

Efecto de la profundidad de la capa freática en la sobrevivencia y productividad de las plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis*) ante el riesgo de la variabilidad climática

Effect of water table depth on the survival and productivity of rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations under the risk of climate variability

Fanny Brenes-Bonilla¹, Dagoberto Arias-Aguilar²

Brenes-Bonilla, F; Arias- Aguilar, D. Efecto de la profundidad de la capa freática en la sobrevivencia y productividad de las plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis*) ante el riesgo de la variabilidad climática. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° especial Tecnología en Marcha. Marzo, 2026. Vol. 39, N° especial VII Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Marzo, 2026. Pág. 44-56.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i6.8572>



- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 f.brenes.2@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0009-0322-7271>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 darias@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-3056-9172>

Palabras clave

Disponibilidad hídrica; agua subterránea; variabilidad climática; propiedades hidropedológicas.

Resumen

La disponibilidad de agua en el suelo es un factor crítico para el desarrollo y supervivencia de plantaciones forestales, incluyendo los cultivos forestales, incluyendo los cultivos de *Hevea brasiliensis* (hule natural). En complemento con el estudio de los factores mayores que inciden en la productividad forestal, el presente estudio enfatiza en las propiedades hídricas y pedológicas y su influencia en el establecimiento y crecimiento de tales cultivos. Se presenta en este trabajo el abordaje metodológico y primeros resultados de un análisis hidropedológico que considera parámetros físicos del suelo como textura, densidad aparente, porosidad total, conductividad hidráulica y curvas de retención de humedad, que reflejan cómo el suelo retiene y moviliza agua disponible para las raíces. Son realmente pocos los estudios en plantaciones forestales que muestren la evolución del perfil edáfico y el manejo forestal (como el aclareo, las podas o extracción de látex) y su efecto en la capacidad de retención y disponibilidad hídrica. Además, la química del suelo — incluyendo pH, aluminio intercambiable, carbono y nitrógeno totales, capacidad de intercambio catiónico y saturación de bases — se correlaciona con la fertilidad y capacidad hídrica, factores fundamentales para la productividad y resistencia al estrés hídrico en *Hevea brasiliensis*. Las investigaciones más recientes en plantaciones del árbol de hule en Costa Rica indican que la evolución pedológica del suelo en zonas como Guácimo y Siquirres, Limón (Costa Rica) permite entender cómo estas variables físicas y químicas interactúan para favorecer o limitar las primeras etapas del desarrollo vegetativo, siendo su estudio un elemento clave para prever otros efectos por variabilidad climática y exceso o falta de agua en el suelo.

Keywords

Water availability; groundwater depth; climate variability; hydrogeological properties.

Abstract

The availability of water in the soil is a critical factor for the development and survival of forest plantations, including forest crops such as *Hevea brasiliensis* (natural rubber). Complementing the study of the major factors that influence forest productivity, this research emphasizes the hydric and pedological properties and their influence on the establishment and growth of such crops. This paper presents the methodological approach and initial results of a hydrogeological analysis that considers physical soil parameters such as texture, bulk density, total porosity, hydraulic conductivity, and moisture retention curves, which reflect how the soil retains and mobilizes water available to roots. There are very few studies in forest plantations that assess the evolution of the soil profile and forest management practices (such as thinning, pruning, or latex extraction) and their effects on water retention capacity and availability. Furthermore, soil chemistry — including pH, exchangeable aluminum, total carbon and nitrogen, cation exchange capacity, and base saturation — correlates with fertility and water-holding capacity, both fundamental factors for productivity and drought resistance in *Hevea brasiliensis*. Recent research conducted in rubber tree plantations in Costa Rica indicates that the pedological evolution of soils in areas such as Guácimo and Siquirres, Limón (Costa Rica) helps to understand how these physical and chemical variables interact to either enhance or limit the early stages of vegetative development. Studying these interactions is a key element for anticipating other effects related to climatic variability and excessive or deficient soil moisture.

