, 2005). Los tipos de suelo, condición hidrológica y número de curva fueron calculados con el programa NUMCUR. El índice de área foliar (IAF/LAI) fue estimado utilizando imágenes satelitales descargadas de la plataforma de Google Earth Engine (GEE) (Tabla 1).

Tabla 1. Datos de entrada de la calculadora CUBHIC.

Parámetros	Bosque	Plantación establecida	Reforestación	Matorral	Pradera	Suelo desnudo
Tipo de suelo	B	B	B	B	B	B
Condición hidrológica	IV	III	IV	Pobre	Pobre	Pobre
Número de Curva	52	60	52	70	77	82
Prof. efectiva en mm	1811	1544	1811			
Factor K de USLE	0.142	0.142	0.14	0.13	0.13	0.13
Índice de Área Foliar (LAI)	3.8	3.6	3.7	2	1	0
Albedo (fracción)	0.11	0.13	0.12	0.2	0.21	0.6
Factor C de USLE	0.006	0.05	0.01	0.072	0.1	1

El valor del albedo fue estimado con los rangos aproximados de superficies naturales según (Wang, 2020) y factor C de USLE fue estimado con los valores descritos por (Linares *et al.*, 2009). Los coeficientes del modelo como el valor de la fracción de la cobertura nubosa (c) fue estimado según (Soneye, 2021) y el ajuste K según el diámetro estimado de las partículas del suelo relacionado a su textura (Foster *et al.*, 2020;

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [FAO], 2009).

Los cálculos de aportes de agua (escorrentía, percolación y evapotranspiración) y la generación de sedimentos en zona de recarga acuífera fueron realizados para las áreas totales de los tres sistemas en el programa de TPRH de la ESPH.

3. Resultados

3.1. Caracterización de los sistemas

Los sistemas evaluados se ubican en una franja altitudinal de 1826 – 1966 m s. n. m., en zona de vida de Holdridge de bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB) y con precipitación anual promedio de 3914.3 mm de lluvia.

Los suelos fueron clasificados con textura franco-arenosa y con alto porcentaje de materia orgánica. Las pendientes variaron en rango de 15 - 43%. Las características del suelo como la textura, MO, CC, PM, tipo de suelo no varió entre sistemas (Tabla 2).

Tabla 2. Características del suelo.

Características		Bosque	Reforestación	Plantaciones establecidas
Área (ha)		195.93	8.37	41.98
Pendiente promedio (%)		43.1	15.8	17.2
Granulometría (%)	Arena	57	54	61
	Limo	36	39	32
	Arcilla	7	7	7
Textura		Franco arenosa	Franco arenosa	Franco arenosa
MO (%)		6.8	6.8	6.8
CC (%)		25.1	25.8	24.6
PM (%)		10.3	10.3	10.9
Humus (cm)		15	1	10
Hojarasca (cm)		0.3	0	0.1

Se identificaron cuatro estratos definidos en el sistema bosque donde la mayor cobertura fue en el estrato de 2-10 m con un índice de 2.5 de cobertura forestal, los sistemas de plantaciones establecidas y reforestación se caracterizaron por tener tres estratos definidos de estructura vertical. Los sistemas cuentan con una densidad de cobertura del dosel de más del 80% (Tabla 3).

Tabla 3. Características de la cobertura forestal.

Características		Bosque	Reforestación	Plantaciones establecidas
Densidad del dosel (%)	Luz	12	16	8
	Cobertura	88	84	92
Índice promedio de cobertura forestal	0-2 m	1.6	2	2.2
	2-10 m	2.5	1.9	1.9
	10-20 m	2	0.7	1.7
	20-30 m	0.1	0	0
	>30 m	0	0	0
Cobertura de suelo (%)	Suelo desnudo	16.00	18.67	13.67
	Hojarascas	63.75	35.58	68.00
	Materia Vegetal	18.58	39.50	15.08
	Musgos	1.67	6.25	3.25

3.2. Aportes de agua y suelo

Los beneficios potenciales anual en el caudal base entre los tres sistemas son (Figura 5):

