

Multispectral Instrumentation System for the study of tropical forestry species

Arnoldo Ramírez, MSc¹, Carlos Ávila, MSc², Anthony Murillo³, Tiffany Cespedes³ y Leidy Murillo⁴

¹Universidad Técnica Nacional, Alajuela, Costa Rica, aramirezj@utn.ac.cr

²Universidad Técnica Nacional, Alajuela, Costa Rica, cavila@utn.ac.cr

³Universidad Técnica Nacional, Alajuela, Costa Rica, anmurilloj@est.utn.ac.cr

⁴Universidad Técnica Nacional, Alajuela, Costa Rica, tcespedesj@est.utn.ac.cr

⁵Universidad Técnica Nacional, Alajuela, Costa Rica, lmurilloj@est.utn.ac.cr

Summary – The spectral signature obtained in the foliage of the leaves of trees and plants is formed from two variables: reflectance and wavelength. This signature allows the identification of flora species and the anatomical and physiological state of crops through vegetation indices that are mathematical equations, formulated from reflectance values obtained at specific wavelengths of the signature, and that provide specific information about plants and trees such as: chlorophyll, photosynthesis, respiration cellular, turgor pressure, water stress, nutrients and more. All this with the objective of promoting sustainable production and ensuring the conservation of ecosystems. This work consists of the development of a spectral vision system to obtain multispectral signatures and the processing of vegetation indices.

Keywords – spectral signature – vegetation index.

Sistema de instrumentación multiespectral para el estudio de especies arbóreas tropicales

Arnoldo Ramírez, MSc¹, Carlos Ávila, MSc², Anthony Murillo³, Tiffany Cespedes³ y Leidy Murillo⁴

¹Universidad Técnica Nacional, Alajuela, Costa Rica, aramirezj@utn.ac.cr

²Universidad Técnica Nacional, Alajuela, Costa Rica, cavila@utn.ac.cr

³Universidad Técnica Nacional, Alajuela, Costa Rica, anmurilloj@est.utn.ac.cr

⁴Universidad Técnica Nacional, Alajuela, Costa Rica, tcespedesj@est.utn.ac.cr

⁵Universidad Técnica Nacional, Alajuela, Costa Rica, lmurilloj@est.utn.ac.cr

Resumen– La firma espectral que se obtiene en el follaje de las hojas de árboles y plantas se forma a partir de dos variables: la reflectancia y la longitud de onda, esta firma permite identificar las especies de flora, y conocer el estado anatómico y fisiológico de los cultivos por medio de los índices de vegetación que son ecuaciones matemáticas, formuladas a partir de valores de reflectancia obtenidos en longitudes de onda específicas de la firma, y que brindan información específica de las plantas y árboles tales como: clorofila, fotosíntesis, respiración celular, presión de turgor, estrés hídrico, nutrientes y más. Todo lo anterior con el objetivo de promover una producción sostenible y de asegurar la conservación de ecosistemas. Este trabajo consiste en el desarrollo de un sistema de visión espectral para la obtención de firmas multiespectrales y el procesamiento de índices de vegetación.

Palabras clave – firma espectral - índices de vegetación

I. INTRODUCCIÓN

La investigación de las características anatómicas y fisiológicas de las especies arbóreas tropicales en Costa Rica es un campo de estudio que se ve limitado por: el alto costo de los dispositivos de instrumentación, variedad de condiciones de adaptación para el uso de instrumentos en bosques tropicales húmedos y la complejidad de las metodologías de análisis tanto a nivel anatómico como fisiológico.

Los bosques tropicales presentes en Costa Rica cuentan con más de 2000 especies arbóreas identificadas, dispuestas en todo el territorio nacional. Una gran cantidad de estas especies han sido poco estudiadas debido al poco financiamiento de investigaciones, el grado de complejidad de los estudios y a que se requiere de múltiples evaluaciones de individuos en campo [2].

