



**TECNOLOGÍA**  
*en marcha*


Revista trimestral  
Marzo 2026  
Volumen 39  
ISSN-E 2215-3241

**Número especial**

# VII Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado

Publicación y directorio en catálogos

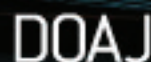
 latindex

 redalyc.org

 Dialnet

 melICA

 SciELO

 DOAJ

  
Editorial Tecnológica  
de Costa Rica

**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

## Comisión Editorial

Felipe Abarca Fedullo. Director.  
Editorial Tecnológica de Costa Rica

Juan Antonio Aguilar Garib  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Universidad Autónoma de Nuevo León.  
México

Carlos Andrés Arredondo Orozco  
Facultad de Ingenierías  
Universidad de Medellín. Colombia

Lars Köhler  
Experimenteller Botanischer Garten  
Georg-August-Universität Göttingen.  
Alemania

Jorge Solano Jiménez  
Instituto Costarricense del Cemento  
y del Concreto

## Edición técnica

Alexa Ramírez Vega

## Revisión filológica

Esperanza Buitrago Poveda

## Diseño gráfico

Felipe Abarca Fedullo

## Diagramación

Alexa Ramírez Vega

## Diseño de cubierta

Felipe Abarca Fedullo

## Imagen de cubierta

Felipe Abarca Fedullo

## Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica  
de Costa Rica. - Vol. 39, número especial.

VII Encuentro Bienal Centroamericano y del  
Caribe de Investigación y Posgrado Marzo,  
2026. ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –  
Publicaciones periódicas CDD:600



TEC | Tecnológico  
de Costa Rica

Apdo 159-7050 Cartago, Costa Rica

Tel.:(506) 2550-2297, 2550-2618

Correo electrónico: [editorial@itcr.ac.cr](mailto:editorial@itcr.ac.cr)

Web: <https://www.tec.ac.cr/editorial>

[http://revistas.tec.ac.cr/tec\\_marcha](http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha)



TEC | Tecnológico  
de Costa Rica

La Editorial Tecnológica de Costa Rica es una dependencia especializada del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Desde su creación, en 1978, se ha dedicado a la edición y publicación de obras en ciencia y tecnología. Las obras que se han editado abarcan distintos ámbitos respondiendo a la orientación general de la Institución.

Hasta el momento se han editado obras que abarcan distintos campos del conocimiento científico-tecnológico y han constituido aportes para los diferentes sectores de la comunidad nacional e internacional.

La principal motivación de la Editorial es recoger y difundir los conocimientos relevantes en ciencia y tecnología, llevándolos a los sectores de la comunidad que los requieren.

La revista *Tecnología en Marcha* es publicada por la Editorial Tecnológica de Costa Rica, con periodicidad trimestral. Su principal temática es la difusión de resultados de investigación en áreas de Ingeniería. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, especialistas, docentes y estudiantes universitarios de todo el mundo.

## Publicación y directorio en catálogos





# **TECNOLOGÍA** *en marcha*

## Contenidos

### Presentación

Presentation

*Luis Alexander Calvo-Valverde, Patricia Guevara-Chaves*..... 2

### Experiencias de aprendizaje sobre sostenibilidad en arquitectura

Learning experiences about environmental sustainability in architecture

*Andrea Ávila-Zamora*..... 5

### Análisis florístico y estructural del bosque tropical en el Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica

Floristic and structural analysis of tropical forest in Palo Verde National Park, Costa Rica

*Elia Anahí Rodríguez-González, Casia Soto-Montoya, Ruperto Quesada-Monge, Lupita Vargas-Fonseca*..... 19

### Modelación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos: una revisión

Modeling of water erosion and sediment transport: a review

*Ericka Picado-Mora, Karolina Villagra-Mendoza, Margaret Gitau*..... 34

### 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-Bonilla, Dagoberto Arias-Aguilar*..... 44

### Ciudades a la Vista: UAVs Autónomos para Mapas 3D sin LiDAR

Cities in Sight: Autonomous UAVs for 3D Maps without LiDAR

*Luis Alberto Chavarría-Zamora, Pablo Soto-Quirós*..... 57

# Presentación

## Presentation

Luis Alexander Calvo-Valverde<sup>1</sup>, Patricia Guevara-Chaves<sup>2</sup>

---

Hernández-Zamora, M.F. Presentación. *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. 2-4.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i6.8568>



1 Dirección de Posgrado. Vicerrectoría de Investigación y Extensión. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 [icalvo@itcr.ac.cr](mailto:icalvo@itcr.ac.cr)

2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 [pguevara@itcr.ac.cr](mailto:pguevara@itcr.ac.cr)

## Investigación y sostenibilidad en la región centroamericana

El Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), a través de su Dirección de Posgrado, presenta con orgullo este número especial de la revista *Tecnología en Marcha*, dedicado a difundir los trabajos presentados por personas estudiantes, docentes investigadoras en el VII Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado del Sistema Regional Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado (SIRCIP-CSUCA), celebrado en Antigua Guatemala, del 8 al 10 de octubre de 2025

Esta edición especial constituye una ventana para visibilizar el compromiso regional con la investigación aplicada, la sostenibilidad ambiental y la innovación tecnológica, pilares estratégicos del desarrollo de los posgrados del TEC. Las contribuciones aquí reunidas reflejan la diversidad disciplinar y la rigurosidad académica que caracterizan el quehacer científico de la institución, en estrecha articulación con las prioridades de desarrollo sostenible y los Objetivos de Desarrollo de la Agenda 2030.

Los artículos seleccionados responden a ejes temáticos de alto impacto para la región: transformación digital, sostenibilidad ambiental, innovación en procesos educativos, conservación de ecosistemas tropicales y adaptación al cambio climático

Desde una mirada interdisciplinaria, los trabajos publicados dan cuenta de cómo la ciencia y la tecnología pueden contribuir al bienestar de las comunidades, a la gestión responsable del territorio y al fortalecimiento de las capacidades locales en investigación avanzada.

En el ámbito de la transformación digital y la automatización, el artículo *“Ciudades a la vista: UAVs autónomos para mapas 3D sin LiDAR”*, de Dr. Luis Alberto Chavarría-Zamora, propone una alternativa de bajo costo para la cartografía tridimensional mediante vehículos aéreos no tripulados y técnicas de inteligencia artificial, destacando su potencial para optimizar la gestión urbana en entornos tropicales

Desde el enfoque de la educación para la sostenibilidad, la Dra. Andrea Ávila-Zamora presenta su propuesta sobre *“Experiencias de aprendizaje sobre sostenibilidad en arquitectura”*, donde analiza metodologías participativas en la enseñanza universitaria que integran el pensamiento crítico y la acción local frente a los retos ambientales y urbanos contemporáneos

La dimensión ambiental y ecológica se aborda en la investigación *“Análisis florístico y estructural del bosque tropical en el Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica”*, de la Máster Elia Anahí Rodríguez González, becaria del Programa Regional DAAD. Este trabajo aporta datos inéditos sobre la biomasa y composición de especies en el bosque seco tropical, un ecosistema clave para la conservación de la biodiversidad centroamericana

Por su parte, la Máster Ericka Fabiola Picado-Mora analiza el vínculo entre degradación del suelo y sostenibilidad agrícola en *“Modelación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos: una revisión”*, donde evalúa modelos internacionales y propone adaptaciones metodológicas para condiciones tropicales, con miras a fortalecer las estrategias de conservación del suelo y gestión del agua

Finalmente, la Máster Fanny Andrea Brenes-Bonilla, junto con el Dr. Dagoberto Arias-Aguilar, presentan su propuesta titulada *“Efecto de la profundidad de la capa freática en la sobrevivencia y productividad de las plantaciones de hule ante el riesgo de la variabilidad climática”*. Este estudio pionero examina la interacción entre propiedades del suelo, disponibilidad hídrica y rendimiento forestal, aportando evidencia clave para la adaptación de sistemas agroforestales ante escenarios de cambio climático

Cada uno de estos artículos representa un esfuerzo por articular la investigación con la solución de problemas reales en sectores estratégicos para el desarrollo sostenible: energía, agua, biodiversidad, territorio y educación. Además, reflejan la creciente proyección internacional del TEC y de sus programas de posgrado, que fortalecen vínculos académicos con universidades centroamericanas y organismos de cooperación, como el Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD).

En el marco del VII Encuentro Bienal, se incluyó la mesa de trabajo titulada “*Cambio climático y enfermedad renal crónica no tradicional (ERCnt)*”, presentada por las estudiantes graduadas Máster Fidelia Solano Gutiérrez y Máster Maricruz Chavarría Castrillo, de la Maestría en Salud Ocupacional, programa conjunto entre la Universidad Nacional (UNA) y el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC). Aunque esta participación, no figura en esta edición especial, interesa destacar por su enfoque interdisciplinario y regional, al abordar una de las problemáticas de salud pública más apremiantes de Centroamérica, vinculando los efectos del cambio climático con los determinantes laborales y ambientales de la ERCnt. La mesa es un valioso ejemplo de colaboración académica entre instituciones de educación superior en Costa Rica y de compromiso científico con la salud y sostenibilidad en la región.

Este número especial se concibe, así, como un testimonio del talento humano y la cooperación científica regional, y como una invitación a continuar impulsando la investigación interdisciplinaria y la formación de capital humano avanzado en beneficio de Centroamérica y el Caribe.

### **Declaratoria sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)**

Para la versión final se utilizó la asistencia de inteligencia artificial (ChatGPT modelo GPT-5 de OpenAI), empleando insumos institucionales oficiales (Acta de entrega de ponencias y carta de aceptación de mesa de trabajo; texto de las ponencias, programación y agenda del evento; así como, las notas informativas generadas) para la estructuración y estilo del texto.

# Experiencias de aprendizaje sobre sostenibilidad en arquitectura

## Learning experiences about environmental sustainability in architecture

Andrea Ávila-Zamora<sup>1</sup>

---

Ávila-Zamora, A. Experiencias de aprendizaje sobre sostenibilidad en arquitectura. *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. 5-18.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i6.8569>



1 Doctora en arquitectura. Escuela de Arquitectura y Urbanismo, Instituto Tecnológico de Costa Rica.

 [aavila@itcr.ac.cr](mailto:aavila@itcr.ac.cr)

 <https://orcid.org/0000-0003-3542-6426>

## Palabras clave

Metodología de enseñanza; innovación educativa; pedagogía experimental; investigación participativa; casos de estudio.

## Resumen

La construcción del conocimiento en el aula, se realiza en varias vías, la forma más tradicional que va desde el docente hacia el alumno, así como las metodologías de enseñanza y aprendizaje más contemporáneas, que promueven que el intercambio de información se logre entre los mismos pares y donde la construcción individual del aprendizaje debe fomentar la investigación, la exploración y la práctica, vinculados idealmente a la realidad nacional. Como parte de los trabajos realizados en el curso de Sistemas Espaciales y Ambientales I, de la carrera de Arquitectura del TEC, se estudian los diferentes enfoques que proponen las denominadas Smart Cities desde la sostenibilidad medioambiental en los contextos mundiales y a partir de esto, los estudiantes tienen el encargo de diseñar propuestas teóricas que contribuyan con el mejoramiento integral de diferentes localidades de nuestro país, que ellos consideren que requieren de alguna intervención, ya sea a nivel tecnológico, mejoramiento de barrios, de movilidad, etc., con el objetivo de mejorar su experiencia de aprendizaje vinculada a nuestra realidad nacional. Este artículo, resume algunas de las principales experiencias obtenidas por los estudiantes del curso de Sistemas Espaciales y Ambientales I entre los años 2021 a 2024, en la búsqueda del desarrollo de otras estrategias metodológicas para el mejoramiento del proceso de enseñanza y aprendizaje, como es el pensamiento crítico, por medio del planteamiento de casos de estudio contextualizados en la sociedad costarricense a la que pertenecen y a su diario vivir.

## Keywords

Teaching methodology; educational innovation; experimental pedagogy; participatory research; case studies.

## Abstract

The construction of knowledge in the classroom is carried out in several ways, the most traditional way that goes from the teacher to the student, as well as the most contemporary teaching and learning methodologies, which promote the exchange of information between them. peers and where the individual construction of learning must encourage research, exploration and practice, ideally linked to the national reality. As part of the work carried out in the course of spatial and environmental systems I, of the Architecture degree at TEC, the different approaches proposed by the so-called Smart Cities are studied from environmental sustainability in global contexts and from this, the students are in charge of designing theoretical proposals that contribute to the comprehensive improvement of different locations in our country, which they consider require some intervention, whether at a technological level, improvement of neighborhoods, mobility, etc., with the objective to improve their learning experience linked to our national reality. This article summarizes some of the main experiences obtained by the students of the Spatial and Environmental Systems I, course between the years 2021 to 2024, in the search for the development of other methodological strategies to improve the teaching and learning process, such as critical thinking, through the approach of case studies contextualized in the Costa Rican society to which they belong and their daily lives.

## Introducción

Uno de los principales retos que tenemos los educadores hoy en día es la vinculación de nuestros estudiantes a escenarios de la vida real, desde nuestros contextos educativos teóricos, de esta forma logramos que no vivan ajenos a la realidad nacional, sean protagonistas de las posibles soluciones o que al menos se comprometan a ser una generación nueva de cambio para los problemas que afectan el desarrollo de su país. En el proceso de enseñanza y aprendizaje de nuestros estudiantes, como sistema de comunicación entre las personas estudiantes y el docente, se involucra la implementación de diversas técnicas o estrategias metodológicas que le permiten al docente buscar nuevos escenarios y cada vez más creativos, para mediar los contenidos que forman parte del plan de estudios de la carrera. Los conocimientos adquiridos a lo largo de nuestras vidas constituyen parte fundamental del capital cultural con el que aportamos a la sociedad. Las tareas llevadas a cabo por los docentes son uno de los mayores retos para el desarrollo de un país, ya que una sociedad educada es una sociedad productiva. En este contexto, se reliva la importancia de la aplicación de enfoques pedagógicos que permitan la innovación en los procesos de enseñanza. [1]

En la didáctica de los tiempos modernos, este vínculo que se fomenta entre las situaciones reales de nuestra sociedad y la aplicación del método científico, ya que promueve que las personas estudiantes actúen, prevean y resuelvan teóricamente por medio del pensamiento crítico en un contexto donde van a mediar otras competencias como el trabajo en equipo, el intercambio de ideas y la cooperación entre otras. Parte de la dinámica implementada en el curso de Sistemas Espaciales y Ambientales de la carrera de Arquitectura del TEC, fue el estudio, análisis y propuesta de las Smart Cities en diferentes contextos. La educación desempeña un papel fundamental en la promoción del desarrollo sostenible en las ciudades. Desde el surgimiento de los movimientos ecologistas y la creación de organismos internacionales como la ONU, se ha reconocido la importancia de la sostenibilidad en los acuerdos internacionales. La Agenda 2030 de las Naciones Unidas, a través de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, destaca el papel crucial de la educación en la promoción de estilos de vida sostenibles. El objetivo 4, “Garantizar una educación de calidad, inclusiva y equitativa y promover oportunidades de aprendizaje a lo largo de toda la vida para todos”, reconoce que la educación es fundamental para impulsar cambios culturales hacia una sociedad más justa y sostenible.[5] Las ciudades, como espacios donde conviven personas, impactan en la calidad de vida del ciudadano que, día a día, se ve enfrentado a todo tipo de problemas como la contaminación por congestión vehicular o saturación industrial; la escasez de recursos finitos; la falta de vivienda adecuada y empleo; el aumento de condiciones de pobreza y hacinamiento; la inseguridad ciudadana; la mala disposición de los desechos y, en fin, a toda una serie de problemas y desafíos derivados muchas veces de la falta de una adecuada planificación del espacio y de una óptima utilización y distribución de los recursos escasos existentes. [6] Las tecnologías han seguido impactando a la sociedad a lo largo de los años, mejorando nuestra calidad de vida, y han hecho posible la información basada en datos, la movilidad conectada y las comunicaciones en cualquier momento. Gracias a la capacidad adicional que ofrece la fusión de tecnologías emergentes, muchos países han implementado proyectos nacionales relacionados con las ciudades inteligentes para transformar vidas, mejorar las operaciones comerciales y la competitividad en el mercado.[2] Es un proceso transformador que involucra reflexión, crítica, revisión por pares e intercambio público, lo que conduce a mejores prácticas de enseñanza, mejor aprendizaje de los estudiantes y beneficios sociales.

## Objetivo general de la investigación

“Estudio de las propuestas teóricas sobre las Smart Cities realizadas por las personas estudiantes en el curso de Sistemas Espaciales y Ambientales I de la EAU, TEC como estrategia metodológica para el desarrollo del pensamiento crítico y reflexivo en un contexto real costarricense”.

## Objetivos específicos

1. Estudiar las comunidades seleccionadas por los estudiantes para realizar sus propuestas.
2. Analizar las variables de las Smart Cities implementadas, para comprender mejor sus intereses y recomendaciones.
3. Evaluar el conocimiento adquirido en el tema de Smart Cities de forma integral, en la búsqueda del pensamiento crítico por parte de las personas estudiantes.

## Materiales y métodos (metodología)

La metodología utilizada en esta investigación fue de carácter exploratoria y descriptiva, dado que los objetivos están enfocados a comprobar si tras el proceso de aprendizaje desarrollado, las personas estudiantes adquirieron nuevos conocimientos en el tema en cuestión. Los procesos cognitivos o intelectuales, actitudinales y procedimentales asociados al aprendizaje de los estudiantes, han permitido la creación de ejercicios y actividades de clase, que contribuyen al desarrollo de las diferentes competencias que el estudiantado requiere desarrollar para mejorar sus habilidades dentro y fuera del aula, tal es el ejemplo de los casos de estudio. Conforme el entorno laboral y social evoluciona hacia una interconexión y diversidad mayor, este tipo de habilidades se vuelven imprescindibles para el éxito profesional y personal. Permiten interrelacionarnos con otros, así como hacer frente a diferentes situaciones reaccionando de manera adecuada, facilitan un desempeño exitoso en las tareas emprendidas, en sí, proporcionan un conjunto de habilidades que tiene que ver con el saber, habilidades que permiten relacionarse adecuadamente con los demás, con el entorno y con nosotros mismos. [4] El curso de Sistemas Espaciales y Ambientales I, pertenece al área de ecología y medioambiente dentro de la carrera de Arquitectura y busca que las personas estudiantes, observen, analicen, cuestionen la realidad nacional e internacional en materia de sostenibilidad medioambiental como un elemento integrador de la sociedad, la economía, las personas y el medio ambiente natural y construido. Según se indica en el programa oficial del curso “El estudiante será capaz de determinar sistemas arquitectónicos sostenibles para su implementación en proyectos que respondan a modelos de desarrollo ambiental, social y económico.” [7] Específicamente para este ejercicio metodológico, se buscó que el estudiantado a partir de la información brindada, no solo la recordara, la comprendiera, sino que también la aplicara en un caso de estudio en particular, que a su vez tenía como objetivo de aprendizaje el análisis de la problemática medioambiental de una comunidad real, la evaluación de las condiciones actuales y finalmente la creación de una propuesta teórica de mejoramiento, basada en los principios de las Smart Cities.

Para lograr cumplir con los objetivos propuestos, se plantea una metodología SoLT, que busca mejorar los aprendizajes de los estudiantes por medio de la práctica docente reflexiva, transformadora y desde la evidencia. La metodología de enseñanza y aprendizaje “Scholarship of teaching and learning (SoLT), fortalece la innovación y la comunicación en los procesos de enseñanza; mediante el desarrollo de una pedagogía mediante ciclos recursivos y crecientes de diseño, aplicación y sistematización. [8] El estudio de la enseñanza y el aprendizaje (SoTL) en la educación superior, tiene una profunda preocupación por desarrollar el pensamiento crítico,

que se ha convertido en un resultado de aprendizaje común y un atributo deseado para los graduados. [3] El rol del estudiante es fundamental para la metodología SoLT ya que fomenta la didáctica universitaria inter trans-disciplinaria, al fomentar una cultura de investigación y colaboración entre educadores, SoLT promueve prácticas de enseñanza innovadoras que trascienden los límites disciplinarios tradicionales.

## Procedimiento

### *Población*

La población muestra, fueron personas estudiantes de nivel de bachillerato, el cual es un nivel intermedio en la carrera de Arquitectura y se aplicó a un promedio de 98 estudiantes del curso entre los años 2021 al 2024. Con este ejercicio metodológico, se pretendió crear una conciencia en el estudiante sobre la importancia de sus decisiones a la hora de conceptualizar, diseñar y especificar los materiales y sistemas de un proyecto, con miras a proponer una arquitectura respetuosa del medio ambiente.

### *Temporalidad*

La actividad fue realizada durante la semana 13, avanzada la segunda mitad del curso lectivo, donde las personas estudiantes ya han adquirido conocimientos básicos sobre el tema de sostenibilidad medioambiental aplicada a la arquitectura. La duración del ejercicio fue de una semana.

## Instrumento

### *Descripción de las actividades realizadas*

Se utilizó como herramienta de enseñanza y aprendizaje, el *caso de estudio*, como punto de partida para que las personas estudiantes realizaran una propuesta teórica para crear ciudades que fuesen sostenibles económicas, sociales y medioambientalmente viables, denominadas Smart Cities. Durante el tiempo de clase, la actividad inicia con información y conceptos básicos sobre qué son las Smart Cities. Adicionalmente, se les muestra un video que ejemplifica el caso de Santiago de Chile, como una ciudad inteligente latinoamericana para introducir el tema de estudio.

