ISSN 1729-3804

TELEDETECCIÓN DE ESTRÉS EN CULTIVOS DE CAÑA A TRAVÉS DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

Andrés Subert Semanat¹, Lídices Reyes Hung², David Castro Piñol³

1,2,3Universidad de Oriente, Ave. Las Américas s/n. Santiago de Cuba, Cuba.

¹ asubert@uo.edu.cu, ² lidices.reyes@eaaas.ays.cu, ³ davidpinol@uo.edu.cu

RESUMEN

El cultivo de la caña de azúcar como materia prima para la producción de azúcar constituye el eslabón primario de una gran cadena alimenticia. En el presente trabajo se desarrolló una propuesta de algoritmo para la teledetección de cultivos estresados de caña de azúcar utilizando técnicas del procesamiento digital de imágenes. Las imágenes utilizadas fueron capturadas en los campos de la zona central de Cuba utilizando una cámara multiespectral, montada en un Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT). Estas fueron luego procesadas en computadora, utilizando algoritmos sobre la base del paquete de procesamiento digital de imágenes de Matlab. La técnica propuesta usó operaciones matriciales entre las bandas, el método de Otsu y operaciones morfológicas y lógicas. Esta técnica contribuyó a diferenciar campos de caña de azúcar afectados por el estrés de los cultivos sanos.

PALABRAS CLAVES: Agricultura de precisión, teledetección, imágenes multiespectrales, procesamiento digital de imágenes.

REMOTE DETECTION OF STRESS IN CANE CROPS THROUGH MULTISPECTRAL IMAGES

ABSTRACT

The cultivation of sugar cane as a raw material for the production of sugar constitutes the primary link in a large food chain. In the present work, an algorithm proposal was developed for remote sensing of stressed sugarcane crops using digital image processing techniques. The images used were captured in the fields of central Cuba using a multispectral camera, mounted on an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). These were then processed on a computer, using algorithms based on the Matlab digital image processing package. The proposed technique used matrix operations between the bands, the Otsu method, and morphological and logical operations. This technique helped to differentiate sugarcane fields affected by stress from healthy crops.

INDEX TERMS: Precision agriculture, remote sensing, multispectral imaging, digital image processing.

1. INTRODUCCIÓN

El estrés en las plantas (enfermedades, maleza, sequía, inundaciones, déficit de fertilizante), ejercen una influencia negativa sobre su crecimiento y constituye un incentivo para la búsqueda de nuevas formas de mejora de los niveles de productividad y sostenibilidad en la industria agrícola [1]. El uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) agiliza los procesos de análisis y solución de estos problemas. Entre estas tecnologías y procedimientos se destaca el procesamiento digital de imágenes que hace posible la mejora en la toma de decisiones en la gestión de cultivos [2]. La investigación indaga si se puede diseñar un algoritmo para identificar el cultivo que se encuentra estresado y analizar su estado dede salud.

Manuscrito recibido:3-12-2021, aceptado:4-12-2021

Sitio web: http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele

Las imágenes multiespectrales permiten acceder a información muy útil, no disponible en las imágenes naturales, por lo que es fundamental para la identificación del cultivo estresado de manera satisfactoria. Con dichas imágenes es posible obtener los parámetros agrupados bajo el nombre de índices de vegetación (IV), los cuales se obtienen a partir de una combinación de bandas espectrales. El presente trabajo tiene como objetivo implementar un algoritmo que permita detectar el cultivo de la caña de azúcar estresado dentro de un área limitada de terreno utilizando el sistema de cómputo numérico MATLAB. Los algoritmos desarrollados producen resultados que serán interpretados en la determinación del vigor de la vegetación.

