

# RELACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA Y REFLECTANCIA ESPECTRAL DE ALGUNOS CULTIVOS ANDINOS DE LA PROVINCIA DE HUAMANGA, 2020.

**Solano Reynoso, Walter Mario; Soca Flores, Renato; Torres Huaripaucar, Noel**

## RESUMEN

Se ha obtenido la reflectancia espectral de seis cultivos andinos típicos de la región andina peruana, particularmente de Ayacucho, calculando los índices del contenido de clorofila (ICC) y de agua (ICA) de las hojas de los cultivos. Los datos de reflectancia fueron medidos mediante un espectroradiómetro Field Spec 4 entre 350 y 2500 nanómetros en intervalos de 1 nm, por el período comprendido entre el 17 de febrero y 9 de marzo de 2020 en intervalos de una semana. Los resultados muestran que el maíz y papa tienen un ligero mayor contenido de clorofila que la quinua, mientras que en el caso del contenido de agua, las hojas del maíz tienen menos contenido de agua respecto a la papa y quinua. El otro rasgo es que en la quinua hay un incremento del contenido de agua mientras que una disminución en maíz y papas. Si bien estos resultados iniciales indican diferencias y similitudes entre los cultivos a pesar de tener las mismas condiciones ambientales de los cultivos, sugiere que se realicen estudios futuros al respecto.

Palabras claves: Reflectancia espectral, índices de contenido de clorofila, índices de contenido de agua.

# RELACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA Y REFLECTANCIA ESPECTRAL DE ALGUNOS CULTIVOS ANDINOS DE LA PROVINCIA DE HUAMANGA, 2020.

## ABSTRACT

The spectral reflectance of six typical Andean crops of the Peruvian Andean region, particularly of Ayacucho, has been obtained, calculating the indices of the chlorophyll content (ICC) and water (ICA) of the leaves of the crops. The reflectance data were measured using a Field Spec 4 spectrometer between 350 and 2500 nanometers in 1 nm intervals, for the period between February 17 and March 9, 2020 in one week intervals. The results show that corn and potato have a slightly higher chlorophyll content than quinoa, while in the case of water content, corn husks have less water content compared to potato and quinoa. The other feature is that in quinoa there is an increase in water content while a decrease in corn and potatoes. Although these initial results indicate differences and similarities between the crops despite having the same environmental conditions of the crops, they suggest that future studies be carried out in this regard.

Keywords: Spectral reflectance, chlorophyll content index, water content index.

## INTRODUCCIÓN

En ciertos cultivos andinos a más de 2700 msnm, como la papa, quinua y maíz, se tienen variedades que se diferencian entre sí en la coloración del producto, tal como la quinua blanca y roja, la papa blanca y roja o morada, el maíz blanco y morado, atribuibles a su hábitat alto andinos. Entendiendo que las coloraciones se relacionan a pigmentos como los carotenoides y antocianinas en el producto, se ha intentado detectar si hay diferencias significativas en el contenido de clorofila y antocianinas de las hojas de los cultivos mencionados, habiéndose utilizado índices de contenido de clorofila y antocianinas encontrados en la literatura, a los cultivos estudiados.

La necesidad de cuantificar el contenido de clorofila de las hojas verdes es de larga data, particularmente utilizando técnicas relacionadas a la detección de la reflectancia de las hojas que no necesita destruir las hojas para su análisis como también con técnicas de percepción remota como drones, aviones o sensores de satélite. Para ello se propusieron índices que relacionan reflectancias de ciertas longitudes de onda que sean sensibles al contenido de clorofila con aquellas insensibles a la misma. De las propuestas destacan los

índices que utilizan el llamado borde rojo, que se define como el punto de inflexión entre el rojo y el infrarrojo cercano (NIR) (Horler et al., 1983, Curran et al., 1990), ya sea como razón simple o normalizada (Horler et al., 1987, Gitelson, et al., 1996). Particularmente destaca los índices propuestos por Datt (1999) utilizando tres reflectancias para los índices de clorofila que no dependen de la orientación para capturar el espectro de reflectancia. Se ha realizado evaluaciones del contenido de nitrógeno en hojas y utilizado varios índices (Xue y Yang, 2009) en algunas especies. Se usaron las concentraciones de clorofila para comparar las respuestas de hojas estresadas por falta de agua con las frescas (Lin et al., 2015), las correlaciones entre los índices de la reflectancia espectral y la tolerancia al frío (Obeidat et al., 2018). Una publicación reciente relaciona el contenido de clorofila con la reflectancia espectral multiangular (Li, et al., 2019), concluyendo que los índices propuestos por Datt en 1999 eran adecuados para cuantificar los contenidos de clorofila en condiciones de mediciones de campo donde la orientación de la incidencia de la luz solar es crítico.