Los casos de estudio son una vinculación a situaciones reales, presentan muchas ventajas en el contexto educativo, ya que representa una conexión entre la teoría y la práctica o la realidad. Es una técnica comúnmente utilizada que favorece la observación de diversas perspectivas sobre un tema común, presenta una solución viable al lograr que las personas estudiantes investiguen sobre los antecedentes del tema, lo que ha funcionado bien, lo que no lo cual les permite identificar y plantear de forma teórica, posibles soluciones.

Con estos insumos, las personas estudiantes debían considerar que sus propuestas teóricas, logaran:

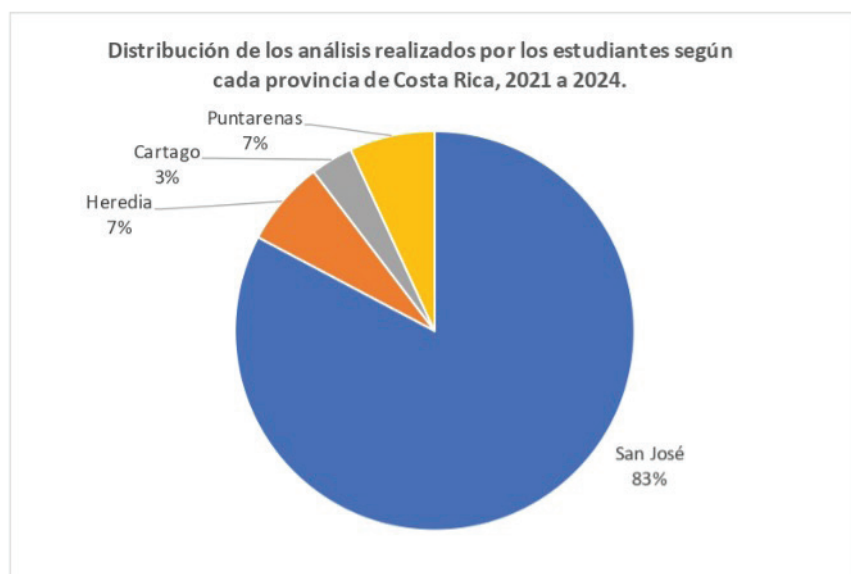
- Promover la inclusión social.
- Desarrollar al máximo la tecnología, productividad y la innovación.
- Contribuir a mejorar la calidad de vida de los usuarios de estas comunidades.
- Que fuesen proyectos que generen una integración regional garantizando ahorros económicos y energéticos sustanciales.

A partir de lo anterior, los estudiantes tenían el encargo de definir la comunidad costarricense enmarcada en un contexto real a trabajar, para transformarla teóricamente en una ciudad inteligente. Debían analizar los principales problemas que atentan a esta comunidad en 3 ejes: *movilidad, medio ambiente y seguridad*. Adicionalmente tenía que realizar una búsqueda en internet sobre algunos otros ejemplos de ciudades inteligentes alrededor del mundo y analizarlos, como el caso de Finlandia, Suecia y Chile. Finalmente, como parte del encargo, en su propuesta teórica debían contemplar el diseño conceptual de un modelo básico en 3D que resumiera la zonificación de ciudad inteligente propuesta, contemplando soluciones para las siguientes de:

- Movilidad.
- Medio ambiente.
- Seguridad.
- Cómo mejorar la calidad de vida de las personas.
- Cómo hacer un uso más eficiente de la energía.

## Resultados

A continuación, se muestran las provincias seleccionadas por las personas estudiantes dentro de nuestro territorio costarricense, para realizar su propuesta de mejoramiento:



**Figura 1.** Gráfico de localización de las propuestas de mejoramiento.

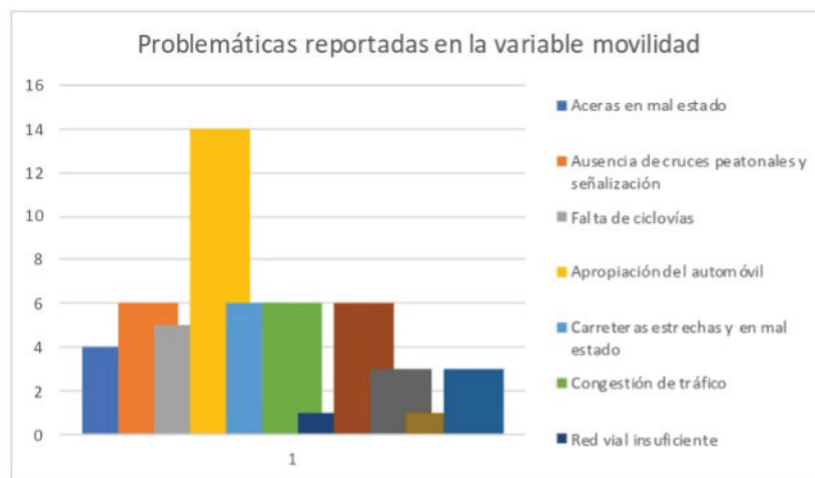
De la figura 1 se desprende que la mayor ubicación de propuestas de Smart Cities propuestas por los estudiantes se encuentra en la provincia de San José con un 83%, en segundo lugar, Heredia y Puntarenas con un 7% y finalmente con tan solo un 3% la provincia de Cartago. De lo anterior se podría interpretar que es la ciudad de San José la que presenta un mayor potencial de mejoramiento según la percepción de los estudiantes para realizar sus futuras propuestas de intervención.



**Figura 2.** Gráfico de localización en la provincia de San José, de las propuestas de mejoramiento.

De la figura 2 se puede observar que, de la provincia de San José, el Distrito Hospital fue el que las personas estudiantes seleccionaron en su mayoría para realizar sus propuestas de intervención, en segundo lugar, se ubica Guadalupe y en tercer lugar La Sabana. De lo anterior se podría interpretar que es dentro de nuestra ciudad capital, es el centro de San José el que se encuentra más deteriorado.

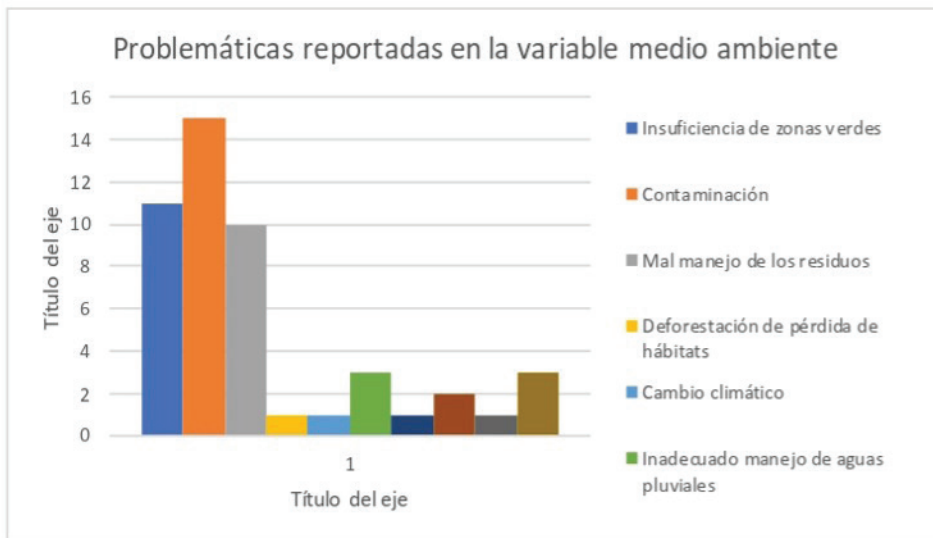
En relación con el análisis de la problemática encontrada en estas localidades, las personas estudiantes analizaron 3 variables de movilidad, medio ambiente y seguridad. A continuación, se presenta los resultados obtenidos:



**Figura 3.** Gráfico de la problemática reportada en la variable movilidad.

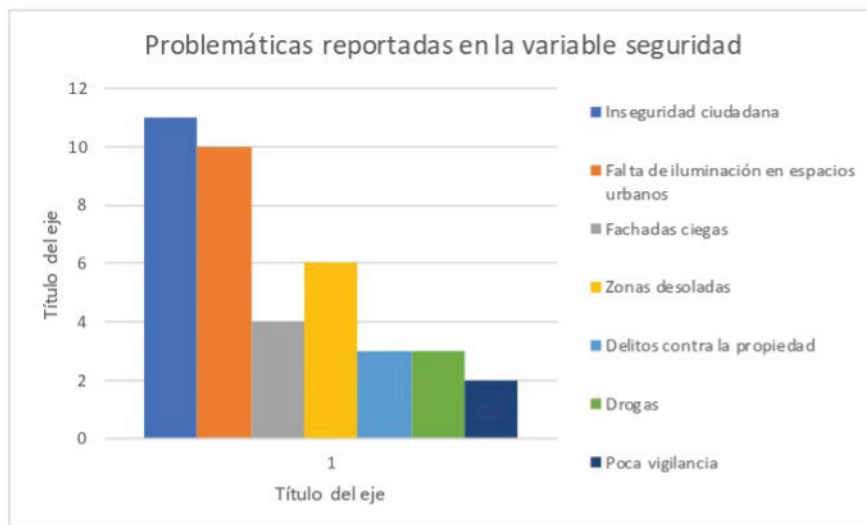
En la figura 3 se puede observar que la principal problemática señalada por las personas estudiantes es la apropiación del automóvil en la ciudad, como segunda problemática se encuentra la ausencia de cruces peatonales, las carreteras estrechas y en mal estado, así como la congestión vial y el transporte público insuficiente. Todos son problemas que claramente

atentan contra la sostenibilidad y contra la pacificación de la ciudad al ser generadores de contaminación del aire, ruido y poner en riesgo la autonomía y seguridad de las personas que transitan a pie nuestra ciudad capital.



**Figura 4.** Gráfico de la problemática reportada en la variable medio ambiente.

De la mano con la imagen anterior, no es de extrañar que la figura 4 reporte que el principal problema a nivel de medio ambiente es la contaminación en la ciudad en primer lugar, en segundo lugar, se reporte las consecuencias del cambio climático y en tercer lugar el mal manejo de los residuos. Todos los problemas medioambientales reportados, son reflejo de falta de infraestructura física que mejore las condiciones medioambientales de los entornos urbanos, la falta del verde en la ciudad que contribuya a minimizar el efecto de isla de calor, y refresque y purifique el aire contaminado producto de la gran flota vehicular que atraviesa diariamente la ciudad.

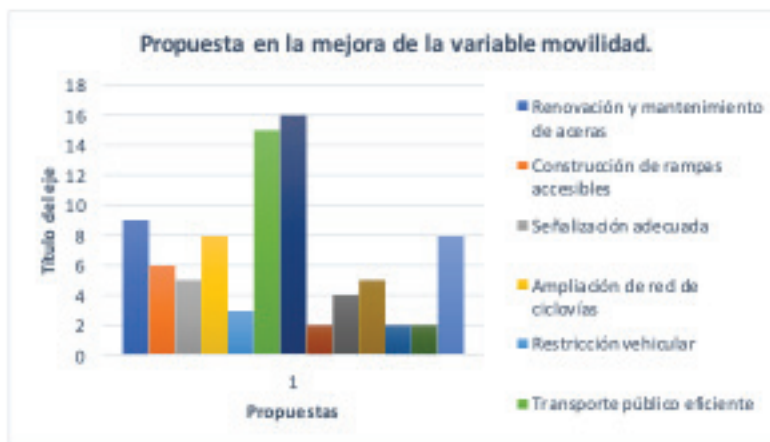


**Figura 5.** Gráfico de la problemática reportada en la variable seguridad.

De la figura 5, se desprende que el principal problema a nivel de seguridad en la ciudad reportado por los estudiantes es la misma seguridad ciudadana, producto del desempleo, problemas sociales entre otras cosas. En segundo y tercer lugar se ubican la falta de iluminación en la ciudad, especialmente se reportaron fachadas ciegas, lotes baldíos oscuros y espacios urbanos desolados. Estos problemas de falta de seguridad en la ciudad generan que las personas se vuelvan transeúntes o visitantes de paso y no disfruten de la misma por la misma falta de espacios para disfrutar, observar, descansar, etc., y por el temor a ser asaltados.

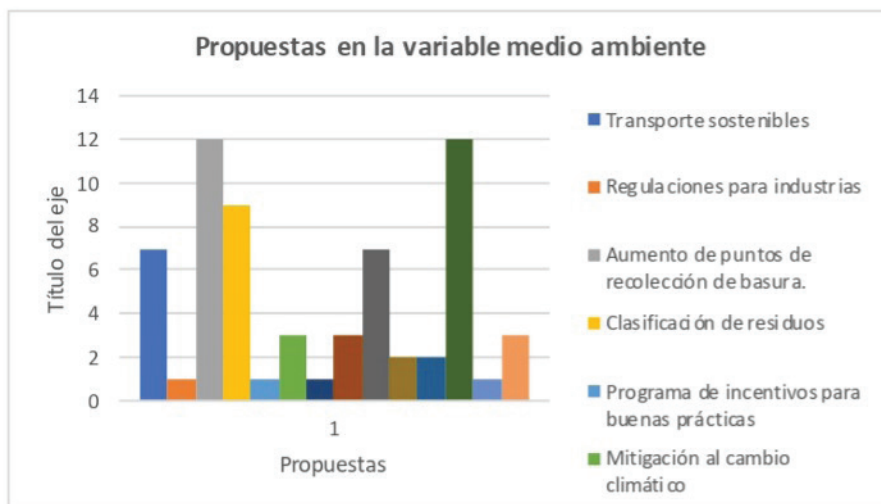
### Propuestas teóricas realizadas

A partir del análisis de estas localidades, surgen algunas propuestas teóricas para contribuir a mejorar la situación actual, así como también para mejorar la calidad de vida de las personas y la gestión energética. A continuación, se presentan los principales resultados:



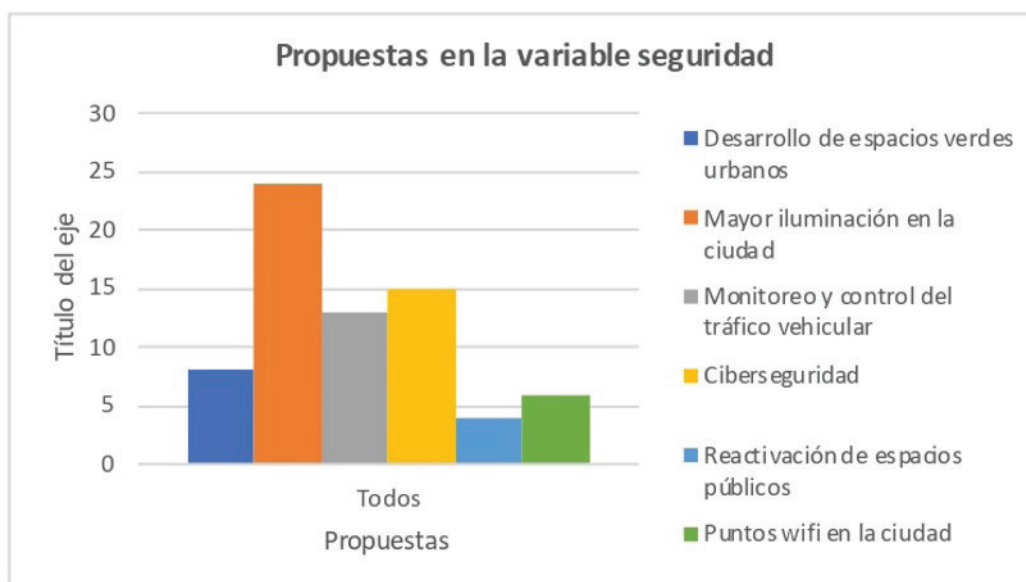
**Figura 6.** Gráfico de la propuesta en la variable movilidad.

Según la figura 6, se reporta el mal estado de las aceras como el principal punto de mejora para nuestra ciudad capital. También existe una preocupación por mejorar y hacer más eficiente el transporte público de la ciudad y finalmente el seguir implementando la restricción vehicular. Algunas otras variables que las personas estudiantes identifican como importantes de mejorar en nuestra ciudad son la ampliación de la red de ciclo-vías, la construcción y ampliación de rampas para lograr una ciudad inclusiva y el trabajar en una señalización más adecuada.



**Figura 7.** Gráfico de la propuesta en la variable medio ambiente.

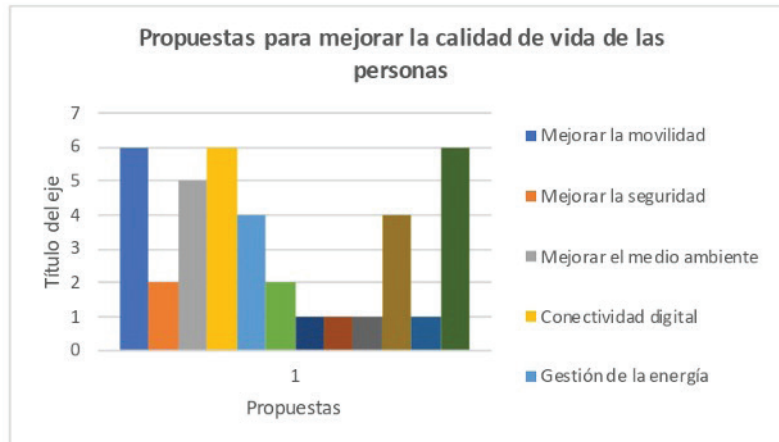
La figura 7, considera la variable de medio ambiente, donde las personas estudiantes, se enfocaron en que es prioritario el aumento de puntos de recolección de basura y su clasificación, en que se promuevan programas de incentivos de los gobiernos locales para buenas prácticas, y en que apostemos por un transporte público sostenible que facilite la movilidad sin seguir generando contaminación del aire en nuestra ciudad capital, así como el ruido que también la flota vehicular tradicional genera y contamina de forma constante.



**Figura 8.** Gráfico de la propuesta en la variable seguridad.

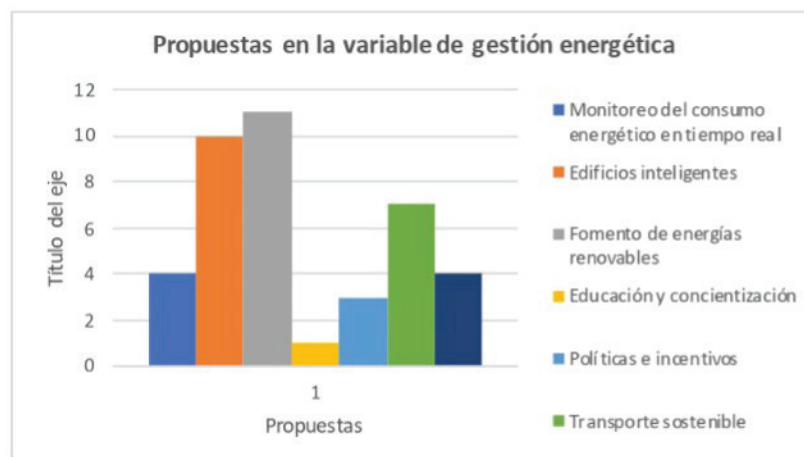
La figura 8, resume las propuestas en la línea de seguridad, donde se identifica la iluminación de la ciudad como el principal punto de mejora, en segundo lugar, la importancia de que exista una ciber seguridad que promueva una seguridad que vaya trabajando más de la mano de la tecnología, acorde a los tiempos modernos. Y el monitoreo y control del tráfico vehicular se

muestra en tercer lugar de importancia. Otras variables como la reactivación de los espacios públicos en la ciudad, la implementación de puntos wifi, podrían ser generadores de lugares que fomenten más la participación ciudadana en diferentes franjas horarias y, por ende, logren una ciudad de gente más feliz en el disfrute de espacios públicos sin temor de ser asaltados.



**Figura 9.** Gráfico de la propuesta para mejorar la calidad de vida.

La figura 9, muestra al detalle las propuestas que las personas estudiantes determinaron para mejorar la calidad de vida de las personas, identificando que una mejora en la movilidad de la ciudad, de la calidad del medio ambiente, el fomento de la conectividad digital, así como una mejor gestión de la energía en la ciudad, podrían ser factores que logren que las personas que habitan estos lugares tengan una mejor calidad de vida, al gozar de sistemas de transporte públicos más eficientes, una mejor calidad del aire con menos contaminación y un mejor manejo de los residuos sólidos urbanos todo gestionado mediante la tecnología.



**Figura 10.** Gráfico de la propuesta para mejorar la gestión energética.

Finalmente, en la figura 10, se muestran las propuestas en relación a la gestión energética, como es el fomento de las energías renovables en primer lugar, la construcción a futuro de edificio inteligentes y nuevamente se hace referencia a la preferencia hacia el uso del transporte sostenible como podría ser caminar tranquilamente en la ciudad, el uso de la bicicleta así como

también la gestión por medio de aplicaciones de un transporte público más eficiente que se pueda monitorear en tiempo real y con más rutas que generen menos tiempos de espera a sus usuarios.