Introducción

El estudio de las aguas subterráneas profundas es fundamental para respaldar el crecimiento y la sobrevivencia de cultivos perennes, como las plantaciones forestales, especialmente frente a la amenaza creciente de déficit hídrico por sequías prolongadas. Estas aguas representan una fuente crítica y más estable de agua para las plantas durante períodos de estrés hídrico, aportando humedad cuando la precipitación superficial y el agua en capas superiores del suelo son insuficientes [1]. Varios autores señalan que el acceso a aguas profundas es posiblemente el mecanismo más eficiente para las plantas perennes para garantizar productividad y sobrevivencia en tiempos de escasez de agua; sin embargo coinciden que existen pocos estudios a nivel forestal y escasos a nivel de plantaciones forestales [2]. En regiones áridas y semiáridas, la profundidad del nivel freático afecta directamente la disponibilidad de agua para la vegetación. Especies de plantas con raíces profundas ajustan su sistema radicular para captar agua del agua subterránea profunda, lo que les permite mantener su función fisiológica y sobrevivir a sequías prolongadas [3]. En plantaciones forestales perennes, la profundidad y accesibilidad del agua subterránea es un factor clave para la resiliencia hídrica, ya que permite a los árboles acceder a reservas de agua durante sequías estacionales o multianuales, manteniendo su transpiración y crecimiento [4]. Además, la eficiencia en el uso de agua en plantaciones se optimiza cuando las raíces pueden explorar capas profundas del suelo, donde la humedad se mantiene más tiempo, mitigando el impacto de la escasez de agua superficial [5]. Por otro lado, la sobreexplotación o disminución del nivel freático puede afectar negativamente las especies, reduciendo su crecimiento y aumentando la vulnerabilidad a estrés hídrico extremo [3]. En un estudio reciente para 29 especies del dosel de un bosque tropical en Isla Barro Colorado monitoreadas por 35 años, se encontró que la exposición de las especies al estrés hídrico durante sequías extremas, disminuyó a medida que la profundidad efectiva de enraizamiento de las especies fue más profunda, lo que indica que los árboles compensan el riesgo de mortalidad ante la falta de agua mediante el acceso a aguas profundas [2]. Desde el punto de vista de la gestión agrícola y forestal sustentable, integrar el monitoreo de aguas subterráneas profundas es crucial para garantizar un suministro hídrico suficiente en cultivos perennes y para anticipar posibles impactos de eventos climáticos extremos. La planificación basada en el conocimiento hidrogeológico local permite diseñar intervenciones que mantengan la viabilidad de las plantaciones y contribuyan a la mitigación del déficit hídrico [6]. La evidencia científica sugiere que la preservación y restauración de ecosistemas con acceso a aguas subterráneas profundas son piezas clave para la adaptación al cambio climático y la seguridad hídrica en el sector forestal [2] [7] [8]. En Costa Rica no se dispone de estudios del efecto de las aguas subterráneas sobre la sobrevivencia y productividad de plantaciones forestales, ni en lo particular para el caso de las plantaciones de *Hevea brasiliensis* (árbol de hule). Esta especie de árbol es originario de la cuenca amazónica en América del Sur, y tradicionalmente conocido como el árbol del caucho, produce un látex natural que ha sido utilizado desde culturas precolombinas para manufacturar productos gomosos. La domesticación del árbol de caucho, fuera del centro de origen, data de finales del siglo XIX, y actualmente, el sudeste asiático es responsable de más del 90% de las áreas de plantaciones de esta especie, pero con consecuencias científicamente demostradas, más de 4 millones de hectáreas de pérdida de bosques para el caucho desde 1993 (al menos 2 millones de hectáreas desde el año 2000) y más de 1 millón de hectáreas de plantaciones de caucho establecidas en Áreas Clave de Biodiversidad [9] [10]. En la economía moderna, el caucho natural es un producto esencial para las industrias de ingeniería, medicina y farmacéutica. En 2020, la producción mundial de caucho natural fue de 12,9 millones de toneladas, un aumento significativo en comparación con 20 años atrás, cuando fue de 6,8 millones de toneladas [11]. Se prevé que la demanda mundial de caucho natural seguirá aumentando de forma constante. En vista de ello, se han dirigido esfuerzos para reducir los efectos adversos de los factores abióticos y bióticos en los

cultivos de caucho y aumentar la productividad del caucho natural. La zona atlántica de Costa Rica ha sustentado históricamente su economía en actividades agropecuarias y forestales, destacándose cultivos como banano, plátano, palma aceitera, piña y la producción de maderas comerciales como teca, melina, cedro, laurel entre otras. Desde el siglo XIX se comercializó el hule silvestre (*Castilla elastica*), y posteriormente, en 1934, la variedad *Hevea brasiliensis* impulsada por la Goodyear Rubber Company y la Estación Experimental del Caucho en Turrialba. Su auge ocurrió durante la Segunda Guerra Mundial gracias a la cooperación agrícola con Estados Unidos, pero luego la producción decayó y Costa Rica pasó a depender de la importación de caucho. Desde 2015, la empresa Hevea Costa Rica ha revitalizado el cultivo en la Región Huetar Atlántica, donde las condiciones edafoclimáticas son favorables. Actualmente, partir de esta situación descrita, la producción de hule es una alternativa viable y sostenible en el tiempo, donde el estudio de su cultivo y los factores fisiográficos que intervienen en su producción, están requiriendo la vinculación de la academia, representada por el Tecnológico de Costa Rica junto con el sector productivo, para estudiar aspectos de estudios genéticos de los clones, resistencia a plagas y enfermedades, consolidación de mejores paquetes tecnológicos y la interrelación del suelo, agua y planta en la calidad de la producción, así como, la incidencia de la variabilidad climática en el establecimiento y manejo de nuevas plantaciones forestales.

Materiales y métodos (metodología)

Para la evaluación de las condiciones hidropedológicas de los sitios representativos para el cultivo del árbol de hule, se seleccionaron al menos 5 sitios de la zona vadosa en varias fincas con plantaciones de *Hevea brasiliensis*, con edades entre 3 y 5 años, localizadas en los distritos de Guácimo, Pocora y El Cairo de Siquirres, propiedad de la empresa Hevea CR Desarrollos Agroforestales Sociedad Anónima. En su mayoría se trata de suelos del orden inceptisol y condiciones climáticas representadas por la zona de vida: Bosque muy Húmedo Tropical, con clases de capacidad de uso del suelo desde I a VI, siendo que esta última por sus limitaciones como drenaje pobre, riesgo de inundación o pendiente, su uso está restringido a pastoreo o manejo forestal. Una de las fincas con mayor intensidad de muestreo se localiza en el distrito El Cairo, del cantón Siquirres, de la provincia de Limón, Costa Rica. Comprende el área cubierta por el inmueble con número de folio real o matrícula 7 – 155377 – 000, con número de plano catastro L – 1786344 – 2014, propiedad de la compañía Hevea CR Desarrollos Agroforestales Sociedad Anónima, según se observa en la figura 1.