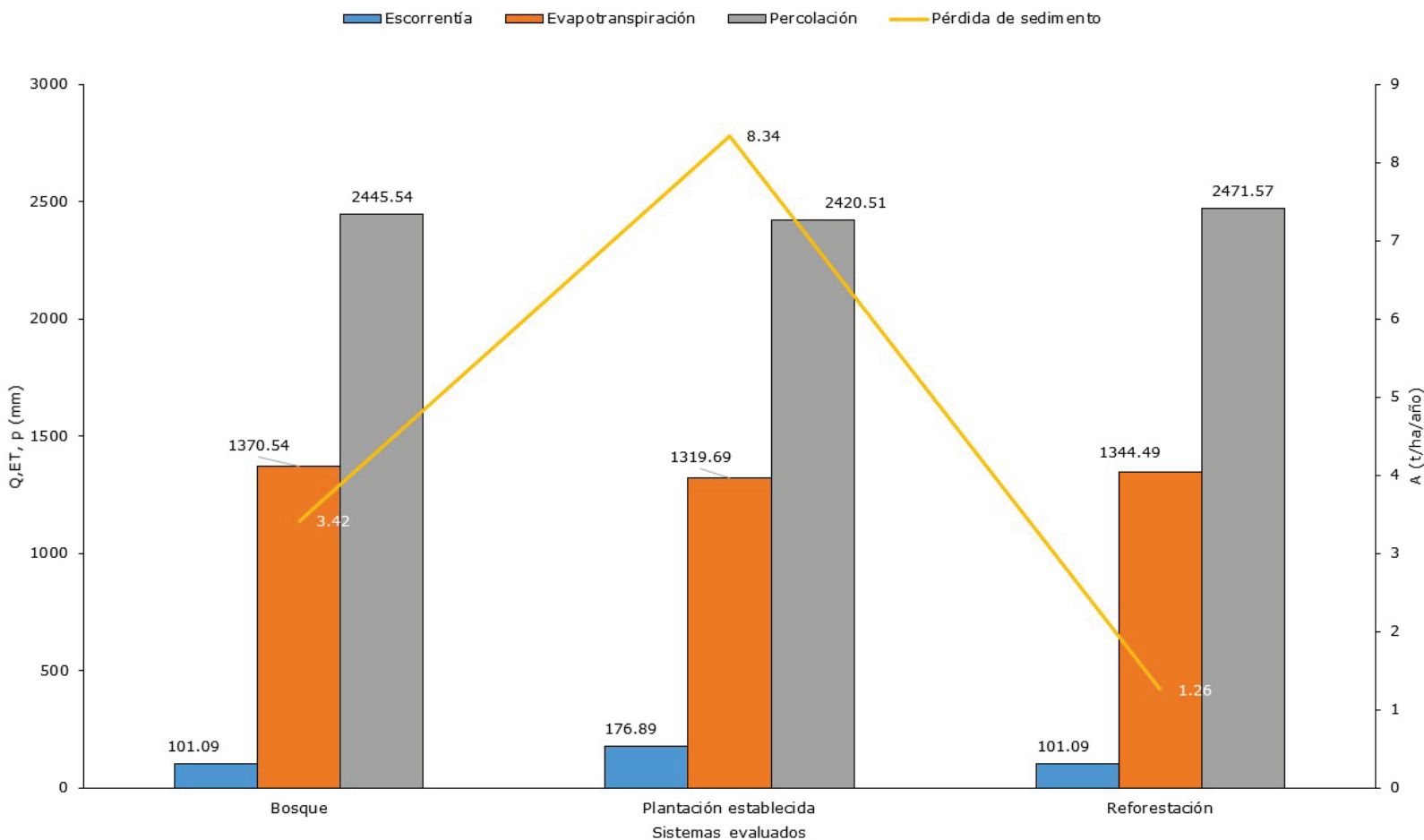


Figura 5. Componentes del balance hídrico anual y pérdida de sedimentos en bosque, plantación establecida y reforestación.

