

Estimación de la severidad de la infección en la caña de azúcar mediante imágenes satelitales



<https://cu-id.com/2177/v33n2e04>

Estimation of Infection Severity in Sugarcane Using Satellite Images

^{I*}Rubén Orozco-Morales^{I*}, ^{II}Osmany de la C. Aday-Díaz^{II}, ^{III}Luís Hernández-Santana^{III},
^{III}Luís E. Hernández-Morales^{III}, ^{II}Iliá Lugo Ruiz^{II}

^IUniversidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV), Centro de Investigaciones de Métodos Computacionales y Numéricos en la Ingeniería (CIMCNI), Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

^{II}Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA Villa Clara), Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

^{III}Universidad Central “Marta Abreu” de Las Vilas (UCLV), Cuba, Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

RESUMEN: La contaminación con roya parda (*Puccinia melanocephala*) en la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un importante problema por los costos que impone a los productores. Basándonos en un estudio reciente, en el que se utilizó análisis hiperespectral a nivel de laboratorio, así como multiespectral mediante vehículo aéreo no tripulado (UAV), este trabajo acometió la tarea de estimar la infección con roya parda mediante las imágenes multiespectrales (MSI) de la constelación satelital Sentinel-2. Los resultados arrojan gran coincidencia entre la estimación mediante UAV, la obtenida mediante imágenes satelitales y la observada en el terreno por un especialista. Estos resultados posibilitan extender la estimación de la infección de esta enfermedad a grandes áreas reduciendo los costos que implica trasladar el UAV hasta las regiones a estudiar, en las que solo puede cubrir un espacio limitado en cada vuelo.

Palabras clave: Sensado remoto, roya, imágenes satelitales, vehículos aéreos no tripulados, caña de azúcar.

ABSTRACT: Brown rust (*Puccinia melanocephala*) contamination in sugarcane (*Saccharum* spp.) is a major problem because of the costs it imposes on growers. Based on a recent study using hyperspectral analysis at the laboratory level as well as multispectral analysis by unmanned aerial vehicle (UAV), this work undertook the task of estimating brown rust infection using multispectral images (MSI) from the Sentinel-2 satellite constellation. The results show a high agreement between the estimation by UAV, the one obtained by satellite images and the one observed in the field by a specialist. These results make it possible to extend the estimation of the infection of this disease to large areas, reducing the costs involved in moving the UAV to the regions to be studied, where it can only cover a limited space in each flight.

Keywords: Remote sensing, rust, satellite imagery, unmanned aerial vehicles, sugarcane.

INTRODUCCIÓN

La roya parda (*Puccinia melanocephala*) de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.), es una enfermedad foliar de importancia económica por los costos que causa tanto a productores como a la sociedad debido a las pérdidas que causa. Se informa su presencia en 57 países (Aday *et al.*, 2020; Grisham *et al.*, 2020). Todo ello se agudiza en momentos en que muchos países se enfrentan a una compleja situación económica, recrudescida por diversos factores a partir de la epidemia de COVID-19 y conflictos bélicos en diversas regiones. Un punto de vista para enfrentar la infección por roya parda en plantaciones cañeras la

aporta la espectrometría, ya sea mediante tecnologías geoespaciales (satélites), aéreas (UAV) o a nivel de laboratorio en condiciones controladas. La espectrometría, ya sea multiespectral (MSI) o hiperespectral (HSI) es considerada una alternativa a los métodos tradicionales de muestreo de campo, imponiéndose cada día más gracias al desarrollo de nuevos instrumentos y software. Ejemplo de ello ha sido la aplicación de la espectrometría en el estudio de la infección por roya parda y roya naranja en caña de azúcar (Soca *et al.*, 2020), en el que, además, se determinó un índice de vegetación (VI) sensible a roya parda (*Puccinia melanocephala*) y roya naranja

*Autor para correspondencia: Rubén Orozco-Morales, e-mail: rorozco@uclv.edu.cu

Recibido: 05/10/2023

Aceptado: 13/03/2024

(*Puccinia kuehni*) entre los comúnmente utilizados, siendo este la base de este trabajo. También constituyen bases de este trabajo el estudio sobre el procesamiento de imágenes aéreas multiespectrales en la agricultura de precisión [Kharuf et al. \(2018a\)](#), así como el análisis de MSI adquiridas con UAV ([Kharuf et al., 2018b](#)). Todos estos trabajos han sido desarrollados por el Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP), de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV) y el Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA Villa Clara).