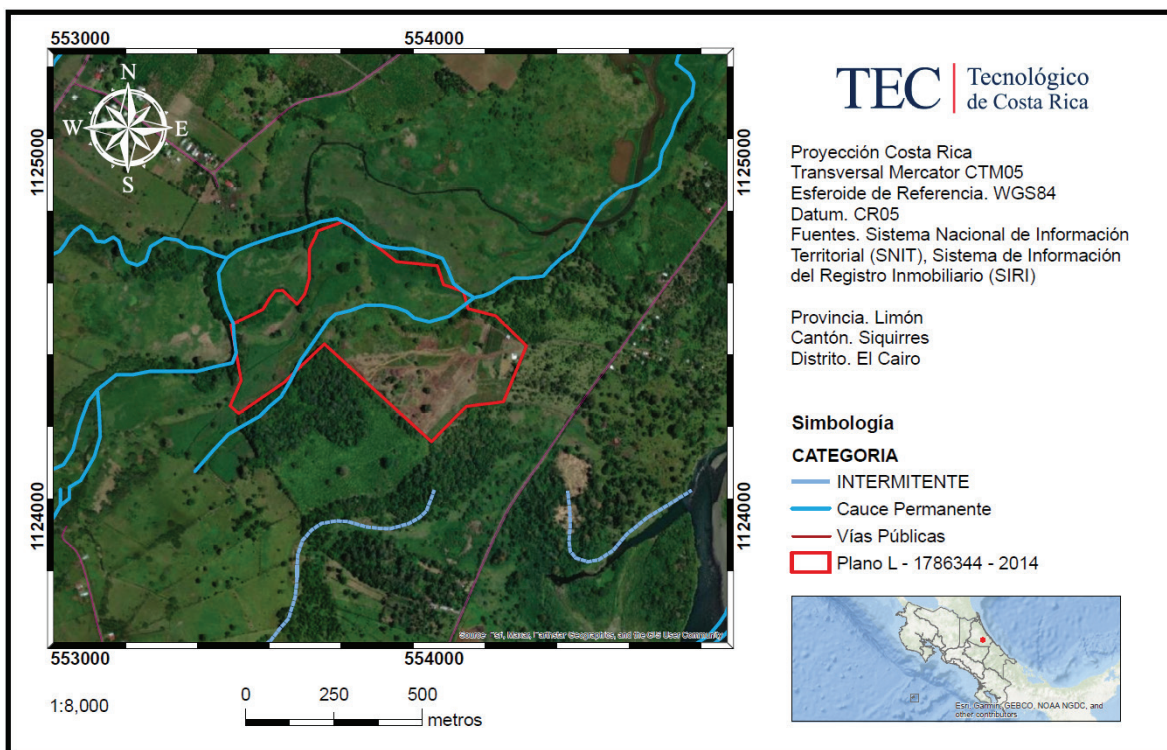


Figura 1. Ubicación espacial del sitio de proyecto.

Para este estudio se siguió la siguiente metodología de trabajo.

1. Recopilación de información disponible en bases de datos institucionales y proyectos de desarrollo, sobre las condiciones fisiográficas de la zona de estudio.
2. Elaboración del plano topográfico para observar las trayectorias probables del flujo superficial y subsuperficial del agua en el suelo, utilizando cartografiado digital, disponible en el Sistema Nacional de Información Territorial de Costa Rica, con ayuda de Sistemas de Información Geográfica.
3. Revisión bibliográfica y consulta a especialistas de las características de las formaciones geológicas presentes y sus orígenes, tipos de materiales y sus condiciones de permeabilidad, a partir del análisis de documentación ya generada en estudios previos y consulta a geólogos que hayan estudiado la zona.
4. Balance hídrico y estudio de láminas de agua en tránsito, mediante el Modelo Analítico para Determinar la Infiltración [12].
5. Determinación de variables del suelo mediante muestreos representativos del suelo, correspondientes a densidad aparente (D_a), densidad real, retención o tensión de humedad, logaritmo de la tensión (pF), coeficiente de almacenamiento o porosidad drenable (S), textura de suelo, concentración de iones hidronio (pH), efectos sodio y calcio en la permeabilidad del suelo, consistencia de suelo, color, estructura, capacidad de intercambio catiónico y saturación de bases, contenido de materia orgánica, tipo de suelo (Clasificación Taxonómica), elaboración de curvas de retención de humedad, conductividad hidráulica saturada (K), porosidad total (n), retención específica (S_r) y capacidad de infiltración (I) [13] [14]. La figura 2 muestra una de las calicatas objeto de estudio.



Figura 2. Detalle de una calicata con depósitos del cuaternario, correspondientes a materiales sedimentarios y volcánicos durante el Paleógeno y Neógeno.

6. Agrupación de resultados para efecto de análisis y aplicación de métodos cuantitativos para su interpretación, mediante diagramación de resultados por planos o mapas.
7. Análisis de sensibilidad climática de las plantaciones forestales para la zona de estudio. Acá se evalúa la respuesta del crecimiento y productividad de las plantaciones de hule ante variaciones proyectadas de temperatura, precipitación y otros factores climáticos relevantes. Para ello, se recopilan series históricas de datos meteorológicos y se aplican modelos climáticos regionales que permiten simular escenarios futuros de cambio climático. Posteriormente, se emplean modelos de idoneidad de hábitat o de producción forestal, los cuales parametrizan las variables estructurales y ecológicas de las plantaciones en función del clima actual, proyectando su comportamiento bajo diferentes escenarios de incremento térmico o déficit hídrico. Finalmente, se determina la sensibilidad de cada especie o rodal comparando las tasas de crecimiento, biomasa o cobertura foliar estimadas, a fin de clasificar el riesgo potencial de reducción de productividad o vulnerabilidad ecológica en la zona de estudio [15].