Hay numerosas publicaciones del uso de los índices de clorofila en agricultura basados en la reflectancia espectral, relacionando con el contenido de nitrógeno, el uso de

fertilizantes en mejorar la productividad, las condiciones de estrés de las plantas en diferentes cultivos, como maíz, papas, frejoles, soya, etc. Particularmente en cultivos andinos encima de los 2500 m.s.n.m. relacionados a los índices de clorofila, no se han encontrado trabajos y menos en la región de Ayacucho, habiéndonos propuesto evaluar diferentes índices de contenido de clorofila en tres cultivos andinos y su variantes blanca y roja, intentado encontrar las diferencias y similitudes entre ellos.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Se ha considerado cultivos de maíz blanco, maíz morado, papa blanca, papa roja, quinua blanca y quinua roja, realizados en los campos de cultivo del Instituto Nacional de Innovación Agraria de Ayacucho en parcelas pequeñas en condiciones normales de crecimiento. El inicio de las mediciones de la reflectancia espectral se realizaron 4 semanas después de la siembra en intervalos de 7 días con un espectrorradiómetro Field Spec 4 de 350 a 2500 nm, en intervalos de 1 nm, teniendo una resolución espectral de 3 nm en el intervalo de 350 a 1000 nm y de 30 nm hasta 2500 nm. La toma de datos se ha realizado directamente en 3 plantas de cada tipo de cultivo escogidos aleatoriamente, con 10 mediciones para cada planta y luego promediadas. A cada promedio se aplicó un filtro para eliminar el ruido de los

datos, comparando el promedio móvil con el filtro Goyal-Zavinsky, obteniendo los mismos resultados y finalmente utilizando la media móvil por su sencillez.

### 2.1 Reflectancias espectrales

En la Fig. 1 se muestra las reflectancias espectrales de las hojas recolectadas, ilustrando en una gráfica el método seguido para utilizar los datos almacenados en la determinación de las reflectancias, que son las que se usarán para la determinación de los índices de contenido de clorofila (ICC). De manera general, sin entrar en los detalles físico matemáticas de la determinación de la reflectancia por el instrumento, la reflectancia se cuantifica como

$$R(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0} \quad (1)$$

Siendo  $I_0$  la intensidad de la radiación incidente e  $I(\lambda)$  la intensidad de la radiación reflejada por el material. Experimentalmente  $I_0$  se determina capturando la reflexión en un dispositivo especial que teóricamente es un reflector perfecto que se denomina espectralón. Luego el detector de la señal se dirige a la hoja para almacenar el valor de  $I(\lambda)$ , dependiente de la longitud de onda, y calcular  $R(\lambda)$  mediante la ecuación (1).

El pico de la antocianina se da cerca de 520 nm

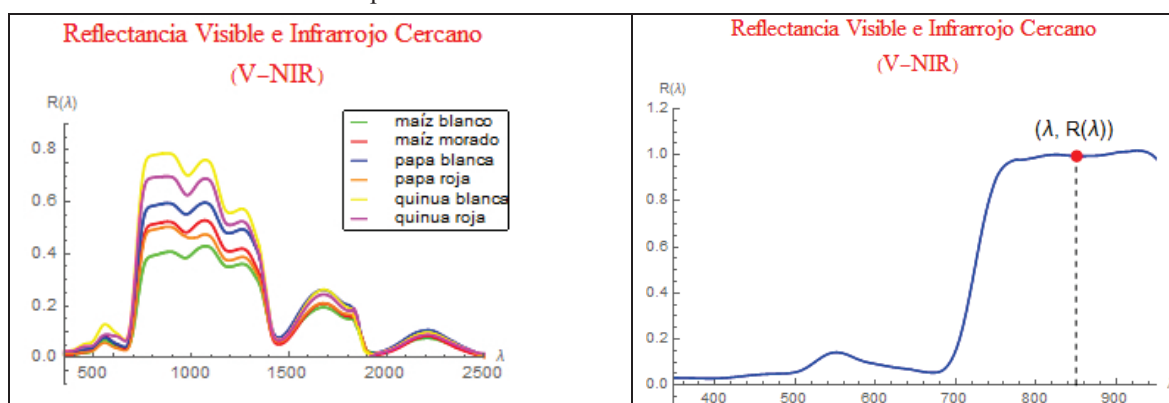


Fig. 1.- Reflectancia espectral de hojas de maíz, papa y quinua y sus coordenadas.