Está ampliamente reportada la utilización de UAV para el análisis de MSI de cultivos de caña de azúcar, ya que con ellos pueden obtenerse imágenes a baja altura con elevada resolución espacial ([Som et al., 2021](#)). Según un trabajo recientemente publicado en *Remote Sensing Applications: Society and Environment* ([Amarasingam et al., 2022](#)), se reconoce que, en Cuba, específicamente en la provincia de Villa Clara, ha sido uno de los lugares del mundo en que se han utilizado los UAV en la agricultura azucarera. El uso de los UAV ha sido crítico para el manejo y mejoramiento de los cultivos dada su flexibilidad y adaptabilidad a las exigencias locales, volar por debajo de las nubes, lo cual los libera de las sombras que estas producen, así como no estar restringidos a un horario de vuelo específico. No obstante, el uso de cámaras para HSI en UAV es costoso, siendo lo común equiparlos con cámaras para MSI. Por otra parte, resulta costoso trasladar los UAV hasta los lugares donde se encuentran los cultivos, teniendo en cuenta que los vuelos con ellos solo cubren áreas relativamente pequeñas, adquiriendo decenas o miles de imágenes que luego deben ser procesadas por software especializado. Además, existen regulaciones gubernamentales que limitan el uso intensivo y extensivo de los UAV en muchos lugares.

Dado el carácter de cultivo tropical de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.), algunas de sus variedades son muy susceptibles a la infección por roya parda, principalmente en países con poco desarrollo dadas las limitaciones que sufren para adquirir los recursos y las tecnologías idóneas para su detección temprana. Tradicionalmente, la estimación de la severidad de la infección por roya parda se ha realizado mediante inspección visual y la aplicación de escalas graduales de severidad de los síntomas. El método tradicional requiere que personal especializado recorra extensas áreas realizando muestreos esporádicos o esparcidos cuyos resultados están condicionados por la subjetividad característica de la estimación humana y carecen de reproducibilidad. De esta forma, el resultado depende de la experticia y la agudeza de la estimación realizada por el personal disponible en cada lugar, lo cual puede variar entre amplias zonas distantes entre sí. Además, el escrutinio de grandes áreas es un proceso que consume un gran fondo de

tiempo y esfuerzo. Coincidentemente, la introducción de nuevas tecnologías por parte de agricultores locales, como los UAV, se obstaculiza por limitaciones de recursos y adecuados conocimientos para su utilización, lo que abarca desde la planificación del vuelo hasta el procesamiento de las imágenes, el elevado costo inicial de la inversión, incluyendo la usual reluctancia al uso de nuevas tecnologías.

En contraposición con los UAV, los satélites brindan imágenes que pueden cubrir grandes áreas de manera regular con una resolución temporal estable y con una resolución espectral que permite obtener imágenes en múltiples bandas. Algunas bases de datos de imágenes satelitales se pueden obtener libremente de internet. No obstante, debido a la altura que vuelan los satélites, su resolución espacial puede ser muy inferior a la obtenida por un UAV volando a baja altura. A ello se suma la afectación que sufren las imágenes satelitales debido a la dispersión de la radiación electromagnética causada por la refracción a través de la atmósfera, así como su absorción por parte de partículas como el polvo o el humo. Todo ello hace que se reconozca el análisis satelital como uno de los retos remanentes en la detección de plagas, haciendo difícil extrapolar los métodos utilizados a escala de laboratorio o a muy baja altura, al procesamiento de imágenes tomadas a gran altura ([Müllerová et al., 2017](#); [Caasi et al., 2020](#); [Lu et al., 2020](#)). Es por ello que el propósito de este trabajo es mostrar la viabilidad del uso de MSI de la constelación satelital Sentinel-2 en la estimación de plantaciones cañeras infectadas con roya parda, sobre lo cual no conocemos de otra publicación previa. Así mismo, discutir sus beneficios y limitaciones y proponer una solución implementada procesando MSI satelitales de 10 m de resolución espacial, la que ofrece resultados comparables a los obtenidos mediante UAV y que ha sido validada mediante trabajo de campo en el área de cultivo analizada. El resultado de este trabajo ya se encuentra introducido en la IDE (*Spatial Data Infrastructure*) del grupo azucarero AZCUBA.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio y UAV imágenes

Las imágenes para este trabajo fueron adquiridas el 23 de julio de 2020 en campos de caña del central azucarero “Héctor Rodríguez”, ubicado al noreste de Sagua la Grande, Provincia de Villa Clara, Cuba ([Figural](#)). Esta fecha se corresponde con la temporada de alta temperatura y humedad en los campos de caña de azúcar. De acuerdo con ([Aday et al., 2020](#)), la infestación por roya parda es más severa en Cuba entre los meses de abril y septiembre, principalmente en agosto y septiembre.

El UAV de ala rotatoria utilizado estuvo equipado con la cámara multiespectral *MicaSense RedEdge-MX*



FIGURA 1. Campos de caña del central azucarero “Héctor Rodríguez” en Villa Clara, Cuba, utilizados para este trabajo. En recuadro rojo la zona estudiada según la escala del mapa.