La esorrentía fue relativamente baja en todos los sistemas, aunque la plantación establecida presentó el valor más alto (176.89 mm), superando al bosque y a la reforestación, que registraron valores similares (101.09 mm). Los valores de la evapotranspiración oscilaron entre 1319.69 mm en la plantación establecida y 1370.54 mm en el bosque.

En contraste, la percolación constituyó el componente dominante del balance hídrico en los tres sistemas siendo el valor promedio de 2445.88 mm/año. La plantación establecida registró la mayor pérdida

anual (8.34 t/ha/año), seguida del bosque (3.42 t/ha/año), mientras que la reforestación presentó la menor pérdida de sedimentos (1.26 t/ha/año).

3.3. Escenarios de Cambio de Uso de Suelo

Los escenarios sobre el cambio de uso de suelo los resultados mostraron patrones consistentes. La escorrentía aumento en los tres escenarios respecto a las coberturas actuales, el mayor incremento se registró en suelo desnudo. La percolación se mantuvo relativamente constante entre escenarios. La evapotranspiración disminuyó progresivamente pasando del bosque a matorral, luego a la pradera y finalmente, al suelo desnudo.

Por otro lado, el escenario de suelo desnudo presentó la mayor generación de sedimentos, los valores fueron considerablemente superiores a matorral y pradera (Tabla 4).

Tabla 4. Heatmap escorrentía, evapotranspiración y percolación y la pérdida de sedimentos (valores \log_{10}) bajo diferentes escenarios de uso del suelo.

Sistema - Escenario	Escorrentía (mm/año)	Evapotranspiración (mm/año)	Percolación (mm/año)	Pérdida de sedimento (t/ha/año)					
Bosque	2.00	3.14	3.39	0.53					
Bosque - Matorral	2.53	2.92	3.44	1.99					
Bosque - Pradera	2.72	2.76	3.45	2.27					
Bosque - Suelo desnudo	2.85	2.05	3.49	3.37					
Plantación establecida	2.25	3.12	3.38	0.92					
Plantación - Matorral	2.53	2.92	3.44	1.28					
Plantación - Pradera	2.72	2.76	3.45	1.56					
Plantación - Suelo desnudo	2.85	2.05	3.49	2.66					
Reforestación	2.00	3.13	3.39	0.10					
Reforestación - Matorral	2.53	2.92	3.44	1.33					
Reforestación - Pradera	2.72	2.76	3.45	1.61					
Reforestación - Suelo desnudo	2.85	2.05	3.49	2.71					
	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00

4. Discusión

4.1. Influencia de la estructura forestal en la regulación hidrológica

El sistema bosques presentó mayor estratificación vertical y los valores más altos de cobertura en los estratos intermedios, lo que podría indicar un estado avanzado de la regeneración de los bosques montanos estudiados. Esta estructura favorece la intercepción de la lluvia y la moderación de los procesos erosivos.

La menor estratificación presente en los sistemas de plantaciones establecidas y reforestaciones explica parcialmente sus diferencias hidrológicas. Según Dobos (2020), doseles con menos estratos vertical presentan mayores valores de albedo y menor capacidad de interceptar la radiación. En concordancia con ello, en este estudio se observaron índices LAI ligeramente inferiores en dichas coberturas, lo que se tradujo en una evapotranspiración algo reducida en comparación con el bosque secundario.

4.2. Aportes de agua: similitudes y diferencias entre sistemas

La capacidad de percolación, la escorrentía superficial y la generación de sedimentos en los sistemas evaluados reflejan la interacción entre las propiedades físicas del suelo y la estructura de la vegetación.

Los resultados obtenidos muestran valores similares de percolación entre los tres sistemas, lo cual puede atribuirse principalmente a las características intrínsecas de los andisoles. Estos suelos, predominantes

en el área de estudio, se caracterizan por un alto contenido de materia orgánica (6.8% en todos los sistemas), alta macroporosidad y una notable capacidad de retención de agua en el suelo (Rawls *et al.*, 2003; USDA, 2007), condiciones que favorecen el flujo vertical del agua independientemente del tipo de cobertura vegetal.