## Conclusiones y/o recomendaciones

Al finalizar la actividad de clase en la que las personas estudiantes mostraron sus propuestas en un modelo en 3 dimensiones con el resumen de las variables anteriormente descritas, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Es importante resaltar que, en la variable de *movilidad*, existente una fuerte preocupación por la contaminación que produce nuestra flota vehicular ecológica en la ciudad y que logre desplazamientos en un menor tiempo para sus usuarios.
2. En relación, a las personas que transitan en otros medios más sostenibles como *caminar o utilizar la bicicleta*, la principal preocupación es la falta de señalización, aceras en mal estado y la necesidad de ampliar las rutas demarcadas en muchos casos sin una correcta planificación para la ciclo vías y carencia de elementos que brinden accesibilidad a todas las personas. No podemos olvidar que tenemos en nuestra ciudad ciudadanos que cuentan con una movilidad reducida, baja visión, uso de silla de ruedas y algunas otras condiciones, a los que se les debería de ofrecer aceras más anchas y en buen estado, con líneas guías, rampas, demarcación táctil y auditiva, si queremos hablar de una ciudad inteligente e inclusiva.
3. A nivel de *medio ambiente*, se recae nuevamente en la problemática que representa la contaminación sónica y la contaminación del aire que representa para la ciudad el uso del transporte público y privado motorizado. De allí la importancia de fomentar el uso de vehículos eléctricos que tengan precios accesibles a toda la población y un mejor servicio de puntos de recarga en buen estado.
4. El aumento del *tráfico vehicular* ha representado en la ciudad capital un problema que se ha tratado de controlar un poco desde hace varios años, por medio de la restricción vehicular, sin embargo es tal la cantidad de carros que viene en aumento, el mal estado de las calles y avenidas, aunado a los problemas de congestión de la red de alcantarillado público en la ciudad, que genera atascos, desplazamientos muy lentos y altamente contaminantes para todas las personas que transitan nuestra ciudad capital.
5. El aumento de los *residuos sólidos urbanos*, la falta de buenas prácticas en el manejo de estos por parte de los usuarios, ocasionan que las calles se inundan producto de los efectos del cambio climático como el aumento en las lluvias y los fenómenos climáticos que vuelven a ser insostenible. Para esto es inminente programas de educación en todos los sectores que concienticen a las personas, sobre la importancia del reciclaje, de la reutilización y de ir buscando esquemas de economías circulares y no lineales.
6. En relación con la *seguridad*, como los asaltos, la falta de oportunidades laborales, las drogas, la falta de espacios verdes en la ciudad y la ausencia de iluminación afectan gravemente el disfrute y tranquilidad de los transeúntes en la ciudad capital. Según lo señalaron las personas estudiantes, es necesario que hagamos de la tecnología un verdadero aliado para monitorear en tiempo real, la actividad ciudadana y así direccionar al cuerpo policial donde realmente es prioritario.

7. La *gestión de la energía* es solo una variable necesaria que claramente se desarrolla de la mano de la tecnología, en la que debemos de trabajar cada día más, invertir recursos en esta línea para lograr una ciudad segura, bien iluminada y que garantice el disfrute de todos sus habitantes, con edificios de energía positiva.
8. El *monitoreo o gestión de la energía* es un tema muy común en otras latitudes que deben de marcar nuestro camino a futuro para lograr hacer un uso más eficiente de la energía en edificios públicos, en alumbrado público, y hasta la misma gestión y recolección de la basura de forma inteligente, para lograr a futuro su procesamiento y posterior transformación en nuevos usos.

## Discusión

1. Es necesario apostar por *más verde en la ciudad*, por más espacios de la gente y para la gente, donde se pueda simplemente ver gente pasar, caminar, correr, descansar o contemplar el hermoso atardecer del que gozamos en nuestro clima tropical.
2. La *modernidad de las Smart Cities* vienen a mostrar lo que para algunos países en otras latitudes es una normalidad, y lo que, para Costa Rica, probablemente represente un reto por lograr, pero que en definitiva es el camino correcto que debemos seguir si queremos heredarle a las futuras generaciones un mundo mejor, más equitativo, sostenible y humano.
3. Está claro que *necesitamos y meremos una ciudad capital para todos que refleje los valores costarricenses* y que busque por rescatar nuestras raíces de que nos han caracterizado como un pueblo amigo, donde las personas son felices y donde hasta hace algunas décadas reinaba la paz y la tranquilidad en nuestra sociedad.
4. Las *experiencias de aprendizaje* de este ejercicio, demuestra que las personas estudiantes tienen una *visión crítica* de la problemática de la ciudad actual, propia de una generación de jóvenes que apuestan por un cambio en el modelo tradicional de diseño de las ciudades, donde a través de sus propuestas de movilidad, medio ambiente, seguridad, calidad de vida y gestión de la energía, muestran su deseo de tener un futuro distinto y mejor al que tenemos hoy en día.

## Agradecimientos

Esta investigación fue realizada gracias al apoyo del Gobierno de Costa Rica en la figura del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Así mismo, la autora agradece al Ministerio de Ciencia y Tecnología, MICIT a través del programa de jóvenes investigadores, a la Catedrática Marlene Harper Alvarado quienes hicieron posible mi formación como investigadora y agradece a María José Avila Zamora por su apoyo durante el proceso de realización de este artículo.

## Referencias

- [1] Baque, G. (2021) *El aprendizaje significativo como estrategia didáctica para la enseñanza-aprendizaje*. Polo del conocimiento: revista científico-profesional, Volumen 6 (N°5), página 1. Obtenido desde <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7927035>
- [2] Chai K. (Enero, 2020) *Advances in smart roads for future smart cities*. The Royal Society Publishing, Volumen (476), Página 1-2. Obtenido desde <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rspa.2019.0439>
- [3] Gamble B., (2022) "The scholarship of teaching and learning critical thinking: finding a way forward with evidence from a medical teaching context," *International Journal for the Scholarship of Teaching and Learning*: Vol. 16: (No. 3), Article 7. Obtenido de <https://doi.org/10.20429/ijstol.2022.160307>

- [4] Salcedo, M. (2024) *Las Soft Skills en estudiantes de la Universidad Autónoma de Nayarit: Perspectivas, Desafíos y Oportunidades*. Revista electrónica sobre tecnología, educación y sociedad. CTES. Volumen 11 (N°21). Obtenido desde <https://ctes.org.mx/index.php/ctes/article/view/825/1090>
- [5] Scala, D. (2025) *Tendencias educativas actuales para trabajar las ciudades sostenibles*. Obtenido desde <https://didacticageografica.age-geografia.es/ojs/index.php/didacticageografica/article/view/709/639>
- [6] Segura, O. (2020) Ciudades inteligentes y sostenibles, estado del arte 2019. Obtenido desde <https://repositorio.una.ac.cr/server/api/core/bitstreams/2289dc84-a515-41e6-abcf-f66bb72efc52/content>
- [7] TEC. (s.f.). Programa del curso Sistemas Espaciales y Ambientales I: Plan de estudios. Escuela de Arquitectura. Instituto Tecnológico de Costa Rica. código AU- 1903
- [8] Williams, M. (Abril, 2024) A conceptual, strategic and implementation framework for the Scholarship of Learning and Teaching. Journal of Applied Learning & Teaching Vol.7 (No.1) página 250. Obtenido de: <file:///Users/andreaavilaz/Downloads/1367-Article%20Text-5983-2-10-20240528.pdf>

### **Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)**

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

# Análisis florístico y estructural del bosque tropical en el Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica

## Floristic and structural analysis of tropical forest in Palo Verde National Park, Costa Rica


Elia Anahí Rodríguez-González<sup>1</sup>, Casia Soto-Montoya<sup>2</sup>,  
Ruperto Quesada-Monge<sup>3</sup>, Lupita Vargas-Fonseca<sup>4</sup>

Rodríguez-González, E.A; Soto-Montoya, C; Quesada-Monge, R; Vargas-Fonseca, L. Análisis florístico y estructural del bosque tropical en el Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° especial Tecnología en Marcha. Marzo, 2026. Vol. 39, N° especial VII Encuentro Bial Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Marzo, 2026. Pág. 19-33.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i6.8570>

1 Maestría en Ciencias Forestales, Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 [erodriguez@estudiantec.cr](mailto:erodriguez@estudiantec.cr)


 <https://orcid.org/0009-0008-4824-0069>


2 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 [csoto@itcr.ac.cr](mailto:csoto@itcr.ac.cr)

 <https://orcid.org/0000-0002-2275-7317>


3 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 [rquesada@itcr.ac.cr](mailto:rquesada@itcr.ac.cr)

 <https://orcid.org/0000-0003-4981-426X>

4 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 [lvargas@itcr.ac.cr](mailto:lvargas@itcr.ac.cr)

 <https://orcid.org/0000-0001-6254-9507>



## Palabras clave

Biomasa; bosque; ecuación; teledetección; PN Palo Verde.

## Resumen

Costa Rica ha aumentado la cobertura de copas arbóreas pero la deforestación y degradación del bosque persisten. El bosque tropical es un ecosistema escaso a nivel mundial, vulnerable a los incendios forestales y otros factores de degradación. El uso de tecnologías avanzadas como la teledetección con datos de inventario de campo es crucial para optimizar las mediciones y obtener información confiable para definir acciones para su restauración y conservación. Este estudio presenta resultados sobre la composición florística y la estructura del bosque en el Parque Nacional Palo Verde. Se analizaron estos datos a partir de clases de biomasa estimada mediante ecuaciones alométricas, como parte de una investigación más amplia que incluye otros dos sitios en la Ecorregión del Pacífico Norte. La información obtenida servirá de base para el desarrollo de un nuevo modelo estadístico para la estimación de biomasa aérea aplicable en bosques tropicales. Para el estudio, se evaluaron 30 parcelas de 500 m<sup>2</sup> establecidas con un receptor GNSS de alta precisión (RTK). Se midieron todos los árboles con un diámetro  $\geq 5$  cm y la altura total. El error de muestreo relativo fue de 11,48 %, con una densidad promedio de 1168 individuos ha<sup>-1</sup> y un área basal promedio de 17,84 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. La biomasa aérea estimada con ecuaciones alométricas osciló entre 46,43 Mg ha<sup>-1</sup> y 141,77 Mg ha<sup>-1</sup>. Las especies más relevantes para la estructura del bosque, de acuerdo con el Índice de Valor de Importancia (IVI), fueron *Luehea candida*, *Guazuma ulmifolia* y *Calycophyllum candidissimum*.

## Keywords

Biomass; forest; equation; remote sensing; NP Palo Verde.

## Abstract

Costa Rica has increased its tree canopy cover; however, deforestation and forest degradation still persist. Tropical forests are globally scarce ecosystems and are particularly vulnerable to wildfires and other degradation factors. The use of advanced technologies such as remote sensing, combined with field inventory data, is essential to optimize measurements and generate reliable information to guide restoration and conservation actions. This study presents findings on the floristic composition and forest structure of Palo Verde National Park. The data were analyzed based on biomass classes estimated through allometric equations, as part of a broader research project that also includes two additional sites within the North Pacific Ecoregion. The information obtained will serve as a foundation for developing a new statistical model for estimating aboveground biomass in tropical forests. For this study, 30 plots of 500 m<sup>2</sup> were established using a high-precision GNSS receiver (RTK). All trees with a diameter  $\geq 5$  cm were measured, along with total height. The relative sampling error was 11.48%, with an average density of 1,168 individuals ha<sup>-1</sup> and a mean basal area of 17.84 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. Aboveground biomass estimated using allometric equations ranged from 46.43 Mg ha<sup>-1</sup> to 141.77 Mg ha<sup>-1</sup>. The most structurally important species, according to the Importance Value Index (IVI), were *Luehea candida*, *Guazuma ulmifolia*, and *Calycophyllum candidissimum*.

## Introducción

Se requiere un conocimiento más preciso de la estructura del bosque tropical para comprender mejor la dinámica, las amenazas a la biodiversidad y el estado de conservación de este bioma vulnerable. Según la definición bioclimática de la *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) combinada con datos *CHELSEA*, en 2020 la superficie de bosque seco tropical con dosel cerrado ( $\geq 40\%$ ) se estimó en 4,9 millones de  $\text{km}^2$ , con una pérdida bruta de 561 719  $\text{km}^2$  (11%) entre 2001 y 2020 [1].

Costa Rica, desde el año 2000, ha registrado una tasa promedio de deforestación de 1 647 hectáreas por año [2]. Sin embargo, estudios de monitoreo basados en imágenes Landsat evidenciaron que, entre 2000 y 2005, el país experimentó una recuperación neta de 169 900 ha, equivalente a una tasa anual de recuperación del 0,66 %, mientras que la tasa anual de pérdida fue de apenas 0,09 %, lo que indica que la regeneración superó ampliamente la deforestación en ese período [3]. Esta tendencia de recuperación se ha consolidado en años recientes, alcanzando una cobertura forestal del 57,1 % del territorio nacional para 2021 [4]. Asimismo, el 27,6 % del territorio se encuentra bajo alguna categoría de área silvestre protegida [5], lo que evidencia avances significativos en conservación y gestión sostenible de los recursos forestales.

No obstante, aunque se han implementado grandes esfuerzos para la recuperación de cobertura, las zonas boscosas continúan siendo afectadas por los incendios forestales, en el 2023 la mayoría de las áreas afectadas se concentraron en el Área de Conservación Arenal Tempisque con 4 159,26 ha, representando el 69,2 % del total, seguido de Área de Conservación Guanacaste con 630,43 ha (10,5 %); por causas recurrentes como el vandalismo, las actividades de caza, quema de pastizales para ganado [6]. Aun así, se ha demostrado que los bosques secos tropicales en recuperación, incluso después de impactos humanos severos, mantienen un alto valor para la fauna [7].

A escala local, en el Parque Nacional Palo Verde (PNPV), la estructura horizontal evidencia un comportamiento típico de bosques en estado dinámico, con mayor número de individuos en las primeras categorías diamétricas [8]. El parque presenta aspectos geológicos muy diversos entre los cuales, se conoce que el material del suelo está formado por fracciones de calizas [9]. En este contexto, Muñoz et al. [10] ha comprobado que la geología (sustratos) y topografía determinan la estructura, diversidad y composición de los bosques, en particular la roca caliza puede constituir un entorno más favorable para el desarrollo de los bosques secos tropicales.

A la fecha, el avance tecnológico ha permitido importantes adelantos en las ciencias forestales, particularmente en las mediciones utilizando sensores remotos [11]. Complementariamente, a los estudios basados en teledetección, es fundamental ampliar continuamente los datos de inventario de campo, recopilando datos en áreas no representadas, utilizados para investigar nuevos sensores y parámetros que se están diseñando para estimar la biomasa forestal [12].

Este documento presenta resultados preliminares de la composición florística y estructural del bosque de PNPV, la cual, es analizada a partir de clases de biomasa estimada mediante ecuaciones alométricas con datos de campo, como parte de un estudio más amplio que incluye éste y otros dos sitios ubicados en la Ecorregión del Pacífico Norte de Costa Rica, información que sustentará a la generación del nuevo modelo matemático para la estimación de biomasa aérea aplicable en bosques tropicales.

## Materiales y métodos

*Zona de estudio.* El estudio se desarrolló en el Parque Nacional Palo Verde (PNPV), perteneciente a la provincia de Guanacaste [9]. El cual se ubica en el centro de la Ecorregión Cuenca Baja del Tempisque. Abarca altitudes máximas de hasta 262 msnm, entre el periodo

2020-2024 se registró una precipitación anual hasta de 1 947 mm y una temperatura promedio anual de 28 a 39 °C [13]. El PNPV tiene una extensión total de 19 800 ha, de las cuales 10 926 ha corresponden a áreas boscosas [14].

*Diseño de muestreo.* Para garantizar la representatividad de las diferentes condiciones de biomasa, se generó una capa ráster mediante un modelo matemático (1) aplicado al bosque tropical [15]. Esta capa se construyó a partir del índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) calculado sobre imágenes Sentinel-2A (1 de junio - 30 de noviembre de 2023), corregidas por nubes y cirros en Google Earth Engine (GEE) [16] y el sistema de referencia de coordenadas empleado fue CR-SIRGAS/CRTM05 (EPSG:8908). El procesamiento se complementó con herramientas de QGIS v3,34.

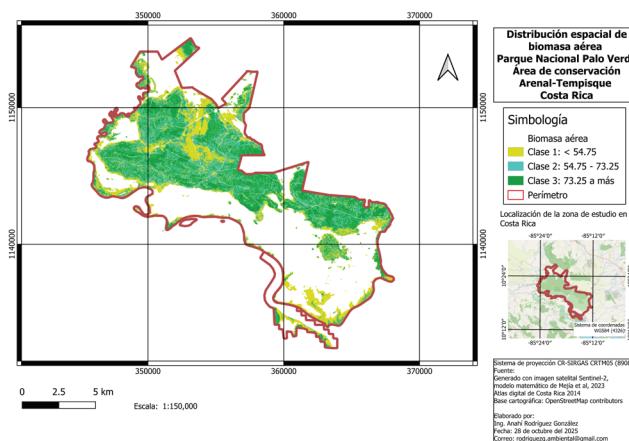
$$\ln(B) = -2,6 + 11,03 * (NDVI) \quad (1)$$

Donde:

LN(B) = logaritmo natural de la biomasa.

NDVI = índice de vegetación de diferencia normalizado.

Con base en esta capa, se establecieron tres categorías de biomasa aérea (clase 1 = baja, clase 2 = intermedia y clase 3 = alta), delimitadas mediante los percentiles 33 y 66 % con un código de *Python* en el programa *Geany*. Se seleccionaron 10 parcelas por cada categoría, a una distancia de caminos entre 100 a 300 m y no menor de 100 m a ríos y quebradas. Se registró información de variables dasométricas de individuos de diámetro  $\geq 5$  cm a 1,30 m de altura sobre el suelo, para evitar subestimación de la biomasa [17]. También, se estimó la altura total con hipsómetro láser (Nikon, Forestry Pro II) (se midió cada 10 árboles), se identificaron los individuos a nivel de género y especie y se documentaron con fotografías (Figura 1).



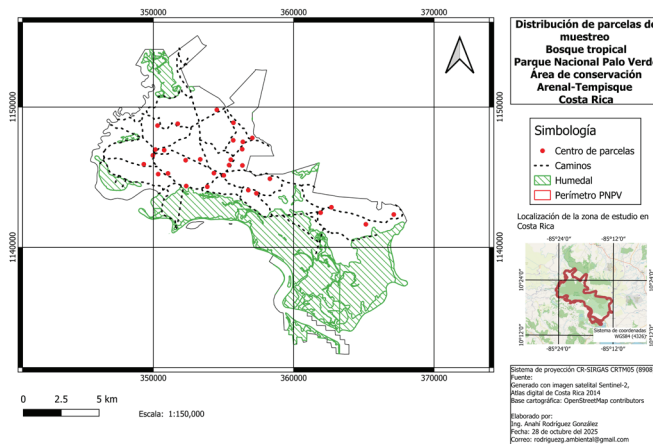
**Figura 1.** Distribución de la biomasa aérea en bosques del PNPV, 2025.

Nota: OpenStreetMap contributors. (2024). Standard Tile Layer [Mapa de teselas].

Recuperado de <http://tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png>.

A partir de la aproximación preliminar de biomasa aérea estimada mediante la ecuación (1), se obtuvo una referencia general sobre la acumulación de biomasa en el área de estudio. Con base en esta información exploratoria, se procedió a realizar el inventario forestal mediante un muestreo aleatorio, estableciendo un total de 30 parcelas circulares de 500 m<sup>2</sup> (radio de 12,62 m), por su facilidad para la colecta de datos [18] y su aplicación en estudios de biomasa aérea con Sentinel-2 [19], dentro de un área con cobertura boscosa de 10 926 ha.

Las parcelas se establecieron con apoyo de un receptor *GNSS* estándar (Garmin) y *GNSS* de precisión milimétrica *RTK* (*Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System*), por su eficiencia en condiciones con inclinación superior a 10 % [20], complementado con cinta métrica y brújula (Figura 2).



**Figura 2.** Distribución espacial de parcelas de muestreo en el PNPV, 2025.

Nota: OpenStreetMap contributors. (2024). Standard Tile Layer [Mapa de teselas].

Recuperado de <http://tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png>.

*Estimación de biomasa aérea de los árboles.* Se estimó la biomasa aérea en  $\text{kg árbol}^{-1}$  mediante las ecuaciones alométricas (2, 3, 4) de Fonseca et al. [21], utilizando como variable principal el diámetro, posteriormente se realizó una extrapolación a  $\text{Mg ha}^{-1}$ . A partir de esta estimación directa en parcelas, se establecieron nuevas clases de biomasa (clase 1, clase 2 y clase 3) mediante el método de percentiles 33 y 66 %.

$$\text{Biomasa fuste} = \exp(-2,27978 + 2,22575 * \ln(Dap)) \quad (2)$$

$$\text{Biomasa ramas} = \exp(-3,23177 + 2,38074 * \ln(Dap)) \quad (3)$$

$$\text{Biomasa hojas} = \exp(1,81502 + 0,0021515 * Dap^2) \quad (4)$$

Donde:

Dap es el diámetro del fuste a la altura del pecho (cm).

Ln es el logaritmo natural.

*Composición florística.* Se generó el porcentaje de especies con distribución horizontal continua, basado en el número de especies y su peso ecológico [22],[23]. Se estimó el peso ecológico (Índice de Valor de Importancia) de cada especie con los valores de área basal y número de individuos por hectárea para determinar la dominancia, abundancia y frecuencia relativa [22],[23], con el programa Excel (*Office Profesional Plus 2024*).

Se estimó la diversidad florística mediante el Coeficiente de Mezcla (CM) [22],[24], con la ecuación (5):

$$CM = \frac{\text{Número de especies}}{\text{Número total de individuos}} \quad (5)$$

Se evaluó la diversidad de especies (índice de Shannon) por clase de biomasa aérea, considerando riqueza y equitatividad, para conocer qué tan balanceada era la abundancia entre las mismas (especies), como indican otros estudios [25]-[26], con la fórmula de cálculo (6):

$$H = - \sum pi \ln(pi) \quad (6)$$

Donde:  $p_i$  es la abundancia proporcional (relativa) de la especie “i” respecto al total.

Según se ha reportado en diferentes estudios [22], [27], se determinaron las clases de frecuencia absoluta a partir de la agrupación de especies por las categorías: I (0-20 %) correspondiente a especies raras, II (21-40 %), ocasional, III (41-60 %), frecuente, IV (61-80 %), abundante y V (81-100 %), muy abundante.