### 2.2 Índices de concentración de clorofila (ICC).

Se han definido diferentes tipos de índices, de los cuales tenemos los índices de razón simple (Simple Ratio, SR) dada de manera genérica como

$$SR = \frac{R_{\lambda_1}}{R_{\lambda_2}}, \quad (2)$$

donde  $R_{(\lambda_1)}$  es la reflectancia a la longitud de onda  $\lambda_1$  y  $R_{(\lambda_2)}$  a la longitud de onda  $\lambda_2$ . El otro tipo es el índice de diferencia normalizada (Normalised Difference Index) dada como

$$NDI = \frac{R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}}{R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2}}, \quad (3)$$

Otro tipo de índices relacionan tres reflectancias para tres diferentes longitudes de onda escrito como

$$I3 = \frac{R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}}{R_{\lambda_1} - R_{\lambda_3}}, \quad (4)$$

Entre estos destaca el propuesto por Datt (1999), dada como

$$MDatt = \frac{R_{850} - R_{710}}{R_{850} + R_{680}}$$

Apreciando la Fig. 2, se tiene la reflectancia espectral de la región visible e infrarrojo cercano (NIR) de las hojas, dentro del cual se toman las longitudes de onda para determinar los índices de contenido de clorofila. Uno de los índices de diferencia normalizada propuestos es dada como (Normalised Difference Red Edge, NDRE) (Gitelson et al., 2005):

$$NDRE = \frac{R_{790} - R_{720}}{R_{790} + R_{720}}$$

El término borde rojo (Red Edge) es usado en esta definición, el cual viene a ser el punto de inflexión de la curva que sube del mínimo rojo a la cima del infrarrojo cercano, como se aprecia en la Fig. 2.

Hace poco, Gitelson y Solovchenko (2017) hicieron una evaluación de un modelo de tres bandas de 45 diferentes especies con cientos de hojas, propuesto años atrás (Gitelson et al., 2003; Gitelson et al., 2006; Gitelson et al., 2009) y concluyeron que para clorofila y antocianina es mejor usar tres bandas, sugiriendo una banda entre 540 y 560 nm, otra del borde rojo (red edge) entre 710 y 720 nm, y el tercero en el NIR entre 770 y 800 nm, en la forma

$$\text{INDICE} = \left[ \frac{1}{R(\lambda_1)} - \frac{1}{R(\lambda_2)} \right] R(\lambda_3).$$

Para la clorofila sugiere dos bandas,  $R(\lambda_2) = R(\lambda_3)$ , tomando el borde rojo y el NIR, siendo la propuesta

$$\text{Chl}_{\text{RE}} = \frac{\text{NIR}}{R_{\text{RE}}} - 1,$$

tomando RE entre 710 y 720 nm, mientras el NIR entre 770 y 800 nm.

Para la antocianina propone dos alternativas,

$$\text{ARI} = \frac{1}{R_{\text{green}}} - \frac{1}{R_{\text{RE}}},$$

siendo ARI (Anthocyanin Reflectance Index) el índice de reflectancia de la antocianina, y el modificado

$$\text{mARI} = \left( \frac{1}{R_{\text{green}}} - \frac{1}{R_{\text{RE}}} \right) R_{\text{NIR}}$$

En un estudio realizado por Li et al. (2019) relacionados a diferentes ángulos de incidencia y reflexión, se destacó el índice de contenido de clorofila de tres bandas, ya propuesto por Datt (1999) para otras bandas, dada como

$$\text{LCC} = \frac{R_{720} - R_{761}}{R_{720} - R_{672}},$$

como muy sensible al ángulo cenit de visión de las tres especies estudiadas.