(<https://micasense.com/rededge-mx/home>), de solo 150 g de peso y diseñada especialmente para trabajos profesionales en la agricultura. Esta cámara obtiene imágenes simultáneamente en cinco bandas espectrales discretas B: azul (475 nm, 32 nm BW), G: verde (560 nm, 27 nm BW), R: rojo (668 nm, 16 nm BW), RE: borde rojo (717 nm, 12 nm BW), y NIR: infrarrojo cercano (842 nm, 57 nm BW). Posee su propio sistema de posicionamiento global (GPS) y WiFi. Además, incluye tecnología de punta para medir la irradiación y posición angular del sol, así como una confiable corrección radiométrica. Las imágenes son salvadas en formato GeoTiff de 12 bits por pixel, lo que produce 4 096 niveles de intensidad en escala de grises para cada pixel, teniendo cada una 1280 x 960 píxeles.

Los vuelos se realizaron a 90 m de altura, obteniéndose una resolución espacial de 6 cm/píxel (GSD). La duración de los vuelos fue de unos 10 minutos, limitados por capacidad de la batería. Por su parte, el horario de los vuelos fue en mitad de la mañana, lo cual minimiza la incertidumbre en la corrección radiométrica, así como la irradiación térmica por calentamiento del suelo. Las imágenes obtenidas en el vuelo fueron procesadas mediante el software libre *Agisoft PhotoScan Professional* (<http://www.agisoft.com/>) para la construcción de los ortomosaicos georeferenciados de cada una de las bandas espectrales. Para ello se siguieron las fases de alineación de la imagen, construcción de la geometría y generación del ortomosaico. La información geográfica de las esquinas de los ortomosaicos es: latitud 22.822° ~ 22.834° y longitud -80.041° ~ -80.047°

Adquisición de Datos Satelitales

El programa *Copernicus* (<https://copernicus.eu/>) de la agencia espacial europea (ESA) lanzó desde el año

2015 el satélite Sentinel-2A y en el año 2017 el Sentinel-2B, concebidos para el sensado remoto, principalmente en la agricultura, por lo que pueden considerarse relativamente novedosos en este ámbito según la *European Space Agency* (ESA, 2015). Estos proveen imágenes en 13 bandas espectrales que cubren las frecuencias electromagnéticas visible, NIR y SWNIR con resoluciones espaciales (GSD) de 10, 20 y 60 m por píxel, siendo considerados sensores multiespectrales (Lu et al., 2020; Segarra et al., 2020; Som et al., 2021). Además, el programa *Copernicus* brinda las imágenes *true color* (RGB), así como algunos índices de vegetación, como el NDVI, o el de humedad (MI). Ambos satélites forman una constelación volando en la misma órbita polar a una altura promedio de 786 km, pero desfasados 180° para proveer una resolución temporal de cinco días, con el *Mean Local Solar Time* (MLST) a las 10:30 AM; esto es, sincronizados con el sol. La resolución radiométrica es de 12 bits/píxel, por lo que la radiación es registrada con una precisión de 4'096 niveles de intensidad en cada píxel (Lastovicka et al., 2020). Estas características de las MSI de Sentinel-2 ya han sido aprovechadas para la detección de la roya amarilla (yellow rust: *Puccinia striiformis*) en cultivos de trigo (Zheng et al., 2018), así como para monitorear cultivos de caña de azúcar (López et al., 2022). La estabilidad en la periodicidad de las imágenes, con solo 5 días de resolución temporal, ha sido ampliamente utilizada para el desarrollo de series de tiempo que permitan detectar, con gran facilidad y eficiencia, signos tempranos de diversos factores dinámicos de naturaleza biótica y abiótica que estresan los cultivos (Wang et al., 2019; 2020; Xu et al., 2020; Ruan et al., 2021; Vaudour et al., 2021).

Las imágenes satelitales se descargaron de la base de datos de la constelación satelital Sentinel-2,

correspondiendo al 23 de agosto de 2020; esto es, 30 días posteriores a la fecha de realización de los vuelos con el UAV. La diferencia de tiempo se debe tanto a la resolución temporal del Sentinel-2, como a la presencia de nubes sobre el terreno estudiado en alguno de los días intermedios. La información geográfica de las esquinas de las imágenes es: latitud $22.806^{\circ} \sim 22.844^{\circ}$ y longitud $-80.004^{\circ} \sim -80.086^{\circ}$, lo que coincide con la parte inferior de la [Figura 1](#).