Incluso sistemas con menor complejidad estructural, como las reforestaciones y las plantaciones establecidas, mantuvieron tasas altas de percolación, lo que evidencia que la influencia del suelo puede superar, en ciertos casos, las diferencias asociadas a la estratificación de la vegetación.

No obstante, las diferencias en escorrentía, particularmente el valor más alto en plantaciones establecidas (176.89 mm/año) se relacionan con la menor acumulación de hojarasca. La literatura indica que las características del suelo como la hojarasca y humus actúan como un amortiguador hidrológico, retrasando la saturación superficial y disminuyendo la escorrentía inmediata (Franco & Pascual, 2020). Su menor presencia en plantaciones explica el aumento de escorrentía reportado.

4.3. Generación de sedimentos y erosión del suelo

La pérdida de suelo fue considerablemente mayor en plantaciones establecidas, seguido por bosque secundario y reforestación. Aunque pudiera esperarse que el bosque secundario presentara la menor pérdida, el área total cubierta por este sistema y las pendientes asociadas influyeron en los valores absolutos obtenidos.

Liu *et al.* (2001) demuestran que la pendiente amplifica la susceptibilidad a la erosión incluso cuando existe cobertura vegetal, lo

cual es coherente con los resultados de este estudio: el bosque secundario, aunque bien estructurado, presentaba pendientes superiores a las de las reforestaciones y plantaciones, lo que aumenta el potencial erosivo cuando se considera el sistema como unidad total.

4.4. Análisis de escenarios de degradación y su relación con la seguridad hídrica

Los escenarios simulados evidencian cómo la degradación progresiva de cobertura forestal desde matorral hasta suelo desnudo genera incrementos en escorrentía y pérdidas de suelo, acompañados de disminución de la evapotranspiración. Este gradiente coincide con lo reportado por Marhaento *et al.* (2017) para cuencas tropicales intervenidas, donde la deforestación reduce la capacidad del ecosistema para regular el ciclo hidrológico y aumenta la vulnerabilidad a la contaminación por sedimentos.

Estos cambios alteran directamente la seguridad hídrica, entendida no solo como disponibilidad de agua sino también como calidad. En particular, el aumento de sedimentos en las fuentes de agua superficial implica mayores costos y desafíos para la potabilización, tal como señalan Hilary *et al.* (2021) para sistemas fluviales en Costa Rica. Dado que las microcuencas estudiadas abastecen a la ESPH, cualquier incremento sostenido de sedimentos comprometería la eficiencia de captación y el tratamiento del recurso, destacando la importancia de conservar las coberturas forestales analizadas.

4.5. Relación con PSAH, TPRH y gestión del recurso hídrico

Los resultados del estudio ofrecen una base técnica sólida para justificar la continuidad y fortalecimiento de los mecanismos de conservación aplicados en Heredia (Costa Rica), como el Pago por Servicios Ambientales Hídricos (PSAH) y la Tarifa para la Protección del Recurso Hídrico (TPRH) empleado por la ESPH S.A.

Estos instrumentos priorizan la protección de zonas de recarga hídrica y promueven la conservación de coberturas forestales que como evidenciaron los resultados del presente estudio, aumentan la percolación hacia el acuífero, reducen la escorrentía inmediata, disminuyen la pérdida de sedimentos, y estabilizan el ciclo hidrológico bajo variaciones climáticas o antrópicas.

La evidencia generada utilizando la herramienta CUBHIC es especialmente relevante para la cuenca del río Grande, donde la disponibilidad de agua potable depende directamente del desempeño hidrológico de estas microcuencas.

5. Conclusiones

Las coberturas forestales bajo el programa de pago por servicios ambientales hídricos (PSAH) de la ESPH S.A. generan beneficios en la disponibilidad del agua en las microcuencas del río Ciruelas y río Segundo. Los tres sistemas evaluados mantuvieron una percolación alta (62% del balance hídrico) y escorrentía reducida, condiciones favorables para sostener caudales base y la recarga potencial del acuífero Barva.