### Reflectancia Visible e Infrarrojo Cercano (V-NIR)

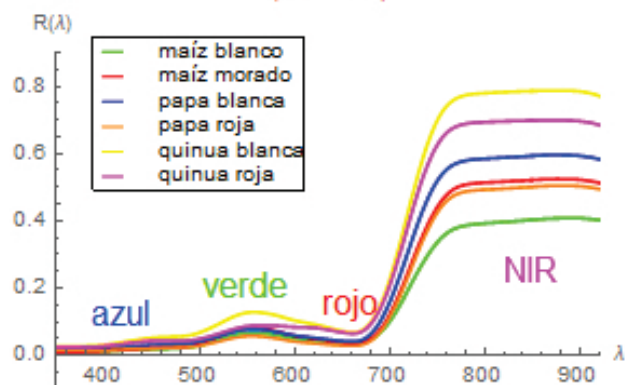


Fig. 2. Región visible e infrarrojo cercano de la reflectancia espectral de los cultivos estudiados, tomados hasta los 920 nm. Observar que un poco más allá de los 900 nm comienza el declive de la curva hacia la absorción del agua. Este comportamiento sugiere no tomar longitudes de onda del NIR más allá de los 900 nm.

En la Tabla 2 se tiene el resumen de varios índices utilizados en este trabajo, tomados de las referencias señaladas.

Tabla 2. Índices de contenido de clorofila.

ÍNDICE DE CLOROFILA	FÓRMULA	REFERENCIA
Razón Simple	$\frac{R_{800}}{R_{680}}$	Blackburn, 1998
Razón Simple	$\frac{R_{750}}{R_{550}}$	Datt, 1998
Razón Simple	$\frac{R_{850}}{R_{550}}$	Datt, 1998
	$\frac{R_{750}}{R_{710}}$	Zarco-Tejada et al., 2005
Diferencia Normalizada	$\frac{R_{800} - R_{680}}{R_{800} + R_{680}}$	Blackburn, 1998
Diferencia Normalizada	$\frac{R_{750} - R_{710}}{R_{750} + R_{710}}$	Gitelson y Merzlyak, 1994
Diferencia Normalizada	$\frac{R_{750} - R_{550}}{R_{750} + R_{550}}$	
Diferencia Normalizada	$\frac{R_{860} - R_{550}}{R_{860} + R_{550}}$	

Se utilizó el índice de diferencia normalizada NDII (Normalised Difference Infrared Index) (Hardisky y Klemas, 1983), dada como

$$NDII = \frac{R_{850} - R_{1650}}{R_{850} + R_{1650}},$$

y el NDII2 (Rodríguez-Péres, 2007) escrita como

$$NDII2 = \frac{R_{870} - R_{1260}}{R_{870} + R_{1260}},$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para mostrar cualitativamente el comportamiento espectral de la parte visible de los cultivos estudiados, se muestra en la Fig. 4 las reflectancias correspondientes. El pico en la parte

visible es la no absorción de la luz en la longitud de onda que corresponde al verde, produciéndose la reflexión más intensa del visible. De este pico hay un decaimiento hacia un mínimo, que corresponde al rojo. Un rasgo característico entre las hojas de maíz blanco, papa blanca y quinua blanca y las correspondientes al maíz morado, papa roja y quinua roja, es que para estos últimos el decaimiento muestra ligeras subidas, siendo más acentuada en la quinua roja. Este comportamiento se atribuye a la influencia de la antocianina, que no será analizada en esta publicación.

Fig. 4. Reflectancia espectral de los cultivos usados en el presente trabajo.

En la Fig. 5 se muestra los índices de clorofila de razón simple y diferencia normalizada calculados de acuerdo a las propuestas en la Tabla 1. En ambos casos se nota la tendencia a la disminución del índice de clorofila.