Software de procesamiento

Tanto los ortomosaicos construidos a partir de las imágenes adquiridas por el UAV, como las obtenidas por Sentinel-2, fueron procesadas utilizando la herramienta computacional Matlab 2017a teniendo instalados el *Image Processing Toolbox* y el *Mapping Toolbox* (Swami, 2009; The Math works, 2009), para lo cual se programaron los códigos necesarios tanto para la manipulación de las imágenes, como para la computación de las operaciones realizadas con las mismas, así como para la visualización de los resultados. En todo ello se utilizó como base el trabajo publicado en (Soca et al., 2020), donde se determinó un índice de vegetación (VI) altamente sensible para estimar el grado de infestación con roya parda en la caña de azúcar. El código creado en *scripts* con formato .m corre sobre plataforma Windows 10 Pro para 64 bits, instalado en una laptop *Lenovo-ThinkPad* con un Intel® Core i5 @ 2.5 GHz y 8 GB de RAM. Cabe destacar, que a las imágenes no se les realizó ningún pre-procesamiento (suavizado, reducción de ruido, realce de contrasta, etc.) descargándose de la base de datos de Sentinel-2 con las correcciones realizadas por el programa *Copernicus*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En (Soca et al., 2020) se concluye que para reconocer mejor la firma espectral de la roya parda (*Puccinia melanocephala*) en sus diferentes estados el porcentaje del área foliar afectada (*ALA: affected leaf area*), debe utilizarse bandas espectrales con longitudes de onda en el intervalo entre 700 nm y 1500 nm. No obstante, la poca cantidad de bandas espectrales que presentan las imágenes de Sentinel-2, así como la limitación a solo cinco bandas espectrales de la cámara *MicaSense*, hace que en ninguno de los dos casos se disponga de las bandas idóneas para estimar la severidad de la infección con roya parda. Es por ello que, atendiendo a los resultados del trabajo mencionado, el VI se determina utilizando las imágenes de las bandas RE (735 nm) y NIR (790 nm) de la cámara *MicaSense* adosada al UAV. A partir de ello, la mayor correspondencia entre los resultados obtenidos mediante el UAV y las imágenes satelitales se obtuvieron utilizando las bandas 4 (665 nm) y 8 (842 nm) de Sentinel-2, ambas con 10 m de resolución espacial.

Las [Figuras 2 a\) y b\)](#) muestran un ejemplo de los ortomosaicos construidos con las imágenes de las bandas NIR y RE de la cámara *MicaSense* respectivamente en la zona de estudio mostrada en la [Figura 1](#). En la [Figura 2 c\)](#) se muestra el resultado del procesamiento utilizando las imágenes de ambas bandas. El color naranja (*pseudo color*) resalta las zonas identificadas como de mayor infección, mientras que el verde las no infectadas. Por su parte, el color rojo está relacionado con otro tipo de vegetación.

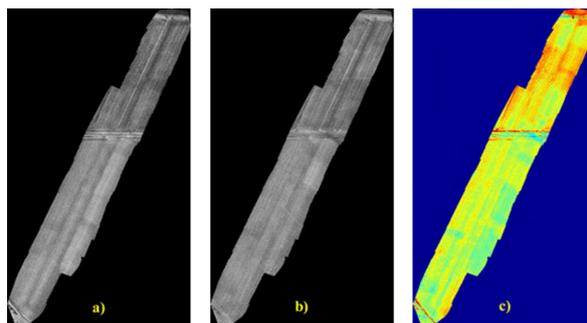


FIGURA 2. Ortomosaicos construidos mediante las MSI de las bandas a) NIR y b) RE de la cámara *MicaSense*. c) Resultado del procesamiento de las imágenes, resaltándose en naranja la mayor infección y en verde la no infección por roya parda.

La [Figura 3](#) muestran las imágenes obtenidas por Sentinel-2 en la misma zona de estudio volada por el UAV. En comparación con la imagen RGB mostrada en la [Figura 1](#), estas se han recortado con el propósito de mostrar, con la mayor resolución posible, la zona analizada. La parte a) corresponde a la imagen de color verdadero (RGB), mientras que las partes b) y c) a las bandas 4 y 8 respectivamente atendiendo a lo explicado en la sección 2.2. En la [Figura 3 d\)](#) se muestra en *pseudo color* el resultado obtenido tras el procesamiento utilizando ambas bandas espectrales, al que se le ha superpuesto un recuadro en rojo indicando el área aproximada volada por el UAV que fue mostrada en la [Figura 2](#). El color amarillo-naranja indica las zonas de mayor infección por roya parda, mientras que el verde y azul las no infectadas. El color naranja intenso no está asociado a la presencia de esta infección.

Dado que las MSI de Sentinel-2 están digitalizadas con 4 096 niveles de resolución radiométrica (12 bits/pixel) entre cero y uno, el índice calculado puede tomar la misma cantidad de valores, pero en el intervalo $\pm 2,5$, aunque para la zona mostrada lo hace entre 0,271 y 1,898, lo cual depende del contenido de vegetación, suelo y otros elementos dentro de la imagen. No obstante, el VI en las zonas afectadas con roya parda toma valores entre 1,3 y 1,44, como puede verse en la [Figura 3 e\)](#), donde se muestra el VI calculado, pero sin utilizar *pseudo color*.

