

Método alternativo para medir la densidad aparente de tejido vegetal (hojas del árbol *Eugenia uniflora*)

Alternative method to determine the apparent density of the leaves of the *Eugenia uniflora* tree

Omar Rodríguez P.¹ y Érika V. Rueda M.²

Resumen

En el presente trabajo teórico-experimental, se presentan los resultados obtenidos con la técnica de capacitor de placa paralela, la determinación del comportamiento en frecuencia 30-125 KHz de la densidad aparente (DAp) de muestras de tejido vegetal (hojas del árbol *Eugenia Uniflora*), y el comportamiento de la conductividad eléctrica en presencia de material particulado en la superficie de las muestras (metales) por precipitación. Las hojas recolectadas en el parque central de la Universidad Central, Sede Centro, fueron tratadas como material dieléctrico en la estructura del capacitor. Con lo anterior, se pretende determinar el grado de contaminación ambiental por metales y proponer una nueva técnica de muestreo para la detección de esta clase de componentes no naturales del aire.

Palabras clave: densidad aparente, espesor, humedad relativa, permitividad eléctrica, voltaje.

Abstract

In the present theoretical-experimental work, we show the results obtained with the parallel plate capacitor technique, the determination of the frequency 30-125 KHz, behavior of the apparent density (DAp) of plant tissue samples (leaves of the *Eugenia Uniflora* tree), as well as the behavior of electrical conductivity in the presence of particulate material on the surface of samples (metals) by precipitation. The leaves collected in the central park of the Central University, central headquarters, were treated as dielectric material in the capacitor structure. The aim is to determine the degree of environmental contamination by metals and to propose a new sampling technique for the detection of this kind of non-natural components of air.

¹ M. Sc. en Física Nuclear. Profesor asistente del Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: orodriguezp@ucentral.edu.co.

² Estudiante de Ingeniería Ambiental, Fundación Universidad Autónoma de Colombia. Correo: essoporto@yahoo.es.

Keywords: apparent density, thickness, relative humidity, electric permittivity, voltage.

1. Introducción

En el siguiente artículo, se presentan los resultados experimentales del comportamiento de la densidad aparente (DAp) de las hojas del árbol *Eugenia uniflora*, en el rango de frecuencias 35-130 KHz. Los resultados se obtuvieron teniendo en cuenta la aplicación del modelo matemático (DAp) como función no lineal de parámetros tales como la temperatura y la permitividad relativa, y de variables como la humedad relativa (HR) y el voltaje, que fueron medidos con un dispositivo electrónico diseñado en la Universidad Central por el Grupo de Investigación Maxwell.

2. Planteamiento del problema

En el proceso de caracterización de la calidad del aire en una zona específica de Bogotá, en este caso el parque principal de la Universidad Central, ubicada en el centro de la ciudad, las propiedades electromecánicas y ópticas de las hojas del árbol *Eugenia uniflora* determinan el comportamiento funcional de la densidad aparente (DAp) de las muestras objeto de estudio. Si la calidad (Q) de la hoja se ve afectada por factores externos anormales, como contaminantes metálicos suspendidos en el aire o depositados sobre la superficie de la hoja por precipitación (lluvia), la dilatación térmica, las propiedades ópticas (absorción y emisión de radiación electromagnética), la conductividad eléctrica y la DAp se verán afectadas sustancialmente por dichos factores. En la actuali-

dad, existen varios métodos y técnicas experimentales que determinan la calidad del aire en la zona definida, como en el caso de Sumin Choi (2014) y Kyu Hyun Kim (2014), que caracterizan muestras de aire con material particulado de tamaño PM_{10} y PM_{25} . Otra técnica de caracterización de aire es por absorción UV en hojas (Rodríguez, 2017), que describe el mecanismo que utilizan las hojas del árbol de *Eugenia uniflora* para absorber radiación UV generada en una cámara de plasma. Estas técnicas buscan determinar el comportamiento electromagnético de las propiedades físicas, como conductividad eléctrica σ_e y térmica σ_T , impedancia Z , susceptibilidad magnética X , entre otras, de las muestras objeto de estudio. Dentro de las variables experimentales a tener en cuenta, está la impedancia compleja Z , la humedad relativa RH, la permisividad eléctrica ϵ y la frecuencia de oscilación del campo eléctrico aplicado a las muestras.

Por lo anterior, en el laboratorio de estado sólido y optoelectrónica de la Universidad Central en Bogotá, Colombia, el Grupo de Investigación Maxwell, a través de sus investigadores, diseñó un dispositivo electrónico que determina el comportamiento en frecuencia de la DAp para materiales dieléctricos, incluido tejido vegetal.

