



Sistema de visión hiperespectral para el estudio de especies arbóreas tropicales

Hyperspectral vision system to study tropical species of trees

Arnoldo Ramírez-Jiménez¹, Dagoberto Arias-Aguilar², Juan Carlos Valverde-Otárola³, Nelson Zamora-Villalobos⁴, María Rodríguez-Solís⁵, Ernesto Montero-Zeledón⁶

Ramírez-Jiménez, Arnoldo; Arias-Aguilar, Dagoberto; Valverde-Otárola, Juan Carlos; Zamora-Villalobos, Nelson; Rodríguez-Solís, María; Montero-Zeledón, Ernesto. Sistema de visión hiperespectral para el estudio de especies arbóreas tropicales. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35, especial V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Junio, 2022. Pág 16-23.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i6>.

- 1 Laboratorio de Aplicaciones Ecofisiológicas. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: aaramirez@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-7090-4465>
- 2 Laboratorio de Aplicaciones Ecofisiológicas. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: darias@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-3056-9172>
- 3 Laboratorio de Aplicaciones Ecofisiológicas. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: jcvalverde@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-3181-1346>
- 4 Laboratorio de Aplicaciones Ecofisiológicas. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: nzamora@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-6242-3725>
- 5 Centro de Investigación en Innovación Forestal. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: maria.rodriguez@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-4605-6152>
- 6 Laboratorio de Espectroscopía. Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: emontero@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-4545-5805>

Palabras clave

Especies arbóreas; reflectancia; firma espectral; dispositivo electrónico; ecofisiología.

Resumen

La reducida cantidad de estudios que consideran los aspectos ecofisiológicos de las especies de plantas tropicales se debe en parte al costo elevado de la instrumentación. Sin embargo, la revolución tecnológica de la última década ha permitido desarrollar dispositivos electrónicos de bajo costo y que, aunado a los recursos de la inteligencia artificial, permiten obtener mediciones muy precisas. 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 electrónico capaz de adquirir datos espectrales a partir de imágenes del espectro visible de las hojas y procesar su reflectancia y longitud de onda, con la finalidad de analizar variables fisiológicas (tales como concentraciones de clorofila y nitrógeno) de las especies arbóreas tropicales en peligro de extinción.

Keywords

Tree species; reflectance; spectral signature; electronic device; ecophysiology.

Abstract

There is a small number of studies that consider the ecophysiological aspects of tropical plant species, this is due to the high cost of instrumentation. However, the technological revolution of the last decade has made it possible to develop low-cost electronic devices that, and along with the resources of artificial intelligence open the possibility to make very precise measurements. The goal is to foster sustainable production and to ensure the conservation of ecosystems. This work shows the development of an electronic system, as prototype capable of acquiring spectral data from images of the visible spectrum of leaves and processing their reflectance and wavelength, to analyze physiological variables (such as concentrations of chlorophyll and nitrogen) of tropical tree species in danger of extinction.

Introducción

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 campañas de evaluación de individuos en campo [1].

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 [2]. 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 hiperespectral y la fluorescencia que han mostrado ser únicas para cada especie [3], dichas variables combinadas con los análisis colorimétricos y anatómicos permitirían contar con la información básica para pasar a los estudios a escala geoespacial utilizando imágenes de satélite con bandas hiperespectrales, lo cual facilitaría, por ejemplo, la ubicación y tamaño de las distintas poblaciones de especies arbóreas [4].

El producto de este trabajo se concibe como una herramienta de bajo costo y de uso académico y con potencial para apoyar la investigación en árboles y plantas para las aplicaciones del entendimiento de la ecofisiología tropical, con el fin de conservar y desarrollar sosteniblemente los recursos naturales del país.

Metodología

La investigación tiene un enfoque cuantitativo y las variables a evaluar se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Detalle del enfoque cuantitativo de la investigación.

Variable cuantitativa	Descripción
Reflectancia	Adimensional, expresada en porcentaje, su estimación proviene de la medición de intensidad lumínica y potencia radiada.
Longitud de onda	En unidades de nanómetros. En el rango del espectro visible, con un máximo de hasta los 700 nm.
Bandas hiperespectrales	Con rangos de longitud de onda menores a 700 nm, utilizando una selección de al menos 12 rangos de forma continua.