Los suelos andisoles actúan como estabilizador hidrológico, ya que la alta porosidad y materia orgánica favorecen la infiltración y almacenamiento potencial del agua en el suelo, aumentando la resiliencia del sistema frente a diferencias en la estructura vertical del dosel.

La degradación de la cobertura forestal de matorral a pradera y esta hacia suelo desnudo, compromete la seguridad hídrica, ya que se incrementa la escorrentía, producción de sedimentos, disminución de la evapotranspiración, elevando los riesgos para la calidad del agua y costos de potabilización en la cuenca del río Grande.

El uso de la herramienta CUBHIC permitió el análisis de beneficios hidrológicos de los sistemas y los escenarios de cambio de uso de suelo ejecutando las ecuaciones del balance hídrico y pérdida de suelo para los años 2017-2021 en el área de recarga acuífera de las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen enormemente a la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH S.A.) por permitir la realización de este estudio en sus fincas y por el acceso a las áreas de estudio en el marco del programa de Pagos por Servicios Ambientales Hídricos implementado por la empresa. Asimismo, se reconoce el apoyo logístico y técnico brindado por el personal de la ESPH S.A. durante el desarrollo del trabajo de campo.

7. Financiamiento

Este estudio fue financiado mediante una beca otorgada por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá (SENACYT), que



apoyó la formación en la maestría Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas de la primera autora en el CATIE, Costa Rica.

8. Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses financieros, personales o institucionales que pudiera haber influido en los resultados o en la interpretación de este estudio.

9. Declaración de uso de IA

Durante la preparación del artículo no se utilizó inteligencia artificial generativa para la obtención, análisis o interpretación de los datos. Se empleó M365 Copilot únicamente en la etapa posterior al proceso de revisión por pares, donde se utilizó exclusivamente de apoyo gramatical, sin afectar el contenido científico ni la responsabilidad intelectual del trabajo. La autora, Ana Karen Franco-Ábrego, revisó, verificó y autorizó los elementos dado por M365 Copilot para ser integrados al artículo.

10. Referencias

CEDARENA, Centro de Derecho Ambiental y los Recursos Naturales, & ARESEP, Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (2019). *Guía para la formulación de estudios tarifarios que promueven la Protección del Recurso Hídrico*. https://aresep.go.cr/wp-content/uploads/2020/11/Guia_para_la_formulacion_de_estudios_tarifarios_que_promueven_la_TPRH_10-1-2019.pdf

Decreto Ejecutivo N. 32868 Canon Por Concepto de Aprovechamiento de Aguas, Pub. L. 32868 (2005). http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=56341&nValor3=83806¶m2=1&strTipM=TC&Resultado=2&strSim=simp

Dobos, E. (2020). Albedo. En Y. Wang (ed.), *The Handbook of Natural Resources* (2nd ed.). CRC Press, Taylor & Francis Group.

ESPH, Empresa de Servicios Públicos de Heredia (2020). *Informe de Sostenibilidad 2020*. <https://www.esphsa.com/sites/default/files/2021-04/informe-de-sostenibilidad-2020.pdf>

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (2009). *Guía para la descripción de suelos*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b54d0348-dfce-413c-bd5d-142b3a14a049/content>

Foster, M. E., Chen, D., & Kieser, M. S. (2020). *Forestación y Protección de Bosques: Cuantificación de beneficios potenciales en el caudal base y reducción de sedimentos*. <https://forest-trends.org/infraestructura-natural-en-peru/#chad-tab25>

Franco, A. R., & Pascual, D. A. (2020). Interception and runoff of the high Andean forest in the "El Malmo" Protective Forest Reserve. *Natural Resources Conservation and Research*, 3(2). <https://doi.org/10.24294/nrcr.v3i2.1546>

GWP, Global Water Partnership (2013). *Guía para la aplicación de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) a nivel municipal*. <https://gwpo-gwp.org/wp-content/uploads/2026/04/guia-girh-a-escala-municipal.pdf>

Hilary, B., Chris, B., North, B. E., Angelica Maria, A. Z., Sandra Lucia, A. Z., Carlos Alberto, Q. G., Beatriz, L. G., Rachael, E., & Andrew, W. (2021). Riparian buffer length is more influential than width on river water quality: A case study in southern Costa Rica. *Journal of Environmental Management*, 286, 112132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112132>

Lemmon, P. E. (1957). A New Instrument for Measuring Forest Overstory Density. *Journal of Forestry*, 55(9), 667-668.