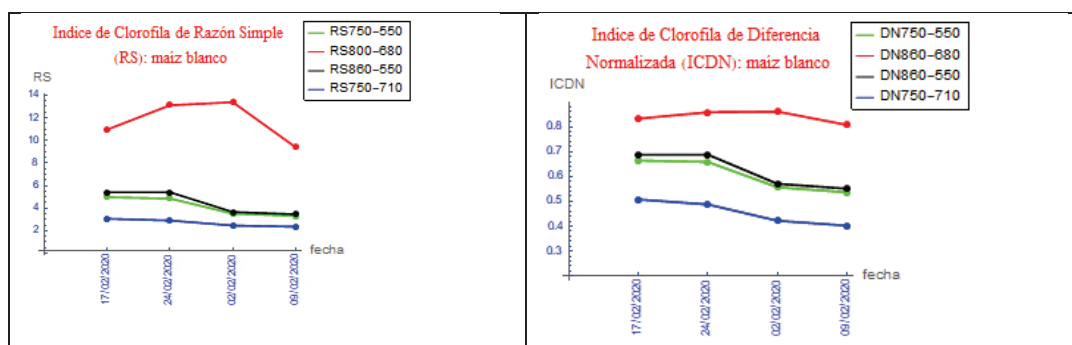


Fig. 5. Índices de clorofila de razón simple y normalizada del maíz blanco.

En la Fig. 6 se muestra los índices de razón simple y de diferencia normalizada para la clorofila de las hojas de

quinua blanca y roja, cuyo comportamiento cualitativo es similar.

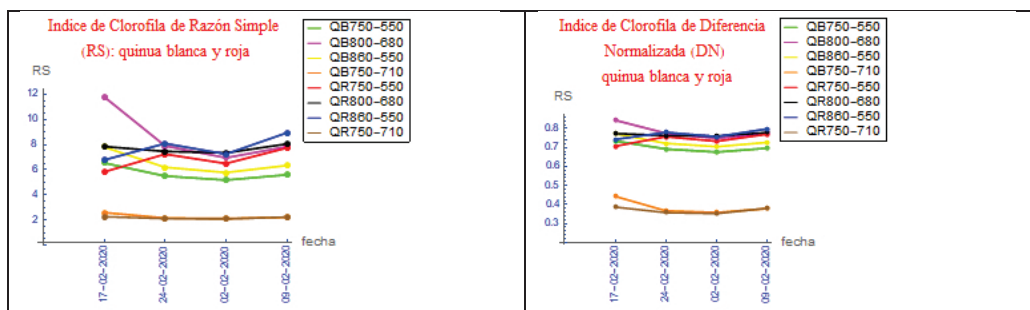
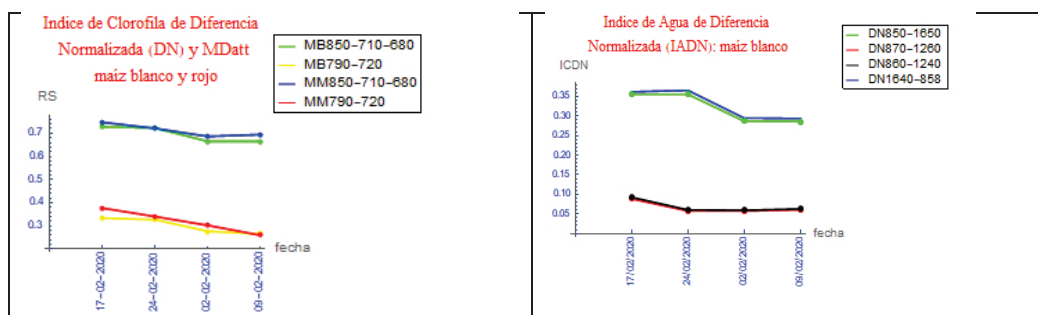


Fig. 6. Índices de contenido de clorofila de razón simple y normalizada de la quinua blanca y roja.

En la Fig 7 se observa los índices de contenido de clorofila de diferencia normalizada y de Datt para los seis tipos de cultivos y los correspondientes índices de contenido de agua de las hojas. Lo que se observa es que tanto el índice de clorofila del maíz y papas tiende a disminuir en el período de

4 semanas, lo que no ocurre con la quinua, notándose una ligera disminución y recuperación del índice de contenido de clorofila y un notorio aumento del índice de contenido de agua. El comportamiento de la quinua necesita ser explorado para conocer su fisiología respecto al maíz y papa.