Para la validación de los resultados se utilizan programas profesionales que permiten implementar algoritmos de segmentación, georreferenciar imágenes, calcular los índices de vegetación, crear el ortomosaico¹, medir distancias, áreas y volúmenes, entre otros. Entre estas aplicaciones se encuentran QGIS, Agisoft Photoscan, Pix4d [3], Aspect Plus y MATLAB. Los resultados obtenidos de la aplicación de estos productos se pueden utilizar también en la detección precoz de enfermedades, la optimización de la aplicación de fertilizantes, agua, así como para la estimación del crecimiento de los cultivos [4]. Se evidencia que la fotogrametría espectral facilita la evaluación de extensas zonas agrícolas y ha mostrado excelentes resultados en cultivos como maíz, trigo, arroz y soya [5].

Otras instituciones como la Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (ETICA) en coordinación con el Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad "Marta Abreu" de Villa Clara, han dado pasos en el análisis del cultivo con imágenes multiespectrales, en los que se utilizan preferentemente distintos programas profesionales como QGIS, Agisoft Photoscan, Pix4d², [5,6]. Es así que el departamento de telecomunicaciones y electrónica de la Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones, Informática y Biomédica (FITIB) de la Universidad de Oriente ha concebido la idea de en implementar algoritmos para la detección de estrés en el cultivo de caña de azúcar a partir de imágenes multiespectrales, empleando el MATLAB.

Las contribuciones científicas fundamentales que se hacen en este trabajo son:

- Se logró implementar un algoritmo usando las herramientas de procesamiento digital de imágenes del software MATLAB, que detecta el cultivo estresado de la caña de azúcar a partir de imágenes multiespectrales. Este resultado está en la dirección de ampliar la soberanía tecnológica.
- Se pudo comprobar mediante la experimentación que usar la banda infrarrojo cercano, es mejor que utilizar NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), para segmentar la vegetación de interés del suelo.
- Se pudo comprobar con el cálculo del error cuadrático medio MSE, que el NDVI calculado en el MATLAB y el NDVI obtenido en software de referencia profesional Qgis tiene un error nulo.

2. ANÁLISIS PARA EL PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES EN LA AGRICULTURA.

Existe la necesidad de minimizar los insumos y alcanzar elevadas producciones en los cultivos. Uno de los enfoques para conseguir este objetivo es el uso de herramientas que permitan manejar bases de datos de información relevante de los cultivos para la gestión de actividades agrícolas [8].

Según [8] la agricultura de precisión consiste en el manejo diferenciado de los cultivos a partir del conocimiento de la variabilidad existente en una explotación agrícola. Se define como el "manejo de la variabilidad espacial y temporal a nivel de subparcela de campo, para mejorar el retorno económico y reducir el impacto ambiental". Se utilizan herramientas tecnológicas como los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), sensores planta-clima-suelo e imágenes (multiespectrales e híperespectrales) obtenidas a partir de satélites, aviones o los vehículos aéreos no tripulados (VANT).

¹ Es una fotografía que ha sido dividida en secciones rectangulares organizada como un mosaico a partir de una colección de imágenes.

² Un paquete de software de fotogrametría único para mapeo con drones

ISSN 1729-3804

Cuba es un país tropical con una agricultura basada en los cultivos del café, el plátano, el tabaco y principalmente la caña de azúcar. Estas cosechas constituyen un importante factor que favorece el desarrollo económico. Sin embargo, en las últimas décadas numerosos factores han provocado variabilidad en el clima trayendo consigo numerosas enfermedades que causan pérdidas económicas a gran escala [9]. En la mayoría de los casos, para su control se aplican herbicidas en todo el campo de forma uniforme e innecesaria, generando gastos elevados. Esta situación puede solventarse mediante un control localizado de las infestaciones presentes en el campo de cultivo [4].

El estudio de los cultivos a través de la percepción remota, implica una serie de consideraciones, procesos y técnicas, que tienen por objetivo la clasificación, caracterización, y estudio del comportamiento de la vegetación en su medio. Con ello emerge la posibilidad de relacionar variables físicas que se obtienen del suelo como pueden ser las propiedades fisiológicas y estructurales de un cultivo. Otras mediciones de los sistemas de reflectividad, temperatura y otros parámetros bioclimáticos pueden alimentar a un sistema de apoyo a la toma de decisiones en beneficio de la agricultura.