*Estructura horizontal y vertical.* El análisis de la estructura horizontal se realizó mediante gráficos de distribución con datos de abundancia y área basal por hectárea. Para la estratificación vertical (alturas), se clasificó la altura en tres estratos con respecto a la altura superior del vuelo (piso superior > 2/3, piso medio entre < 2/3 y > 1/3, piso inferior < 1/3) [22]-[28].

*Análisis estadístico y de consistencia.* Se realizó los cálculos de estadísticas de precisión (con un alfa de 0,05) y los supuestos estadísticos con el programa *InfoStat* (v. 2020). Con este se evaluó la normalidad y la homogeneidad de varianzas, así como el error de muestreo relativo, la desviación estándar y el coeficiente de variación de las variables diámetro (cm), altura (m) y biomasa aérea (Mg ha<sup>-1</sup>). Se excluyeron los valores atípicos identificados en el análisis de consistencia, con la finalidad estandarizar y disminuir la variabilidad y error en la construcción del nuevo modelo para estimación de biomasa aérea [29].

## Resultados

*Estadísticas obtenidas.* El error de muestreo (E %) con un alfa de 0,05 en la estimación de la biomasa aérea fue de 11,48 %, en la medición del diámetro fue de 7,52 % y en la medición de la altura fue de 5,95 % (Cuadro 1).

Los valores bajos del error muestral evidenciaron consistencia en la toma de datos durante la etapa de campo, con un nivel mínimo de error, en concordancia con lo reportado por Yanai et al. [30] en inventarios forestales.

En el Cuadro 1 se resumen las estadísticas descriptivas y estructurales por clases de biomasa aérea en el PNPV.

**Cuadro 1.** Estadísticas descriptivas y estructurales por clases de biomasa aérea, PNPV, 2025.

Clase	Biomasa Mg ha <sup>-1</sup>			N/ha	G m <sup>2</sup> /ha	CM	H
	Min	Max	Promedio				
C1	46,43	69,43	56,6a	1290a	13,0a	6,62a	1,96a
C2	69,65	87,82	78,9b	1120a	17,34b	3,96a	2,19a
C3	90,34	141,8	110,7c	1094a	23,21c	4,31a	2,17a

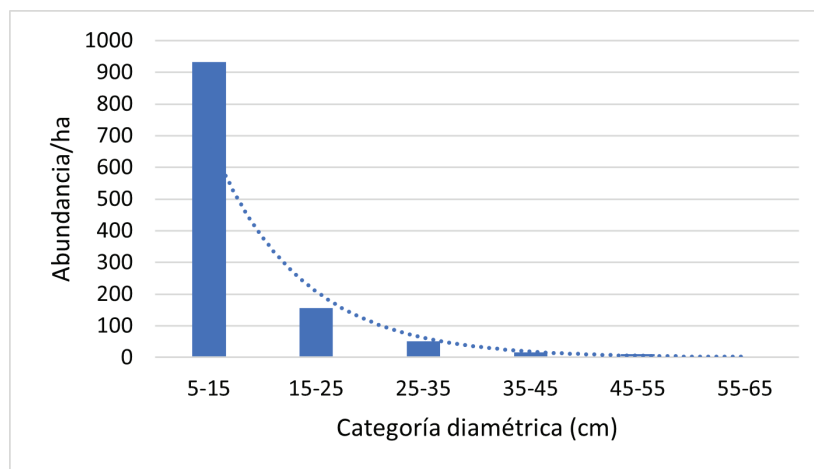
Los supuestos estadísticos mostraron que las variables, en general, siguen una distribución normal ( $p < 0,05$ ) y cumplen con homocedasticidad. Sin embargo, al comprobar cada variable de forma independiente, se evidenció que no todas presentaban simultáneamente normalidad y homogeneidad de varianzas. Por esta razón, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis y, adicionalmente, se transformaron las variables de biomasa y área basal por hectárea mediante logaritmo natural (Ln). Tras la transformación, se obtuvo para biomasa un valor de  $p = 0,05$  y para área basal  $p = 0,225$ , confirmando homocedasticidad en ambos casos.

Los resultados del ANOVA indicaron diferencias significativas entre las clases con respecto a la biomasa ( $p = 0,0001$ ) y el área basal ( $p = 0,0001$ ). No obstante, no se detectaron diferencias significativas para el número de árboles por ha, el índice de Shannon (H) ni para el coeficiente de mezcla (CM).

*Estimación de biomasa aérea con datos de parcelas.* Los valores de biomasa oscilaron entre  $46,43 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $141,77 \text{ Mg ha}^{-1}$ , en términos de distribución por componentes, el promedio de la biomasa aérea se concentró principalmente en el fuste (56,64 %), seguido por las ramas (35,56 %) y en menor proporción, por las hojas (7,8 %). Con base en estos resultados y con el propósito de facilitar el análisis espacial y la interpretación de los datos, se estableció una reclasificación de la biomasa aérea en tres categorías: Clase 1:  $46,43\text{-}69,44 \text{ Mg ha}^{-1}$ , Clase 2:  $69,44\text{-}87,82 \text{ Mg ha}^{-1}$ , Clase 3:  $>87,82 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

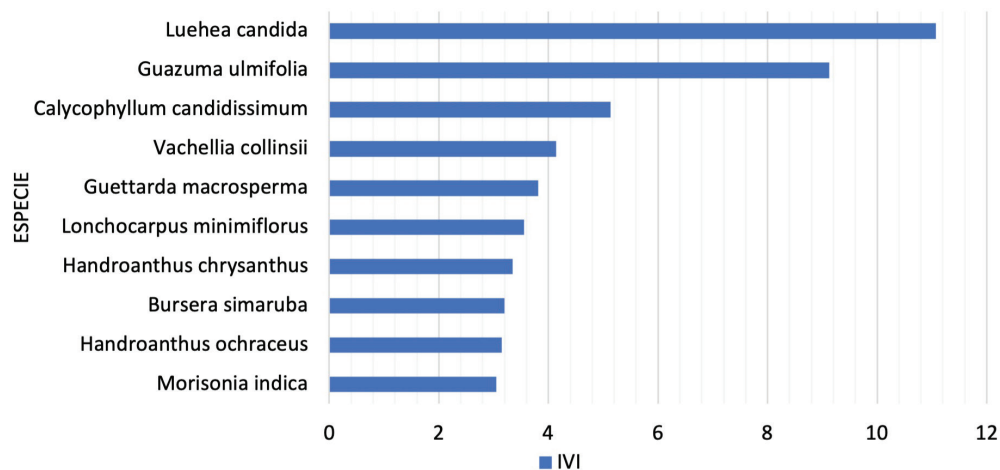
Adicionalmente, con el propósito de analizar la distribución espacial de la biomasa aérea en el bosque del PNPV, se estimó la superficie correspondiente a cada clase, obteniéndose un total de  $10\,755,74 \text{ ha}$ , una vez excluidas áreas no boscosas como caminos y cuerpos de agua. De acuerdo con la clasificación generada, la Clase 1 abarcó  $3\,549,40 \text{ ha}$ , la Clase 2 comprendió  $3\,549,72 \text{ ha}$  y la Clase 3 registró  $3\,656,62 \text{ ha}$ .

*Estructura horizontal y vertical.* El análisis estructural se realizó exclusivamente sobre el área efectiva de muestreo correspondiente a las 30 parcelas establecidas, que en conjunto abarcaron  $1,5 \text{ ha}$ , en la cual se determinó una densidad promedio de  $1\,168 \text{ individuos ha}^{-1}$  y un área basal promedio de  $17,84 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ . La estructura poblacional estuvo dominada por árboles de diámetros pequeños: el 79,8 % de los individuos se concentró en categorías de 5-15 cm de diámetro, el 1,33 % alcanzó diámetros entre 50-59,9 cm, representando individuos relictos, siendo la especie *Calycophyllum candidissimum* la que presentó el mayor diámetro registrado (56,9 cm). La distribución de los árboles  $\text{ha}^{-1}$  mostró la forma clásica de J invertida (Figura 3).



**Figura 3.** Distribución del número de individuos por hectáreas por categoría diamétrica en el PNPV, 2025.

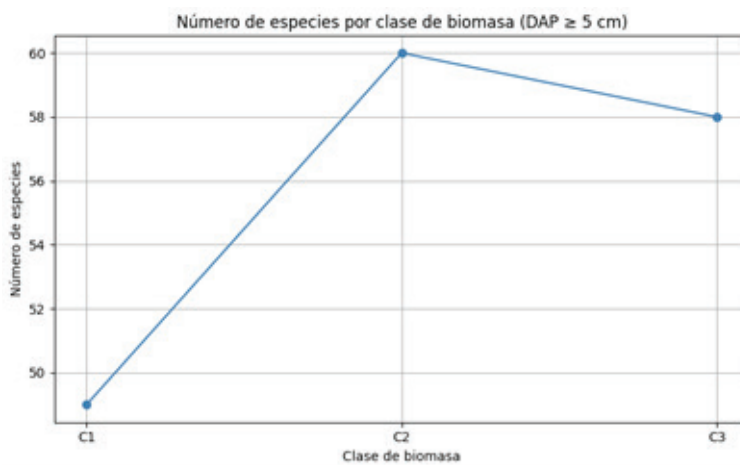
*Composición florística del sitio.* El Índice de Valor de Importancia (IVI) permitió identificar las especies con mayor peso ecológico dentro del área de estudio, integrando la frecuencia, dominancia y abundancia relativas. En la Figura 4 se presentan las diez especies con mayor IVI, ordenadas de mayor a menor valor. En conjunto, estas especies concentran el 49,6 % del peso ecológico total del bosque.



**Figura 4.** Especies con el mayor Índice de Valor de Importancia (IVI) en el PNPV, 2025.

A nivel de clases de biomasa aérea, la composición de las especies con mayor importancia ecológica mostró variaciones entre categorías. En la clase 1 se encontraron *Guazuma ulmifolia*, *Luehea candida*, *Vachellia collinsii*, en la clase 2 destacaron *Luehea candida*, *Guazuma ulmifolia*, *Handroanthus ochraceus*, mientras que en la clase 3 fueron nuevamente relevantes *Luehea candida*, *Calycophyllum candidissimum* y *Lysiloma divaricatum*.

En total se registraron 88 especies: 49 en la clase 1, 60 en la clase 2 y 58 en la clase 3. Estas cifras no son excluyentes, ya que varias especies estuvieron presentes en más de una clase de biomasa aérea. No obstante, se identificaron también especies exclusivas en cada categoría. En la clase 1 se identificaron nueve especies exclusivas, entre ellas *Cordia alliodora* y *Thouinidium decandrum*; en la clase 2 fueron diez, siendo algunas de ellas *Dalbergia retusa* y *Guaiacum sanctum*; mientras que en la clase 3 se encontraron quince, incluyendo *Swietenia macrophylla* y *Byrsonima verbascifolia* (Figura 5).



**Figura 5.** Número de especies registradas por clase de biomasa aérea en el PNPV, 2025.

*Clases de frecuencia.* La clase de frecuencia I (0–20 %) agrupó el 80 % de las especies registradas, lo que evidenció una alta proporción de especies con baja ocurrencia en las parcelas. Entre las especies con mayor frecuencia dentro de esta categoría destacaron *Allophylus psilospermus*, *Coccoloba guanacastensis*, *Gliricidia sepium*. La frecuencia II representó el 9 % del total, entre las que sobresalieron *Morisonia indica*, *Tabernaemontana donnell-smithii* y *Handroanthus ochraceus*. Por su parte, la frecuencia III concentró el 8 % incluyendo especies como *Vachellia collinsii*, *Lonchocarpus minimiflorus* y *Guettarda macrosperma*. La frecuencia IV agrupó únicamente el 2 %, correspondientes a *Luehea candida* y *Guazuma ulmifolia*, mientras que en la frecuencia V no se registraron especies.

*Riqueza y diversidad florística.* El cálculo de Coeficiente de Mezcla global para el sitio dio un valor de 1:20, cada 20 individuos se encontró una especie nueva. En la clase 1 el CM fue de 1:13, mientras que en las clases 2 y 3 alcanzó un valor de 1:9. Las especies predominantes fueron *Luehea candida* y *Guazuma ulmifolia* en las clases 1 y 2, mientras que en la clase 3 destacó *Luehea candida* acompañada de *Guettarda macrosperma*.

*Índice de Shannon.* El promedio obtenido para el Índice de Shannon de toda la muestra fue de 2,10. Los valores del Índice de Shannon por clase de biomasa fueron: C1 = 1,96, C2 = 2,19 y C3 = 2,17.

## Discusión

Con base en el análisis estadístico, se confirmó que los resultados respaldaron la representatividad de las parcelas, lo que refuerza la validez del diseño de muestreo aplicado. En cuanto a la biomasa aérea, la variabilidad se explicó por la heterogeneidad estructural entre parcelas, en particular en la clase 1, donde se encontró individuos de diámetros pequeños junto con árboles relictos de gran tamaño.

De acuerdo con los resultados estadísticos, no se detectaron diferencias significativas en el índice de Shannon ni el coeficiente de mezcla entre clases de biomasa, lo que permitió inferir que la variación en la biomasa estuvo más asociada a diferencias estructurales del bosque (área basal) y no cambios en la diversidad florística o mezcla de especies.

Quesada et al. [31], con base en tres fases sucesionales propuestas por Spittler [32], describieron cambios estructurales asociados al avance sucesional, caracterizados por una disminución en el número de árboles (N/ha) y un incremento en el área basal por hectárea conforme aumentó la edad del bosque (Cuadro 2). En este estudio se encontró una disminución en el número de árboles en las tres clases de biomasa, acompañado de un aumento en el área basal.

**Cuadro 2.** Análisis comparativo estructural del bosque.

Quesada et al. (2025) EEFH [27]			Resultados (2025) PNPV		
Edad	N/ha	Área basal (m <sup>2</sup> /ha)	Biomasa aérea	N/ha	Área basal (m <sup>2</sup> /ha)
Menor a 15	930	10,77	Clase 1	1290	13,002
Entre 15 y 35	687,5	17,17	Clase 2	1120	17,29
Mayor a 35	861	19,94	Clase 3	1094	23,20
Promedio	826	15,96	Promedio	1168	17,84

En concordancia con el estudio de Calvo et al. [33], a medida que se incrementó el grado de desarrollo del bosque, aumentaron los valores de biomasa (Cuadro 3), siendo que el estadio temprano mostró valores inferiores con respecto al estadio tardío [33].

**Cuadro 3.** Valores comparativos de biomasa aérea Mgha<sup>-1</sup>.

Calvo et al. (2017) PNSR [29]		Resultados (2025) PNPV	
Estadio	Biomasa aérea PNSR Mgha <sup>-1</sup> (2014)	Clasificación	Biomasa aérea Mgha <sup>-1</sup>
Joven	60,9	Clase 1	56,60
Intermedio	195,3	Clase 2	78,99
Maduro	205,4	Clase 3	110,79

Las diferencias marcadas entre PNSR y PNPV se explicaron por la estructura diamétrica de los individuos registrados, con un máximo de 59,9 cm en el PNPV frente a 135 cm en el PNSR. Además, otros factores explicativos podrían ser los antecedentes de uso del suelo, los métodos de estratificación por estadio sucesional que no necesariamente son equivalentes a las clases por biomasa aérea de este estudio, la ecuación alométrica empleada para estimar biomasa y las diferencias en el tamaño, forma y distribución de las parcelas [21], [33].

Los resultados de este estudio se respaldaron con lo reportado por Fonseca et al. [21], quienes para bosques caducifolios del Pacífico Norte de Costa Rica estimaron una biomasa arbórea promedio de 130,8 Mg ha<sup>-1</sup>, con valores entre 30,3 y 334,3 Mg ha<sup>-1</sup>. Las ecuaciones alométricas desarrolladas en dicho trabajo, con R<sup>2</sup> superiores a 0,93, fueron aplicadas en esta investigación para la estimación de biomasa aérea en el PNPV, lo que reforzó la confianza de los resultados obtenidos.

En este estudio se registró una biomasa aérea máxima de 141,77 Mg ha<sup>-1</sup>, valor que se ubicó próximo al promedio nacional reportado por Fonseca et al. [21]. Además, es consistente con lo documentado por Becknell y Powers [34], quienes señalaron que la biomasa aérea aumentó conforme avanza la sucesión. Esto permitió inferir que el bosque evaluado representó condiciones de recuperación, coincidiendo con la predominancia de individuos de diámetros bajos y escasa presencia de árboles de gran porte.

El promedio obtenido para el Índice de Shannon de toda la muestra fue de 2,10, valor que corresponde a una diversidad intermedia-alta. Los resultados obtenidos en este estudio se compararon con lo reportado por Solano [35] en los bosques del PNPV (Cuadro 4). Los valores del Índice de Shannon resultaron mayores en este estudio (C1 = 1,96; C2 = 2,19; C3 = 2,17), lo cual refleja la diversidad total acumulada. En el estudio de Solano [30] el índice de Shannon (H) aumentó conforme el bosque avanzó hacia estadios más avanzados. Sin embargo, este estudio encontró un aumento entre la C1 y la C2, pero el valor de H fue ligeramente menor en la C3. Esta relación se reforzó con lo observado en la figura 5, donde el número de especies (riqueza) se incrementó en la clase 2 y tendió a estabilizarse en la clase 3, posiblemente debido a la dominancia de especies de estadios más avanzados.

**Cuadro 4.** Análisis de diversidad: Índice de Shannon (H).

Solano (2020) PNPV [30]		Resultados (2025) PNPV	
Estadio	H	Clase biomasa	H
Joven	1,81	C1	1,96
Intermedio	2,03	C2	2,19
Maduro	2,53	C3	2,17

El comportamiento de J invertida ha sido documentado como una tendencia común en bosques tropicales [36]. Conforme a lo mostrado en la figura 3, la mayoría de los individuos se concentraron en categorías diamétricas menores, con una reducción progresiva hacia los diámetros superiores, esto evidenció la capacidad de regeneración natural del bosque y continuidad en el tiempo, en concordancia con la autoecología de las especies [22].

Cabe destacar que, en el PNPV, según los lineamientos de manejo del parque, se otorgaron concesiones para pastoreo como medida preventiva frente a incendios forestales, al reducir el material combustible [9]. En contraste, en el PNSR se desarrollaron programas de restauración y manejo del bosque que incluyeron estrategias integradas de fuego y restauración del ecosistema [37]. Al comparar con otros estudios es importante tomar en cuenta otras variables. Por ejemplo, en la EEFH disturbios como incendios, pastoreo, suelos inundables y pendientes pronunciadas pudieron alterar el curso de las tres fases sucesionales, afectando el crecimiento de la vegetación [37].

Calvo et al. [38], demostraron la relevancia de incluir en el muestreo a los árboles con diámetro  $a \geq 5$  cm, debido a que el número de tallos presentó un efecto positivo significativo, tanto en el almacenamiento ( $p < 0,05$ ) como en la ganancia de carbono ( $p < 0,001$ ). Esto sugiere que, la biomasa estimada calculada a partir de árboles  $\geq 5$  cm, cumplió con la tendencia natural de incrementar progresivamente conforme aumenta la categoría diamétrica. En promedio, los árboles de diámetros menores a 10 cm aportaron entre un 15 a 20 % de la biomasa y el área basal total, lo que sugiere que, aunque no contribuyeron de manera relevante en la captura de carbono actual, son fundamentales como parte de la regeneración y de la dinámica de acumulación de biomasa a largo plazo.

Se observó que la estructura vertical del bosque reflejó un patrón de acumulación de individuos en alturas inferiores, principalmente correspondientes al grupo de heliófitas efímeras y durables [39], entre las especies más abundantes en este estrato fueron *Luehea candida* (209 individuos) *Guazuma ulmifolia* (120 individuos) *Vachellia collinsii* (98 individuos) *Allophylus psilospermus* (75 individuos), lo cual concuerda con lo reportado en estudios recientes en bosques tropicales [35].

Este comportamiento no solo reflejó la composición florística, sino que además coincide con los hallazgos de Sánchez y Bax [40] quienes, por medio de un análisis vertical con LIDAR en el PNSR, concluyeron que la biomasa aérea tiende a concentrarse en los estratos bajos.

El número de especies aumentó y tendió a estabilizarse a medida que ocurrió la transición entre clases o estadio. Según estudios recientes [41], la interpretación del índice de Shannon mejoró cuando la diversidad se analizó mediante estratos.

La escasa presencia de individuos en el piso superior indicó una baja población de árboles emergentes, posiblemente como consecuencia de la historia de uso del bosque. Este patrón se reflejó en la dominancia de individuos jóvenes con alturas menores a 8 m en los sitios con menor acumulación de biomasa (clase 1).

*Calycophyllum candidissimum* y *Spondias mombin* fueron registradas en todas las categorías diamétricas, lo que evidenció una estructura horizontal continua. La capacidad de persistencia de estas especies es característica de poblaciones con regeneración sostenida y dinámica estructural estable en bosques tropicales [22]. Lo que permitió inferir que han mantenido procesos activos de dispersión y permanencia dentro del bosque.

En este estudio, la alta proporción de especies en la clase de frecuencia I indicó una distribución espacial localizada, es decir, que se encontraron en pocas parcelas, las más frecuentes dentro del grupo de especies raras fueron *Allophylus psilospermus* y *Coccoloba guanacastensis*. Por el contrario, la presencia de las especies *Luehea candida* y *Guazuma ulmifolia* en la categoría IV evidenció que estaban ampliamente distribuidas en el bosque.

El comportamiento observado por clases de frecuencia permitió inferir que la dinámica del bosque presentó una marcada heterogeneidad en la composición florística. Aunque algunas especies mostraron amplia distribución espacial, el ecosistema evaluado mantuvo una estructura composicional diversa, sin evidencias de dominancia absoluta. En este sentido, González y Castro [27] señalaron que la frecuencia constituye un indicador de la distribución espacial de las especies y permite interpretar su comportamiento dentro de la dinámica del bosque.