Una cantidad muy reducida de estudios consideran los aspectos ecofisiológicos de las especies [6], lo anterior por el nivel de complejidad y dependencia de equipos de alto costo. El entendimiento de la fisiología de las especies arbóreas ha tomado relevancia en la última década como mecanismo de entendimiento del cambio en la dinámica de los bosques ante el cambio climático [5], de igual forma interesa la caracterización de la capacidad de soportar el estrés hídrico generado por el aumento de los periodos de sequía [9] y la

potencial adaptabilidad de las especies a condiciones nutricionales en suelos deficientes [2]. La instrumentación en ecofisiología y sus aplicaciones se convierte en una herramienta fundamental para facilitar el criterio de identificación de especies (permite identificar y cuantificar características únicas de cada especie), además facilita el entendimiento del rol de los bosques y la dinámica de acumulación de carbono, los reservorios de agua y su impacto en la subsistencia de la fauna amenazada [10].

A. Problema de investigación

Este proyecto desarrolla un sistema electrónico de visión espectral, que mide la reflectancia y longitud de onda en las hojas de especies tropicales en Costa Rica, la solución diseñada es de bajo costo y capaz de capturar, procesar y analizar datos multiespectrales con alta precisión por medio de modelos predictivos que utilizan inteligencia artificial.

Este sistema se concibe como una herramienta para el estudio ecofisiológico de especies arbóreas en Costa Rica que brinda información precisa sobre el estado anatómico y fisiológico de las especies de bosques tropicales, lo cual es vitales para disminuir la huella de carbono, conservar de agua, asegurar el crecimiento saludable de cultivos, mejorar la productividad agroforestal.

II. METODOLOGÍA

La caracterización fisiológica de cada especie permite crear nuevos criterios para el manejo y conservación de los recursos naturales, bosques y su biodiversidad, con el fin de generar el menor impacto posible a los ecosistemas y la sostenibilidad en la obtención de recursos forestales. El estudio de los elementos fisiológicos puede simplificarse y aumentar la precisión en el estudio de las especies, con los análisis ópticos como la firma multiespectral y la fluorescencia que han mostrado ser únicas para cada especie [3], dichas variables combinadas con los análisis espectrales permitirían contar con la información básica para pasar a los estudios a escala geoespacial utilizando imágenes de satélite con bandas multiespectrales, lo cual facilita, por ejemplo, la

ubicación y tamaño de las distintas poblaciones de especies arbóreas [8].

Sin embargo, los instrumentos disponibles para el análisis multispectral poseen un costo elevado que limitan su uso y generan dependencia con las compañías que los comercializan (licencias, partes, actualizaciones, calibración y mantenimiento) lo que acorta el tiempo de vida del equipo hasta volverse obsoletos en muy poco tiempo y que obliga a la renovación periódica de los equipos; lo que genera a su vez un aumento en los presupuestos de investigación y laboratorios para la docencia. El auge de sistemas abiertos (del inglés open-source) tanto a nivel de software como hardware, permite el desarrollo de dispositivos de bajo costo y con una alta precisión (95%), esto se logra por medio de modelos de sistemas y filtros, que implementados en forma de algoritmos en un sistema empotrado ofrecen datos con un margen de error reducido; estos datos pueden ser sometidos a técnicas de análisis de inteligencia artificial y constituyen una herramienta muy poderosa para una temprana detección de variables ecofisiológicas, necesarias para incurrir en acciones dirigidas hacia la conservación de especies forestales y la protección de los recursos naturales.

Las firmas espectrales son imágenes de datos que tienen varias bandas espectrales de información a través de todo el espectro electromagnético. El rango de luz que se captura en un sistema espectral puede variar, el espectro visible para el ojo humano es muy pequeño en el espectro electromagnético, ronda entre los 400nm y 700nm (Fig.1). Para la firma multispectral de plantas generalmente se evalúa entre los 300 y 1100 nm, y permite determinar en cada punto de la escala nanométrica la reflectancia de la luz que no es absorbida y que tiende a ser única y especializada para cada especie [6]. En Ref [6] se encontraron que la firma es única para 20 especies tropicales del Ecuador y encontró que el rango de los 540 a 600 nm es el punto de diferenciación de cada especie debido a la disposición del nitrógeno.

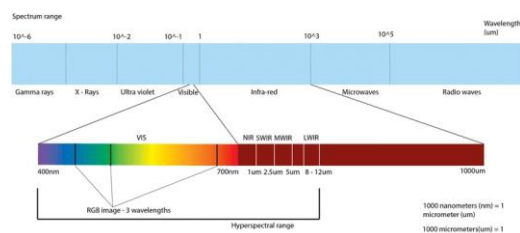


Fig1. Espectro electromagnético, luz visible e infrarroja. [7].