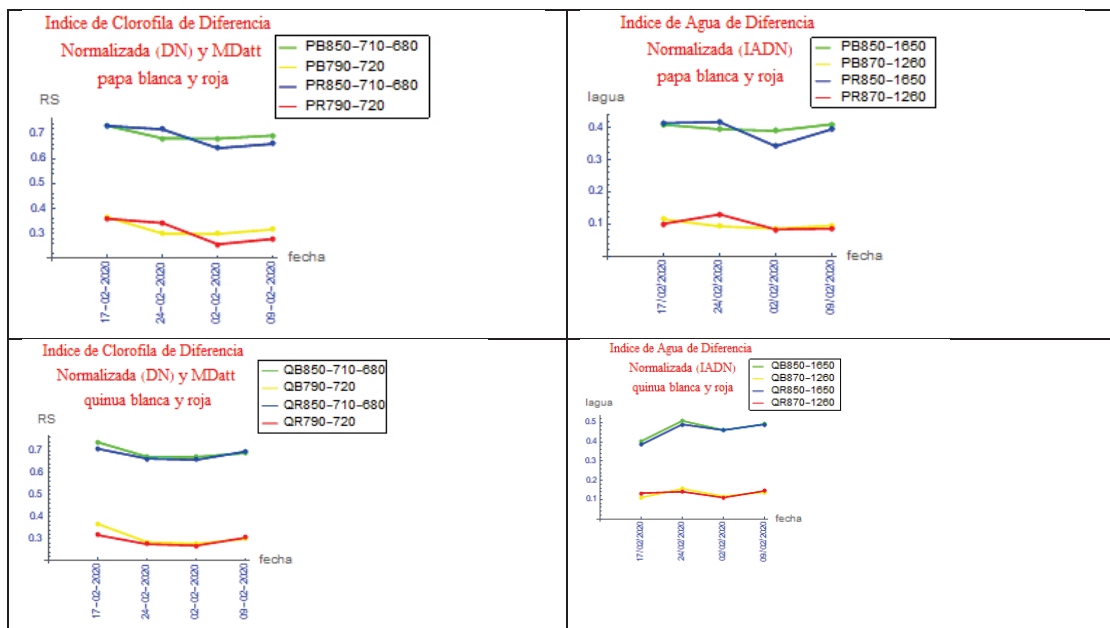


Fig. 7. Contenido de clorofila y agua de los cultivos

Finalmente, en la fig. 8 se tiene la reflectancia de la parte visible de la quinua, cuyo descenso en del máximo que corresponde al verde hacia el rojo, sugiere un ligero incremento respecto a la quinua blanca, lo cual sugiere sea debido al mayor contenido de antocianinas en las hojas de la quinua roja.

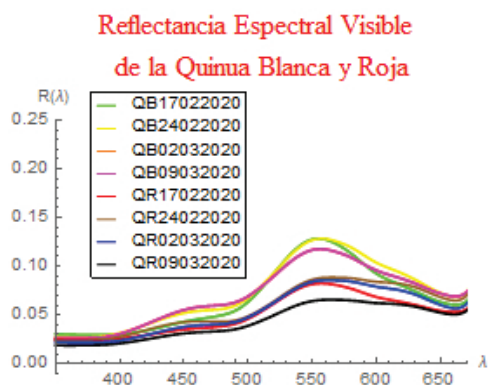


Fig. 8. Reflectancia de la parte visible de los cultivos de maíz, papa y quinua.

## CONCLUSIONES

Se ha obtenido las reflectancias espectrales de tres cultivos andinos: maíz blanco

papa blanca y roja, reflejando las diferencias y semejanzas entre ellos.

Se encontró que el contenido de clorofila del maíz y papa disminuye en el período de las cuatro semanas de medición, en cuanto que en la quinua se mantuvo esencialmente el mismo,

Respecto al contenido de agua también se encontró una disminución en el maíz y papa y un incremento en la quinua.

Aparentemente no hay diferencias entre los contenidos de clorofila de las variedades de maíz, papa y quinua utilizadas, como también del contenido de agua para las longitudes de

onda utilizadas.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda explorar las razones del incremento de clorofila y notoriamente del agua en las hojas de quinua, contrario a lo que ocurre con el maíz y papas.

No se han usado índices de las primeras derivadas, especialmente el que corresponde al borde rojo, para obtener mejores criterios en la determinación de los índices.

Se recomienda explorar la relación entre los índices de contenido de clorofila y de agua, para ver las tendencias.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., & Grégoire, J.M. (2001). *Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. Remote Sensing of Environment*, 77(1), 22–33. doi:10.1016/s0034-4257(01)00191-2.