En condiciones promedio, el Coeficiente de Mezcla (CM) ha sido reportado en 1:7 para bosques tropicales, lo que reflejó una alta heterogeneidad de especies [22]. En este estudio, el valor global obtenido (1:20) indicó que los bosques presentaron una baja mezcla de especies y, por tanto, menor heterogeneidad florística. De manera complementaria, un estudio en bosque seco reportó un CM de 1:25,8; lo que evidenció una condición aún más homogénea [42].

Al analizar el CM por clases de biomasa, se demostró la dominancia marcada por pocas especies, aunque con una tendencia a mayor mezcla conforme aumentó la biomasa. Esta relación complementó al índice de Shannon, ya que, si bien se observó una diversidad media-alta, la distribución no fue uniforme y existió dominancia de unas pocas especies. Se encontró un incremento del número de especies entre las clases de biomasa aérea C1 (49 especies) y C2 (60 especies) que disminuye levemente en la C3 (58 especies), lo que reflejó una tendencia hacia el equilibrio en la riqueza conforme el bosque alcanzó estados de mayor biomasa.

## Conclusiones y recomendaciones

En términos de composición florística y estructura, los bosques del PNPV presentaron una comunidad diversa y espacialmente heterogénea, caracterizada por una alta proporción de especies con distribución espacial localizada y ausencia de dominancia absoluta. La diversidad registrada ( $H'$  promedio = 2,10) reflejó una condición intermedia-alta con tendencia a estabilizarse en las clases de biomasa superiores, mientras que la estructura diamétrica en forma de J invertida evidenció procesos activos de regeneración natural.

La mayor acumulación de biomasa en las clases superiores estuvo asociada principalmente al incremento en el tamaño de los árboles, más que a cambios en la diversidad florística o en la densidad de individuos. En conjunto, estos resultados indican que el bosque evaluado se encontró en una condición de recuperación estructural, con predominancia de individuos jóvenes y presencia de algunos árboles relictos de mayor tamaño que contribuyen significativamente a la acumulación de biomasa.

Se recomienda incorporar en el análisis de los otros dos sitios de estudio, EEFH y PNSR, una evaluación comparativa de la distribución de la biomasa en los diferentes componentes arbóreos (fuste, ramas y hojas), con el fin de determinar su representatividad como reservorios de carbono. Asimismo, el análisis de la superficie correspondiente a cada clase de biomasa aérea permitiría fortalecer la planificación del manejo forestal a futuro, facilitando la priorización de áreas para conservación, restauración o aplicación de prácticas silviculturales específicas.

La metodología de estratificación por clases de biomasa con imágenes satelitales resultó ser útil para interpretar la composición y estructura, además de localizar zonas con menor o mayor acumulación de biomasa aérea, lo que permitió una distribución equilibrada de 10 parcelas por clase.

Se sugiere priorizar el seguimiento mediante teledetección para la estratificación de la biomasa por clases, con el fin de focalizar áreas de baja y alta acumulación y dirigir esfuerzos hacia su protección como fuentes de regeneración, núcleos de biodiversidad o reservorios de carbono, contribuyendo a la mitigación y adaptación frente a la variabilidad climática y el calentamiento global.

La metodología aplicada en este estudio es más objetiva, al generar clases por biomasa aérea y no por la edad del bosque, porque la clasificación en etapas sucesionales supone que el bosque se ha dejado desarrollar a partir de una fecha específica y no considera las múltiples alteraciones que sufre el bosque, que afectan su desarrollo y rendimiento.

Se recomienda ampliar el análisis de composición florística mediante la clasificación de especies en gremio ecológico, con el fin de identificar en cuáles se concentra la mayor proporción de biomasa aérea. Esto permitiría determinar si el bosque presenta estrategia predominante adquisitiva, es decir, caracterizada por una acumulación rápida de biomasa, pero con menor permanencia en el tiempo o conservativa, asociada a mayor longevidad. Asimismo, se sugiere incorporar un análisis de diversidad estructural y funcional que permita evaluar el bosque como una comunidad integrada, proporcionando criterios técnicos para el diseño de tratamientos silviculturales orientados a promover especies con mayor resiliencia frente al cambio climático.

## Agradecimientos

Agradecemos profundamente el valioso apoyo brindado por el Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), al Comité del Fondo y Desarrollo de Becas del Instituto Tecnológico de Costa Rica, al programa de investigación de la Organización para estudios tropicales (OET), Asimismo, reconocemos la colaboración del Sistema Nacional de Áreas de Conservación de AC Arenal-Tempisque del Parque Nacional Palo Verde y Área de Conservación Guanacaste-Parque Nacional Santa Rosa y Estación Experimental Forestal Horizontes.

De igual manera, agradecemos al proyecto de Evaluación de la estructura del bosque mediante sensores remotos y validación de campo, en el Pacífico Norte de Costa Rica, bajo la dirección de docentes de la Escuela de Ingeniería Forestal y al equipo de trabajo en campo, conformado por docentes, estudiantes de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Forestal y de la Maestría en Ciencias Forestales.

## Referencias

- [1] J, Ocón, T. Ibanez, J. Franklin, S. Pau, G. Keppel, G. Rivas Torres, M.E. Shin y T.W. Gillespie, "Global tropical dry forest extent and cover: A comparative study of bioclimatic definitions using two climatic data sets", PLoS ONE, vol. 16, no. 5, May., pp. 05-20, 2021.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), "FAOSTAT: Emisiones derivadas de los bosques. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/GF>. [Consultado: 26 de enero de 2024].
- [3] Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). Estudio de Monitoreo de Cobertura Forestal de Costa Rica 2005. I Parte: Clasificación de la Cobertura Forestal con Imágenes Landsat ETM+ 2005, San José, Costa Rica, 2007.
- [4] Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), "Plan Estratégico Institucional SINAC 2023–2030". SINAC–MINAE, 2023.

- [5] Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE), "Cuarta Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático", MINAE, 2021.
- [6] L. Corrales Chaves, "Tendencias, riesgos e implicaciones de la gestión de la biodiversidad en Costa Rica", CONARE-PEN, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.conare.ac.cr/server/api/core/bitstreams/f8aa0994-1d1f-431d-a757-efd7f9419c97/content>.
- [7] B. Hilje, N. V. Sánchez, E. M. Bayne y A. Sánchez Azofeifa, "Bird Assemblage Recovery in a Chronosequence of Tropical Dry Forests in Costa Rica", *Forests*, vol. 11, no. 6, Jun., Art. no. 629, 2020.
- [8] P. M. Solano-Solano, "Composición florística, estructura de bosque y diversidad de especies en bosques secundarios húmedos tropicales del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica", Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2020.
- [9] Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). "Plan General de Manejo del Parque Nacional Palo Verde. Volumen I – Diagnóstico". Área de Conservación Arenal Tempisque (ACAT). Guanacaste-Costa Rica. 2013.
- [10] R. Muñoz, M. Enríquez, F. Bongers, R. D. López-Mendoza, C. Miguel Talonia, and J. A. Meave, "Lithological substrates influence tropical dry forest structure, diversity, and composition, but not its dynamics", *Frontiers in Forests and Global Change*, vol. 6, Art. no. 1082207, mar 2023.
- [11] N. L. Vásquez and H. C. Sevilla, "Uso De Los Sensores Remotos En Mediciones Forestales", *European Scientific Journal*, vol. 14, no. 15, May., p. 58, 2018.
- [12] V. K. Dadhwal y S. Nandy, "Forest Biomass Assessment Using Multisource Earth Observation Data: Techniques, Data Sets and Applications", *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol. 52, May., pp. 703-709, 2024.
- [13] WorldClim, "WorldClim version 2.1: Free climate data," [En línea]. Disponible: <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html#> [Consultado: Aug. 29, 2025].
- [14] Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), "Cobertura forestal de Costa Rica 2023". (s.f), [En línea]. Disponible en: [https://www.snitcr.go.cr/ico\\_servicios\\_ogc\\_info?k=bm9kbzo6NDA=&nombre=SINAC](https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc_info?k=bm9kbzo6NDA=&nombre=SINAC). [Consultado: feb. 12, 2024].
- [15] Mejía, C., Andrade, H y Segura, M, "Estimación de biomasa y carbono con herramientas de teledetección en bosques secos tropicales del Tolima, Colombia". *Revista de Teledetección*, vol 62, Jul., pp. 57-70. 2023.
- [16] G. Código Domper, "Bajar imágenes Sentinel mediante script en GEE," YouTube, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://www.youtube.com/watch?v=mq\\_Qkfqp-tY&t=2s](https://www.youtube.com/watch?v=mq_Qkfqp-tY&t=2s). [Acceso: Apr. 12, 2024].
- [17] T. Nguyen y M. Kappas, "Estimating the aboveground biomass of an evergreen broadleaf forest in Xuan Lien Nature Reserve, Thanh Hoa, Vietnam, using SPOT-6 data and the random forest algorithm", *International Journal of Forestry Research*, pp. 1-13, 2020.
- [18] L. F. Gonzales Tejena, "Determinación del volumen comercial en plantación de Teca (*Tectona grandis* L) utilizando tres formas de parcelas en el sitio Visquije del Cantón Santa Ana", Trabajo de Titulación, Carrera de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Naturales y de la Agricultura, Univ. Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador, 2018.
- [19] N. Ahmad, S. Ullah, N. Zhao, F. Mumtaz, A. Ali, A. Ali, A. Tariq, M. Kareem, A. B. Imran, I. A. Khan et al., "Comparative analysis of remote sensing and geo-statistical techniques to quantify forest biomass", *Forests*, vol. 14, no. 2, feb., Art. no. 379, 2023.
- [20] H. Cho, J. Park y W. Lee. "Assessment of the GNSS-RTK for Application in Precision Forest Operations ", *Remote Sensing*, vol. 16, no. 1, Ene., p. 148, 2024.
- [21] W. Fonseca, R. Villalobos y M. Rojas, "Potencial de mitigación del cambio climático de los ecosistemas forestales caducifolios en Costa Rica: modelos predictivos de biomasa y carbono", *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 53, no. 2, Jul., 2019.
- [22] H. Lamprecht, *Silvicultura en los trópicos: Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas, posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido*, Eschborn, Alemania: GTZ, 1990. [E-book] Available: <https://es.scribd.com/document/550052790/Silvicultura-en-Los-Tropicos-Lamprecht>
- [23] C. B. Tipán Torres, "Eficiencia en la producción de carbono y madera en un bosque Siempreverde Piemontano de la Amazonía Ecuatoriana", Tesis de Maestría, Univ. Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador, 2021.
- [24] R. Villalobos Chacón, "El manejo forestal del bosque secundario como alternativa de uso de la tierra en la zona norte de Costa Rica", *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 35, no. 6, dic., pp. 70–78, 2022.
- [25] K. Kitikidou, E. Milios, A. Stampoulidis, E. Pipinis y K. Radoglou, "Using Biodiversity Indices Effectively: Considerations for Forest Management", *Ecologies*, vol. 5, no. 1, pp. 42-51, 2024.

- [26] C. M. Cusaro, C. Grazioli, F. Zambuto, E. Capelli y M. Brusoni, "An improved method for assessing simple sequence repeat (SSR) variation in *Echinochloa crus galli* (L.) P. Beauv. (barnyardgrass)", *Diversity*, vol. 14, no. 1, Dic., art. 3, 2022.
- [27] B. González y G. Castro, "Factores a considerar en la regeneración natural del bosque tropical seco en Nicaragua", *La Calera*, vol. 11, no. 16, pp. 05-11, 2011.
- [28] G. Estrada Valdés, A. R. Endara Agramont, S. Vázquez Lozada y F. S. Todd, "Forest Harvesting Impacts on the Structure and Composition of Coniferous Forests in Mexico", *Forests*, vol. 12, no. 8, Aug. art. 1068, 2021.
- [29] J. Torrez, "Evaluación de la utilidad de los sensores remotos Landsat-8 y Sentinel-2 para el monitoreo de calidad de agua en la Laguna de Apoyo", Tesis Ing., Universidad Nacional Agraria., Managua, Nicaragua, 2021.
- [30] R. D. Yanai, M. A. Arthur, J. D. Battles, C. R. Blinn, C. S. Campbell, S. Fraver et al., "Measurement uncertainty in a national forest inventory", *Forests*, vol. 14, no. 3, mar., Art. no. 628, 2023.
- [31] R. Quesada, M.V. Villalobos, L. Vargas. "Restauración silvicultural de los bosques secundarios de Guanacaste Costa Rica" [Manuscrito inédito], Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [32] P. Spittler, "Potencial de manejo de los bosques secundarios en la zona seca del noroeste de Costa Rica", Investigación de Bosques Tropicales TÖB TWF-23s, Eschborn, Alemania: GTZ, 2001.
- [33] A. J. Calvo Obando, "Biomasa, carbono y CO2 equivalente acumulado en una cronosecuencia de bosque seco tropical en el Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica y el Parque Estadual de Mata Seca, Brasil," Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica, 2015.
- [34] J. M. Becknell, L. K. Kucek y J. S. Powers, "Aboveground biomass in mature and secondary seasonally dry tropical forests: A literature review and global synthesis", *Biological Conservation*, vol. 149, no. 1, pp. 1-12, 2012.
- [35] P. Solano, "Composición florística, estructura de bosque y diversidad de especies en bosques secundarios húmedos tropicales del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica", Tesis de Ingeniería, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2020.
- [36] W. N. Ramírez Huila y N. E. Ayoví Garcés, "Estructura y composición arbórea del bosque seco tropical en el valle Sancán, Manabí, Ecuador", *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, vol. 10, no. 2, pp. 169-181, 2022.
- [37] Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE), Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), "Sistematización de la experiencia Programa de Restauración y Silvicultura, Área de Conservación Guanacaste", no. 10, San José, Costa Rica: MINAE-SINAC, 2021.
- [38] S. Calvo Rodriguez, G. A. Sánchez Azofeifa, S. M. Durán, M. M. Do Espírito Santo y Y. R. Ferreira Nunes, "Dynamics of carbon accumulation in tropical dry forests under climate change extremes", *Forests*, vol. 12, no. 6, jun., Art. no. 698, 2021.
- [39] Sistema de Información de Recursos Forestales de Costa Rica (SIREFOR), "Listado de especies con gremios ecológicos actualizados", 2018. [En línea]. Disponible en: [https://www.sirefor.go.cr/Sirefor/publicaciones\\_tabla?nombre=Especies](https://www.sirefor.go.cr/Sirefor/publicaciones_tabla?nombre=Especies)
- [40] C. Liu, A. Sanchez-Azofeifa y C. Bax, "Studying Tropical Dry Forests Secondary Succession (2005–2021) Using Two Different LiDAR Systems", *Remote Sensing*, vol. 15, no. 19, oct., Art. no. 4677, 2023.
- [41] S. He, D. Li, X. Yang, D. Qi, N. Shang, C. Liang, R. Liu y C. Du, "Environmental heterogeneity drives diversity across forest strata in *Hopea hainanensis* communities", *Diversity*, vol. 17, no. 8, ago., Art. no. 556, 2025.
- [42] J. Moscol, M. Puestas y E. Herrera, "Estructura y diversidad arbórea y su relación con el suelo forestal en un ecosistema de bosque seco", *Manglar*, vol. 19, no. 4, pp. 323-330, 2022.

## Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Se realizó revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleando la herramienta de IA [*Prompt en Open AI 5, 2025*], con un grado de uso bajo. Con la cual se identificaron errores y permitió mejorar la fluidez del texto. No obstante, para garantizar el cumplimiento con los estándares de calidad de la revista, revisamos exhaustivamente todo el documento.

Para traducir partes de este artículo del español a inglés, utilizamos la herramienta de inteligencia artificial [*Matecat open source platform*] con un grado de uso bajo. La cual agilizó el proceso de traducción, sin embargo, realizamos revisión final para asegurar exactitud en las traducciones.

# Modelación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos: una revisión







## Modeling of water erosion and sediment transport: a review

Ericka Picado-Mora<sup>1</sup>, Karolina Villagra-Mendoza<sup>2</sup>, Margaret Gitau<sup>3</sup>

Picado-Mora, E; Villagra-Mendoza, K; Gitau, M. Modelación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos: una revisión. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° especial Tecnología en Marcha. Marzo, 2026. Vol. 39, N° especial VII Encuentro Biental Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Marzo, 2026. Pág. 34-43.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i6.8571>



- 1 Estudiante de Posgrado Maestría en Ciencia y Tecnología para la Sostenibilidad, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.  
 [epicadom@estudiantec.cr](mailto:epicadom@estudiantec.cr)  
 <https://orcid.org/0009-0008-3160-863X>
- 2 Profesora e Investigadora Centro de Investigación y Extensión en Tecnología e Ingeniería Agrícola, Escuela de Ingeniería Agrícola, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.  
 [kvillagra@itcr.ac.cr](mailto:kvillagra@itcr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0002-2335-0615>
- 3 Profesora del Departamento de Ingeniería Agrícola y Biológica, Purdue University. Estados Unidos.  
 [mgitau@purdue.edu](mailto:mgitau@purdue.edu)  
 <https://orcid.org/0000-0002-4931-7047>

## Palabras clave

Conservación de suelos; degradación del suelo; erosión; modelos; sensores remotos; transporte de sedimentos.

## Resumen

La erosión hídrica y el transporte de sedimentos son procesos clave en la degradación del suelo, impactando significativamente la sostenibilidad agrícola en regiones tropicales con alta pendiente como América Latina. Esta revisión analiza el estado del arte en la modelación de dichos procesos, con énfasis en enfoques experimentales a nivel de laboratorio y su integración en estrategias de conservación del suelo. Se aplicó una metodología mixta, utilizando la base de datos Scopus, identificando 64 publicaciones como nivel integrador entre 2020 y 2025. Los modelos más citados fueron SWAT, IBER y SDR-InVEST, por su capacidad de simular pérdida de suelo y transporte de sedimentos a distintas escalas. La teledetección y las parcelas de escorrentía emergen como herramientas clave para la validación de modelos en contextos tropicales. Los resultados evidencian el potencial de la modelación para apoyar el manejo sostenible del suelo y contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Sin embargo, persisten desafíos asociados a la calidad de los datos, la validación en condiciones locales y la articulación con marcos de sostenibilidad. Se concluye que es necesario fortalecer los estudios aplicados en zonas tropicales y fomentar la integración de herramientas técnico-científicas en planes de conservación del suelo.

## Keywords

Soil conservation; soil degradation; erosion; models; remote sensing; sediment transport.

## Abstract

Water erosion and sediment transport are key processes in soil degradation, significantly impacting agricultural sustainability in tropical high-slope regions such as Latin America. This review analyzes the state of the art in the modeling of these processes, with an emphasis on experimental approaches at the laboratory scale and their integration into soil conservation strategies. A mixed methodology was applied using the Scopus database, identifying 64 publications as the integrative level between 2020 and 2025. The most cited models were SWAT, IBER, and SDR-InVEST, recognized for their ability to simulate soil loss and sediment transport across different scales. Remote sensing and runoff plots emerge as key tools for model validation in tropical contexts. The findings highlight the potential of modeling to support sustainable soil management and contribute to the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs). However, challenges remain regarding data quality, local validation, and integration with sustainability frameworks. It is concluded that applied research in tropical regions must be strengthened, and the integration of technical and scientific tools into soil conservation planning must be promoted.

## Introducción

La degradación del suelo por erosión hídrica representa una amenaza crítica para la sostenibilidad agrícola, especialmente en regiones tropicales de alta pendiente. En Costa Rica, el uso intensivo del suelo y las prácticas agrícolas inadecuadas han agravado esta problemática, que, según la FAO [1], afecta al 33% de los suelos a nivel mundial, siendo América Latina la región con mayor proporción de casos severos. Esta situación genera una reducción

significativa en la productividad agrícola, pérdidas económicas y una presión creciente sobre la sostenibilidad ambiental. Además de su papel en la producción de alimentos, el suelo cumple funciones esenciales en la regulación del clima, al actuar como reservorio de carbono, por lo que su conservación es clave para avanzar hacia el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 2: Hambre Cero, que promueve una agricultura resiliente frente al cambio climático y la degradación de los recursos naturales [2]. En respuesta a esta problemática, se han desarrollado diversas metodologías para monitorear y modelar los procesos de erosión y transporte de sedimentos. Entre las más destacadas se encuentran la teledetección, la modelación computacional y los enfoques experimentales en laboratorio, como el uso de parcelas de escorrentía y simuladores de lluvia. Estas herramientas permiten generar datos precisos y contextualizados, esenciales para diseñar estrategias efectivas de conservación del suelo. Sin embargo, persisten vacíos en la validación de modelos en condiciones tropicales y en su articulación explícita con los ODS. En este contexto, la presente revisión de literatura analiza los avances científicos recientes en la modelación de la erosión hídrica y el transporte de sedimentos, con énfasis en enfoques experimentales y su potencial para mitigar la degradación del suelo en el marco del desarrollo sostenible. Abordando tres ejes principales: (i) el impacto de estos procesos en la sostenibilidad agrícola, (ii) los modelos más utilizados a nivel de laboratorio, y (iii) su aplicación en estrategias de conservación del suelo y manejo del agua ante el cambio climático.