La potencialidad de uso de la firma espectral es amplia, se puede usar para diferenciar especies y entender el grado de salud o nutricional de las plantas, esto se debe a que la forma de la curva se rige por los efectos de la absorción de clorofila y otros pigmentos de las hojas. La clorofila absorbe

la luz visible eficazmente, pero esta absorbe más fuertemente la longitud de onda del color azul y de color rojo, no tanto así la longitud de onda del color verde, esto produce un pequeño pico de reflectancia en el intervalo de la longitud de onda del color verde. La reflectancia aumenta bruscamente a lo largo de la frontera entre las longitudes de onda del rojo y cercana al infrarrojo y alcanza valores próximos a 40-50% para la mayoría de las plantas [9]. La caracterización fisiológica nutricional ha permitido encontrar relaciones directas entre la coloración verduzca de las hojas y contenidos potenciales de nitrógeno, potasio y fósforo, elementos que se pueden encontrar a partir de la segunda derivada de la curva de la firma hiperespectral. Otro acercamiento utilizado para reconocer a las especies [7] es la detección de cambios en la reflectancia entre las bandas del color rojo y el borde de la banda infrarroja, en Fig. 2 se puede observar la ubicación de la franja roja en el espectro donde termina el espectro visible y empieza el infrarrojo.

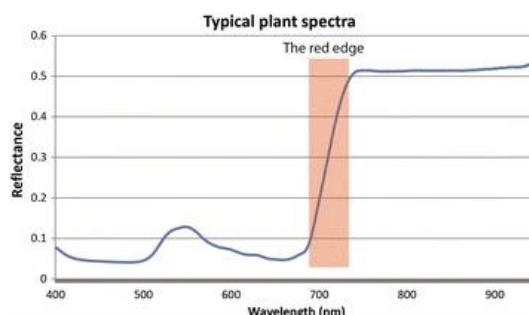


Fig 2. Espectro típico de una vegetación saludable (400-1000nm), la sección roja resaltada (690-740 nm). [7].

El proyecto se implementó considerando como meta los grupos productores de sistemas agroforestales, que tienen sistemas de plantación de árboles y cultivos comestibles, con el fin de que puedan obtener información rápida y confiable del estado anatómico y fisiológico de las plantaciones. El estudio se llevó a cabo en la región central de la provincia de Alajuela y del cantón de Atenas, en la sede de la UTN en Balsas.

II. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El uso de modelos de inteligencia artificial en sistemas empotrados permite la generación de datos con un margen de error reducido, convirtiéndose en una herramienta poderosa para el estudio de parámetros ecofisiológicos en pro de acciones dirigidas a la conservación de especies forestales y la protección de los recursos naturales. Las firmas espectrales son gráficos construidos a partir de datos provenientes de la energía en forma de radiación del espectro electromagnético de la luz. El rango de energía irradiada que se captura en un sistema espectral puede variar, y ronda entre los 400 nm y 700 nm. Para la construcción de la firma multi-espectral

provenientes de plantas se trabaja con un rango que va de los 300 a 1100 nm, permitiendo capturar el porcentaje de reflectancia de la luz que no es absorbida por la hoja de la especie en estudio, sin embargo, entre los 540 a 600 nm es observable la diferenciación de cada especie, esto debido a la disposición del nitrógeno. La potencialidad de uso de la firma espectral es amplia, dentro de sus usos está la diferenciación de especies y la cuantificación del estado nutricional de las plantas por medio del cálculo de índices de vegetación, esto se debe a que la forma de la curva se rige por los efectos de la absorción de clorofila y otros pigmentos de las hojas. La clorofila absorbe la luz visible eficazmente, sin embargo, la absorción es más pronunciada con la longitud de onda del color azul y del color rojo, no tanto así la longitud de onda del color verde.