Chen, P., Haboudane, D., Tremblay, N., Wang, J., Vigneault, P. y Li, B. (2010). New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat, *Remote Sensing of Environment*, 114, 1987–1997.

Cho, M. A. y Skidmore, A. K. (2006). A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method. *Remote Sensing of Environment*, 101(2), 181–193. doi:10.1016/j.rse.2005.12.011.

Collins, W., 1978, Remote sensing of crop type and maturity. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44, pp. 43–55.

Covshoff, S. (Editor). (2018). *Photosynthesis, Methods and*



- Protocols Human Press. Springer.
- Croce, R., van Grondelle, R., van Amerongen, H. y van Stokkum, I (Editores). (2018). *Light Harvesting in Photosynthesis*. CRC Press.
- Curran, P. J., Dungan, J. L., and Gholz, H. L., (1990). Exploring the relationship between reflectance red Edge and chlorophyll content in slash pine, *Tree Physiology*, 7, 33-48.
- Curran, P. J., Dungan, J. L., Macler, B. A., and Plummer, S. E. (1991). The effect of a red leaf pigment on the relationship between red Edge and chlorophyll concentration, *Remote Sensing of Environment*, 35, 69-76.
- Danson, F. M. y Plummer, S. E., (1995). Red Edge response to forest leaf are a index. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 183-188.
- Datt, B. (1999). *A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests using Eucalyptus Leaves*. *Journal of Plant Physiology*, 154(1), 30–36. doi:10.1016/s0176-1617(99)80314-9.
- Filella, I. y Peñuelas, J. (1994). The red Edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status, *International Journal of Remote Sensing*, 15, 1459-1470.
- Genc, L., Inalpulat, M., Kizil, U., Mirik, M, Smith, S.E. y Mendes, M.(2013). Determination of water stress with spectral reflectance on sweet corn (*Zea mays* L.) using classification tree (CT) analysis, *Zemdirbyste-Agriculture*, 100, 81–90. DOI 10.13080/z-a.2013.100.011.
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., y Lichtenthaler, H. K. (1996). *Detection of Red Edge Position and Chlorophyll Content by Reflectance Measurements Near 700 nm*. *Journal of Plant Physiology*, 148(3-4), 501–508. doi:10.1016/s0176-1617(96)80285-9.
- Golbeck, J. y van der Est, A. (Editores). (2014). *The Biophysics of Photosynthesis*, Springer.
- Griffiths, D.J. (2013). *Introduction to Electrodynamics*, Pearson, Fourth Edition.
- Grimes, D.M. y Grimes, C.A. (2005). *The Electromagnetic Origin of Quantum Theory and Light*, Second Edition, World Scientific.
- Guangjiana, Y., Ronghaia, H., Jinghuia, L., Maried, W., Hailana, J., Xihana, M., Donghuia, X. y Wuminga, Z. (2019). Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives, *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 390-4111.
- Horler, D. N. H., Dockray, M., y Barber, J. (1983). *The red edge of plant leaf reflectance*. *International Journal of Remote Sensing*, 4(2), 273–288. doi:10.1080/01431168308948546.
- Im, J., y Jensen, J. R. (2008). *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*. *Geography Compass*, 2(6), 1943–1961. doi:10.1111/j.1749-8198.2008.00182.x.
- Jacquemond, S. y Ustin, S. (2019). *Leaf Optical Properties*, Cambridge University Press.
- Jackson, J.D. (1999). *Classical Electrodynamics*. Third Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Jensen, J.R. (2014). *Remote Sensing of the Environment and Earth Resource Perspective*, Sec. Edit., Pearson New International Edition.
- Jin, X., Shi, C., Yu, C.Y., Yamada, T. y Sacks, E.J. (2017). Determination of Leaf Water Content by Visible and Near-Infrared Spectrometry and Multivariate Calibration in *Miscanthus*. *Front. Plant Sci.* 8:721. doi:10.3389/fpls.2017.00721.
- Lang, K.R. (2006). *Sun, Light and Sky*, Second Edition, Springer.
- Lin, C., Popescu, S. C., Huang, S. C., Chang, P. T., & Wen, H. L. (2015). *A novel reflectance-based model for evaluating chlorophyll concentrations of fresh and water-stressed leaves*. *Biogeosciences*, 12(1), 49–66. doi:10.5194/bg-12-49-2015.
- Liu, N., Wu, L., Chen, L., Sun, H., Dong, Q., & Wu, J. (2018). *Spectral Characteristics Analysis and Water Content Detection of Potato Plants Leaves*. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), 541–546. doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.152.
- Luo, X., Croft, H., Chen, J. M., He, L., & Keenan, T. F. (2019). *Improved estimates of global terrestrial photosynthesis using information on leaf chlorophyll content*. *Global Change Biology*. doi:10.1111/gcb.14624.
- Mead, C.A. (2000). *Collective Electrodynamics, Quantum Foundations of Electrodynamics*, The MIT Press, Massachusetts.
- Miphokasap, P., Honda, K., Vaiphasa, C., Souris, M. y Nagai, M. (2012). Estimating Canopy Nitrogen Concentration in Sugarcane Using Field Imaging Spectroscopy, *Remote Sens.* 2012, 4, 1651-1670; doi:10.3390/rs4061651.
- Morrey, J. R. (1968). *On determining spectral peak positions from composite spectra with a digital computer*. *Analytical Chemistry*, 40(6), 905–914. doi:10.1021/ac60262a006.
- Obeidat, W., Avila, L., Earl, H., & Lukens, L. (2018). *Leaf Spectral Reflectance of Maize Seedlings and Its Relationship to Cold Tolerance*. *Crop Science*, 0(0), 0. doi:10.2135/cropsci2018.02.0115.
- Pfeffer, J.I. y Nir, S. (2000). *Modern Physics, An Introductory Text*, Imperial College Press.
- Railyan, V. Y. y Korobov, R. M. (1993). Red Edge structure of canopy reflectance spectra of triticale, *Remote Sensing of Environment*, 46, 173-182.
- Sneppen, K. y Zocchi, G. (2005). *Physics in Molecular*