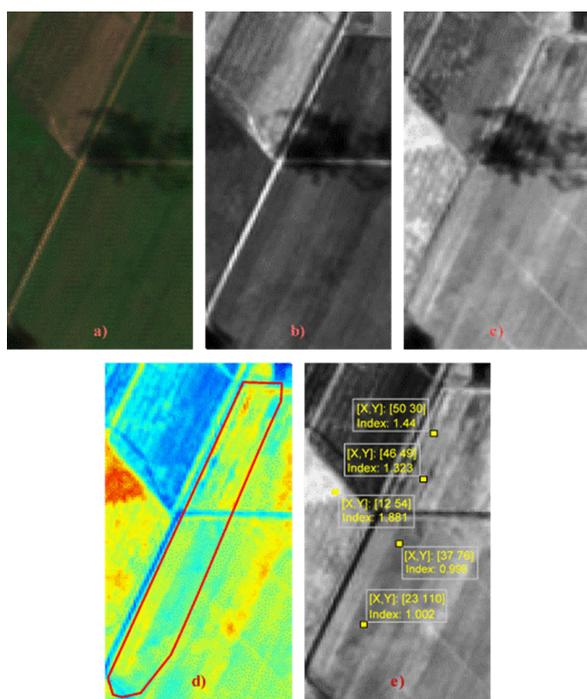


FIGURA 3. Imágenes obtenidas por Sentinel-2. a) color verdadero (RGB), b) y c) bandas 4 y 8, d) índice calculado en *pseudo color* y e) índice calculado mostrando algunos valores.

A partir del VI calculado (Figura 3 e), se traza el histograma de los valores obtenidos para la región mostrada en esta figura, el cual se muestra en la Figura 4. En la parte a) para el intervalo de valores del VI entre 0.27 y 1.898. Entre líneas rojas están los valores del VI que se corresponden con los píxeles en los que hay presencia de roya parda. En la parte b) de la Figura 4 se amplía la zona del histograma entre 0.9 y 1.58. El carácter multimodal de la distribución de valores que muestra el VI calculado se debe a la diversidad de elementos que componen la región mostrada, en la cual hay presencia de caña de azúcar no infestada y con diversos grados de infestación, otras vegetaciones, suelos, etc. En el histograma se aprecia también una gran dispersión de las distribuciones de cada uno de los elementos que componen la región mostrada, lo cual es consecuencia de la baja resolución espacial de las imágenes de

Sentinel-2, donde cada pixel abarca un área de 10x10 m.

Los valores del índice calculado dentro de una región dependen del grado del área foliar afectada, la susceptibilidad de la variedad de caña a la infección de la roya parda, la fase fenológica del cultivo, así como a otros factores abióticos (humedad, temperatura, etc.) (Ady *et al.*, 2020; Soca *et al.*, 2020), por lo que la decisión final sobre la presencia de roya debe tener en cuenta todos estos aspectos.

Debe notarse en las Figuras 3 d) y e) que el VI calculado no se afecta por la presencia de la sombra de la nube, como sí se observa en las imágenes originales de las Figuras 3 a), b) y c), correspondientes a color verdadero y bandas 4 y 8 respectivamente.

La validación de los resultados alcanzados a partir de imágenes obtenidas de forma remota, como lo es para el caso de los UAV y las satelitales, las cuales se basan en la radiación electromagnética, es una fuente de información acerca de la eficacia de los métodos empleados para la obtención y procesamiento de tales imágenes. Diversos autores (Gruber *et al.*, 2020) recomiendan la necesidad de la existencia de datos de referencia medidos localmente utilizando métodos tradicionales. La correlación entre los resultados a partir de observaciones remotas con los datos de referencia es una invaluable fuente de errores de estimación. Evidentemente, no debe obviarse la naturaleza estocástica de toda medición, principalmente la obtenida de forma remota, con la consiguiente incertidumbre en los resultados. A tales efectos, coincidiendo con la fecha de realización de los vuelos con el UAV, un especialista del INICA realizó un recorrido muestreando los campos sobrevolados, con lo cual se pudo estimar la severidad de la infección por roya parda en cada uno de ellos. Como resultado, mediante la comparación entre las imágenes obtenidas tras el procesamiento digital, tanto a partir de las del UAV como de las de Sentinel-2, se pudo verificar que en ambos casos hay coincidencia entre las zonas estimadas con lo observado en el terreno. A tales efectos, no es posible determinar un valor numérico de correlación entre las zonas con y sin presencia de roya parda debido a la diferencia de resolución entre las imágenes obtenidas por el UAV y

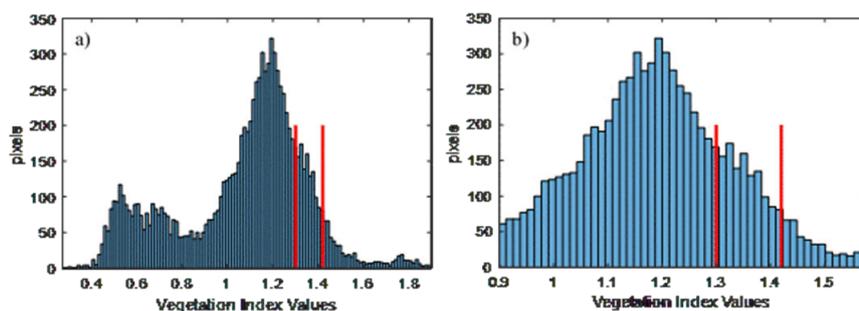


FIGURA 4. Histograma de los valores del VI calculado para la región mostrada en la Figura 3 e).

por el satélite, así como entre estas y la observación en el terreno, para lo cual solo se determinó la región infestada de cada campo y la severidad de la infección. La coincidencia entre la observación y las zonas infestadas de cada tipo de imagen se determinó a partir de las coordenadas georreferenciadas.