El tipo de investigación es experimental puesto que requirió de la medición de variables, y los resultados entre grupos son comparados, además se realizó una manipulación intencional de variables independientes. La investigación se desarrolló en el Laboratorio de Aplicaciones de Ecofisiología y Aplicaciones Ecosistémicas (EcoPlant) de la Escuela de Ingeniería Forestal del ITCR, en un periodo de un año, lapso donde se desarrolló la investigación propuesta y la obtención de resultados.

Para el desarrollo de esta investigación se tomaron datos de hojas en las siguientes especies tropicales: *Handroanthus ochraceus*, *Switenia macrophylla*, *Dalbergia retusa* y *Zygia longifolia*.

Para cada una de estas especies se colectaron muestras de forma aleatoria de hojas a una altura de 3 metros. Para cada especie se consideraron cinco árboles, de cada uno se colectaron veinte hojas, lo que hace un total de cien muestras de hojas, por especie. Los criterios de selección para la toma de muestras utilizadas en esta investigación consideran que las hojas sean de forma regular, coloración verdosa, sin defectos visibles y limpias.

El desarrollo de la investigación se dividió en tres etapas. La primera etapa consistió en el diseño de un modelo para obtener la firma hiperespectral de la especie a partir de sus hojas, con una precisión mínima del 90%. La segunda etapa se orientó a la construcción de un sistema electrónico de bajo costo para procesar una imagen fotográfica del patrón de difracción de la luz sobre la hoja de un árbol. Finalmente, la tercera etapa se concentró en escoger un modelo de inteligencia artificial que permitiera estudiar características ecofisiológicas de la especie, a partir de la información obtenida en la firma hiperespectral.

La entrada al sistema de visión fue una fotografía de la luz difractada del objeto en estudio en este caso la imagen de cada una de las hojas de las cuatro especies en estudio. Cada imagen se procesó como señal, y se obtuvo únicamente las líneas del espectro de las hojas, que posteriormente se convirtieron a escala de grises y se obtuvo una matriz de píxeles $m \times n$, este arreglo se utilizó para generar un cuadro de líneas, de donde se obtuvo la curva espectral en función de longitudes de onda. Para obtener el modelo de reflectancia se utilizó la técnica de sombras de difracción por medio de la función de distribución de Wigner, esto por su rapidez y practicidad.

Resultados y discusión

Para la obtención de una firma hiperespectral se requiere de la construcción de un cubo de espectros con alta densidad en dimensiones espaciales y espectrales, para este trabajo se utilizó segmentación de píxeles para la obtención de las firmas de cada especie, en la figura 1 se puede visualizar el grupo de funciones espectrales para la especie forestal *Zygia longifolia* obtenida con el dispositivo desarrollado.