Resultados

De acuerdo con los análisis preliminares efectuados en campo, los sitios de estudio corresponden a suelos de tipo Inceptisol, según taxonomía USDA [16]. Estos suelos fueron formados especialmente en zonas aluvionales y se extienden por la costa Atlántica y Pacífica del país, a elevaciones menores a los 100 m.s.n.m. [17]. Los suelos Inceptisoles analizados, corresponden al suborden Udepts propios de regímenes de humedad údicos, y que presentan un leve desarrollo pedogénico que los ha llevado a desarrollar varios horizontes con estructura [18]. Estos suelos se originan de la meteorización de sedimentos aluviales y coluviales, con presencia de tablas de agua someras que han provocado la reducción del hierro debido al empobrecimiento del oxígeno, y con ello, generado procesos de gleyzación en algunos sectores. Es común encontrarlos en condiciones anóxicas, donde la falta de oxígeno durante largos periodos de inundación o sobresaturación del suelo, puede inducir a un ambiente anaeróbico que favorece la formación de suelos grisáceos, azulados o verdosos. Bajo estas condiciones, el control del drenaje es fundamental en plantaciones extensivas, para cultivos forestales perennes, en sus primeras etapas de establecimiento.

La arcilla predominante es la montmorillonita (2:1) del grupo de las esmectitas, la cual puede provenir de rocas sedimentarias, con características coloidales más acentuadas y minerales feldespáticos. La presencia de montmorillonita hace que la tasa de infiltración del agua sea mayor en el horizonte B, que en el horizonte A. Esto se debe a que la arcilla es más activa, lo cual provoca que el suelo se expanda y contraiga con más frecuencia según las variaciones de humedad del suelo. Debido a la presencia de materia orgánica en el horizonte superficial se reduce la expansión y contracción, y por consiguiente la capacidad de infiltración del horizonte A. Estructuralmente el comportamiento de la montmorillonita tiende a alterar la estructura granular, dando origen a una estructura en bloques, que presenta revestimientos de películas de arcilla iluvial, confiriéndoles a su vez estabilidad estructural [19]. Respecto a la porosidad, los suelos arcillosos tienen más microporosidad que macroporosidad. Esta característica también favorece la capacidad de retención de humedad, ya que el agua es retenida con mayor fuerza en los poros menores. Los agentes que agregan partículas primarias como óxidos de hierro y materia orgánica, favorecen la infiltración y percolación del agua en el perfil del suelo [20].

Con respecto a los aspectos geológicos, las rocas formadoras de estos suelos son depósitos del cuaternario, correspondientes a materiales sedimentarios y volcánicos durante el Paleógeno y Neógeno, que se encuentran distribuidos particularmente en la margen izquierda del río Reventazón. Los mismos provienen de la actividad volcánica establecida durante el cuaternario y su fuente principal ha sido el macizo del Turrialba y el volcán Dos Novillos [21]. Se describen como depósitos constituidos por coluvios y aluviones relacionados con la actividad neotectónica de las fallas y ubicados en sus vecindades [22] y sobreyacen a las formaciones geológicas más antiguas de manera discordante. Del estudio de la geología de la región según su estratigrafía, se evidencia que, para la época del holoceno, ha transcurrido el proceso de deposición de materiales, constituidos por minerales de cuarzo, feldespato, mica y fragmentos de rocas preferencialmente, que se transforman en minerales secundarios, tales como las esmectitas.

Del análisis de las características formadoras de los suelos, la mineralogía de la arcilla dominante es uno de los factores que más inciden en el movimiento del agua en el suelo. Este factor, asociado a otras propiedades que están siendo estudiadas en este proyecto, definen la relación entre la recarga en tránsito (flujo o lámina en tránsito infiltrada) y la recarga (flujo percolado). El primer caso se refiere al agua que desciende desde el suelo edáfico por debajo de la zona de raíces y se denomina lámina en tránsito; según [23] en su trayecto hasta el acuífero, el flujo en tránsito fluye por la zona no saturada del perfil del suelo y puede encontrar niveles menos permeables sobre los cuales se pueden generar acuíferos colgados, o bien, el agua puede fluir horizontalmente y descargar hacia la atmósfera como flujo hipodérmico o

interflujo. Si el agua infiltrada en el suelo, no intercepta niveles menos permeables para generar tablas freáticas colgadas y el relieve topográfico favorece la percolación vertical, se produce la recarga del acuífero más superficial, según sus condiciones físicas de permeabilidad. No obstante, el interés de este estudio, está relacionado a los flujos en tránsito y el agua retenida en la zona vadosa para disponibilidad hídrica de las plantas, principalmente la disponibilidad del agua en el suelo, para el desarrollo de las plantaciones forestales de *Hevea brasiliensis*.