El tiempo de procesamiento utilizando los scripts creados, ya sea de los ortomosaicos construidos a partir de las imágenes adquiridas por el UAV, como de las imágenes adquiridas por el Sentinel-2, fue inferior a un minuto en la plataforma mencionada. Evidentemente, cuando se procesen grandes extensiones de cultivo de caña de azúcar, el análisis debe concentrarse solo en aquellas plantaciones que tengan variedades de caña susceptible a la roya parda, con lo cual se reduce la carga computacional.

El resultado de este trabajo ya se encuentra formando parte de la infraestructura de datos espaciales (IDE) (*Spatial Data Infrastructure*) en las áreas cañeras del norte de Villa Clara, Cuba, la cual puede ser accedida en <https://azcuba.geocuba.cu/visor>. Un ejemplo puede verse en la [Figura 5](#).

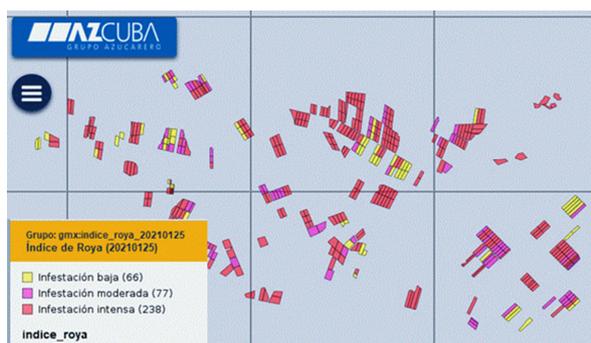


FIGURA 5. Ejemplo de la infraestructura de datos espaciales (IDE) del grupo azucarero AZCUBA mostrando la severidad de la infección con roya parda en diversas plantaciones cañeras.

CONCLUSIONES

- Dado que el método tradicional de estimación de la infección por roya parda, consistente en la observación humana, demanda personal calificado, gran esfuerzo humano y fondo de tiempo, no estando exento de subjetividades, puede llevarse a cabo esta tarea utilizando análisis espectral.
- El uso de UAV con cámara multispectral reduce el fondo de tiempo y la subjetividad, no obstante, su uso está limitado a áreas relativamente pequeñas por vuelo, lo que conduce a la realización de múltiples vuelos para cubrir grandes extensiones de plantaciones de caña de azúcar, con el consiguiente gasto en transportación. A ello también se añade la necesidad de personal especializado en el manejo de los UAV y el procesamiento de las imágenes a nivel local.

- Con el uso de imágenes obtenidas mediante la constelación Sentinel-2, las cuales pueden descargarse mediante libre acceso, pueden analizarse grandes extensiones de cultivo en pocos minutos y de manera periódica. Además, aprovechando la estabilidad temporal de la periodicidad de Sentinel-2, es posible obtener fácilmente series de tiempo que muestren la evolución de la infección por enfermedades en los cultivos, la dirección de su propagación, así como su dependencia de factores bióticos y abióticos.
- Los resultados alcanzados en la estimación de la infección con roya parda utilizando MSI obtenidas por Sentinel-2 se corresponden con los obtenidos por el UAV volando a baja altura, así como estos con las observaciones en el terreno realizadas por un especialista. Ello muestra que las MSI adquiridas por Sentinel-2 poseen potencialidad para detectar la severidad de la infección por roya parda en plantaciones de caña de azúcar.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a la empresa GEOCUBA por facilitar la realización de los vuelos que permitió obtener las MSI con el UAV. Así mismo al programa Copernicus de la ESA por posibilitarnos descargar libremente las MSI de Sentinel-2.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAY-DÍAZ, O. de la C.; MONTALVÁN DELGADO, J.; DELGADO PADRÓN, J.; PUCHADES IZAGUIRRE, Y.; RODRÍGUEZ LEMA, E.L.; ALFONSO-TERRY, I.: "Orange rust disease progress in different plantation cycles of sugarcane in Cuba", *Sugar Tech*, 22(6): 1057-1062, 2020, ISSN: 0972-1525, DOI: [10.1007/s12355-020-00843-w](https://doi.org/10.1007/s12355-020-00843-w).
- AMARASINGAM, N.; SALGADOE, A.A.; POWELL, K.; GONZALEZ, L.F.; NATARAJAN, S.: "A review of UAV platforms, sensors, and applications for monitoring of sugarcane crops", *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 26: 100712, 2022, ISSN: 2352-9385, DOI: [10.1016/j.rsase.2022.100712](https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100712).
- CAASI, O.; HONGO, C.; WIYONO, S.; GIAMERTI, Y.; SAITO, D.; HOMMA, K.; SHISHIDO, M.: "The potential of using Sentinel-2 satellite imagery in assessing bacterial leaf blight on rice in West Java, Indonesia", *Journal of International Society for Southeast Asian Agricultural Sciences*, 26(1): 1-16, 2020.
- ESA: *Sentinel-2 user handbook*, Ed. European Space Agency, 64 p., 2015.
- GRISHAM, M.P.; WARNKE, K.Z.; MAGGIO, J.R.; TODD, J.R.; DAVIDSON, W.; HAUDENSHIELD,

- J.S.; HARTMAN, G.L.; HERNANDEZ, E.; SCOTT, A.; COMSTOCK, J.K.: "First Report of Puccinia kuehnii Causing Orange Rust of Sugarcane in Texas, USA", *Plant disease*, 104(10): 2731, 2020, ISSN: 0191-2917, DOI: [10.1094/pdis-10-19-2117-pdn](https://doi.org/10.1094/pdis-10-19-2117-pdn).
- GRUBER, A.; DE LANNOY, G.; ALBERGEL, C.; AL-YAARI, A.; BROCCA, L.; CALVET, J.-C.; COLLIANDER, A.; COSH, M.; DAVIDSON, W.; DORIGO, W.: "Validation practices for satellite soil moisture retrievals: What are (the) errors?", *Remote sensing of environment*, 244: 111806, 2020, ISSN: 0034-4257, DOI: [10.1016/j.rse.2020.111806](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111806).
- KHARUF-GUTIERREZ, S.; HERNÁNDEZ-SANTANA, L.; OROZCO-MORALES, R.; ADAY-DÍAZ, O. de la C.; DELGADO MORA, I.: "Análisis de imágenes multispectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados", *Ingeniería electrónica, automática y comunicaciones*, 39(2): 79-91, 2018a, ISSN: 1815-5928, DOI: [10.18046/syt.v16i47.3221](https://doi.org/10.18046/syt.v16i47.3221).
- KHARUF-GUTIERREZ, S.; OROZCO-MORALES, R.; ADAY-DÍAZ, O. de la C.; PINEDA-RUIZ, E.: "Multispectral aerial image processing system for precision agriculture", *Sistemas y Telemática*, 16(47), 2018b, ISSN: 1692-5238.
- LASTOVICKA, J.; SVEC, P.; PALUBA, D.; KOBLIUK, N.; SVOBODA, J.; HLADKY, R.; STYCH, P.: "Sentinel-2 data in an evaluation of the impact of the disturbances on forest vegetation", *Remote Sensing*, 12(12): 1914, 2020, ISSN: 2072-4292, DOI: [10.3390/rs12121914](https://doi.org/10.3390/rs12121914).
- LÓPEZ-BRAVO, E.; PLACERES-REMIOR, A.; GONZÁLEZ-CUETO, O.; HERRERA-SUÁREZ, M.: "Monitoring of Sugarcane Cultivation Using Satellite Images", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31(3), 2022, ISSN: 2071-0054.
- LU, B.; DAO, P.D.; LIU, J.; HE, Y.; SHANG, J.: "Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture", *Remote Sensing*, 12(16): 2659, 2020, ISSN: 2072-4292, DOI: [10.3390/rs12162659](https://doi.org/10.3390/rs12162659).
- MÜLLEROVÁ, J.; BRŮNA, J.; BARTALOŠ, T.; DVOŘÁK, P.; VÍTKOVÁ, M.; PYŠEK, P.: "Timing is important: Unmanned aircraft vs. satellite imagery in plant invasion monitoring", *Frontiers in Plant Science*, 8: 887, 2017, ISSN: 1664-462X, DOI: [10.3389/fpls.2017.00887](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00887).
- RUAN, C.; DONG, Y.; HUANG, W.; HUANG, L.; YE, H.; MA, H.; GUO, A.; REN, Y.: "Prediction of wheat stripe rust occurrence with time series sentinel-2 images", *Agriculture*, 11(11): 1079, 2021, ISSN: 2077-0472, DOI: [10.3390/agriculture11111079](https://doi.org/10.3390/agriculture11111079).
- SEGARRA, J.; BUCHAILLOT, M.L.; ARAUS, J.L.; KEFAUVER, S.C.: "Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications", *Agronomy*, 10(5): 641, 2020, ISSN: 2073-4395, DOI: [10.3390/agronomy10050641](https://doi.org/10.3390/agronomy10050641).
- SOCA-MUÑOZ, J.L.; RODRÍGUEZ-MACHADO, E.; ADAY-DÍAZ, O. de la C.; HERNÁNDEZ-SANTANA, L.; OROZCO-MORALES, R.: "Spectral signature of brown rust and orange rust in sugarcane", *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (96): 9-20, 2020, ISSN: 0120-6230, DOI: [10.17533/udea.redin.20191042](https://doi.org/10.17533/udea.redin.20191042).
- SOM-ARD, J.; ATZBERGER, C.; IZQUIERDO-VERDIGUIER, E.; VUOLO, F.; AL-ZAHRANI, M.: "Remote sensing applications in sugarcane cultivation: A review", *Remote sensing*, 13(20): 4040, 2021, ISSN: 2072-4292, DOI: [10.3390/rs13204040](https://doi.org/10.3390/rs13204040).
- SWAMI, M.: "A new toolbox for mapping regulatory sites", *Nature Reviews Genetics*, 10(5): 282-283, 2009, ISSN: 1471-0056. DOI: [10.1038/nrg2584](https://doi.org/10.1038/nrg2584).
- THE MATH WORKS: *Mapping Toolbox™ User's Guide*, Mapping Toolbox™, 2009.
- VAUDOUR, E.; GOMEZ, C.; LAGACHERIE, P.; LOISEAU, T.; BAGHDADI, N.; URBINA-SALAZAR, D.; LOUBET, B.; ARROUAYS, D.: "Temporal mosaicking approaches of Sentinel-2 images for extending topsoil organic carbon content mapping in croplands", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96: 102277, 2021, ISSN: 1569-8432, DOI: [10.1016/j.jag.2020.102277](https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102277).
- WANG, J.; XIAO, X.; LIU, L.; WU, X.; QIN, Y.; STEINER, J.L.; DONG, J.: "Mapping sugarcane plantation dynamics in Guangxi, China, by time series Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat images", *Remote sensing of environment*, 247: 111951, 2020, ISSN: 0034-4257, DOI: [10.1016/j.rse.2020.111951](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111951).
- WANG, M.; LIU, Z.; BAIG, M.H.; WANG, Y.; LI, Y.; CHEN, Y.: "Mapping sugarcane in complex landscapes by integrating multi-temporal Sentinel-2 images and machine learning algorithms", *Land use policy*, 88: 104190, 2019, ISSN: 0264-8377, DOI: [10.1016/j.landusepol.2019.104](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104).
- XU, Z.; CAO, L.; ZHONG, S.; LIU, G.; YANG, Y.; ZHU, S.; LUO, X.; DI, L.: "Trends in global vegetative drought from long-term satellite remote sensing data", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 815-826, 2020, ISSN: 1939-1404. DOI: [10.1109/JSTARS.2020.2972574](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2972574).
- ZHENG, Q.; HUANG, W.; CUI, X.; SHI, Y.; LIU, L.: "New spectral index for detecting wheat yellow rust using Sentinel-2 multispectral imagery", *Sensors*, 18(3): 868, 2018, ISSN: 1424-8220, DOI: [10.3390/s18030868](https://doi.org/10.3390/s18030868).