La teledetección se define como la ciencia de adquirir y procesar información de los objetos sin necesidad de entrar en contacto con ellos, gracias a la reflectancia, es decir, la interacción de la energía electromagnética que existe entre el sensor y el objeto estudiado. La clave en los análisis con sensores remotos está en el comportamiento de manera particular de los objetos a lo largo de las regiones del espectro electromagnético [2]. Cada elemento emite energía de una manera específica generando una huella única, conocida como firma espectral, lo que permite la identificación de los materiales que componen un objeto analizado. La reflectancia espectral es responsable del color o tono de la imagen fotográfica de un objeto dentro de la gama visible, a lo que se suma su reflectancia en otras longitudes de onda fuera del espectro visible [10] (véase la Fig.1).

La teledetección registra la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la tierra, permitiendo tomar imágenes de ésta en diversas regiones espectrales. Esto depende de la propiedad del material (estructural, química y física), la rugosidad de la superficie, el ángulo de incidencia, la intensidad y la longitud de onda [11].

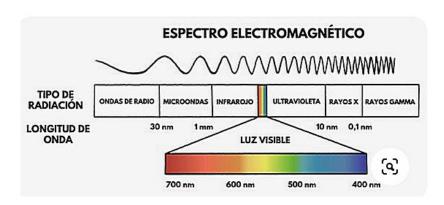


Figura 1: Espectro electromagnético con sus respectivas bandas. (Fuente: [12]).

La clave en los análisis con sensores remotos está en el comportamiento de manera particular de la reflectancia de los objetos a lo largo de las regiones del espectro electromagnético. La firma espectral ρ (λ) se define como la respuesta de distintos objetos a la radiación solar incidente en función de la longitud de onda λ , es la relación entre la energía electromagnética reflejada E_R (λ) y la energía electromagnética incidente E_I (λ). La reflectancia espectral es responsable del color o tono de la imagen fotográfica de un objeto dentro de la gama visible, a lo que se suma su reflectancia a otras longitudes de onda fuera del espectro visible [10]. Los datos de la interpretación de las imágenes

son valores de firmas espectrales que han sido ampliamente medidos y registrados, estos van a depender de la longitud de onda que incide sobre el objeto, se expresa mediante (1).

$$\rho(\lambda) = \frac{E_R(\lambda)}{E_I(\lambda)} \tag{1}$$

donde:

 E_R (λ) es la energía de la longitud de onda reflejada desde el objeto.

 $E_I(\lambda)$ es la energía de la longitud de onda incidente sobre el objeto

Una $\rho(\lambda)=1$ expresa que toda la radiación incidente se refleja y para $\rho(\lambda)=0$ representa que toda la radiación incidente es absorbida[13]. La respuesta espectral que tiene la vegetación sana muestra baja reflectancia en el espectro visible (400 a 700 nm). Las bandas (azul, verde y roja) en los pigmentos de las hojas absorben la mayor parte de la energía y en el espectro no visible (mayor de 750 nm). En la banda infrarrojo cercano (NIR) las células de las hojas que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía, como se observa en la Figura 2 2 y es causada por la estructura celular del follaje. Cuando la vegetación sufre algún tipo de daño o estrés (presencia de plagas, sequía, déficit de fertilizante, etc.), la cantidad de agua disminuye en las células. Por esta razón la reflectancia disminuye en el espectro no visible y aumenta en el espectro visible al tener menor absorción de clorofílica. Esto es debido a la fuerte absorción de luz por los pigmentos vegetales.

Un indicador de estrés vegetal es la absorción de luz y reflexión. Esta diferencia en la respuesta espectral puede contribuir a distinguir, a separar la vegetación sana de la estresada. El índice de vegetación de diferencia normalizada es una unidad de medida diseñada para tomar en cuenta la reflexión tanto en la banda del rojo como infrarrojo cercano [14].