Es importante indicar que en la estación lluviosa se pueden establecer flujos subsuperficiales. La ocurrencia de estos según [23] se da debido a que la conductividad vertical en los suelos disminuye con la profundidad y durante episodios lluviosos, pueden producirse flujos subsuperficiales laterales que pueden aflorar en superficie y volver a infiltrarse en zonas más bajas o más permeables. Este flujo subsuperficial juntamente con la escorrentía directa sobre la superficie del terreno, constituyen la escorrentía superficial. No se debe confundir, por tanto, la escorrentía subsuperficial con el flujo hipodérmico, aunque resulte difícil distinguirlos en el terreno. Según lo indicado anteriormente, es de suma importancia estimar mediante métodos como Balances Hídricos, la cantidad de agua que está disponible para percolar a lo largo de la zona no saturada y la que queda retenida parcialmente para ser absorbida por el sistema radicular de los árboles plantados, sumado a los balances con un monitoreo de los cuerpos de agua (quebradas, flujos hipodérmicos, manantiales) que se puede estimar de forma directa, para correlacionar, si la cantidad de lámina en tránsito alcanza los niveles más profundos, recargado las reservas de agua subterránea y por consiguiente generando un escurrimiento subterráneo cíclico. En la figura 3, se puede observar las distintas etapas del ciclo del agua a partir del perfil del suelo (zona no saturada) para conocer cada una de las entradas y salidas al sistema que permitan estimar de forma indirecta la cantidad de recarga por aguas percoladas a una reserva de agua subterránea y la cantidad de agua en tránsito y retenida que queda disponible para las plantaciones forestales antes de su percolación profunda. El potencial de lámina de agua en tránsito y cantidad de agua retenida en los primeros horizontes del suelo representa el flujo en tránsito que es de interés para el establecimiento de una plantación forestal, pero también, la capacidad de drenaje del suelo es importante para los terrenos donde se localiza la plantación, ya que debe existir un equilibrio, entre el flujo de agua disponible para el sistema radicular y las condiciones hidromórficas del suelo, que afectan su drenaje interno.

El sistema radical del árbol de hule (*Hevea brasiliensis*) ha sido objeto de numerosos estudios científicos que revelan una arquitectura radical compleja y adaptativa. Las investigaciones muestran que el sistema consiste en una raíz pivotante vigorosa que puede alcanzar 2 metros de profundidad a los 2-3 años de edad, complementada por un extenso sistema de raíces laterales secundarias y terciarias que constituyen aproximadamente el 15% del peso seco total del árbol maduro. Los estudios de dinámica radical profunda realizados en Tailandia demuestran que las raíces finas de *H. brasiliensis* pueden explorar perfiles de suelo hasta 4.5 metros de profundidad, con patrones de renovación diferenciados según la profundidad: las raíces superficiales (0.5 m) tienen una vida media de 16 meses, mientras que las raíces más profundas (2.5-3.0 m) presentan una renovación acelerada con vida media de solo 4 meses. La investigación sobre estrategias de búsqueda de nutrientes indica que la arquitectura del sistema radical juega un papel más determinante que las características individuales de las raíces, con plantaciones en elevaciones altas mostrando un incremento de 2.9 veces en el crecimiento longitudinal radical y 13.8 veces en la fracción de masa radical. Los estudios de competencia intrasistemática demuestran que existe una competencia activa entre la raíz pivotante y las raíces secundarias tempranas, donde el bloqueo de la raíz principal resulta en un aumento significativo de la elongación de raíces laterales. Las investigaciones también han establecido

que el sistema radical presenta una plasticidad arquitectónica superior comparada con la anatomía y morfología radical individual, permitiendo adaptaciones eficientes a gradientes de recursos ambientales