3. Modelo teórico

Partiendo de los desarrollos teóricos presentados por Pearce (2014) y Seymour (2014), el cálculo de la permisividad eléctrica de ma-

material dieléctrico ubicado entre dos placas paralelas se define como:

$$\varepsilon = \varepsilon_o + \frac{P}{E} \left(H + \frac{f(w)-1}{a(w)} \right) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde: P , polarización de la muestra; E , campo eléctrico; ε_o , permisividad eléctrica del vacío; H , humedad relativa de la muestra; $f(w)$ y $a(w)$, funciones de calibración que dependen de la frecuencia.

La permisividad eléctrica dependiente de la frecuencia se define como:

$$\varepsilon = \varepsilon_o + \frac{\chi}{1+(jw\tau)^a} + \frac{\sigma}{jw\varepsilon_o} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde: χ , susceptibilidad eléctrica de la muestra; σ , conductividad eléctrica; a , parámetro adimensional y τ , tiempo de relajación de polarización.

Los anteriores modelos teóricos conducen indirectamente al cálculo de la impedancia compleja Z de dicho material, pero no al establecimiento de una técnica experimental acorde al problema planteado. Combinando las ecuaciones 1 y 2 se obtiene el comportamiento de la RH en función de la frecuencia como:

$$H = \frac{P}{E} \left[\frac{\chi}{1+(jw\tau)^a} + \frac{\sigma}{jw\varepsilon_o} \right] + \frac{f(w)-1}{a(w)} \quad (\text{Ec. 3})$$

Las funciones de calibración $f(w)$ y $a(w)$ en la ecuación 3 fueron simuladas por Rodríguez (2016), teniendo en cuenta datos experimentales obtenidos para muestras de material cerámico sin dopar. Esto se hizo para tener un marco de referencia frecuencial o de calibración en relación con otras muestras, despejando de la ecuación 3 la conductividad eléctrica σ y reemplazándola en la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{L}{A\sigma} \pm jX \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde: L , A , dimensiones de la muestra y X , reactancia.

Se obtiene la impedancia característica de muestras de tejido vegetal. La conexión directa de la impedancia eléctrica con la DAp se manifiesta de la siguiente forma:

$$DAP = \frac{k_H k_S d_H d_S (CL_T - A\varepsilon_o)}{\beta} \quad (\text{Ec. 5})$$

donde β

$$CL_T \begin{pmatrix} X(\varepsilon_o(k_H d_H - k_S d_S) + k_H k_S(d_S - d_H)) \\ -k_H d_H(\varepsilon_o - k_S) \end{pmatrix}$$

ε_o es permitividad eléctrica del aire; k_H , permitividad eléctrica relativa del agua; k_S , permitividad eléctrica relativa del sólido; L , distancia total entre placas del capacitor; A , área de una de las placas del capacitor; C , capacitancia; d_H , densidad del agua.

4. Procedimiento experimental

Para determinar la DAp de las muestras objeto de estudio (hojas del árbol *Eugenia uniflora*), se reunieron 50 muestras. Inicialmente, se estableció un área específica de recolección de las muestras (parque central de la Universidad Central, Sede Centro); posteriormente, se empacaron y se rotularon debidamente; luego, se estableció el protocolo de medición de las variables asociadas a la determinación de la DAp (voltaje, frecuencia, capacitancia, espesor), así como las condiciones iniciales de medida con el equipo de densidad, y, por último, se registraron las variables anteriormente mencionadas en la

matriz de cálculo con el rango de frecuencias preestablecido, entre 35-130 KHz, con un valor de 5 voltios pico a pico. Cada una de las muestras fue colocada en el dispositivo electrónico, midiendo primero la capacitancia que generaba la muestra y registrando su dato en la matriz de cálculo. Acto seguido, se determinó el espesor de la hoja con un calibrador digital para asegurar la disminución del error en esta medida e ingresarla en la base de datos (hoja de Excel). El siguiente proceso experimental consistió en someter la muestra a la acción directa de la onda electromagnética en el rango de la frecuencia establecida y posteriormente calcular tanto la conductividad eléctrica en tiempo real como la densidad aparente.

5. Análisis de resultados

Aunque el método experimental propuesto en el presente informe se basa en ondas de ultrasonido no generadas por un proceso mecánico, sino por una fuente de ondas electromagnéticas de baja intensidad, estas no alteran las estructuras moleculares de las hojas en su interior ni en su superficie. Este hecho se pudo confirmar al observar las muestras a través de un microscopio óptico y mediante fluorescencia de rayos X (FRX), equipo facilitado por la Fundación Universidad Autónoma de Colombia para el desarrollo del modelo teórico. A continuación, se presentan las gráficas obtenidas en el proceso de medición de la DAp y su comportamiento en frecuencia (figura 1).