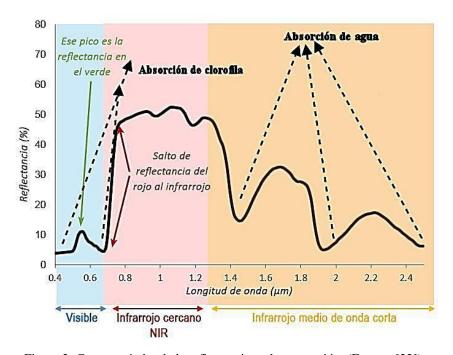


Figura 2: Curva estándar de la reflectancia en la vegetación. (Fuente: [22]).

La resolución espectral para un sistema de teledetección, está determinada por el número de bandas espectrales que el sensor puede detectar en todo el espectro electromagnético, en distintas longitudes de onda. Esta magnitud hace referencia al número de bandas espectrales que puede distinguir el sensor, así como al ancho que éstas poseen. A mayor resolución espectral, más provechosa será la información que pueda ser inferida.



ISSN 1729-3804

Las imágenes espectrales son aquellas que producen la figura de un objeto en función de la longitud de onda que esté reflejando (o emitiendo) el objeto en cuestión. Entre ellas se tienen, las imágenes multiespectrales e hiperespectrales [15].

Las imágenes multiespectrales (Véase Figura) capturan información entre 3 y 15 bandas espectrales de unos 100 nm de ancho. Éstas pueden estar separadas por filtros a longitudes de onda diferentes, no contiguas unas de otras, permitiendo la extracción de información de bandas del espectro visible y no visible [10]. Permite diagnosticar el estado de desarrollo de los campos de cultivo, la presencia de plagas u otras patologías como la carencia de nutrientes en el suelo. Estas imágenes, una vez analizadas por computadoras, permiten un diagnóstico sin el riesgo de cometer errores. El procesamiento de las imágenes multiespectrales en la agricultura proporciona una serie de ventajas en base a la toma de datos, su análisis e interpretación.

Entre las mejorías se puede realzar que los profesionales de la agricultura podrían saber las necesidades exactas de insumos, tanto a nivel global como específico. Igualmente permitiría la reducción del riesgo de la equivocación humana, menor contaminación, el ahorro de tiempo, así como una mejor precisión y versatilidad. Una de las acciones que se pueden acometer y que constituye el objetivo de la presente investigación es la identificación del cultivo estresado [16].

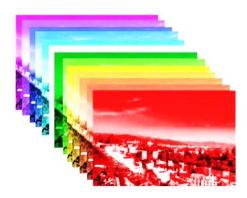


Figura 3: Imagen multiespectral. (Fuente: [17]).

Con dichas imágenes es posible obtener los índices de vegetación (IV), los cuales se refieren a un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los pixeles, usando dos o más bandas pertenecientes a la misma escena. Entre los diferentes índices de vegetación se tienen: el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de vegetación de suelo ajustado (SAVI) e índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI), entre otros. De estos el más conocido y utilizado es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)[18]. Es un índice usado para estimar la cantidad, calidad, estrés y desarrollo de la vegetación con base a la medición por medio de sensores remotos. Es el índice que más frecuentemente se ha usado en la predicción de rendimiento de cultivos. La intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético identifica diferentes procesos en la vegetación porque ésta es capaz de emitir o reflejar ciertas longitudes de ondas [19]. El cálculo determina el aumento de la reflectancia sobre las longitudes de onda visibles de la banda roja que proporciona información de la cantidad de energía absorbida por las plantas. La banda en el infrarrojo cercano actúa a la inversa (véase la Fig. 4) y lo normaliza dividiendo por la reflectancia total en esas longitudes de onda, como se observa en (2).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \tag{2}$$

donde: NIR es Espectroscopía de Reflectancia en el Infrarrojo cercano y RED es la Espectroscopía de Reflectancia de la parte roja visible.



Figura 4: Reflectancia de la vegetación en las bandas roja e infrarrojo cercano.