## Materiales y métodos

Se aplicó un diseño de investigación documental, con enfoque mixto: revisión narrativa y análisis bibliométrico. La búsqueda se realizó en la base de datos Scopus, en donde se definieron cuatro niveles de búsqueda temáticos: (i) erosión y sostenibilidad (1598 resultados), (ii) técnicas experimentales como parcelas de escorrentía y sensores remotos (136 y 836 resultados), (iii) modelos como SWAT, IBER y EUROSEM (109 resultados), y (iv) nivel integrador bajo criterios de sostenibilidad (64 resultados), basado en la cadena: (“soil erosion” OR “land degradation” OR “sediment transport”) AND (“runoff plots” OR “rainfall simulator” OR “remote sensing” OR “satellite imagery”) AND (“modeling” OR “erosion model” OR “sediment model”) AND (“sustainability” OR “climate change” OR “soil conservation”). Se aplicaron filtros por idioma (español/inglés), tipo de documento (artículos y revisiones), área temática (ciencias ambientales, agrícolas e ingeniería), y periodo (2020–2025). Se analizaron 64 publicaciones mediante el paquete *bibliometrix* en RStudio, identificando redes de coocurrencia, autores, instituciones y evolución de conceptos. Los resultados fueron organizados según los objetivos planteados, identificando tendencias, vacíos y oportunidades para futuras investigaciones en conservación del suelo. Adicionalmente, se consultó la base ampliada de más de 1000 artículos sin el filtro de sostenibilidad, con el fin de identificar patrones específicos en la aplicación de modelos empíricos y computacionales en diferentes regiones.

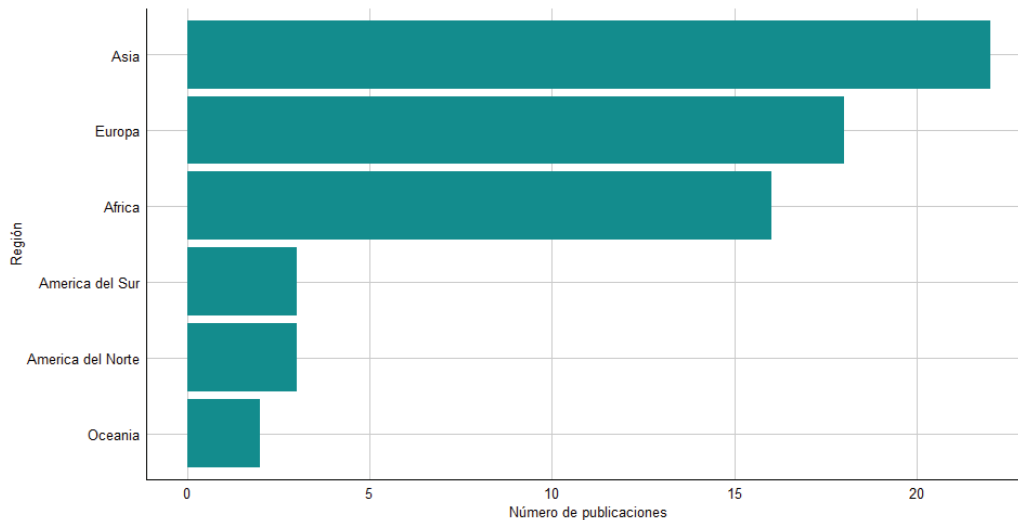
## Resultados

### Panorama general de la producción científica

Entre 2020 y 2025 se identificaron 64 publicaciones indexadas en Scopus relacionadas con la erosión hídrica, el transporte de sedimentos, sus técnicas de modelación y su aplicación en sostenibilidad, siendo este el nivel integrador. Las palabras clave más frecuentes fueron: “sensores remotos”, “erosión hídrica”, “degradación del suelo” y “cambio climático” (Figura 1).



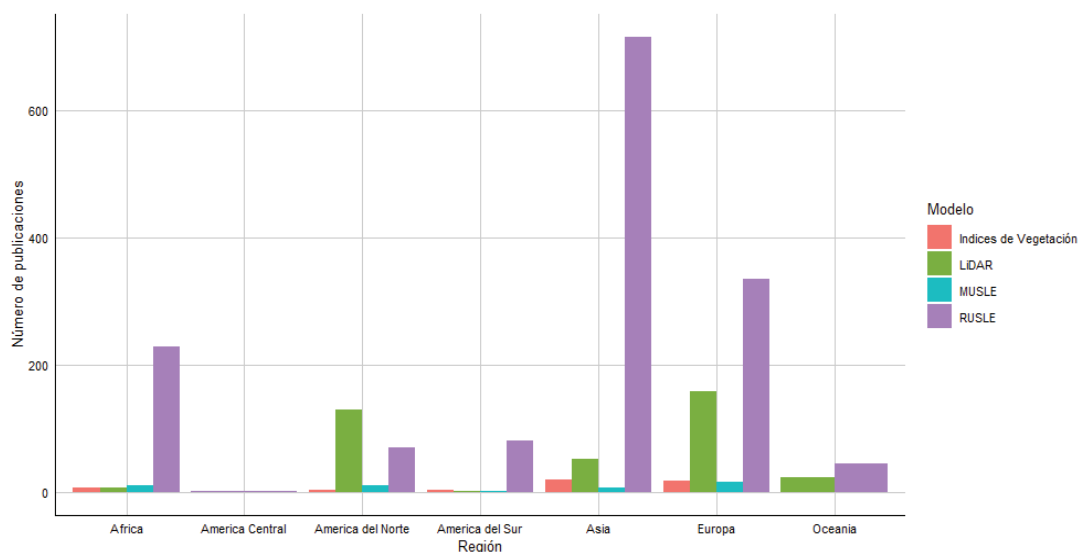
distribución revela una brecha regional en la investigación, vinculada a una menor inversión en investigación ambiental, acceso limitado a tecnologías de modelación y débil articulación entre ciencia y políticas públicas en varios países latinoamericanos [3].



**Figura 3.** Producción científica por región en el nivel integrador.

### Modelación de la erosión hídrica: clasificación, aplicaciones y avances recientes

Se identificaron cinco tipos de modelos aplicados a la cuantificación de la erosión hídrica: físicos, empíricos, conceptuales, digitales y analógicos. Entre ellos, los modelos empíricos son los más aplicados, destacando la ecuación RUSLE, en la búsqueda ampliada de más de 1000 artículos publicados entre 2020 y 2025 (sin el filtro de sostenibilidad), RUSLE aparece presente en más de 600 estudios en Asia y al menos 150 en América (Figura 4). Esta ecuación considera variables como textura del suelo, pendiente, cobertura vegetal y régimen hídrico, y ha sido ampliamente empleada en zonas agrícolas, combinada con datos de sensores remotos para mejorar la precisión espacial [4]. Por su parte, la ecuación MUSLE ha ganado importancia por su capacidad para estimar la producción de sedimentos en eventos hidrológicos específicos [4]. No obstante, solo alrededor del 25% de los estudios analizados incorporan explícitamente el transporte de sedimentos, lo que constituye una limitación significativa, considerando que muchas aplicaciones se enfocan únicamente en la pérdida de suelo superficial. Aunque RUSLE y MUSLE han sido validadas en contextos agrícolas generales, su precisión en ambientes tropicales altamente degradados es aún incierta. Estudios como el de Quincke Walden et al. [5] evidencian que estas ecuaciones tienden a subestimar las pérdidas en suelos severamente erosionados, resaltando la necesidad de validaciones experimentales.

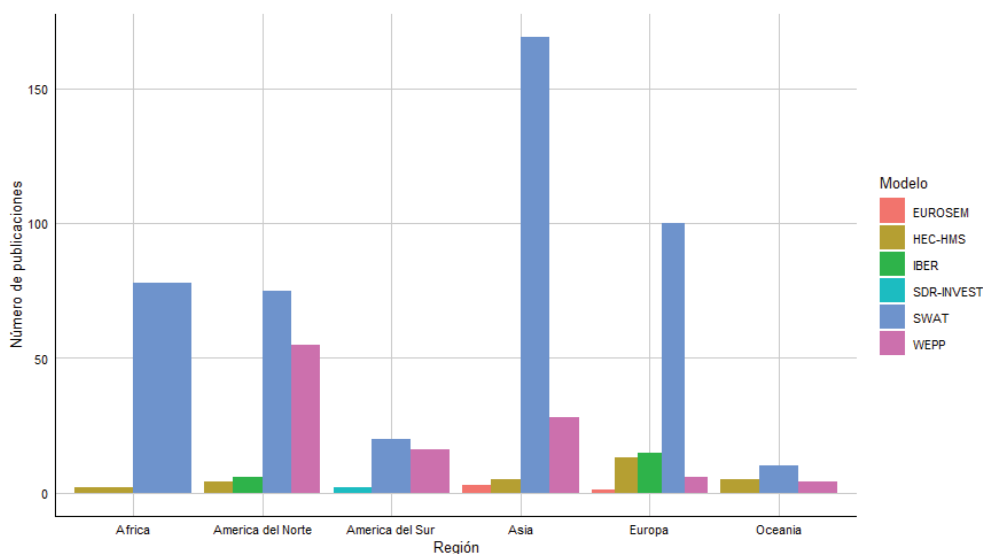


**Figura 4.** Uso de modelos de erosión por región.

La integración de sensores remotos ha mejorado la resolución espacial de los modelos. Vehículos Aéreos no Tripulados (UAVs por sus siglas en inglés), imágenes multiespectrales, sensores láser de teledetección (conocidos como LiDAR) y análisis de índices de vegetación han sido aplicados para estimar pérdida de suelo y evaluar zonas de acumulación de sedimentos. Estas herramientas permiten generar modelos 2D y 3D de alta precisión, aunque requieren calibración con datos de campo y experimentación en laboratorio para asegurar su aplicabilidad en contextos específicos [6], [7]. Según Alexiou et al. [8], los datos de alta resolución sobre deposición de sedimentos respaldan el uso de sensores remotos como herramienta clave para cuantificar la erosión. A pesar del avance tecnológico, existe una baja integración entre modelos predictivos y validación empírica mediante parcelas de escorrentía o simuladores de lluvia, los cuales resultan esenciales para observar los procesos en tiempo real bajo condiciones controladas. La falta de estandarización metodológica limita la transferencia de resultados entre regiones o escalas [2]. En este contexto, la sostenibilidad se posiciona como un criterio transversal, la capacidad de anticipar pérdidas de suelo y sedimentos con modelos validados localmente es crucial para el diseño de estrategias de conservación efectivas, especialmente en zonas agrícolas vulnerables. Sin embargo, el número limitado de estudios que combinan validación experimental, modelación matemática y teledetección revela una brecha metodológica significativa [9].

### Modelación del transporte de sedimentos

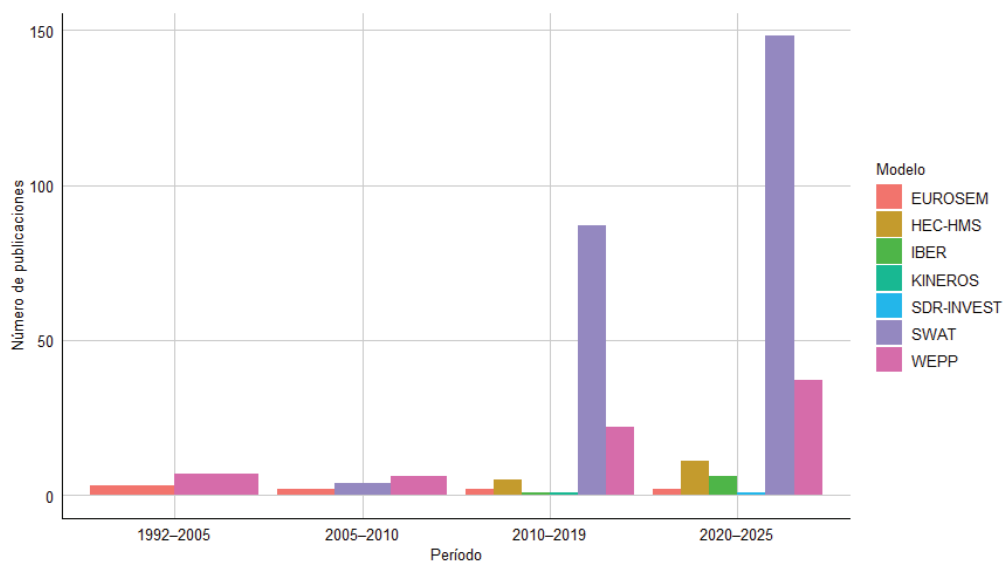
El análisis bibliográfico identificó más de 150 estudios que utilizaron el modelo SWAT para simular el transporte de sedimentos, consolidándolo como el modelo más empleado a nivel global en las últimas dos décadas (Figura 5). Este hallazgo coincide con lo señalado por Colín-García et al. [10], quienes destacan su versatilidad para simular procesos hidrológicos, calidad del agua y transporte de sedimentos a múltiples escalas. SWAT integra variables como uso del suelo, cobertura vegetal, clima y topografía, e implementa la ecuación MUSLE junto con otras ampliamente reconocidas como Bagnold, Molinas y Wu, y Yang [11].



**Figura 5.** Aplicación de los modelos de transporte de sedimentos por región.

Otros modelos relevantes incluyen WEPP, IBER, y SDR-InVEST, utilizados principalmente en América y Europa. SDR-InVEST ha cobrado notoriedad recientemente por su enfoque ecosistémico, y ha sido empleado en estudios enfocados en la valoración de servicios ambientales, especialmente en Estados Unidos [12]. De los modelos analizados, SWAT, WEPP, SDR-InVEST, KINEROS e IBER cuentan con módulos específicos para la erosión y el transporte de sedimentos. En contraste, ecuaciones como RUSLE y MUSLE se utilizan para estimar la pérdida de suelo, sin simular transporte de sedimentos en cauces, y más bien contribuyen al complementar los modelos computacionales mencionados. El análisis temporal (Figura 6) muestra una transición metodológica clara: modelos como EUROSEM y WEPP fueron dominantes hasta 2005, mientras que a partir de 2010 se incrementó el uso de modelos computacionales más avanzados, como SWAT y SDR-InVEST. Entre 2020 y 2025 se observa una tendencia hacia enfoques integrados, que combinan modelación, sensores remotos y simulaciones en laboratorio. Sin embargo, menos del 20% de los estudios combinó dos o más modelos, siendo las combinaciones más frecuentes SWAT + RUSLE y SWAT + SDR-InVEST, empleadas para validar resultados o cubrir diferentes escalas de análisis, enfocadas principalmente a formaciones fluviales y no ha parcelas de escorrentía superficial [13], [14].

Respecto al contexto de validación, los modelos han sido principalmente calibrados y validados en cuencas templadas, lo cual limita su aplicabilidad directa en regiones tropicales. En este contexto, SWAT se posiciona como el modelo con mayor potencial de adaptación, por su capacidad para simular flujos en pendientes pronunciadas e integrar múltiples ecuaciones de transporte adaptables a escenarios topográficos y edafológicos variables [10], [11]. No obstante, persisten limitaciones importantes: escasa validación con datos obtenidos en condiciones tropicales o mediante parcelas de escorrentía simuladas, baja integración entre modelos y técnicas de teledetección, y limitada disponibilidad de datos de alta resolución. Estos factores reducen la precisión de las proyecciones y dificultan su extrapolación a largo plazo [10], [11]. A pesar de ello, la integración de modelos de transporte de sedimentos con sensores remotos representa una oportunidad significativa para avanzar en la planificación sostenible del uso del suelo y la conservación hídrica. Siempre que estos modelos se adapten a condiciones locales y sean adecuadamente calibrados, pueden contribuir al desarrollo de sistemas de alerta temprana, diseño eficiente de obras de conservación y formulación de políticas basadas en evidencia.



**Figura 6.** Evolución de la aplicación de los modelos de transporte de sedimentos a nivel mundial.

### Aplicación de la modelación en estrategias de conservación y sostenibilidad

La modelación hidro-sedimentológica, combinada con herramientas como la teledetección, representa una base técnica clave para diseñar estrategias de conservación del suelo. Modelos como SWAT, IBER y SDR-InVEST, al integrar ecuaciones validadas como RUSLE y MUSLE, generan resultados cuantificables y representaciones visuales que facilitan la toma de decisiones técnicas y políticas [15]. Estas herramientas también permiten caracterizar el uso del suelo y monitorear condiciones climáticas variables con mayor precisión, lo que resulta particularmente útil en regiones donde el monitoreo de campo es limitado [12], [16]. En América Latina, la aplicación de modelos ha permitido reducir significativamente la pérdida de suelo, como evidencian casos documentados en Argentina, Paraguay y Brasil [17]. En Costa Rica, por ejemplo, la cuenca del río Jesús María ha sido objeto de intervenciones basadas en modelaciones, como las acequias de ladera y gavetas de infiltración, con resultados positivos en la conservación del suelo [18]. Estas experiencias reflejan el aporte de la modelación al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 2 y 13, al fomentar el uso racional del suelo y fortalecer la capacidad de adaptación al cambio climático. Sin embargo, persisten desafíos relevantes, como la calidad y disponibilidad de los datos de entrada, la necesidad de validación local de modelos, y su limitada integración con marcos de sostenibilidad global [19]. El análisis bibliométrico refuerza esta brecha, al evidenciar que términos como “SWAT”, “erosion”, “soil conservation” y “remote sensing” dominan la literatura reciente, mientras que la mención directa a los ODS es limitada. Esto señala la necesidad de fortalecer los vínculos entre ciencia aplicada y agendas internacionales, particularmente en regiones como Centroamérica, donde la degradación del suelo avanza rápidamente y la investigación aplicada aún es escasa.

### Conclusiones

La revisión evidencia que la erosión hídrica y el transporte de sedimentos son procesos críticos en la degradación del suelo, especialmente en regiones tropicales de alta pendiente como América Latina. Esta problemática representa una amenaza directa para la sostenibilidad agrícola y la seguridad alimentaria, y requiere enfoques integrales basados en evidencia científica. Los

resultados muestran que modelos hidro-sedimentológicos como SWAT, IBER y SDR-InVEST han ganado relevancia por su capacidad de simular escenarios de pérdida de suelo y escorrentía. Estos modelos, al incorporar ecuaciones validadas y generar salidas visualmente interpretables, contribuyen al diseño y optimización de estrategias de conservación del suelo. Su integración con herramientas como la teledetección ha fortalecido el diagnóstico territorial, especialmente en contextos con acceso limitado a monitoreo directo. Del mismo modo, el análisis bibliométrico confirma el protagonismo de enfoques técnico-computacionales en la literatura reciente, aunque también pone en evidencia la baja vinculación explícita de estos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Esta desconexión representa una oportunidad para alinear la producción científica con metas globales de sostenibilidad. Finalmente, la modelación de la erosión hídrica y el transporte de sedimentos se consolida como una herramienta estratégica para el manejo sostenible del suelo. No obstante, su efectividad depende de la calidad y disponibilidad de los datos, la validación en condiciones locales y su articulación con enfoques experimentales. En regiones como Centroamérica, donde los procesos de degradación son acelerados y la investigación aplicada sigue siendo limitada, es urgente fortalecer la generación de información contextualizada, promover estudios experimentales y consolidar la integración de estas herramientas en planes técnicos de conservación del suelo.

## Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica (código 1421040). Los autores agradecen a la Maestría en Ciencia y Tecnología para la Sostenibilidad del Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE) y al Instituto Tecnológico de Costa Rica por el apoyo académico vinculado a esta iniciativa.

## Referencias

- [1] FAO, *Global Soil Partnership 2012-2022-Sustainable soil management in action*. Rome: FAO, 2022. doi: [10.4060/cc0921en](https://doi.org/10.4060/cc0921en).
- [2] T. Palominos-Rizzo, M. Villatoro-Sánchez, A. Alvarado-Hernández, V. Cortés-Granados, and D. Paguada-Pérez, "Dinámica temporal de erosión del suelo en café (*Coffea arabica*), Llano Brenes, Costa Rica," *Agronomía Mesoamericana*, vol. 33, no. 13, p. 49736, Ago. 2022, doi: [10.15517/am.v33i3.49736](https://doi.org/10.15517/am.v33i3.49736).
- [3] D. M. Santin and S. E. Caregnato, "Concentración y desigualdad científica en América Latina y el Caribe a principios del siglo XXI: un estudio cuantitativo," *Información, cultura y sociedad*, no. 43, pp. 13–30, Oct. 2020, doi: [10.34096/ics.i43.8131](https://doi.org/10.34096/ics.i43.8131).
- [4] Y. A. Bocanegra Alza and Y. E. Guzman Ventura, "Determinación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Chicama, 2021," Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo, 2023. [Online]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14414/16439>. [Accedido Ene. 30, 2025].
- [5] J. A. Quincke Walden *et al.*, "Informe final publicable de proyecto Determinación de tasas de erosión por técnicas nucleares en el experimento agrícola de largo plazo más antiguo de Latinoamérica," Universidad de la República, 2023. [Online]. Disponible en: [https://redi.anii.org.uy/jspui/bitstream/20.500.12381/3942/1/Informe\\_final\\_publicable\\_FMV\\_1\\_2019\\_1\\_156244.pdf](https://redi.anii.org.uy/jspui/bitstream/20.500.12381/3942/1/Informe_final_publicable_FMV_1_2019_1_156244.pdf). [Accedido May 15, 2025].
- [6] S. Arriola-Valverde, L. C. Villalobos-Avellan, K. Villagra-Mendoza, and R. Rimolo-Donadio, "Erosion Quantification in Runoff Agriculture Plots by Multitemporal High-Resolution UAS Digital Photogrammetry," *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, vol. 13, pp. 6326–6336, 2020, doi: [10.1109/JSTARS.2020.3027880](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3027880).
- [7] S. Polovina, B. Radić, R. Ristić, and V. Milčanović, "Application of Remote Sensing for Identifying Soil Erosion Processes on a Regional Scale: An Innovative Approach to Enhance the Erosion Potential Model," *Remote Sens (Basel)*, vol. 16, no. 13, p. 2390, Jun. 2024, doi: [10.3390/rs16132390](https://doi.org/10.3390/rs16132390).
- [8] S. Alexiou, I. Papanikolaou, S. Schneiderwind, V. Kehrle, and K. Reicherter, "Monitoring and Quantifying Soil Erosion and Sedimentation Rates in Centimeter Accuracy Using UAV-Photogrammetry, GNSS, and t-LiDAR in a Post-Fire Setting," *Remote Sens (Basel)*, vol. 16, no. 5, p. 802, Feb. 2024, doi: [10.3390/rs16050802](https://doi.org/10.3390/rs16050802).