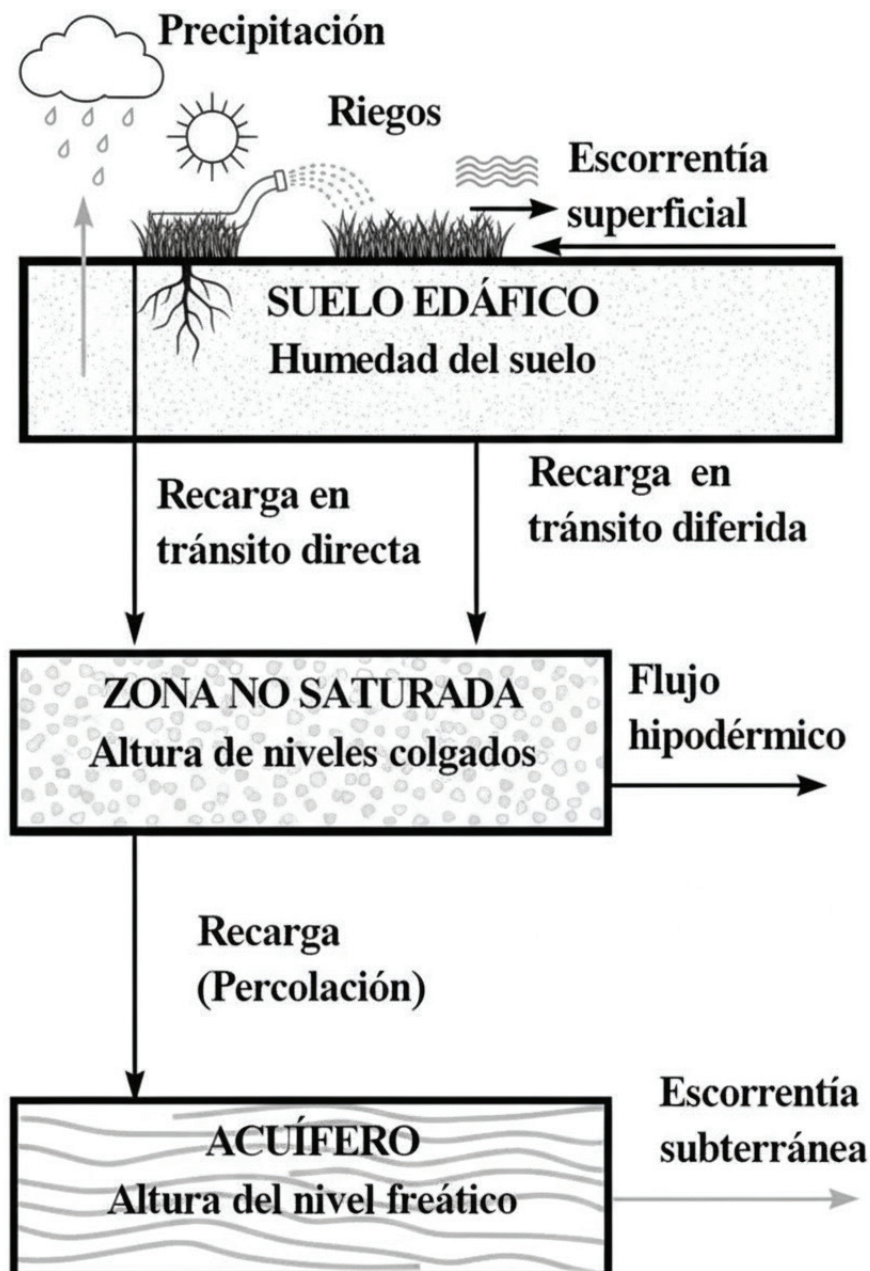


Figura 3. Etapas del ciclo del agua a partir del perfil del suelo (zona no saturada). Fuente: Modificada a partir de [24].

El sistema radicular de la planta de *Hevea brasiliensis*, está compuesto por una raíz pivotante principal, que puede alcanzar profundidades de hasta 2 metros en alrededor 2 a 3 años de establecimiento, además de contar con un sistema de raíces laterales superficiales, que se pueden extender hasta 10 metros alrededor del individuo. Es precisamente esta condición, la que hace necesario el análisis de las láminas de agua retenidas en el perfil del suelo, que son utilizadas por las raíces laterales y las láminas de agua en tránsito que son utilizadas por la raíz pivotante para absorber agua y nutrientes. Para el estudio de estas variables, es necesario

la determinación de algunos parámetros físico – químicos del suelo, donde a partir de los resultados obtenidos durante el proceso de estudio, se podrá comprender la interrelación entre el agua disponible en el suelo, para el establecimiento de una plantación forestal y su capacidad de permanecer retenida, el tiempo suficiente para asegurar la supervivencia de los árboles plantados [25], [26], [27], [28]. La figura 4 ilustra el sistema radical de un árbol de *Hevea brasiliensis* en el entorno de una plantación para el aprovechamiento del látex y se ilustra el rol del agua subterránea profunda como mecanismo de salvaguarda ante la eventualidad de sequías prolongadas en el futuro.

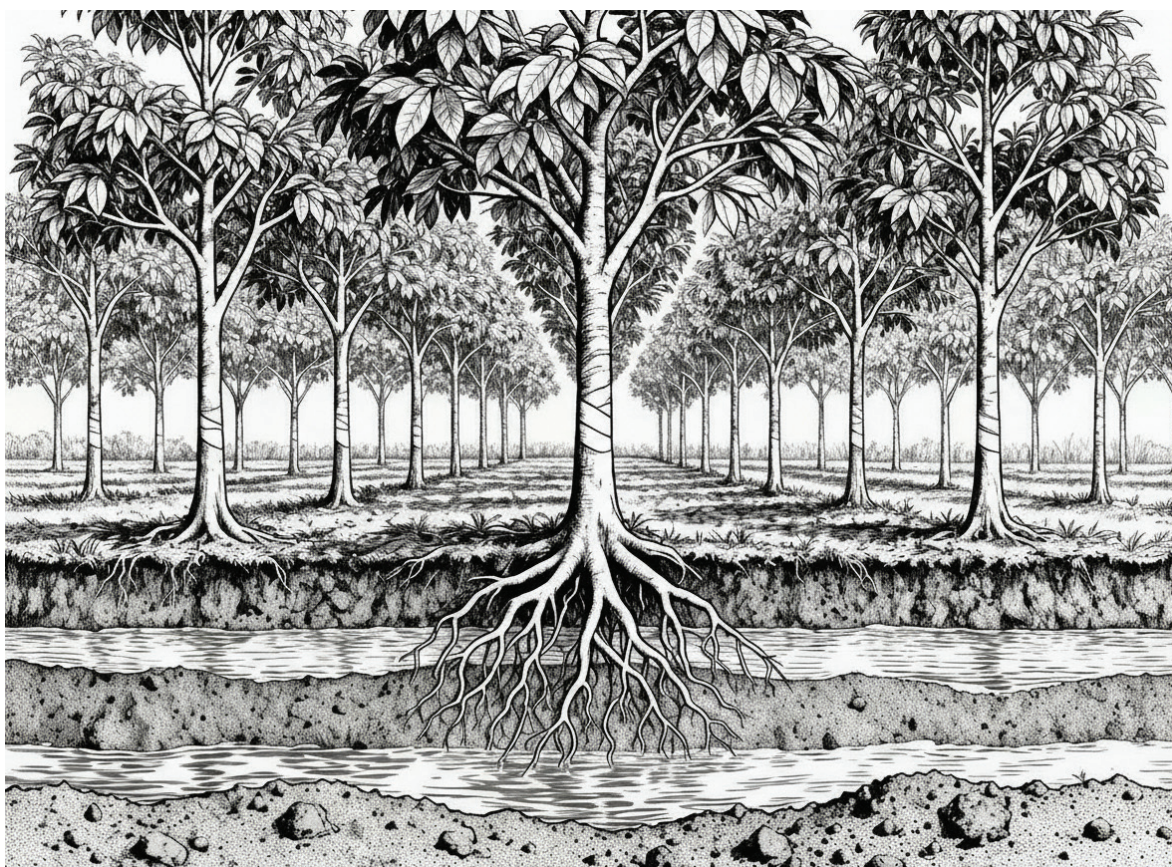


Figura 4. Plantación típica de *Hevea brasiliensis* mostrando el sistema radical y el efecto de las aguas subterráneas.