Estas reflexiones espectrales son en sí, cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral individual; por tanto, éstos toman valores entre un rango de 0 a 1. El NDVI varía como consecuencia entre (-1 y 1), valores por encima del 0.1 indican presencia de vegetación y cuanto más alto sea este índice el vigor de la vegetación es mejor [19], como se muestra en la **Figura** 5.

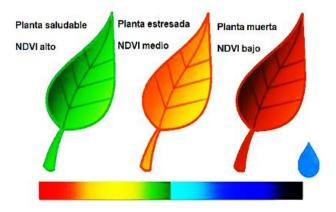
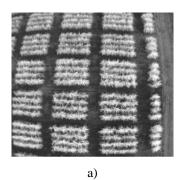


Figura 5: Comportamiento del NDVI en la vegetación.

En el procesamiento de imágenes digitales se aplica un conjunto de técnicas con el objetivo de extraer características útiles, comprimir, facilitar la búsqueda de información y mejorar la calidad de ésta. Como subcategoría o campo del procesamiento de señales digitales el procesamiento de imágenes digitales tiene muchas ventajas sobre el procesamiento de imágenes analógicas. Permite aplicar una gama mucho más amplia de algoritmos a los datos de entrada y puede evitar problemas como la acumulación de ruido y la distorsión de la señal durante el procesamiento. Una de estas técnicas es la segmentación de imágenes que es el proceso de descomponer una imagen en partes o regiones, es decir, los objetos de interés y el fondo, realizándose a partir de características locales que nos ayudan a diferenciar un objeto del fondo y objetos entre sí. En su totalidad están constituidas por regiones o zonas que tienen características homogéneas (nivel de gris, la textura, etc.). Generalmente estas regiones corresponden a objetos de la imagen [20]. Un ejemplo de segmentación aplicado a la Fig. 6a se puede apreciar en la Fig. 6b, en la que se ha utilizado el método de Otsu, el cual utiliza la varianza como criterio de dispersión de los niveles de gris. Se puede observar cómo se resalta el cultivo de la caña de azúcar sobre el suelo.

ISSN 1729-3804



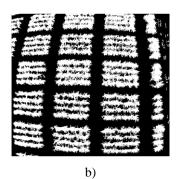


Figura 6: a) Imagen del cultivo caña de azúcar, b) Imagen segmentada.

3.- MATERIALES Y SOFTWARES UTILIZADOS PARA EL PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES.

Estas imágenes multiespectrales fueron obtenidas como fruto de la colaboración con el Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central de Villa Clara "Marta Abreu". Este trabaja en coordinación con la Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (ETICA), en el municipio de Ranchuelo de la provincia de Villa Clara, en el Km 246 de la Autopista Nacional. Las imágenes multiespectrales pertenecen a un campo experimental de caña de azúcar de las instalaciones de la ETICA.

Para la adquisición de este tipo de imágenes se utilizaron vehículos aéreos no tripulados (VANT). Para su selección es necesario conocer las características del mismo, ya que estos pueden variar dependiendo del contexto y del trabajo de fotogrametría que se quiera concebir. Si el vehículo posee una capacidad de carga reducida puede que le sea imposible realizar el vuelo de recolección de fotos con la cámara multiespectral durante el tiempo deseado, o que su velocidad de desplazamiento sea excesivamente elevada para la capacidad de captación de dicha cámara. El vehículo aéreo no tripulado (VANT) 3DR RTF X8+ es un pequeño dispositivo autónomo de ala rotatoria; su diseño específico permite un funcionamiento flexible y se puede implementar de forma segura para diferentes entornos y condiciones meteorológicas. Entre sus principales aplicaciones se encuentran la fotogrametría, la Agricultura de Precisión, el estudio medioambiental, la búsqueda y salvamento e informes de noticias [7].

La cámara multiespectral *Parrot Sequoia* (véase Figura 7) contiene un sensor multiespectral diseñado para la agricultura de precisión. Su arquitectura se fundamenta en tres razones principales: gran facilidad de uso, excelente precisión, tamaño y peso reducidos al máximo. Está diseñada para adaptarse a todos los tipos de VANT: aviones de ala fija y multirotor. Facilita el empleo de recolección de imágenes de sectores plantados en múltiples bandas espectrales, después de ser captadas se realizan análisis con programas que se utilizan para el procesamiento de imágenes [7].