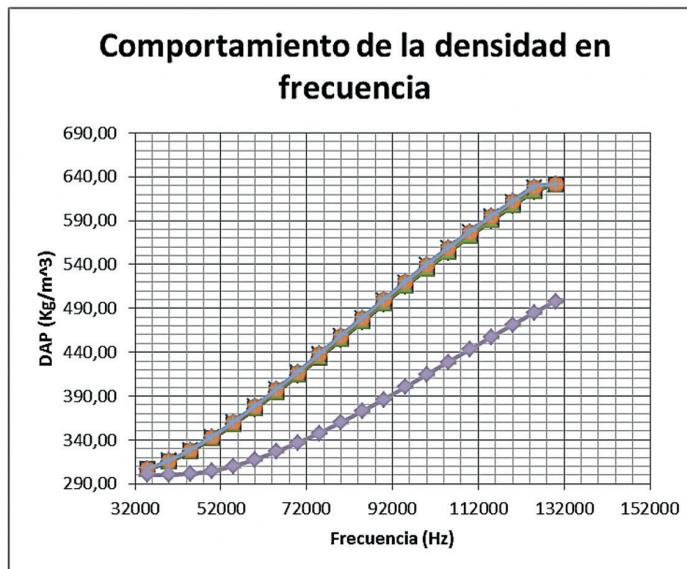


Figura 1. Comportamiento en frecuencia de la DAp para diferentes hojas del árbol *Eugenia uniflora*. Fuente: elaboración propia.

El comportamiento dinámico del material en el rango de 35 a 125 KHz da como resultado, inicialmente, la activación de los modos normales de oscilación de los dipolos de la estructura del H₂O cercanos a los 41,4 KHz, y posteriormente, por efecto de colisión, la activación en la medida del aumento de la frecuencia correspondiente a la fuente de los dipolos de la red.

En la figura 2 se muestra el comportamiento de la parte real de la conductividad eléctrica de esta clase de materiales hasta el rango de 125 KHz. La pendiente de la curva está asociada a la dirección del vector de polarización, P, al interior de la muestra, y su magnitud al número de dipolos orientados por campo eléctrico externo y a su forma de oscilación.

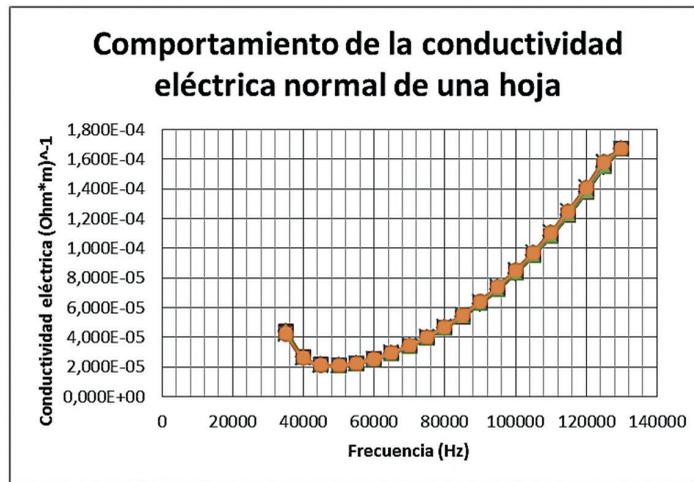


Figura 2. Datos obtenidos del comportamiento de la conductividad eléctrica de las hojas con una HR entre 5 % y 11 %. Fuente: elaboración propia.

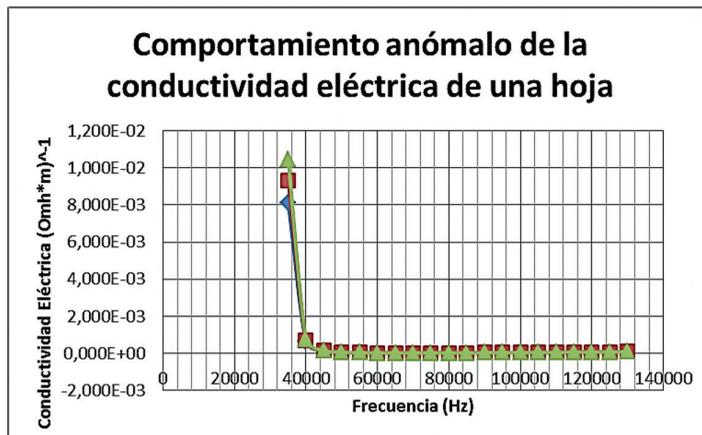


Figura 3. Datos obtenidos del comportamiento de la conductividad eléctrica de las hojas con una HR entre 5 % y 11 % pero que manifiestan presencia de metales en la superficie. Fuente: elaboración propia.