Conclusiones

- A la luz de los datos recopilados y el análisis de muestras del suelo, la disponibilidad de agua en el suelo, determinada por propiedades hidropedológicas como textura, densidad aparente, porosidad, conductividad hidráulica y retención de humedad, es un factor crítico que influye en la previsión a la resistencia al estrés hídrico de las plantaciones de *Hevea brasiliensis*. Las variedades edáficas y químicas del suelo interactúan de manera compleja para afectar estas dinámicas, siendo esenciales para prever el impacto de la variabilidad climática sobre estas plantaciones.

- El sistema radical de *Hevea brasiliensis* presenta una arquitectura compleja y adaptativa que incluye una raíz pivotante profunda que puede alcanzar hasta 2 metros en pocos años, complementada con raíces laterales extensas. Esta capacidad hace presumir que la planta puede aprovechar las reservas de agua profunda, fundamental para su supervivencia y productividad durante períodos de sequía prolongada.
- La accesibilidad efectiva al agua subterránea funciona como un mecanismo esencial para la resiliencia hídrica de las plantaciones perennes del árbol de hule, contribuyendo a mantener la transpiración y crecimiento frente a condiciones de déficit hídrico estacional o multianual. Sin embargo, la sobreexplotación del nivel freático puede disminuir significativamente el crecimiento y aumentar la vulnerabilidad de las plantas al estrés hídrico extremo, especialmente en períodos de sequía prolongada.

Recomendaciones

- Continuar los estudios en plantaciones forestales en general para integrar el monitoreo continuo y específico del nivel freático y las propiedades hidropedológicas del suelo en las zonas de cultivos forestales en suelos inceptisoles y ultisoles, para diseñar intervenciones de manejo que garanticen un equilibrio óptimo entre la disponibilidad hídrica para las raíces y la capacidad de drenaje del suelo, favoreciendo la supervivencia y productividad sostenible de las plantaciones.
- Promover la conservación y restauración de ecosistemas con acceso a aguas subterráneas profundas, en tanto que estos sistemas acuíferos son críticos para asegurar la seguridad hídrica y la adaptación al cambio climático en el sector forestal, asegurando así la continuidad de la producción de madera y caucho natural bajo escenarios climáticos adversos.
- Desarrollar y aplicar paquetes tecnológicos adaptativos que consideren la arquitectura radical de las especies de plantación y su interacción con el suelo y el agua, incorporando conocimientos sobre la variabilidad climática y la genética de clones, para mejorar la eficiencia en el uso del agua y la resistencia a plagas, enfermedades y estrés hídrico.

Agradecimientos

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión por el financiamiento al proyecto “Cultivo comercial del árbol *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) para la producción de caucho natural en zonas rurales de Costa Rica”, Código 1401136. Se agradece a la Dirección de Posgrado del TEC por la beca otorgada a la estudiante Fanny Brenes Bonilla. Un reconocimiento al Ing. Juan Fernando Letona Paiz por toda la colaboración a través de la empresa Hevea CR Desarrollos Agroforestales S.A.

Referencias

- [1] K. Glanville, F. Sheldon, D. Butler, S. Capon. “Effects and significance of groundwater for vegetation,” *Science of The Total Environment* Volume 875, 1, pp. 1-18, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162577>
- [2] R. Chitra-Tarak, C. Xu, S. Aguilar, K.J. Anderson-Teixeira, J. Chambers, M. Detto, B. Faybishenko, R. A. Fisher, R. G. Knox, C. D. Koven, L.M. Kueppers, N. Kunert, S.J. Kupers, N. G. McDowell, B.D. Newman, S.R. Paton, R. Pérez, L. Ruiz, L. Sack, J. M. Warren, B.T. Wolfe, C. Wright, S.J. Wright, J. Zailaa and S.M. McMahon, *Hydraulically-vulnerable trees survive on deep-water access during droughts in a tropical forest. New Phytologist* 231: 1798–1813, 2021. doi: 10.1111/nph.17464. 2021 <https://doi.org/10.1111/nph.17464>