Rubén Orozco-Morales, Electronics Engineer (1981), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), M.Sc. in Telecommunication Systems and Networks (1994), Universidad Politécnica de Madrid, Spain, Ph.D. (1998), Director of the Centro de Investigación de Métodos Computacionales y Numéricos en la Ingeniería (CIMCNI), UCLV.

Osmany de la C. Aday-Díaz, Ph. D., Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA Villa Clara), Cuba, e-mail: osmany.adad@inicavc.azcuba.cu.

Luis Hernández-Santana, Engineer in Automation (1981) by the UCLV, Ph. D., Electrical Engineering Faculty of UCLV, Santa Clara, Cuba. Professor of the Department of Automation of the Faculty of Electrical Engineering of the UCLV. Scientific leader of the Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) of the UCLV. e-mail: luishs@uclv.edu.cu.

Luis Enrique Hernández-Morales, MSc. in Automation. Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Vilas (UCLV), Cuba, e-mail: rorozco@uclv.edu.cu.

Iliá Lugo-Ruíz. Agronomist Engineer by UCLV (2005). M. Sc. in Sustainable Agriculture, UCLV (2016). Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA Villa Clara), Cuba, e-mail:

ilia.lugo@inicavc.azcuba.cu.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

CONTRIBUCIONES DE AUTOR: Conceptualización: R. Orozco-Morales, O. de la C. Aday-Díaz, L. Hernández-Santana. **Curación de datos:** R. Orozco-Morales, L. E. Hernández-Morales, Iliá Lugo-Ruíz.

Análisis formal: O. de la C. Aday-Díaz. **Investigación:** R. Orozco-Morales, O. de la C. Aday-Díaz.

Metodología: R. Orozco-Morales. **Software:** R. Orozco-Morales, L. E. Hernández-Morales. **Supervisión:** O. de la C. Aday-Díaz, L. Hernández-Santana. **Validación:** R. Orozco-Morales, O. de la C. Aday-Díaz, Iliá Lugo-Ruíz. **Redacción - borrador original:** R. Orozco-Morales. **Redacción - revisión y edición:** R. Orozco-Morales, O. de la C. Aday-Díaz.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)