Este proyecto desarrolla una solución de bajo costo y alta precisión para el estudio de especies tropicales en Costa Rica por medio del diseño y construcción de un sistema electrónico multiespectral. El sistema tiene la capacidad de capturar, procesar y analizar imágenes multiespectrales utilizando modelos predictivos y técnicas de inteligencia artificial. El proyecto deja como resultado una herramienta para el estudio variables ecofisiológicas de especies tropicales arbóreas en Costa Rica, al generar información precisa sobre el estado nutricional de las especies, lo cual es vital para conocer el impacto del cambio climático, promover el desarrollo sostenible, disminuir la huella de carbono y promover la conservación de los bosques y vegetación. Las variables de investigación de este proyecto fueron: la reflectancia, la longitud de onda y las bandas multiespectrales, con al menos una precisión del 90%, el rango del espectro en estudio fue de 410 nm a 940 nm. La población en estudio fueron árboles de *Enterolobium cyclocarpum* (guanacaste) y *Schizolobium parahybum* (gallinazo), en total el estudio generó 25 440 datos espectrales que permitieron el estudio de los siguientes índices de vegetación: concentración de nitrógeno, concentración de clorofila y estrés hídrico.

Para el desarrollo de un modelo de inteligencia artificial que permita reducir el error en los índices de vegetación se escogieron como variables fisiológicas la concentración de clorofila, la concentración de nitrógeno, y principalmente la ubicación en la longitud de onda de los índices de vegetación ya que estos parámetros permiten estimar las cantidades de nitrógeno y clorofila de una especie. Para ello se realizó un análisis de máximos en la derivada de primer orden sobre la función espectral de la especie. Se acotó una región o intervalo de longitudes de onda alrededor de este máximo para definir la región característica tanto de la clorofila como del nitrógeno, esto permite ubicar las zonas de longitudes de onda que cada especie utiliza en condiciones normales (hojas sanas y sin defectos) para brindar información sobre la clorofila y el nitrógeno. El método de predicción que se utilizó fue aprendizaje automático no supervisado ya que se

trata de clasificar y mapear la responsividad espectral con la longitud de onda para generar un firma espectral más precisa.

Adicionalmente se consideró que el tamaño de muestras y datos que se manejan en esta investigación es bastante pequeño para este tipo de algoritmos, por lo que es un buen candidato ya que trabaja bien en grupo o sets de datos pequeños, y su precisión es muy alta, especialmente en sistemas lineales. En este trabajo se acotaron las regiones de reflectancia utilizando índices de vegetación, y se focalizó el esfuerzo en intervalos de longitudes de onda donde se encuentra la información relevante de las variables fisiológicas en estudio para cada especie. En el Cuadro 2 se muestran la cantidad de datos para cada longitud de onda de interés de cada especie. Del total de datos se escoge aleatoriamente un grupo de datos para entrenamiento del algoritmo y otro para pruebas.

TABLA 1.

Distribución de longitudes de onda de las especies y cantidad de muestras para el entrenamiento del algoritmo de máquina de vectores de soporte.

Especie	n	Entrenamiento	Pruebas	Longitud Onda
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	50	20	30	150
	100	35	65	250
	200	90	60	350
	400	95	105	550
	800	90	160	750

El contenido de nitrógeno es un factor clave del nivel de nutrición y salud de un cultivo, su deficiencia puede crear complicaciones en el proceso de fotosíntesis, así como su exceso puede causar estrés y contaminación ambiental. Para la obtención de la concentración de nitrógeno foliar se pueden considerar muchos índices espectrales, sin embargo, en este estudio se seleccionó el índice REP (por sus siglas en inglés, Red Edge Position) o bien índice de posición límite roja por su estrecha relación con los niveles de clorofila en las hojas en la función de firma espectral.

Spectra-UTN
NDVI=0.4286

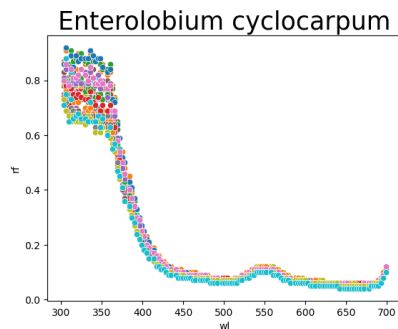


Fig 3. Firma espectral Reflectancia (%) vs Longitud de onda (nm) e Índice de vegetación para *Enterolobium cyclocarpum*.