- [3] S. Zhao, X. Zhao, Y. Li, X. Chen, C. Li, H. Fang, W. Li and W. Guo. Impact of deeper groundwater depth on vegetation and soil in semi-arid region of eastern China. *Front. Plant Sci.* 14:1186406, 2023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1186406>
- [4] K. Mall, J.D. Hernan. "Water shortage risks from perennial crop expansion in California's Central Valley". *Environ. Res. Lett.* 14, pp. 1-9, 2019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4035>
- [5] P. Jiang, J. Yan, R. Liu, X. Zhang, y S. Fan, "Patterns of deep fine root and water utilization amongst trees, shrubs and herbs in subtropical pine plantations with seasonal droughts," *Front. Plant Sci.*, vol. 14, pp. 1-12, 2023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1275464>
- [6] Global Water Partnership, "Aguas subterráneas y agricultura de regadío: haciendo una relación beneficiosa más sostenible," pp. 1-19, 2023. https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/perspective-papers/perspective-paper_gwp-and-irrigated-agriculture_spanish.pdf
- [7] I. Prieto, C. Armas, F.I. Pugnaire, "Hydraulic lift promotes selective root foraging in nutrient-rich soil patches". *Funct. Plant Biol.* 39, 804–812, 2012. <https://doi.org/10.1071/FP12070>
- [8] United Nations Environment Programme, "Becoming Generation Restoration Ecosystem restoration for people, nature and climate", Nairobi, 2021. [Online]. Available: <https://www.unep.org/resources/ecosystem-restoration-people-nature-climate>
- [9] A.Y.A. Rahman, A.O. Usharraj, B.B. Misra, et al, " Draft genome sequence of the rubber tree *Hevea brasiliensis*". *BMC Genomics* 14, 75, pp. 1-15, 2013. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-14-75>
- [10] Y. Wang, P.M. Hollingsworth, D. Zhai, et al. "High-resolution maps show that rubber causes substantial deforestation". *Nature* 623, 340–346, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06642-z>
- [11] Statista Research Department. "Producción mundial de caucho natural desde el año 2000 a 2022" Statista, 2023. <https://es.statista.com/estadisticas/635827/produccion-de-caucho-natural-a-nivel-mundial/>
- [12] G. Schosinsky, "Modelo de flujo para la zona no saturada: ZONOSA," *Revista Geológica de América Central*, vol. 21, pp. 69–80, 1998.
- [13] B. Patiño, L. Shukla, y S. Pandey, "Propiedades hidrofísicas de suelos de la zona cafetera y su influencia en las funciones ecosistémicas," *Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)*, vol. 14, no. 1, pp. 51–84, 2023.
- [14] L.A. Lince & S.S. Khalajabadi, "Propiedades hidrofísicas de suelos de la zona cafetera colombiana y su relación con el material parental", *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 14(1), 51-84, 2022. <https://doi.org/10.22490/21456453.5891>
- [15] A. Miranda, J. Carrasco, M. González, R. Mentler, Í. Moletto, A. Altamirano y A. Lara, "Informe Proyecto ARCLim: Bosques Nativos y Plantaciones Forestales", Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), Universidad de La Frontera, Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería, Universidad de Chile, y Universidad Austral de Chile, coordinado por el Centro de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio Ambiente y la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Temuco, Chile, 2020.
- [16] USDA-NRCS, "Soil Survey Staff, Keys to Soil Taxonomy", 12th ed., Washington, D.C., USA: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014.
- [17] F. Bertsch, R. Mata y C. Henríquez, "Características de los principales órdenes de suelos presentes en Costa Rica," Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 1993.
- [18] D. F. Jaramillo, "Introducción a la ciencia del suelo", 595 p., Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2002.
- [19] J. Salinas, G. Valencia y A. Carlos, "Oxisoles y ultisoles en América Latina tropical", Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia, 1983.
- [20] M. Resende, N. Curi, S. Batista y G. Fernandes, "Pedología. Base para distinção de ambientes", 5ª ed., 322 p., Universidade Federal de Lavras, Brasil, 2007.
- [21] ICE, "Avance a la Factibilidad, Proyecto Hidroeléctrico Reventazón", Informe interno, 222 p., Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica, 2006.
- [22] L. Linkimer, "Neotectónica del extremo oriental del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica", Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2003.
- [23] J. Samper, B. Pisani, y J. Espinha, "Estudio del flujo hipodérmico en zonas de montaña," *Estudios en la Zona No Saturada del Suelo*, vol. X, pp. 265-370, 2011. Disponible en: <https://zonanosaturada.com/zns11/publications/p365.pdf>

- [24] C. J. Schulz y R. F. García, “Aguas subterráneas. Balance hídrico y recarga de acuíferos”, Instituto de Hidrología Ambiental y Estudios del Agua (IHE), Madrid, España, 2021. [Archivo PDF]. Disponible: <https://www.cohife.org.ar/wp-content/uploads/2021/03/Balance-y-Recarga-de-Acuiferos-Version-Final.pdf>
- [25] J. L. Maeght, S. Gonkhamdee, C. Clément, S. Isarangkool Na Ayutthaya, A. Stokes and A. Pierret, “Seasonal Patterns of Fine Root Production and Turnover in a Mature Rubber Tree (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) Stand- Differentiation with Soil Depth and Implications for Soil Carbon Stocks “, *Frontiers in Plant Science*, pp. 1-11, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2015.01022/full>
- [26] P. Thaler, L. Pagès, “Competition within the root system of rubber seedlings (*Hevea brasiliensis*) studied by root pruning and blockage”, *Journal of Experimental Botany*, Volume 48, Issue 7, pp. 1451–1459, 1997, <https://doi.org/10.1093/jxb/48.7.1451>
- [27] M. Duan, L. Li, G. Ding, and Z. Ma, “Leading nutrient foraging strategies shaping by root system characteristics along the elevations in rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations,” *Tree Physiology*, vol. 42, no. 12, pp. 2468–2479, 2022, <https://academic.oup.com/treephys/article-abstract/42/12/2468/6644883?redirectedFrom=fulltext>
- [28] Ministry of Environment, Forest and Climate Change (MoEF&CC) and Rubber Research Institute of India, “Biology of *Hevea brasiliensis* (Rubber),” Compiled by J. Jacob, C. Narayanan, A. Thulaseedharan, K. K. Mydin, R. G. Kala, and S. P. Idicula, UNEP/GEF Phase II Capacity Building Project on Biosafety, Rubber Board, Kottayam, India, pp. 1-30. S.f., Disponible en: https://bangladeshbiosafety.org/wp-content/uploads/2017/06/Biology_of_Hevea_brasiliensis_Rubber_In.pdf

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

En este estudio, generamos la figura 4 utilizando una herramienta de IA Google Gemini 3 Flash. Las imágenes se emplearon para ilustrar el propósito del estudio. Además, hemos verificado que las imágenes sean precisas y representativas de los datos y teorías discutidos en el artículo.