- [9] D. Dunkerley, "The case for increased validation of rainfall simulation as a tool for researching runoff, soil erosion, and related processes," *Catena (Amst)*, vol. 202, p. 105283, Jul. 2021, doi: [10.1016/j.catena.2021.105283](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105283).
- [10] G. Colín-García *et al.*, "Modelación hidrológica con el modelo SWAT empleando diferentes distribuciones espaciales del tipo suelo en la cuenca del Río Mixteco," *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, vol. 41, Mar. 2023, doi: [10.28940/terra.v41i0.1566](https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1566).
- [11] V. J. Vargas Caba, "Simulación hidrológica de cuencas aplicando el modelo hidrológico SWAT," *Revista Técnica de la Construcción*, vol. 1, no. 21, pp. 36–41, 2024, [Online]. Disponible en: <https://revistas.usfx.bo/index.php/revistatecnicaconstruccion/article/view/1298>. [Accedido Abr. 05, 2025].
- [12] H. B. G. D. M. P. Ekanayaka, N. S. Abeysingha, T. Amarasekara, R. L. Ray, and D. K. Samarathunga, "The use of InVEST-SDR model to evaluate soil erosion and sedimentation in the closer catchment of a proposed tropical reservoir in Sri Lanka," *International Journal of Sediment Research*, vol. 40, no. 2, pp. 253–268, Abr. 2025, doi: [10.1016/j.ijsrc.2024.12.005](https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.12.005).
- [13] P. Garcia Ramirez, L. C. Alatorre Cejudo, and L. C. Bravo Peña, "Modelos de escorrentía superficial en la última década. Una revisión bibliográfica," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, no. 1, pp. 7726–7750, Mar. 2023, doi: [10.37811/cl\\_rcm.v7i1.5001](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5001).
- [14] T. Selim, M. Hesham, and M. Elkiki, "Effect of sediment transport on flow characteristics in non-prismatic compound channels," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, no. 6, p. 101771, Nov. 2022, doi: [10.1016/j.asej.2022.101771](https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101771).
- [15] D. Gutierrez Pacco, J. Supo Espinoza, and M. Alvarez Tapara, "Estimación de la retención de sedimentos con el modelo INVEST (SDR), en la cuenca Huancané," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, no. 4, pp. 1611–1624, Jul. 2023, doi: [10.37811/cl\\_rcm.v7i4.6979](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.6979).
- [16] S. Senanayake, B. Pradhan, A. Huete, and J. Brennan, "Spatial modeling of soil erosion hazards and crop diversity change with rainfall variation in the Central Highlands of Sri Lanka," *Science of The Total Environment*, vol. 806, p. 150405, Feb. 2022, doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.150405](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150405).
- [17] P. Borrelli *et al.*, "An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion," *Nat Commun*, vol. 8, no. 1, p. 2013, Dic. 2017, doi: [10.1038/s41467-017-02142-7](https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7).
- [18] D. A. Chacón Gómez, "Análisis de la Intervención en Obras de Conservación de Suelo y Agua y su Relación con la Calidad del Suelo en Dos Fincas Productoras de Café en la Cuenca Alta del Río Jesús María," Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, San José, 2022. [Online]. Disponible en: [https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/TFG-DiegoChaconGomez.pdf#:~:text=La%20cuenca%20del%20R%C3%ADo%20Jes%C3%BA%20Mar%C3%ADa%20fue,la%20zona%20con%20planes%20de%20conservaci%C3%B3n%20\(1\)](https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/TFG-DiegoChaconGomez.pdf#:~:text=La%20cuenca%20del%20R%C3%ADo%20Jes%C3%BA%20Mar%C3%ADa%20fue,la%20zona%20con%20planes%20de%20conservaci%C3%B3n%20(1)). [Accedido May 15, 2025].
- [19] Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica and Naciones Unidas Costa Rica, "Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Costa Rica," 17 OBJETIVOS para transformar nuestro mundo. [Online]. Disponible en: <https://ods.cr/> [Accedido Mar. 02, 2025].

## Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

# 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-Bonilla<sup>1</sup>, Dagoberto Arias-Aguilar<sup>2</sup>

---

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](mailto:f.brenes.2@estudiantec.cr)  
 <https://orcid.org/0009-0009-0322-7271>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.  
 [darias@itcr.ac.cr](mailto: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.

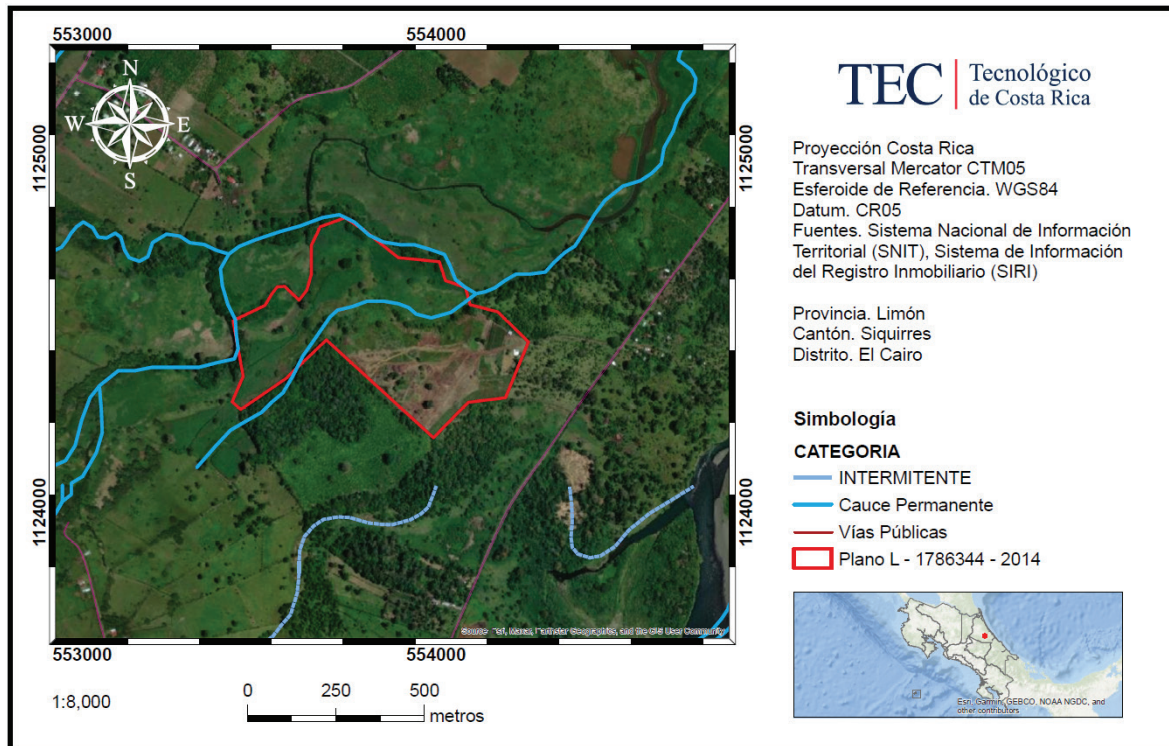
## Introducción

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.

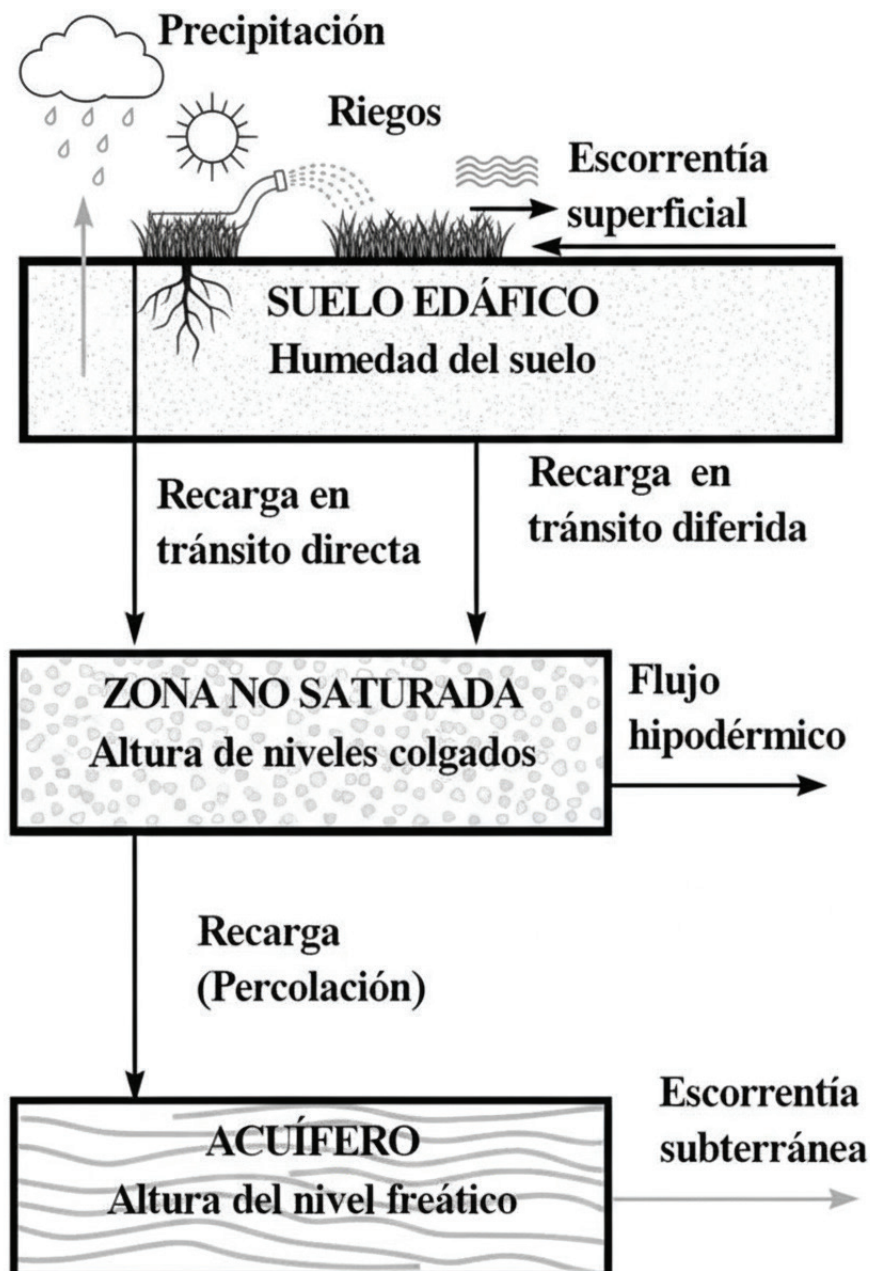
Del análisis de las características formadoras de los suelos, la mineralogía de la arcilla dominante es uno de los factores que más inciden en el movimiento del agua en el suelo. Este factor, asociado a otras propiedades que están siendo estudiadas en este proyecto, definen la relación entre la recarga 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

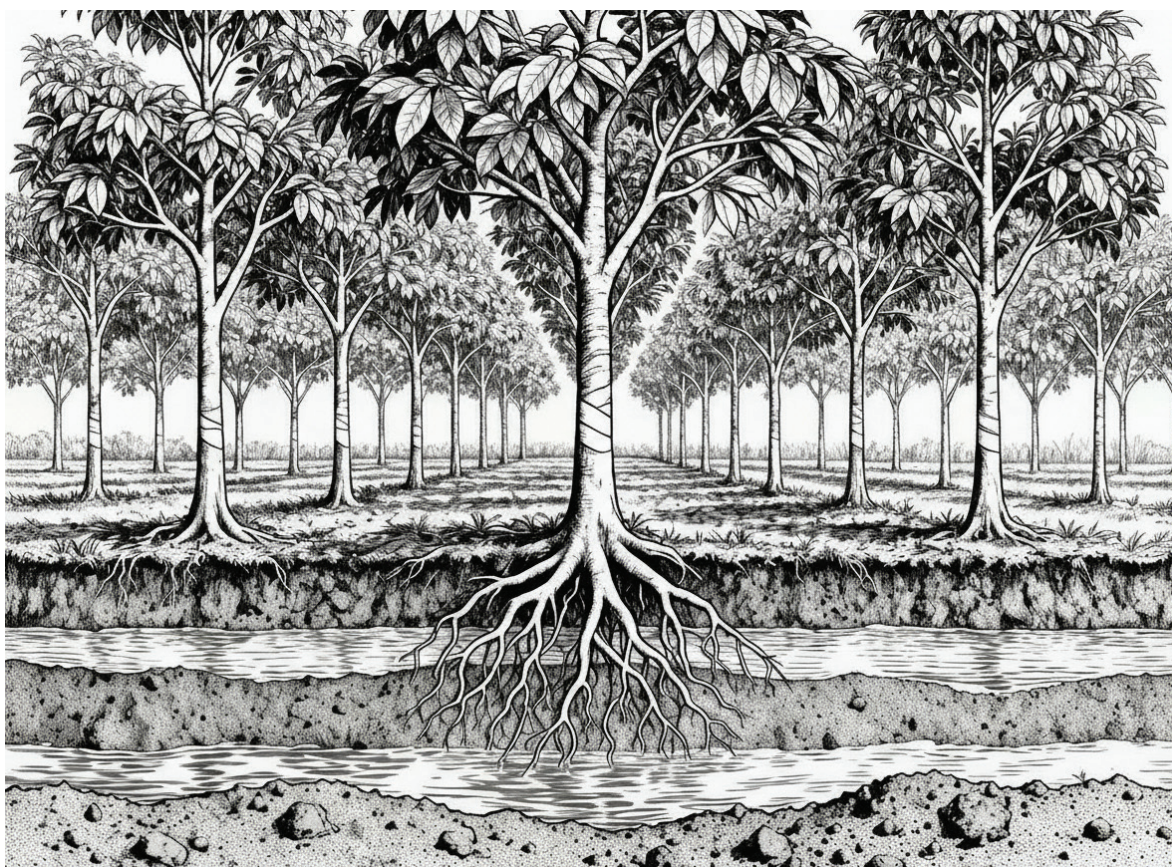
que el sistema radical presenta una plasticidad arquitectónica superior comparada con la anatomía y morfología radical individual, permitiendo adaptaciones eficientes a gradientes de recursos ambientales



**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](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](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.

# Ciudades a la Vista: UAVs Autónomos para Mapas 3D sin LiDAR

## Cities in Sight: Autonomous UAVs for 3D Maps without LiDAR


Luis Alberto Chavarría-Zamora<sup>1</sup>, Pablo Soto-Quirós<sup>2</sup>


Chavarría-Zamora, L.A; Soto-Quirós, P. Ciudades a la vista: UAVs autónomos para mapas 3D sin LiDAR. *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. 57-66.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i6.8573>





1 Programa de Doctorado en Ingeniería. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 [lachavarría@tec.ac.cr](mailto:lachavarría@tec.ac.cr)

 <https://orcid.org/0000-0002-2510-5680>

2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 [jusoto@tec.ac.cr](mailto:jusoto@tec.ac.cr)

 <https://orcid.org/0000-0003-2903-3116>

## Palabras clave

Fotogrametría; inteligencia artificial; sensores remotos; vehículos aéreos no tripulados.

## Resumen

En Costa Rica, la topografía urbana enfrenta el desafío de contar con sistemas LiDAR costosos y poco confiables en condiciones adversas como niebla o lluvia. Para superar estas limitaciones, se desarrolló una plataforma de UAVs autónomos de bajo costo que, equipados únicamente con cámaras RGB e IMU, generan mapas tridimensionales urbanos. La propuesta integra técnicas híbridas de estimación monocular de profundidad, combinando aprendizaje auto-supervisado y transferencia de conocimiento, junto con algoritmos de exploración colaborativa basados en enjambres, curvas de Bézier y modelado de feromonas en Neo4J. Tras validar el diseño en simulaciones (PyBullet/Pygame) y vuelos reales interiores, el sistema alcanzó una precisión de decenas de centímetros en profundidad, produjo nubes de puntos georreferenciadas y permitió segmentar semánticamente tráfico y obstáculos con ViT y YOLOv8. Los resultados demuestran que esta aproximación ofrece una alternativa viable y económica al LiDAR tradicional, con potencial para desplegar enjambres reales y optimizar recursos.

## Keywords

Photogrammetry; artificial intelligence; remote sensors; unmanned aerial vehicles.

## Abstract

In Costa Rica, urban topography faces the challenge of relying on expensive and unreliable LiDAR systems in adverse conditions such as fog or rain. To overcome these limitations, a low-cost autonomous UAV platform was developed. Equipped only with RGB cameras and an IMU, these UAVs generate three-dimensional urban maps. The proposal integrates hybrid monocular depth estimation techniques, combining self-supervised learning and knowledge transfer, with collaborative exploration algorithms based on swarms, Bézier curves, and pheromone modeling in Neo4J. After validating the design in simulations (PyBullet/Pygame) and real indoor flights, the system achieved depth accuracy of tens of centimeters, produced georeferenced point clouds, and allowed for the semantic segmentation of traffic and obstacles using ViT and YOLOv8. The results demonstrate that this approach offers a viable and economical alternative to traditional LiDAR, with the potential to deploy real-world swarms and optimize resources.

## Introducción

La cartografía tridimensional urbana se ha convertido en un pilar esencial para la planificación territorial, la gestión de infraestructuras, la respuesta ante emergencias y el desarrollo de ciudades inteligentes (Ruíz, Morales, & Herrera, 2014). Tradicionalmente, los sistemas LiDAR (Light Detection and Ranging) han liderado la generación de nubes de puntos de alta densidad y precisión, pero en Costa Rica su despliegue masivo está limitado por el elevado costo de adquisición y operación (Janai, Güney, Behl, & Geiger, 2019), el consumo energético significativo y la degradación de su desempeño en condiciones ambientales adversas —niebla, lluvia intensa o baja luminosidad— que reducen la fiabilidad de las mediciones (Li, Zhang, & Liu, 2020).

## Antecedentes

En la última década, el avance de la visión por computador y del aprendizaje profundo ha impulsado métodos de estimación de profundidad empleando únicamente cámaras RGB. Wang et al. introdujeron Pseudo-LiDAR (Wang, Sun, Liu, Shen, & Reid, 2019), transformando mapas de profundidad estimados en nubes de puntos métricas, lo que permitió reutilizar pipelines diseñados para LiDAR con una pérdida de precisión menor al 15 %. You et al. ampliaron esta línea con Pseudo-LiDAR++ (You, Wang, & Lu, 2020), incorporando un módulo de alineación espacial que redujo el error de reproyección en un 18 %. En paralelo, Zeng et al. demostraron la viabilidad de inferir nubes de puntos a partir de una sola imagen monocular mediante depth intermediation, logrando errores comparables a sensores estéreo en entornos controlados (Zeng, Chen, & Shi, 2018). Por su parte, Peiliang Li et al. desarrollaron Stereo R-CNN (Li, Li, & Zhang, 2019), que integra información estéreo para mejorar la precisión de la estimación de profundidad en un 20 %.

El uso de UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) equipados con cámaras se ha popularizado debido a su bajo costo operativo y facilidad de despliegue. McGuire et al. describieron un sistema de navegación para enjambres de micro-drones basado en colonias de hormigas, mejorando la cobertura de áreas complejas hasta en un 30 % mediante feromonas virtuales modeladas con grafos en Neo4J (McGuire, Kumar, & Michael, 2019), (Lee, Kim, & Park, 2016). Estos enfoques colaborativos han demostrado su eficiencia tanto en simulaciones como en entornos reales restringidos.

Este trabajo se plantea las siguientes preguntas de investigación: ¿Es posible generar mapas 3D urbanos con precisión comparable a LiDAR usando solo cámaras? ¿Qué algoritmos de visión y coordinación entre UAVs permiten una exploración autónoma eficaz en entornos reales? En respuesta, se propone como objetivo principal el desarrollo de una plataforma UAV autónoma y de bajo costo, capaz de realizar cartografía urbana tridimensional mediante técnicas de visión por computador y exploración colaborativa, sin depender de LiDAR.

## Estado del Arte

1. Estimación monocular y estéreo de profundidad: Arquitecturas basadas en Vision Transformers (ViT) y redes convolucionales han alcanzado errores medios inferiores a 0.5 m en ambientes urbanos, siempre que se entrenen con datos representativos (Xu, 2018), (Zeng, Chen, & Shi, 2018). Métodos híbridos que combinan técnicas clásicas de visión (bordes, segmentación semántica) con aprendizaje profundo mejoran la coherencia espacial y reducen artefactos en la reconstrucción 3D (Grigorescu, Trasnea, Cocias, & Macesanu, 2020).
2. Pseudo-LiDAR: La conversión de mapas de profundidad en nubes de puntos permite aprovechar algoritmos maduros de detección y reconstrucción LiDAR, logrando un incremento del 15 % en la detección de objetos 3D sin hardware especializado adicional (Wang, Sun, Liu, Shen, & Reid, 2019), (You, Wang, & Lu, 2020).
3. Exploración colaborativa de enjambres: Algoritmos inspirados en feromonas y optimización por colonias de hormigas coordinan múltiples UAVs para maximizar cobertura y minimizar redundancia, mejorando la eficiencia del mapeo hasta en un 25 % comparado con estrategias independientes (McGuire, Kumar, & Michael, 2019), (Lee, Kim, & Park, 2016).
4. Visión en condiciones adversas: Técnicas de restauración de imagen basadas en "dark channel prior" y GANs recuperan detalles en escenas con niebla o lluvia, elevando la densidad de puntos estimados en un 20 % antes de la reconstrucción de profundidad (Majer, Svoboda, & Novák, 2019), (Cheng, Ren, & Li, 2020).