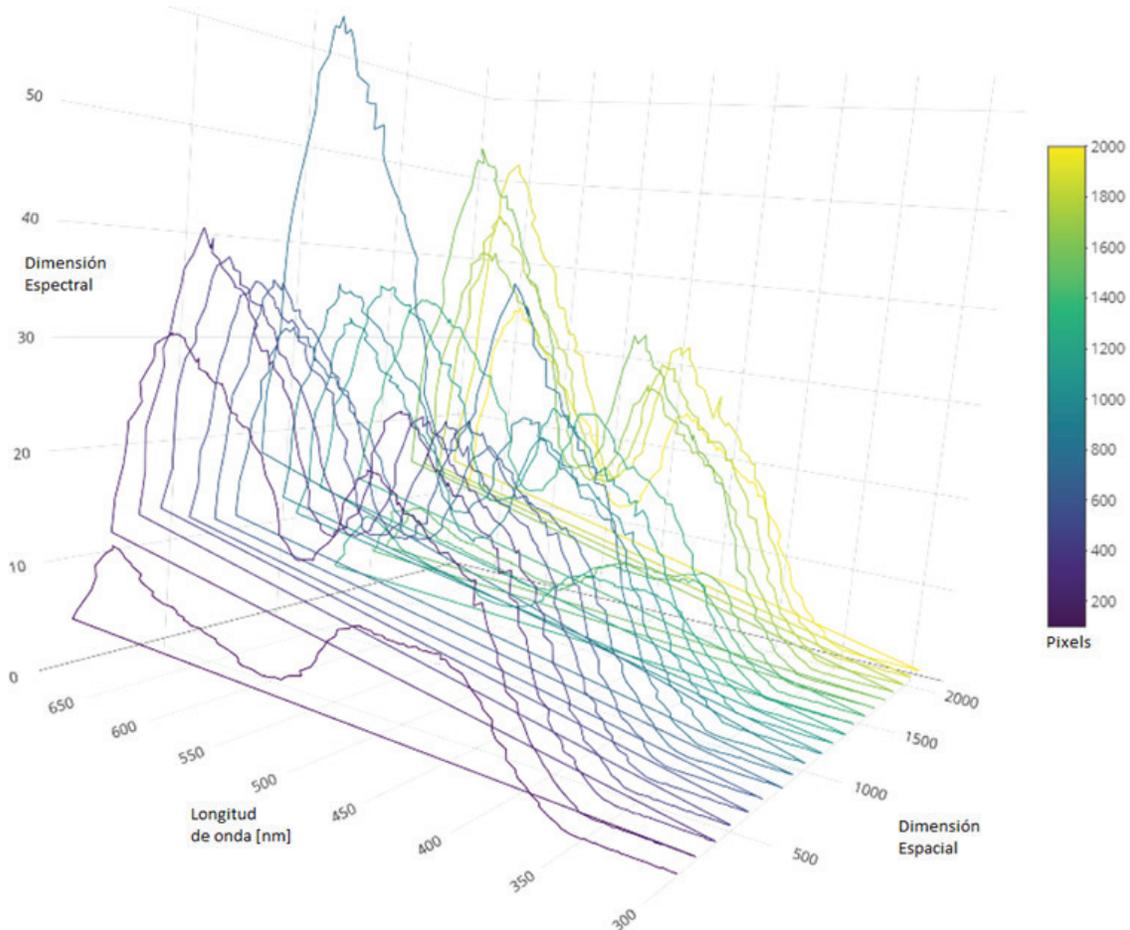


Figura 1. Funciones espectrales para la especie *Zygia longifolia* obtenidas con el dispositivo desarrollado.

En la figura 2 se pueden observar las firmas espectrales obtenidas para *Handroanthus ochraceus*. Las firmas corresponden a las funciones de cada hoja, analizada en un árbol. Por lo que cada imagen contiene 20 firmas espectrales correspondiente a las 20 hojas analizadas.

El resultado de procesar la imagen de la hoja por medio de muestras espaciales y espectrales a través de la técnica de segmentación fue una estructura tridimensional con componentes espaciales (píxeles) y espectrales (reflectancia y longitudes de onda), cada píxel tiene asociado un densa matriz con estimaciones de reflectancia y longitudes de onda, por medio de la factorización y maximización de las funciones matriciales se obtuvieron las firmas espectrales para las cuatro especies en estudio, el análisis estadístico y probabilístico se realiza sobre las matrices obtenidas y se detallan a continuación para cada especie.

En la figura 3 se pueden observar las firmas espectrales obtenidas para la especie *Zygia longifolia*, bajo el mismo procedimiento y en donde se notas las diferencias en los valores de reflectancia de ambas especies y particularmente a partir de los 750 nm.