Biology, Cambridge University Press.

Sun, H., Liu, N., Wu, L., Chen, L., Yang, L., Li, M., & Zhang, Q. (2018). *Water Content Detection of Potato Leaves Based on Hyperspectral Image*. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), 443–448. doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.179.

Velichkova, K. y Krezhova, D. (2019). Extraction of the Red Edge Position from Hyperspectral Reflectance Data for Plant Stress Monitoring, AIP Conference Proceedings 2075, 130018 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5091303> Published Online: 26 February 2019.

Wang, J., Chen, Y., Chen, F., Shi, T., & Wu, G. (2018). *Wavelet-based coupling of leaf and canopy reflectance spectra to improve the estimation accuracy of foliar nitrogen concentration*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 306–315. doi:10.1016/j.agrformet.2017.10.017.

Xue, L., & Yang, L. (2009). *Deriving leaf chlorophyll content of green-leafy vegetables from hyperspectral reflectance*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1), 97–106. doi:10.1016/j.isprsjprs.2008.06.002.

Yan, G., Hu, R., Luo, J., Weiss, M., Jiang, H., Mu, X., y Zhang, W. (2019). *Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 390–411. doi:10.1016/j.agrformet.2018.11.033.

Yoder, B. J., y Pettigrew-Crosby, R. E. (1995). *Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400–2500 nm) at leaf and canopy scales*. *Remote Sensing of Environment*, 53(3), 199–211. doi:10.1016/0034-4257(95)00135-n.

Zhao, B., Duan, A., Ata-Ul-Karim, S. T., Liu, Z., **Chen, Z., Gong, Z.**, Ning, D. (2018). *Exploring new spectral bands and vegetation indices for estimating nitrogen nutrition index of summer maize*. *European Journal of Agronomy*, 93, 113–125. doi:10.1016/j.eja.2017.12.006.

Zheng, T., Liu, N., Wu, L., Li, M., Sun, H., Zhang, Q., & Wu, J. (2018). *Estimation of Chlorophyll Content in Potato Leaves Based on Spectral Red Edge Position*. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), 602–606. doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.131.

Zoogman, P., Liu, X., Chance, K., Sun, Q., Schaaf, C., Mahr, T., & Wagner, T. (2016). A climatology of visible surface reflectance spectra. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 180, 39–46. doi:10.1016/j.jqsrt.2016.04.003.