6. Discusión de resultados

La mayoría de las moléculas dipolares, como la estructura del agua presente en las hojas a través de la HR, tienen tres modos normales de vibración: a) vibración simétrica con una frecuencia asociada de 1097E14 Hz; b) vibración asimétrica de frecuencia 1127E14 Hz; y c) vibración por flexión con frecuencia asociada de 4783E13 Hz. Pese a esto, la incidencia de una onda electromagnética de frecuencia de 135 KHz en la superficie de las hojas debe causar una alteración en la reflexión de los rayos UV a las partículas metálicas que posiblemente estén depositadas en la superficie de las muestras, que fue como se observó en el comportamiento de la conductividad eléctrica en las hojas (figura 3).

Mediante el método capacitivo (modelo propuesto en el presente trabajo) se determinó, en la mayoría de las muestras recolectadas y analizadas (90 %), la ausencia de metales depositados por lluvia sobre la superficie de las hojas. En las muestras restantes (10%) se detectó la presencia de metales, particularmente del rodio (Rh), como indica la curva inferior de la figura 1. Esto se pudo comprobar a través de la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX). La DAp de estas hojas (del 10%) y la conductividad eléctrica de las muestras (figura 2) evidencian claramente, en el rango de los 40 KHz, que existe un agente extraño en su superficie que afecta la conductividad.

7. Conclusiones

El modelo teórico-experimental expuesto en los resultados del presente trabajo representa un nuevo método de cálculo, en tiempo real, de la conductividad eléctrica y de la densidad aparente de las hojas del árbol *Eugenia*

uniflora, que puede emplearse para cualquier otro material dieléctrico que ocupe por completo el espacio entre las placas del capacitor. Esto abre un camino en el tema del análisis de partículas metálicas suspendidas en el aire y depositadas por precipitación en las hojas de los árboles, y en la determinación del grado de contaminación ambiental en una zona particular; para este caso, en el parque central de la Universidad Central, Sede Centro.

La ventaja fundamental del modelo experimental es la sensibilidad que presenta el equipo electrónico al cambio del material entre las placas del capacitor, como material dieléctrico, pues los datos son comparados a través de las señales de entrada y salida, en cuanto existe un cambio de fase, amplitud y corriente.

Referencias

- Choi, S., Johnson, B. C., Castelletto, S., Ton-That, C., Phillips, M. R. y Aharonovich, I. (2014). Single photon emission from ZnO nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 104, 261101.
- Hyun Kim, K. y Fan, X. (2014). Surface sensitive microfluidic optomechanical ring resonator sensors. *Applied Physics Letters*, 105, 191101.
- Rodríguez, O., López, J. y Hurtado, M. F. (2017). UV absorption processes in the Debye sphere, by interaction plasma-metal on the surface of plant tissue *Eugenia uniflora*. *International Journal of Applied, Physical and Bio-Chemistry Research*, 7(5), 49-54.
- Pearce, S. J., Pollard, M. E., Oo, S. Z., Chen, R. y Charlton, M. D. B. (2014). Nanostructured surface enhanced Raman scattering sensor platform with integrated

- waveguide core. *Applied Physics Letters*, 105, 181101.
- Seymour, R., Hemeryck, A., Ken-ichi, N., Wang, W., Kalia, K. R., Nakano, A. y Vashishta, P. (2014). Nanoindentation of NiAl and Ni₃Al crystals on (100), (110), and (111) surfaces: a molecular dynamics study. *Applied Physics Letters*, 104, 141904.
- Rodríguez, O. (2003). Determinación de la influencia del factor estructural en el comportamiento de la permitividad relativa de materias primas cerámicas naturales bajo la acción de un campo eléctrico uniforme. *XLIII Congreso de la Sociedad de Cerámica y Vidrio* (pp. 19-22). Manises, España.
- Rodríguez, O. (2012). New experimental method for measuring the bone mineral density of the bone. *International Journal of Applied Science and Technology*, 2(10), 142-147.
- Rodríguez, O. y Casas, J. (2016). New experimental method for measuring the dynamic behavior of the average density of human cell membrane. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(5), 3427-3429.