Linares, E., Marchamalo, M., & Roldán, M. (2009). Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 33(2), 1-20. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6722>

Liu, Q., Chen, L., & Li, J. (2001). Influences of Slope Gradient on Soil Erosion. *Applied Mathematics and Mechanics*, 22(5), 510-519. <https://doi.org/10.1023/A:1016303213326>

Marhaento, H., Booiij, M. J., Rientjes, T. H. M., & Hoekstra, A. Y. (2017). Attribution of changes in the water balance of a tropical catchment to land use change using the SWAT model. *Hydrological Processes*, 31(11), 2029-2040. <https://doi.org/10.1002/hyp.11167>

MINAE, Ministerio de Ambiente y Energía, SINAC, Sistema Nacional de Áreas de Conservación, FUNBAM, Fundación Banco Ambiental Costa Rica, GEF, Global Environment Facility, & BID, Banco Interamericano de Desarrollo (2022). *Estrategia del SINAC para la conservación y uso sostenible del recurso hídrico*. <https://www.sinac.go.cr/ES/noticias/Documents/Estrategia%20SINAC%20recurso%20h%C3%ADrico.pdf>

Ramírez Chavarría, R. (2014). Recarga Potencial de los Acuífero Colima y Barva, Valle Central, Costa Rica. *Repertorio Científico*, 17(2), 51–59. <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/repertorio/article/view/2567>

Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J. C., Sobecki, T. M., & Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116(1–2), 61–76. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)

Rojas, N. (2011). *Estudio de las cuencas hidrográficas de Costa Rica: Análisis biofísico, climatológico y socioeconómico*. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, Instituto Meteorológico Nacional. <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/estudio-de-las-cuencas-hidrograficas-de-costa-rica/>

Saxton, K. E., & Rawls, W. (2022). *Soil Water Characteristics: Hydraulic Properties Calculator* (6.02.74) [Software]. USDA. <https://www.nrcs.usda.gov/resources/tech-tools/spaw-version-602>

- Solano, V. (2010). Evolución y desafíos del programa de pago por servicios ambientales implementado por la Empresa de Servicios Públicos de Heredia S.A. *Revista de Ciencias Ambientales*, 40(1). <https://doi.org/10.15359/rca.40-2.2>
- Soneye, O. O. (2021). Evaluation of clearness index and cloudiness index using measured global solar radiation data: A case study for a tropical climatic region of Nigeria. *Atmosfera*, 34(1), 25–39. <https://doi.org/10.20937/ATM.52796>
- Thiollay, J.-M. (1992). Influence of Selective Logging on Bird Species Diversity in a Guianan Rain Forest. *Conservation Biology*, 6(1), 47–63. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1992.610047.x>
- UCR, Universidad de Costa Rica, CIA, Centro de Investigaciones Agronómicas (2013). *Mapa digital de Suelos de Costa Rica* [Mapa]. <http://www.cia.ucr.ac.cr/es/mapa-de-suelos-de-costa-rica>
- USDA, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (2007). Chapter 7 Hydrologic Soil Groups. *The National Engineering Handbook* Part 630. <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1712930597/1905.pdf>
- Wang, Y. (2020). Atmosphere and Climate. En: Autor (ed). *The Handbook of Natural Resources* (2nd ed.). CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9780429440984>
- Wawer, R., Nowocien, E., & Podolski, B. (2005). Real and calculated K_{USLE} erodibility factor for selected Polish soils. *Polish Journal of Environmental Studies*, 14(5), 655–658. <https://www.pjoes.com/Real-and-Calculated-K-USLE-Erodibility-Factor-for-Selected-Polish-Soils,87804,0,2.html>