Spectra-UTN
NDVI=0.5

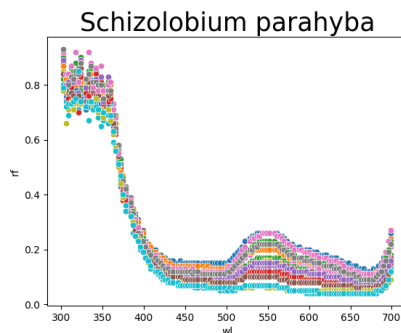


Fig 4. Firma espectral Reflectancia (%) vs Longitud de onda (nm) e Índice de vegetación para *Schizolobium parahyba*

III. CONCLUSIÓN

Es posible desarrollar instrumentación forestal de bajo costo por medio de un diseño de hardware específico (enfocado en la medición y obtención de datos) utilizando bibliotecas de código abierto y seleccionando componentes electrónicos compatibles. El diseño para la portabilidad debe considerar las condiciones climáticas variables de zonas forestales (resistencia al agua, polvo, golpes) así como aspectos ergonómicos (usabilidad e interacción con el usuario). La selección del modelo de inteligencia artificial para calibrar un sensor multispectral se determina con las condiciones de recolección de datos, un análisis de la tendencia de datos y un pre-procesamiento de datos.

La precisión de medición de reflectancia en la especie *E.cyclocarpum* es de 97.5% y para la especie *S.parahyba* es de 98.32%. La incertidumbre de medición para los índices de

vegetación de la especie *E.cyclocarpum* es de 2.93% y para la especie *S.parahyba* es de 2.75%.

AGRADECIMIENTOS

A la Vicerrectoría de Investigación y Transferencia (VIT) de la Universidad Técnica Nacional (UTN) por impulsar la investigación en la academia, a la Escuela de Ingeniería en Electrónica por la comprensión y apoyo durante la investigación y a la Escuela de Ingeniería Forestal, por contribuir significativamente al desarrollo del estudio.

REFERENCIAS

- [1] M. Akiyama, A. Tero, M. Kawasaki, Y. Nishiura, and Y. Yamaguchi, "Theta-alpha EEG phase distributions in the frontal area for dissociation of visual and auditory working memory," *Sci. Rep.*, vol. 7, p. 42776, 2017.
- [2] J. Arango, "Consideraciones estructurales de los bosques de guandal del pacifico sur colombiano," *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, vol. 53, pp. 1011–1042, 2000.
- [3] J. Atherton, B. Olascoaga, L. Alonso, and A. Porcar-Castell, "Spatial variation of leaf Optical Properties in a boreal forest is influenced by species and light environment," *Front. Plant Sci.*, vol. 8, p. 309, 2017.
- [4] D. Hendrik and C. Maxime, "Assessing drought-driven mortality trees with physiological process-based models," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 232, pp. 279–290, 2017.
- [5] G. Piovesan et al., "Tree growth patterns associated with extreme longevity: Implications for the ecology and conservation of primeval trees in Mediterranean mountains," *Anthropocene*, vol. 26, no. 100199, p. 100199, 2019.
- [6] Y. Hu, R. A. Sperotto, G. Koubouris, S. Stojnić, and N. Bellaloui, "Tree ecophysiology in the context of climate change," *J. For. Res.*, vol. 34, no. 1, pp. 1–5, 2023.
- [7] A. Lowe, N. Harrison, and A. P. French, "Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress," *Plant Methods*, vol. 13, no. 1, 2017.
- [8] R. R. Poppiel et al., "Soil color and mineralogy mapping using proximal and remote sensing in Midwest Brazil," *Remote Sens. (Basel)*, vol. 12, no. 7, p. 1197, 2020.
- [9] Y. Sánchez Sánchez, A. Martínez Graña, and F. Santos- Francés, "Remote sensing calculation of the influence of wildfire on erosion in high mountain areas," *Agronomy (Basel)*, vol. 11, no. 8, p. 1459, 2021.
- [10] N. Kumano, K. Kudo, Y. Akimoto, M. Ishii, and H. Nakamura, "Influence of ionomer adsorption on agglomerate structures in high-solid catalyst inks," *Carbon N. Y.*, vol. 169, pp. 429–439, 2020.