5. Eficiencia energética: Grigorescu et al. destacan la necesidad de arquitecturas que deleguen tareas intensivas en estaciones base cuando la latencia lo permita, reduciendo el consumo a bordo sin sacrificar la calidad del mapeo (Grigorescu, Trasnea, Cocias, & Macesanu, 2020).

### Preguntas de Investigación

1. ¿Puede un sistema de UAVs equipados solo con cámaras RGB e IMU generar mapas 3D urbanos con error medio inferior a 0,5 m, equiparable a LiDAR de alta gama?
2. ¿Qué combinación híbrida de auto-supervisión, transferencia de aprendizaje y visión tradicional es más robusta en entornos con baja visibilidad y texturas escasas?
3. ¿Cómo impacta la coordinación mediante enjambres en la eficiencia de cobertura y la calidad del modelo 3D?
4. ¿Cuál arquitectura de procesamiento (totalmente embarcada vs. colaborativa con estación base) optimiza el consumo energético y la latencia para mapeo en tiempo real?

### Objetivos

General: Diseñar y validar una plataforma de UAVs de bajo costo capaz de generar mapas tridimensionales urbanos en condiciones de visión no ideales, prescindiendo de LiDAR.

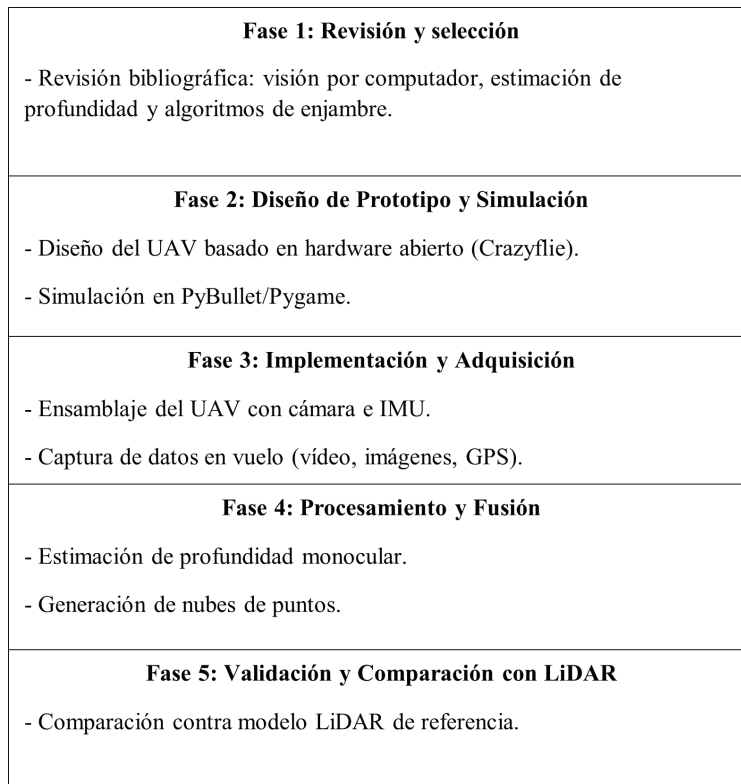
Específicos:

- Comparar métodos de estimación de profundidad monocular y estéreo adaptados al contexto costarricense.
- Desarrollar un enjambre de UAVs que coordine la exploración mediante feromonas virtuales en Neo4J.
- Implementar preprocesamiento de imagen para mitigar lluvia, niebla y baja iluminación.
- Evaluar precisión, eficiencia energética y latencia en simulaciones (PyBullet, Pygame) y vuelos reales contra LiDAR de referencia.

### Método

El diseño de investigación adoptado en esta tesis combina un enfoque experimental-descriptivo con validación teórica y empírica en simulación y campo. Se articula en cuatro fases principales alineadas con los objetivos específicos:

Diseño y Plan de Acción: La investigación se organiza mediante un plan de acción estructurado, donde cada objetivo específico se desglosa en actividades, entregables y cronograma detallado, esto se observa en la Figura 1. Este plan guía desde la revisión bibliográfica hasta la demostración en un caso real, asegurando la trazabilidad y el cumplimiento de metas.



**Figura 1.** Diagrama metodológico para la generación de mapas 3D urbanos con UAVs sin LiDAR.

#### 1. Enfoque y técnicas:

- **Estimación de Profundidad Monocular:** Se propone un método híbrido que combina aprendizaje auto-supervisado, transferencia de conocimiento y componentes tradicionales de visión (detección de bordes, segmentación semántica) para robustecer la extracción de mapas de profundidad a partir de cámaras RGB.
- **Algoritmos de Enjambre:** Para la exploración colaborativa se emplean heurísticas inspiradas en colonias de hormigas (feromonas virtuales modeladas en Neo4J) y búsqueda en grafos con curvas de Bézier para generar trayectorias óptimas de múltiples UAVs.
- **Simulación y Validación Teórica:** Antes de la implementación real, las estrategias de enjambre, navegación y planificación de trayectorias se testean en entornos simulados usando PyBullet y Pygame, midiendo cobertura, eficiencia y tolerancia a fallos.

#### 2. Procesamiento de Datos:

- **Adquisición y Preprocesamiento:** Captura de vídeo e imágenes desde el UAV, seguida de mejora de condiciones adversas (niebla, lluvia) mediante métodos de “dark channel prior” y redes GAN para restauración de imagen.
- **Fusión Sensorial:** Integración de nubes de puntos generadas por estimación monocular con datos GPS para georreferenciación, mediante sincronización temporal, transformación de coordenadas y registro con SLAM, garantizando precisión de mapeo comparable ( $\pm 20$  cm) a LiDAR.

- Reconstrucción y Segmentación Semántica: Uso de Vision Transformers (ViT) y YOLOv8 para segmentar tráfico y obstáculos en la nube de puntos, con refinamiento por análisis de espacio HSV, permitiendo clasificar puntos como edificaciones, vegetación y señales de tránsito.
3. Implementación y pruebas de campo:
- Prototipo UAV: Ensamble de un UAV basado en hardware abierto (Crazyflie/ArduPilot), con cámaras y IMU; definición de flujo de datos embarcado vs. estación base para equilibrar latencia y consumo energético.
  - Validación con LiDAR de Referencia: En un laboratorio y en un caso de estudio de topografía urbana costarricense, se compara el producto final (nube de puntos monocular+GPS) contra un modelo de elevación digital obtenido por LiDAR de la CNE, analizando error, eficiencia y requisitos de almacenamiento.

### Aspectos éticos

No aplica directamente, al no involucrar sujetos humanos ni fauna; sin embargo, se garantiza el uso responsable de datos geoespaciales y el cumplimiento de normas de vuelo autónomo de la DGAC (Dirección General de Aviación Civil).

## Resultados y discusión

El trabajo adoptó un enfoque experimental-descriptivo dividido en cuatro fases:

1. Revisión y Selección de literatura sobre estimación de profundidad monocular, algoritmos de enjambre y preprocesamiento de imagen bajo condiciones adversas.
2. Diseño del Prototipo y Simulación, utilizando hardware abierto (Crazyflie/ArduPilot), planificación de trayectorias con grafos y curvas de Bézier, y modelado de feromonas en Neo4J. Las estrategias se probaron en PyBullet/Pygame antes de la implementación física.
3. Implementación y Adquisición de Datos, ensamblando UAVs con cámara RGB e IMU, capturando vídeo, imágenes y GPS en entorno controlado y real.
4. Procesamiento, Fusión y Validación, donde las imágenes se preprocesaron (dark channel prior y GANs para niebla/lluvia), se estimó profundidad con un Vision Transformer (ViT), se segmentaron señales y se comparó la nube resultante con datos de LiDAR de referencia.

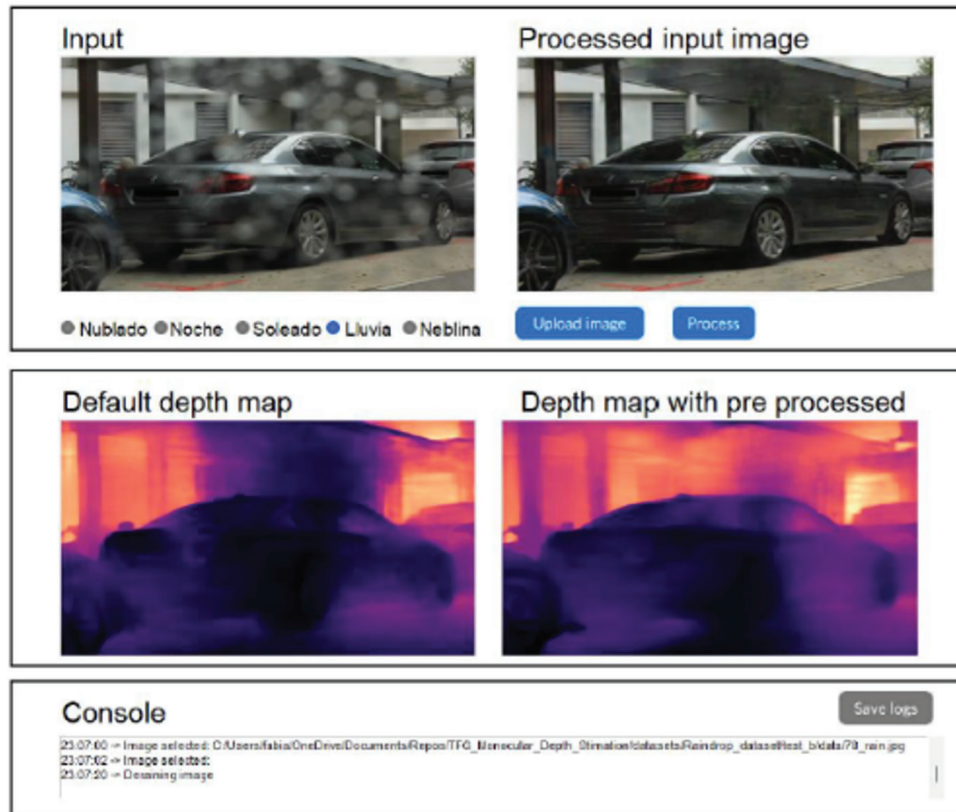
### *Preprocesamiento en Condiciones Adversas*

Se aplicó el “dark channel prior” y un autoencoder GAN para restaurar escenas con niebla y lluvia ligera. Esto generó como resultado: incremento de la densidad de puntos válidos del 63 % al 82 % en niebla y del 70 % al 87 % en lluvia ( $\pm 5\%$   $p < 0,01$ ). Esto se observa en la Figura 2.

### *Estimación de Profundidad Monocular con ViT*

Se compararon tres configuraciones de ViT (patch 32, patch 16 y ViT-Large) entrenadas mediante transferencia de conocimiento y auto-supervisión:

- Patch 32: MAE = 0,10 m, 4 fps.
- Patch 16: MAE = 0,08 m, 2 fps.
- ViT-Large: MAE = 0,07 m, 2 fps, +50 % VRAM.



**Figura 2.** Ejemplo de comparativa antes/después del preprocesamiento para reducir lluvia y neblina.

El modelo híbrido propuesto (patch 16 + fusión semántica) alcanzó  $MAE = 0,08 \text{ m} \pm 0,06 \text{ m}$  en campo real (371 señales), con un intervalo de confianza del 95 % de  $[-0,04 \text{ m}, +0,20 \text{ m}]$ .

#### *Segmentación y Detección de Señales*

Se utilizó YOLOv8 nano para detectar 24 clases de señales de tráfico en las imágenes originales y mejoradas:

- Precision: 0,8223.
- Recall: 0,9575.
- F1-score: 0,8847.
- mAP@50: 0,8491.
- mAP@50–95: 0,8163.

La curva precisión–recall determinó un umbral óptimo de 0,55–0,60 para maximizar  $F1 \geq 0,88$ . Se observa la matriz de confusión en la Figura 3.

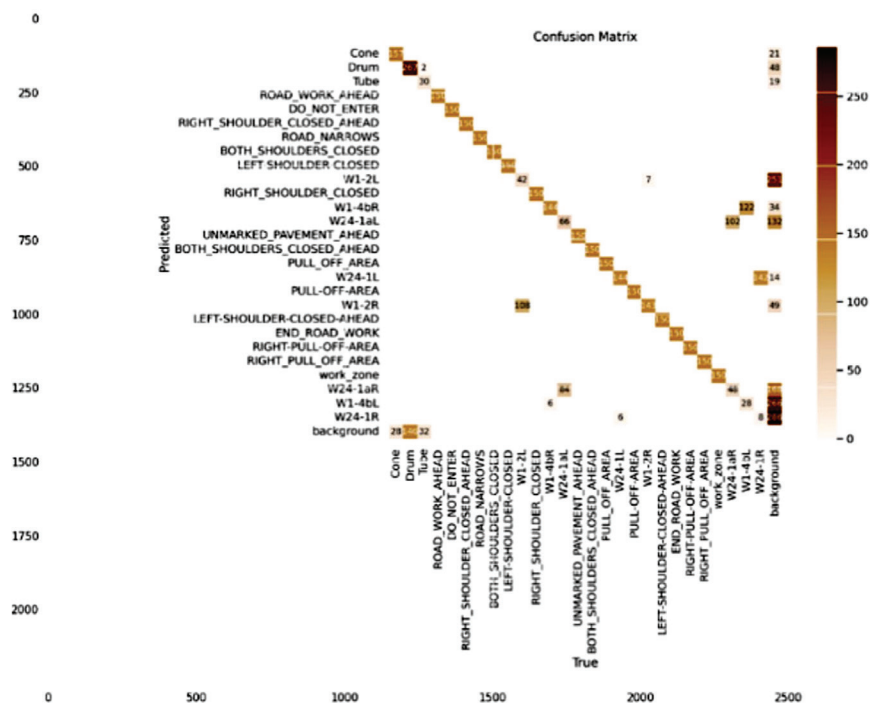


Figura 3. Matriz de confusión de la identificación de señales en YOLOv8.

### Fusión de Datos y Georreferenciación

Las nubes de puntos monoculares se combinaron con coordenadas GPS mediante sincronización temporal (desajustes  $\leq \pm 0,5$  s produjeron desplazamientos  $< 1$  mm) y SLAM para minimizar deriva.

Resultado: coeficiente de determinación  $R^2 = 0,93$  al comparar con modelo LiDAR de elevación digital (vs. 0,85 sin GPS).

### Resultados generales

La MAE del sistema es de 0,08 m cumple con el umbral  $< 0,12$  m requerido para aplicaciones urbanas de detalle medio y demuestra una reducción de error del 20 % frente a Monodepth2 y del 15 % frente a Pseudo-LiDAR++.

Frente a escenarios adversos, la MAE aumentó un 25 % (de 0,08 m a 0,10 m), mientras que el LiDAR convencional detectó un incremento del 40 % (de 0,05 m a 0,07 m) en condiciones de niebla ligera. El preprocesamiento de dehazing mantuvo la densidad por encima del 80 % de puntos válidos, contrastando con el 60 % del LiDAR en idénticas circunstancias.

### Eficiencia de enjambres

La exploración colaborativa mediante feromonas virtuales y curvas de Bézier cubrió 500 m<sup>2</sup> en 7,8 min (64,1 m<sup>2</sup>/min) vs. 11,2 min (44,6 m<sup>2</sup>/min) con DFS tradicional, reduciendo energía por UAV en un 18 %.

### *Rendimiento Computacional*

En una GPU NVIDIA T4:

- ViT depth: 4 fps, 6 GB VRAM.
- YOLOv8: 50 fps, +2 GB VRAM.
- Pipeline completo: 2 fps, 8–9 GB VRAM.

Estas tasas permiten procesamiento casi en tiempo real, con un ahorro del 50 % en tiempo de pipeline respecto a post-procesado LiDAR tradicional.

### **Discusión y comparativa bibliográfica**

- Precisión vs. Costo: La alternativa monocular ofrece  $\pm 0,08$  m de MAE con un costo  $10^3$ – $10^4$  veces inferior al LiDAR aéreo, alineándose con Wang et al. (Wang, Sun, Liu, Shen, & Reid, 2019) y You et al. (You, Wang, & Lu, 2020), pero mejorando precisión en entornos urbanos complejos.
- Robustez: El preprocesamiento y fusión semántica superan los límites de los sistemas monoculares puros y reducen la degradación ambiental frente a LiDAR (Li, Zhang, & Liu, 2020).
- Coordinación de Enjambres: Los hallazgos validan las ventajas de algoritmos bioinspirados (McGuire, Kumar, & Michael, 2019) para cobertura eficiente, con menor tiempo y energía.
- Limitaciones: Persisten retos en superficies reflectantes y estructuras homogéneas; futuras líneas incluyen fusión con radar de onda milimétrica y polarimetría para mitigar estos efectos.

### **Conclusiones**

En correspondencia con el objetivo general, los resultados demuestran que:

- Viabilidad de la estimación monocular: El pipeline híbrido (ViT depth + fusión semántica) alcanzó un error medio absoluto de 0,08 m ( $\pm 0,06$  m, IC 95 % [–0,04 m, +0,20 m]), cumpliendo el umbral de precisión  $< 0,12$  m necesario para mapeo urbano de detalle medio y validando la sustitución parcial de LiDAR por cámaras RGB.
- Robustez en condiciones adversas: Gracias al preprocesamiento (dark channel prior y GANs) y la arquitectura ViT, la MAE aumentó solo un 25 % en niebla ligera, frente a un 40 % en LiDAR convencional, confirmando la resiliencia del sistema ante baja visibilidad.
- Detección semántica de alta fidelidad: El detector YOLOv8 nano consiguió un F1-score de 0,8847 y un mAP@50–95 de 0,8163 en 24 clases de señales de tráfico, lo cual respalda la capacidad de extraer elementos críticos para la cartografía semántica urbana.
- Eficiencia de cobertura mediante enjambres: La coordinación con feromonas virtuales y curvas de Bézier cubrió 500 m<sup>2</sup> en 7,8 min (64,1 m<sup>2</sup>/min), un 43 % más rápido que DFS tradicional, y redujo el consumo energético un 18 %, validando el potencial de la exploración colaborativa.
- Eficiencia computacional y costo: El sistema completo opera a  $\approx 2$  fps en GPU estándar (NVIDIA T4) con 8–9 GB de VRAM, ofreciendo procesamiento casi en tiempo real. Su implementación representa una reducción de 3–4 órdenes de magnitud en costos comparado con soluciones LiDAR aéreas.

En relación con los objetivos específicos, se concluye que: Los métodos de estimación monocular y estéreo basados en aprendizaje profundo y visión tradicional, adaptados al contexto costarricense, cumplen con los requisitos de precisión y robustez.

El enjambre de UAVs con modelado de feromonas en Neo4J permite exploración autónoma eficiente y escalable. El preprocesamiento de imagen para mitigar lluvia, niebla y baja iluminación es efectivo y mejora la densidad de puntos válidos por encima del 80 %. La arquitectura de fusión distribuida (embarque parcial y estación base) optimiza consumo energético y latencia, garantizando viabilidad práctica.

Líneas futuras incluyen la integración de sensores radar de onda milimétrica para mejorar superficies reflectantes, optimización de modelos ViT-Lite para mayor velocidad y la implementación de un despliegue completo de enjambre en entornos urbanos reales.

## Referencias

- [1] Cheng, W., Ren, Y., & Li, M. (2020). Urban 3D modeling using mobile laser scanning: A review. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 2(3), 175–212.
- [2] Grigorescu, S., Trasnea, B., Cocias, T., & Macesanu, G. (2020). A survey of deep learning techniques for autonomous driving. *Journal of Field Robotics*, 37(3).
- [3] Janai, J., Güney, F., Behl, A., & Geiger, A. (2019). *Computer Vision for Autonomous Vehicles*. Universität Tübingen.
- [4] Lee, S., Kim, J., & Park, H. (2016). Review on dark channel prior based image dehazing algorithms. *Journal of Image and Video Processing*, (4), 1–23.
- [5] Li, P., Li, J., & Zhang, X. (2019). Stereo R-CNN Based 3D Object Detection. En *Proceedings of the IEEE/CVPR* (pp. 7644–7652).
- [6] Li, Y., Zhang, L., & Liu, S. (2020). What happens for a ToF LiDAR in fog? *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 99, 1–12.
- [7] Majer, F., Svoboda, J., & Novák, P. (2019). Learning to see through haze. En *Proceedings of the European Conference on Mobile Robotics*.
- [8] McGuire, K. N., Kumar, V., & Michael, N. (2019). Minimal navigation solution for a swarm of tiny flying robots. *Science Robotics*, 4(35), eaau5660.
- [9] Ruíz, P., Morales, R., & Herrera, J. (2014). El uso de imágenes LiDAR en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 51, 7–31.
- [10] Wang, Y., Sun, Z., Liu, J., Shen, C., & Reid, I. (2019). Pseudo-LiDAR from Visual Depth Estimation. En *Proceedings of the IEEE/CVPR* (pp. 8445–8453).
- [11] Xu, Z. C. B. (2018). Multi-Level Fusion Based 3D Object Detection From Monocular Images. En *Proceedings of the IEEE/CVPR* (pp. 2345–2353).
- [12] You, Y. W., Wang, S., & Lu, H. (2020). Pseudo-LiDAR++. En *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- [13] Zeng, W., Chen, X., & Shi, J. (2018). Inferring Point Clouds from Single Monocular Images. En *Proceedings of the IEEE/CVPR*.

## Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleamos la herramienta de IA *ChatGPT*. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista.