

Descomposición de señales espectrales para identificar síntomas de la cenicilla polvorienta en hojas de planta de calabacita

C. A. Rivera-Romero* E. R. Palacios-Hernández**
J. A. Morales-Saldaña*** O. Vite-Chávez****

* Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica Campus Jalpa,
Universidad Autónoma de Zacatecas, Jalpa, Zacatecas, México,
(e-mail: c.a.riveraromero@uaz.edu.mx).

** Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
San Luis Potosí, S. L. P. México, (e-mail:
epalacios@fciencias.uaslp.mx).

*** Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
San Luis Potosí, S. L. P., México, (e-mail: jmorales@uaslp.mx).

**** Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica Campus Jalpa,
Universidad Autónoma de Zacatecas, Jalpa, Zacatecas, México,
(e-mail: osvichz@uaz.edu.mx).

Resumen Este estudio establece un método para detectar y distinguir entre cuatro niveles de daño que causa la cenicilla polvorienta en hojas de calabacita. El problema principal es la generación de datos con firmas espectrales obtenidos de plantas sanas y enfermas. Para resolver esto, las firmas espectrales originales de las hojas, son utilizadas como un patrón espectral para la detección. Los niveles se describieron con las longitudes de onda caracterizadas en regiones y agrupadas en niveles de daño. Como resultado, se obtiene que a través de cálculos estadísticos, como el análisis de varianza y la prueba de Tukey, diferencias significativas entre los niveles de daño son notables al considerar las longitudes de onda de las bandas del verde al rojo y cercano al infrarrojo de 450 nm - 550 nm, 550 nm - 650 nm y del 650 nm - 750 nm. Estos resultados ofrecen datos caracterizados para usarse a futuro en clasificación de enfermedades en plantas y para la detección temprana de enfermedades fúngicas.

Palabras clave: Firmas espectrales, reflectancia, datos espectrales, pruebas estadísticas, análisis de varianza, prueba de Tukey.

1. INTRODUCCIÓN

Para contribuir a la práctica de la agricultura, es fundamental, la detección precisa de una infección primaria y la dinámica de las enfermedades en los cultivos. Una de las técnicas más útiles es la espectroscopia de reflectancia, la cual se ha propuesto para la caracterización de muestras, el análisis de madurez en frutas, verduras y la identificación de nutrientes. Una firma espectral se define como la interacción de respuesta a la radiación reflejada de algún objeto, considerando los rangos del espectro electromagnético con las longitudes de onda (λ) y su porcentaje de reflectancia (%). La vegetación tiene un comportamiento dinámico debido a los cambios fenológicos que ocurren estacionalmente, por lo tanto, una firma espectral permite evaluar los

síntomas de una enfermedad (Ayala-Silva y Beyl (2005)). La reflectancia en el dominio del espectro visible ofrece parámetros específicos que ayudan en el estudio de las plantas. La medida de propiedades espectrales propone métodos y algoritmos que pueden influenciar en la identificación de síntomas de enfermedades en cultivos. Tal es el caso del monitoreo de una siembra, en el cual, a través de reflectancia hiperespectral se identifican enfermedades y plagas. Algo similar, se obtiene al manejar datos espectrales (Cao et al. (2013), Muhammed y Larsolle (2003)).

Entre las características generales de una firma espectral en plantas adultas y sanas se consideran: i) baja reflectancia en el rango de 400-500 nm (azul), ii) un incremento de la reflectancia en el rango de 500-600 nm (verde), iii) fuerte absorción en el rango de 600-700 nm

(rojo), y iv) fuerte reflectancia y transmitancia en el rango de 700-1500 nm (cercano al infrarrojo, NIR). La región visible (VIS) en el rango de 400-700 nm se relaciona con el efecto y comportamiento de las clorofilas, carotenoides y antocianinas. La respuesta en el infrarrojo se determina por las discontinuidades entre las paredes celulares y los espacios con aire intercelulares en la estructura interna de la hoja. Debido a que la clorofila tiene la capacidad de absorber la luz visible, se tiene un aumento en la reflectancia. A nivel del dosel la reflectancia normal es baja en la región entre 480 y 680 nm debido a la absorción de la clorofila y otros pigmentos. En el NIR, la reflectancia es alta debido a la estructura micro celular de la hoja y la estructura del dosel (Ayala-Silva y Beyl (2005), Katsoulas et al. (2016), Yuan et al. (2014)). En la región NIR, es posible un decremento conforme aumenta el daño (Hernández y Montaner (2009), Muhammed (2005)). Por lo tanto, la reflectancia de hojas de plantas enfermas se refleja con saltos espectrales de acuerdo al desarrollo del hongo en la hoja.

La cenicilla polvorienta es una enfermedad que actúa primero sobre las hojas. Un caso específico se da en las cucurbitáceas. Esta enfermedad infecta hojas, tallo y fruto generando la pérdida total de la planta y en casos extremos el cultivo completo. La infección se presenta como una masa blanca con aspecto de ceniza y un incontable número de esporas. Las hojas toman una coloración amarilla para finalmente secarse. Los principales géneros de agentes causales son: *Erysiphe*, *Microsphaera*, *Podosphaera*, *Sphaerotheca* y *Uncinula*. El ciclo de vida inicia a partir de ascosporas. Al entrar en contacto con el hospedante, el hongo comienza a germinar tomando un tiempo de tres a siete días para que aparezca el primer síntoma. Las temperaturas moderadas (15°C a 26°C) y la sombra, favorecen el desarrollo de la enfermedad. En la actualidad, se desarrollan híbridos con resistencia y tolerancia al hongo pero con poca efectividad, debido a la situación climática.

En este trabajo se evalúan las firmas espectrales de hojas de calabacitas (*Cucurbita pepo* L.) para la detección del daño causado por la cenicilla polvorienta.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio, se consideró el análisis de un cultivo de calabacita formado por 29 plantas con tratamiento básico preventivo y de riego, ubicado en el invernadero del Departamento de Estudios Multidisciplinarios (DEM) de la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, en el municipio de Yuriria Guanajuato, México. Se realizó un estudio de las hojas, dividiéndolas en seis zonas de acuerdo a los peciolos para obtener la zona con mayor incidencia a los primeros síntomas de la enfermedad. De un total de 465 hojas, 284 coincidieron con los primeros síntomas en la zona cuatro (Figura 1). A partir de este resultado, se procedió a obtener las firmas espectrales con un espectrómetro HR4000CG-UV-NIR Ocean Optics de rango de longitud

de onda de 195 nm a 1122 nm en el espectro ultravioleta, visible y cercano al infrarrojo (UV-VIS-NIR) y con apoyo de una herramienta tipo sargento mecánico diseñada para tomar la reflectancia con un ángulo de luz incidente de 45°. Se trabajó sobre las mismas plantas continuamente sin cortar las hojas y se etiquetaron como $P_1, P_2, P_3, \dots, P_{15}$. Debido a que la cenicilla polvorienta aparece en las hojas basales, sólo se midieron las primeras ocho hojas verdaderas, las cuales se nombraron como $H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6, H_7$, y H_8 (Rivera-Romero et al. (2020)).

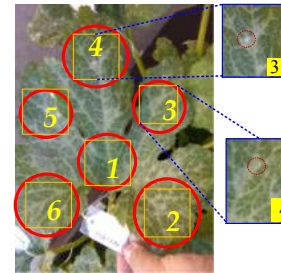


Fig. 1. División de la hoja en zonas para la toma de las firmas espectrales.

A partir de la observación y con el apoyo de los expertos en agricultura, se establecieron cuatro niveles de daño causado por la cenicilla en las hojas. En la Figura 2, se muestran los niveles de daño definidos en Rivera-Romero et al., 2020, donde se consideran: T_1 - hojas totalmente sanas, T_2 - hojas con el hongo en estado de germinación, T_3 - hojas con primeros síntomas y T_4 - hojas totalmente enfermas.

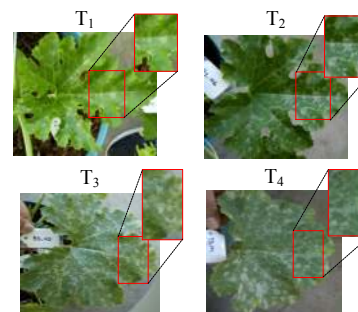


Fig. 2. Características de las condiciones T_1, T_2, T_3 , y T_4 propuestas de las hojas de calabacita.

La base de datos de firmas espectrales se formó con las cuatro niveles propuestos considerando 480 firmas espectrales para T_1 , 210 firmas para T_2 , 240 firmas para T_3 , y 210 firmas para T_4 , con un rango de 200 nm a 980 nm. Debido a que los espectros originales mostraron algunas irregularidades, se optó por aplicar un pre-tratamiento a través del filtro de Savitzky-Golay (Orfanidis (2010)) y la normalización sobre la media (Figura 3) a cada espectro. Una vez pre-tratados los datos, se realizó una descomposición de cada una de las

firmas espectrales en los rangos de nanómetros en las diferentes clases como lo muestra la Tabla 1.

TABLA 1. Caracterización por regiones de las firmas espectrales en bandas del VIS con rangos de 100 nm con intervalos de 0.3 nm.

Región	Rango	Banda	Color
R_1	250 nm - 350 nm	UV	Ultravioleta
R_2	350 nm - 450 nm	VIS	Morado
R_3	450 nm - 550 nm	VIS	Azul/Verde
R_4	550 nm - 650 nm	VIS	Verde/Amarillo
R_5	650 nm - 750 nm	VIS	Naranja/Rojo
R_6	750 nm - 850 nm	NIR	Infrarrojo
R_7	850 nm - 950 nm	NIR	Infrarrojo

En la Figura 3, se muestra un ejemplo de los datos espectrales de la hoja P_5H_7 durante 12 días de muestra. A partir de esta caracterización, se realizó un análisis para identificar los niveles de T_1 , T_2 , T_3 , y T_4 .

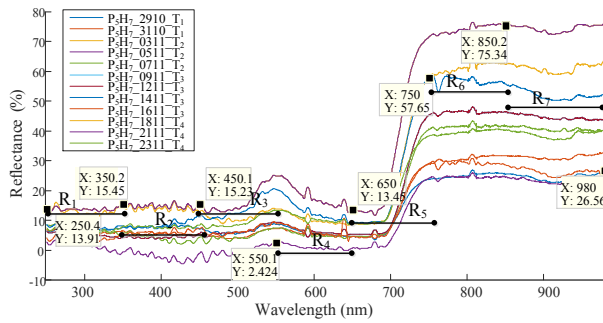


Fig. 3. Firmas espectrales con pre-tratamiento de la hoja H_7 tomada de la planta P_5 durante 12 días de muestra.

El análisis consistió en ocho pruebas estadísticas llamadas A, B, C, D, E, F y G, que fueron implementadas en R Studio. En algunas pruebas, se utilizaron los espectros completos y en otras se trabajó con las regiones. En la prueba A, se utilizó el espectro promedio de las firmas espectrales agrupadas en los niveles de daño. El cálculo de la media se mostró en la prueba B. Considerando conocer el comportamiento de los datos, en la prueba C, se propone mostrar algunos mapas de características tomando los datos por regiones en el espectro electromagnético. Además, adicionalmente se calcularon diagramas de cajas para el análisis de la distribución de los datos en las regiones propuestas en la prueba D. Los datos de estas mismas regiones se sometieron al análisis en diagramas de densidad en una prueba E. La prueba F consiste en el análisis de varianza sobre los datos de las regiones considerando los valores de la mediana para después pasar al cálculo de intervalos con la prueba de Tukey en una prueba G.

Se caracterizaron las firmas espectrales a partir de los cálculos estadísticos de la media, la mediana, la varianza, la desviación estándar y la moda por las regiones de longitudes de ondas definidas previamente en la Tabla 1 (Pacumbaba y Beyl (2011)). La media se define como

la suma de todas las observaciones dividida entre el número de observaciones presentes y se define con (1). x_i se define como la i -ésima observación y n el número de observaciones presentes. Para este caso los datos a considerar son el rango de cada región. La mediana de la muestra se ubica en la mitad de las observaciones, si la mitad de observaciones es menor que, mayor que o igual a la mediana.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

La varianza mide que tan dispersos están los datos alrededor de su media y se define con (2). \bar{x} es la media de las observaciones, x_i es la i -ésima observación y n el número de observaciones.

$$var(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

La desviación estándar da una medida de la dispersión de los datos y se define con (3). En este caso los parámetros que la definen son los mismos que en el caso de la varianza. La moda es el valor de los datos que aparece con más frecuencia dentro del conjunto de datos.

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

Finalmente, se procedió a hacer una multicomparación con una prueba de Tukey de las medias resultantes del análisis de varianza entre los niveles para observar la capacidad que tienen las características para presentar diferencias significativas.

3. RESULTADOS

3.1 Prueba A: espectro promedio

Esta prueba consistió en obtener el espectro promedio de todas las firmas espectrales pertenecientes a los niveles de daño definidos T_1 , T_2 , T_3 , y T_4 . En la Figura 4, se muestra estos espectros promedio, en los cuales se pueden observar algunas diferencias en ciertos rangos. Por ejemplo, entre las longitudes de onda de 500 nm y 600 nm existen diferencias entre T_4 , T_1 y T_2 . En el intervalo de 600 nm y 680 nm, podemos observar claramente los cuatro niveles separados, igual en el intervalo de 750 nm y 900 nm. Estas diferencias entre los espectros promedio significan que existe un cambio en la pigmentación de la hoja indicando la enfermedad. Por lo tanto, estas señales tienen información relevante para discriminar entre los cuatro niveles de daño definidos.

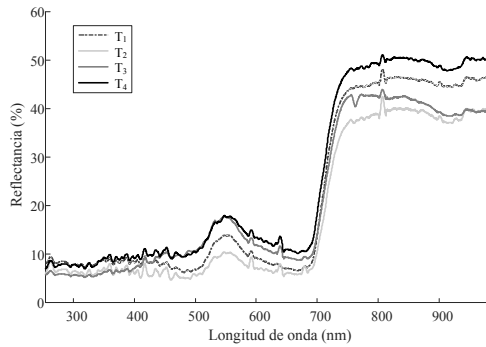


Fig. 4. Resultado de la prueba A que muestra los datos espectrales promediados en relación a los niveles de T_1 , T_2 , T_3 , y T_4 .

3.2 Prueba B: cálculo de la media

Esta prueba consistió en calcular el valor de la media por hojas (H_3 , H_4 , H_5 , H_6 , H_7 y H_8) para cada conjunto de firmas espectrales T_1 , T_2 , T_3 y T_4 y se muestran en gráficas de cajas (Figura 5). Estas gráficas muestran que: i) las medias entre las hojas de T_1 tiene valores diferentes que T_2 . Indicando que las medias también es información relevante para discriminar los cuatro niveles de daño.

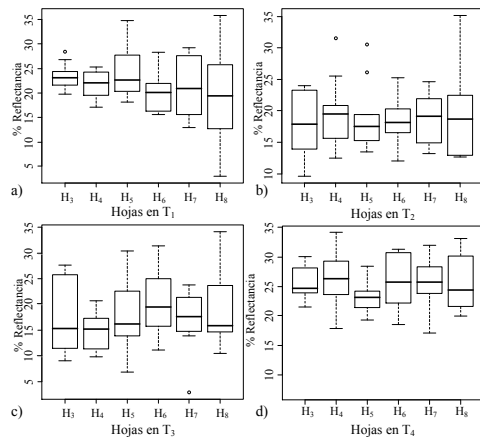


Fig. 5. Resultado de la prueba B con los valores medios de cada hoja en los diferentes niveles.

3.3 Prueba C: mapas de características

En esta prueba se consideró la información por región (R_1 - R_7) definida en la Tabla 1 para establecer los mapas de características. En esta prueba se busca observar la relación lineal o no de los datos entre los niveles de daño a través de las regiones. En la Figura 6, se muestra la relación lineal entre las regiones del NIR (750-850 nm versus 850-950), regiones del VIS (650-750 nm versus 350-450 nm) y región del UV (250-350 nm). Se observa que sólo en el caso de las regiones del NIR, hay una relación lineal y los niveles de daño pueden ser clasificados. Sin embargo, esta relación no existe para el caso de los demás rangos de regiones.

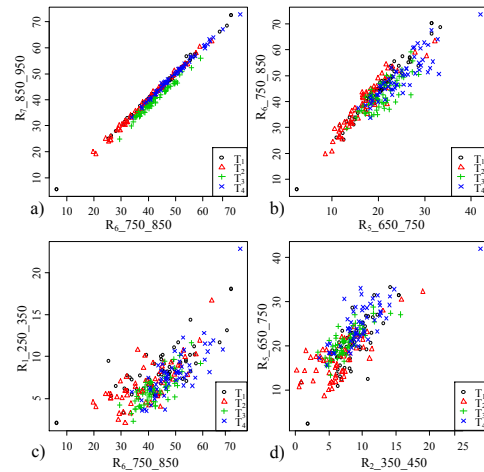


Fig. 6. Resultado de la prueba C, de los diagramas de dispersión y la correlación entre las diferentes regiones a) R_7 -750-850 nm con R_6 -850-980 nm, b) R_5 -650-750 nm con R_6 -750-850 nm, c) R_6 -750-850 nm con R_1 -250-350 nm y d) R_2 -350-450 nm con R_5 -650-750 nm.

3.4 Prueba D: observación de las medias

La Figura 7, corresponde a los resultados de la prueba D. Estos gráficos de caja, muestran las medias contenidas en cada región con respecto a T_1 , T_2 , T_3 , y T_4 . Éstos gráficos describen medias similares de R_3 y R_4 . La media de T_1 oscila entre el 8% y el 9%. T_2 varía 5% y 6%. T_3 tiene una diferencia más alta entre porcentajes, que varía aproximadamente un 2% entre R_3 y R_4 . T_4 en R_4 si muestra un aumento en el porcentaje de su media aproximada a 3% más que en R_3 . en relación a R_5 y R_6 , existe un aumento considerable de porcentaje en todos los niveles, debido al cambio de rango entre rojo y NIR.

3.5 Prueba E: comparación por regiones

En esta prueba se pretende mostrar la distribución de los datos. En este gráfico se muestran los valores y el intervalo en que se concentran los datos espectrales. Por lo tanto, la idea de esta prueba consiste en observar la diferencia que cada nivel de daño presenta en relación con la media y la mediana. Los resultados están contenidos en la Figura 8. A simple vista es notable que existen diferencias. Si se consideran los valores máximos de la curva de densidad (valores entre 0.13-0.15), se observa que en R_3 muestra los niveles mas altos de todas las regiones en T_1 , T_3 , y T_4 . Para T_2 , se tiene un incremento en la densidad en R_4 (valor de 0.17) a diferencia de las regiones R_3 , R_5 y R_6 con valores máximo entre 0.09-0.13. En las regiones R_5 y R_6 se mostraron los niveles de densidad más bajos (valores entre 0.03-0.6). Con respecto a las distribuciones, es notable que al observar las distribuciones de R_3 y R_4 , no son normales. Sin embargo, es notable que para las regiones del NIR, las distribuciones cambian. Por lo tanto,

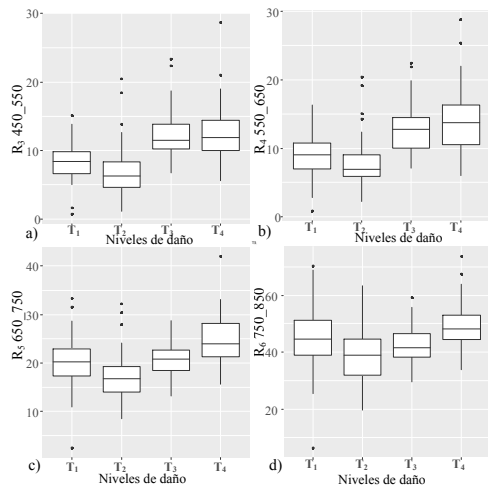


Fig. 7. Resultado de la prueba D con diagramas de caja por región para cada condición: a) R_{3_450} nm - 550 nm de $T_1 - T_4$, b) R_{4_550} nm - 650 nm de $T_1 - T_4$, c) R_{5_650} nm - 750 nm de $T_1 - T_4$ y d) R_{6_750} nm - 850 nm de $T_1 - T_4$.

considerando el cambio de color de la hoja por el daño, coincide con lo observado en la prueba D. Estos resultados sirven como base al momento de considerar las longitudes de ondas con mayor respuesta al cambio de la hoja, para trabajos futuros de clasificación al considerar las bandas del verde y de los límites al NIR.

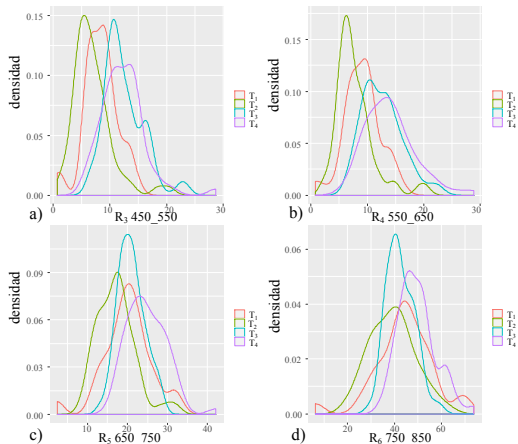


Fig. 8. Resultado de la prueba E con diagramas de densidad por región para cada condición: a) R_{3_450} nm - 550 nm de $T_1 - T_4$, b) R_{4_550} nm - 650 nm de $T_1 - T_4$, c) R_{5_650} nm - 750 nm de $T_1 - T_4$ y d) R_{6_750} nm - 850 nm de $T_1 - T_4$.

3.6 Prueba F: análisis de varianza

Se consideraron los datos por región y se calcularon la media, la varianza, la moda y la mediana. Para hacer una análisis de varianza (ANOVA), es necesario revisar que los datos tienen una distribución normal. Por lo tanto, se procedió a realizar una prueba de Lilliefors (Manly,

2017). Como resultado, se descartaron parámetros que no cumplieron con la condición. Después, se aplicó a prueba F, que consistió en el análisis de varianza de un sólo factor, sólo en el caso en que los datos de las regiones y los parámetros estadísticos calculados cumplieran con dicha distribución. Este análisis dio como resultado el F-estadístico y el p-valor para determinando los valores de las medias de cada nivel de daño de acuerdo a la característica calculada. En la Figura 9a y 9c, se observan con diagramas de cajas un ejemplo del valor medio en R_4 en relación a T_1, T_2, T_3 , y T_4 y el caso de la varianza calculada con la región R_7 en dónde las medias parecen ser iguales.

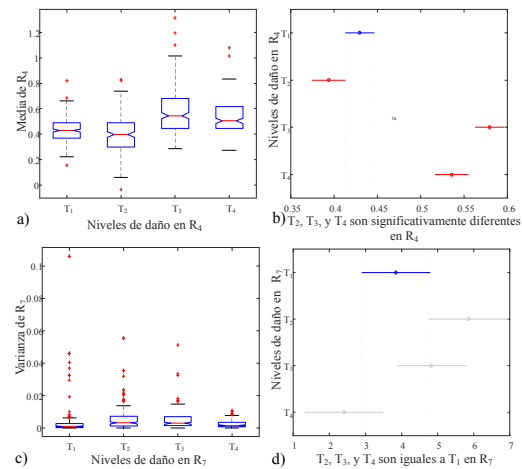


Fig. 9. Resultado de la prueba F. Comparación de las medias de R_4 y R_7 para todas los niveles propuestos. a) Describe las medias de cada condición en R_4 . b) Muestra la multicomparación entre las medias en donde se observa que T_1, T_2, T_3 , y T_4 para R_4 tienen diferencia significativa. c) Presenta las medias de los niveles de daño en R_7 . d) Para este caso, en R_7 no presentan ninguna diferencia entre las medias de los niveles.

3.7 Prueba G: prueba de Tukey

En la Tabla 2, se muestra la capacidad de los estadísticos calculados con las regiones para diferenciar entre los niveles de la enfermedad en las hojas. El resultado describe que las características calculadas de cada región como la media, mediana, moda y desviación estándar (STD) en R_1, R_2 y R_4 , presentan diferencias significativas entre niveles. Además, es observable que tienen la capacidad de discriminar por pares, ejemplo, comparando T_1 versus T_2, T_1 versus T_3, T_1 versus T_4, T_2 versus T_3, T_2 versus T_4 , y T_3 versus T_4 a través de la prueba de Tukey. Esta prueba calcula intervalos de confianza entre los pares. Cada comparación de describe con una letra (a, b, c, d). Si en la región y característica aparecen letras distintas en los niveles, significa que hay medias con diferencias significativas y por lo tanto es un buen resultado de la evaluación. Si aparece alguna letra

repetida significa que no existe diferencia significativa en los niveles de daño y que por lo tanto en algunos casos, sólo tres o dos niveles pueden resultar diferentes.

TABLA 2. Resultados de la prueba G. La prueba de Tukey muestra la capacidad de la media, mediana, moda, desviación estándar (STD), y varianza para diferenciar los niveles T_1 , T_2 , T_3 , y T_4 para cada región considerando el F-estadístico y el p-valor.

Región	T_1	T_2	T_3	T_4	F	p-valor
R_1 -Media	a	b	c	d	35.827	8.70E-22
R_1 -Mediana	a	b	c	d	37.55	9.04E-23
R_3 -Media	a	b	c	d	99.639	3.82E-55
R_3 -Moda	a	b	c	d	71.128	5.64E-41
R_4 -Media	a	b	c	d	82.617	8.12E-47
R_4 -STD	a	a	b	c	29.018	7.46E-18
R_5 -Mediana	a	b	a	c	36.209	5.26E-22
R_6 -Varianza	a	b	c	c	31.718	2.01E-19
R_7 -Mediana	a	b	c	a	37.377	1.13E-22

Finalmente, los resultados de estas pruebas, permiten encontrar características para el análisis de firmas espectrales para el uso de clasificadores de enfermedades en plantas. Se observa que la media de R_1 puede diferenciar entre T_1 , T_2 , T_3 , y T_4 , al igual que la mediana de R_1 , la media de R_3 , la moda de R_3 , y la media de R_4 . Para la STD de R_4 , las medias de T_1 y T_2 son iguales, pero las medias de T_3 y T_4 son significativamente diferentes. Para la mediana de R_5 , T_1 y T_3 tienen medias iguales, sin embargo, T_2 y T_4 , en valor de la media, son significativamente diferentes. T_1 y T_2 en la varianza de R_6 da como resultado diferencias significativas. En este caso T_3 y T_4 son iguales. En la mediana de R_7 , T_1 , T_2 , y T_3 son diferentes, pero, T_4 es igual a T_1 .

4. CONCLUSIONES

En este estudio, los datos espectrales de las hojas de calabacita enfermas de cenicilla polvorienta, se evaluaron para obtener la identificación de síntomas a través de niveles propuestos T_1 -hojas sanas, T_2 -hojas en germinación, T_3 -hojas con primeros síntomas, y T_4 -hojas enfermas. A partir de una serie de pruebas se obtuvieron las siguientes conclusiones. Los datos espectrales fueron estudiados de dos maneras: el espectro de rango visible completo o el espectro dividido por regiones. Al considerar el espectro completo, se observó que la diferencia entre los niveles es más notoria en el rango del verde y rojo. Los resultados de las pruebas, nos indicaron la forma en que las firmas espectrales pueden ser caracterizadas y en un futuro considerar los niveles como clases y las características para algoritmos de clasificación. Un análisis de las firmas espectrales agrupadas por hojas, no da una respuesta esperada de discriminación. Sin embargo, el agrupar las firmas espectrales en niveles, las diferencias en las bandas del VIS y NIR, se hacen presentes con la agrupación por regiones. Este estudio indica que el cálculo de la media, la mediana y la moda son características de utilidad si se consideran las regiones

del ultravioleta (250 nm - 350 nm), banda del azul/verde (450 nm - 550 nm) y la banda del verde (550 nm - 650 nm). Con estos resultados, se cuenta con un conjunto de características para la implementación de algoritmos de clasificación para el nivel de daño de la cenicilla polvorienta en las hojas. Además, estos resultados son una alternativa de caracterización para futuros estudios que se pueden aplicar para otros cultivos de cucurbitáceas con similitudes en sus hojas o que también se afecten con otro tipo de enfermedad.

REFERENCIAS

- Ayala-Silva, T. y Beyl, C.A. (2005). Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency. *Advances in Space Research*, 35(2), 305 – 317. Space Life Sciences: Ground-Based Iron-Ion Biology and Physics, Including Shielding.
- Cao, X., Luo, Y., Zhou, Y., Duan, X., y Cheng, D. (2013). Detection of powdery mildew in two winter wheat cultivars using canopy hyperspectral reflectance. *Crop Protection*, 45, 124 – 131.
- Hernández, J. y Montaner, D. (2009). Patrones de respuesta espectral. Technical report, Laboratorio Geomática y Ecología del Paisaje (GEP), Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile.
- Katsoulas, N., Elvanidi, A., Ferentinos, K.P., Kacira, M., Bartzanas, T., y Kittas, C. (2016). Crop reflectance monitoring as a tool for water stress detection in greenhouses: A review. *Biosystems Engineering*, 151, 374 – 398.
- Manly, B.F.J. (2017). *Multivariate Statistical Methods: A Primer*. Chapman and Hall.
- Muhammed, H.H. (2005). Hyperspectral crop reflectance data for characterising and estimating fungal disease severity in wheat. *Biosystems Engineering*, 91(1), 9 – 20.
- Muhammed, H.H. y Larsolle, A. (2003). Feature vector based analysis of hyperspectral crop reflectance data for discrimination and quantification of fungal disease severity in wheat. *Biosystems Engineering*, 86(2), 125 – 134.
- Orfanidis, S.J. (2010). *Introduction to Signal Processing*. Pearson Education, Prentice Hall.
- Pacumbaba, R. y Beyl, C. (2011). Changes in hyperspectral reflectance signatures of lettuce leaves in response to macronutrient deficiencies. *Advances in Space Research*, 48(1), 32 – 42.
- Rivera-Romero, C.A., Palacios-Hernández, E.R., Trejo-Durán, M., Olivera-Reyna, R., y Morales-Saldaña, J.A. (2020). Visible and near-infrared spectroscopy for detection of powdery mildew in Cucurbita pepo L. leaves. 14(4), 1–19. doi:10.1117/1.JRS.14.044515.
- Yuan, L., Huang, Y., Loraamm, R.W., Nie, C., Wang, J., y Zhang, J. (2014). Spectral analysis of winter wheat leaves for detection and differentiation of diseases and insects. *Field Crops Research*, 156, 199 – 207.