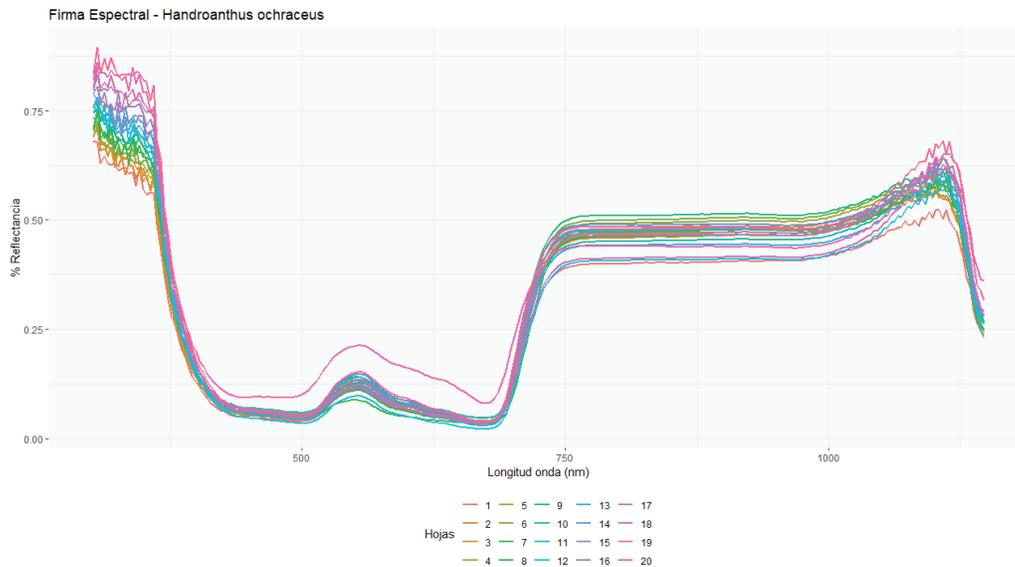


Figura 2. Firmas hiperespectrales para la especie *Handroanthus ochraceus* obtenidas con el dispositivo desarrollado.

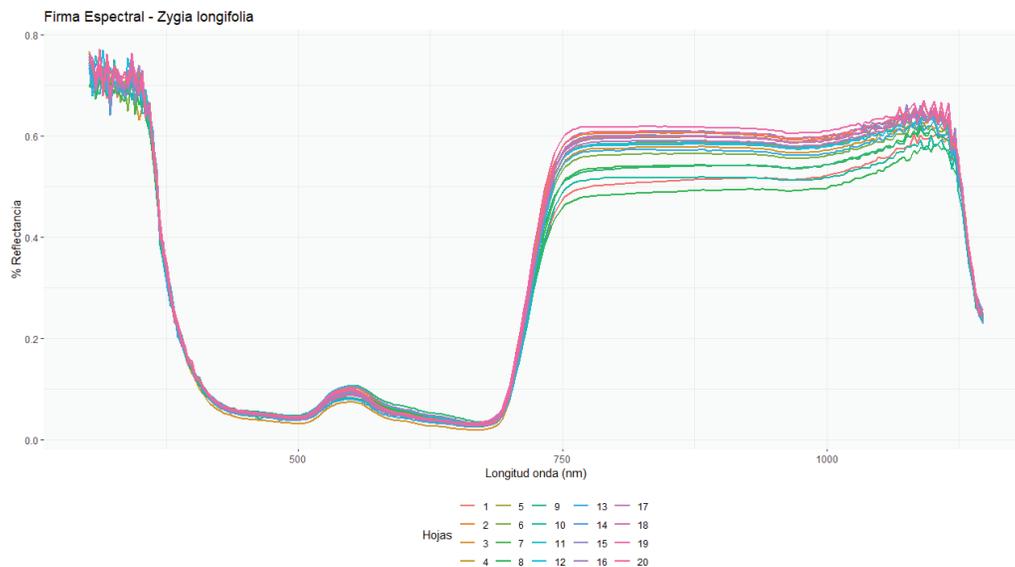


Figura 3. Firmas hiperespectrales para *Zygia longifolia* obtenidas con el dispositivo desarrollado.

Para obtener un marco de referencia de las estimaciones realizadas en el sistema electrónico, se procedió a comparar los resultados de la firma con un equipo comercial, en este caso se utilizó el instrumento Unispec-DC de PPP Systems. A continuación se pueden observar las curvas que contrastan las firmas espectrales obtenidas con el sistema desarrollado que se le ha dado el nombre de SpectraTEC versus el sistema comercial. En importante aclarar que las firmas estimadas, solo contemplan el rango del espectro visible, es decir hasta los 700 nm.

Adicionalmente las firmas obtenidas presentaron variaciones en la reflectancia, que se pueden visualizar como fluctuaciones o ruido en las curvas. Obsérvese cada una de las imágenes mostradas en la figura 4 y figura 5.

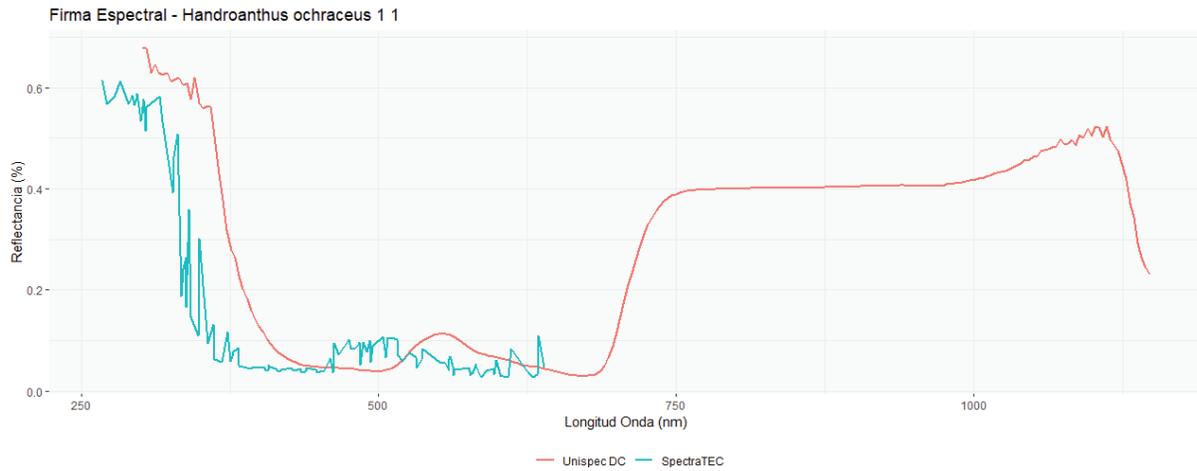


Figura 4. Comparación de las mediciones entre el dispositivo desarrollado SpectraTEC y el UNISPEC para la especie *Handroanthus ochraceus*.

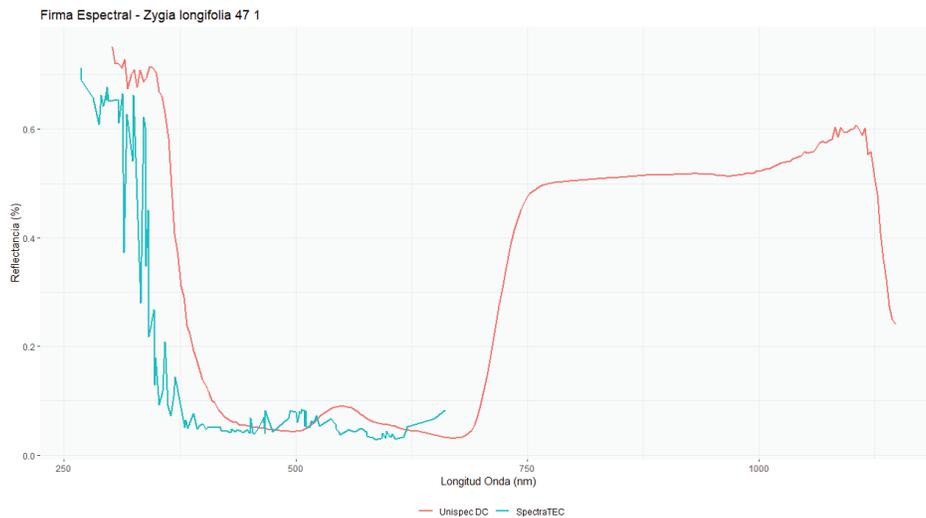


Figura 5. Comparación de las mediciones entre el dispositivo desarrollado SpectraTEC y el UNISPEC para la especie *Zygia longifolia*.

Para cada una de las especies estudiadas se procedió a promediar y normalizar los datos para obtener la curva de mejor ajuste de cada firma, adicionalmente por medio de filtros bilaterales se realizó una regresión para obtener la ecuación característica de cada firma espectral. Obsérvese la línea de mejor ajuste para cada una de las imágenes mostradas en la figura 6 y figura 7.

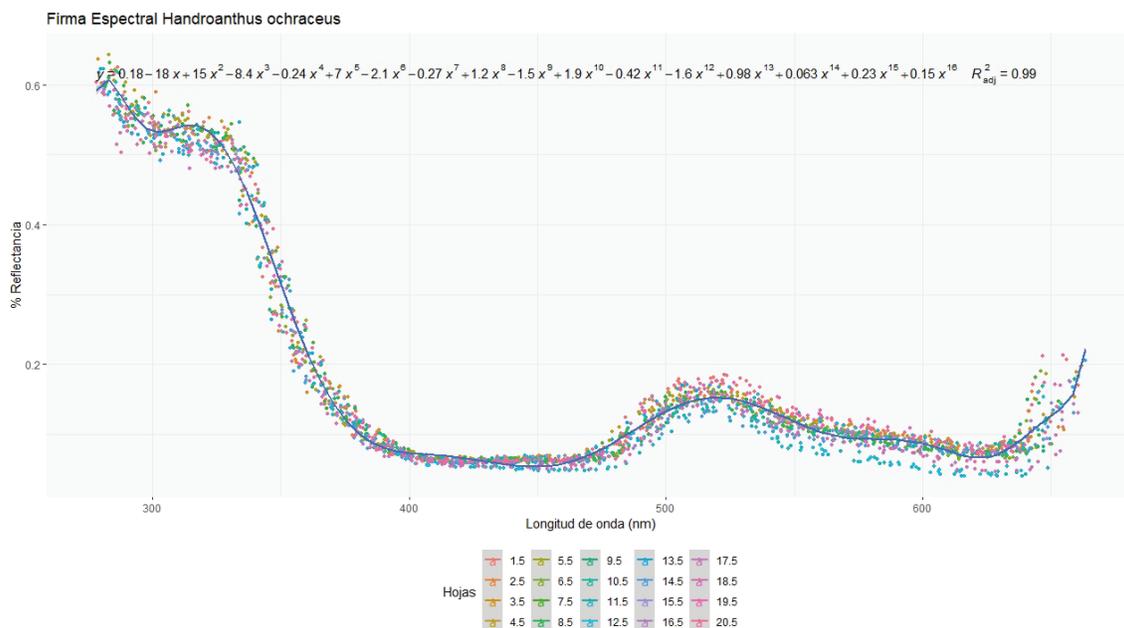


Figura 6. Curva de mejor ajuste - Firma Espectral – con todos los datos para la especie *Handroanthus ochraceus* obtenidos con el dispositivo desarrollado.

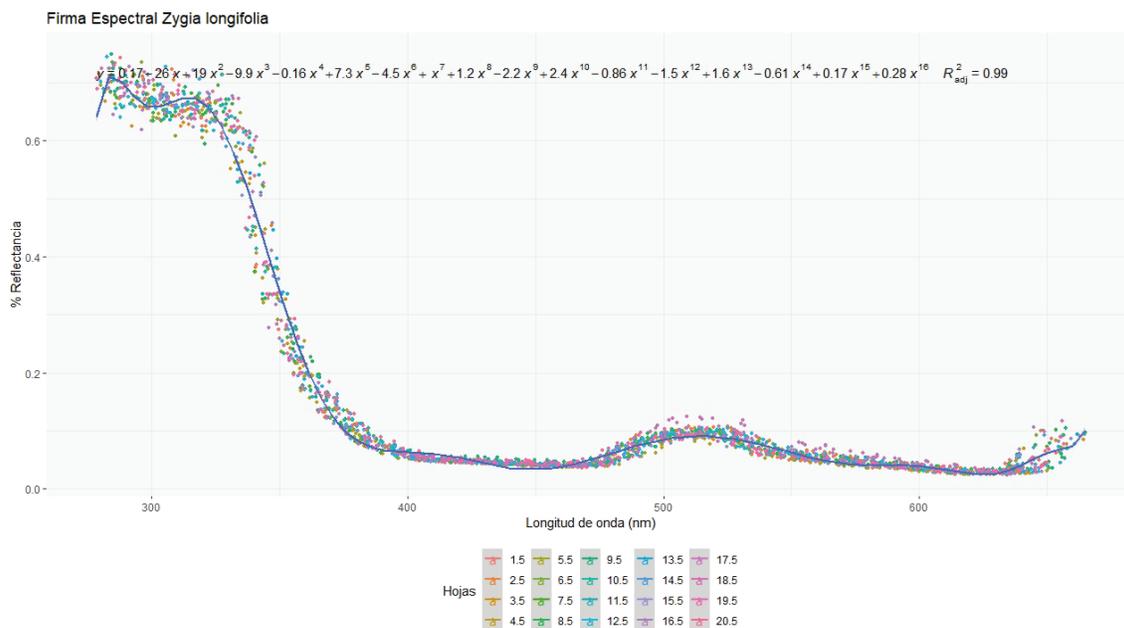


Figura 7. Curva de mejor ajuste - Firma Espectral – con todos los datos para la especie *Zygia longifolia* obtenidos con el dispositivo desarrollado.

Como se pudo observar, el dispositivo desarrollado cumplió el objetivo de generar los valores de reflectancia a lo largo del segmento de longitudes de onda que el patrón de difracción ofrece como salida. La comparación con los resultados del dispositivo comercial, permitieron corroborar que sí es posible realizar mediciones de reflectancia a partir del análisis de patrones de difracción por medio del procesamiento digital de imágenes en hojas de especies forestales.

Conclusiones

La firma espectral de las especies no presenta variaciones significativas en mediciones de reflectancia en diferentes puntos de la superficie foliar. Esto se debe a que la reflectancia es obtenida a partir de la intensidad lumínica, por lo tanto, el factor preponderante en la técnica es la intensidad de luz reflejada proveniente de la hoja.

El porcentaje de precisión promedio final de la reflectancia obtenida en el dispositivo es de 90.03% utilizando un filtro bilateral para mantener los bordes de la curva definidos, este tipo de filtro permitió eliminar ruidos sin suavizar la curva de reflectancia, adicionalmente se implementó un reescalamiento sobre la imagen obtener mejor resolución sobre la imagen.

La precisión para las mediciones de longitud de onda de la curva de reflectancia resultó de 95%, esto se logra al mejorar la luminosidad sobre la muestra, y aumentar la resolución de la imagen, delimitando el área de interés para la red de difracción. La luminosidad sobre la muestra debe ser homogénea, uniformemente distribuida sobre la hoja, adicionalmente los mejores resultados se obtuvieron a 800 lúmenes.

El dispositivo desarrollado y la precisión de las mediciones constituyen una poderosa herramienta portátil y de bajo costo para la toma de mediciones por parte de productores,

La obtención, procesamiento y análisis de firmas hiperespectrales a partir del desarrollo de sistemas empotrados de bajo costo representa una poderosa herramienta para la conservación y desarrollo sostenible de especies forestales, ya que facilita a investigadores, estudiantes y profesionales en el campo del manejo de los recursos naturales la toma de decisiones sobre productividad de cultivos y la sustentabilidad de la producción.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración financiera de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica, a través del proyecto "Implementación de tecnologías y aplicaciones de bajo costo para el estudio de la fisiología de especies arbóreas del trópico mesoamericano como herramienta para su conservación" (2020-2022). Se agradece también al programa de la maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción del TEC.

Referencias

- [1] J. I. Del Valle Arango, "Consideraciones estructurales de los bosques de guandal del pacifico sur colombiano," Rev. Fac. Nac. Agron. Medellin, vol. 53, no. 2, pp. 1011–1042, 2000.
- [2] Brown, Patrick H and Saa, Sebastian and Johnson, Scott and Tian, Shengke, "Foliar Fertilization with Zinc: From Field Trials to Elemental Transport," Comput. Electron. Agric., vol. 113, no. 200, 2012.
- [3] A. Tero, M. Akiyama, 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.
- [4] G. Owomugisha, E. Nuwamanya, J.A. Quinn, M. Biehl and E. Mwebaze, "Early detection of plant diseases using spectral data," pp. 1-6.