Figura 7: Cámara multiespectral Parrot Sequoia. (Fuente: [2]).

Las imágenes multiespectrales en esta investigación fueron procesadas con el software profesional Agisoft Photoscan v1.2.3. Para la generación de los ortomosaicos se utilizó el MATLAB v9.4 R2018a. Con dicha aplicación se implementa un algoritmo para la detección de estrés de cultivo, mientras que el QGIS v3.6 se empleó para calcular el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Dicho índice se utiliza como referencia para evaluar la exactitud del resultado del cálculo del NDVI con las rutinas de código en MATLAB. Estos programas fueron utilizados en una computadora con un procesador Intel(R) Core (TM) i3 7100U CPU @ 2.4GHz con 4GB de memoria RAM con el sistema operativo Windows 10 a 64 bits.

Agisoft Photoscan es un software de pago que se utiliza en la fotogrametría aérea para diferentes aplicaciones de la industria como: la minería, la agricultura, el mapeo aéreo, la arqueología, la arquitectura y los efectos visuales. Permite procesar imágenes para la generación de ortomosaicos georreferenciados, modelos digitales del terreno y elevaciones. Es capaz de procesar miles de fotografías de forma local, lo cual es una solución apropiada para el procesamiento de datos sensibles.

La aplicación Quantum GIS (QGIS), es un Sistema de Información Geográfica (GIS) libre y de código abierto en los lenguajes de programación C++ y Python para implementar componentes adicionales y es compatible con Windows, MAC, OS X, Linux, Unix, MS Windows y Android. Permite manejar formatos ráster y vectoriales a través de sus bibliotecas, así como bases de datos. Posee una caja de herramientas ToolBox para el procesamiento de imágenes adquiridas por vehículos aéreos no tripulados. Sus módulos son desarrollados como algoritmo de procesamiento para QGIS, posibilitando a los usuarios la confección de mapas con múltiples capas con disimiles proyecciones, que pueden ser cargados en formatos variables y para distintos usos. Distintas variedades de imágenes de mapa de bits son compatibles y el software es capaz también de georreferenciar imágenes. Entre sus potencialidades está el cálculo de índices radiométricos de vegetación y la orto rectificación [21]. Este software fue utilizado como referencia para evaluar el resultado del cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada creado a través de MATLAB.

El objetivo de este procesamiento es permitir a los agricultores detectar de manera temprana el estrés del cultivo en plantaciones de caña de azucar carentes de agua, de fertilizantes o afectadas por el ataque de diferentes agentes patógenos. El proceso para la realización de la segmentación del cultivo estresado se presenta en el diagrama de flujo en la

Figura 8. Primero son leídos los ortomosaicos de las imágenes multiespectrales obtenidas por el software Agisoft Photoscan. Las bandas roja e infrarroja cercana son las utilizadas para realizar el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). El cálculo permite obtener con el método de segmentación basado en la umbralización, las máscaras binarias del cultivo de caña de azúcar estresado y el saludable. La banda infrarroja cercana y el cálculo del NDVI son segmentados con el Método de Otsu³, eliminando componentes conexos de menor área que no son significativos, para así obtener el cultivo de caña de azúcar de interés. El resultado de la banda infrarroja cercana segmentada es multiplicado con cada máscara binaria de la parte estresada y saludable, lo cual arroja el cultivo de la zona de interés estresada y saludable. Por último, se realiza una comparación del resultado del cálculo del NDVI obtenido en MATLAB con el del software profesional QGIS utilizando el error cuadrático medio (MSE) como parámetro.

³ Llamado así en honor a Nobuyuki Otsu que lo inventó en 1979, utiliza la varianza, que es una medida de la dispersión de los niveles de gris

ISSN 1729-3804

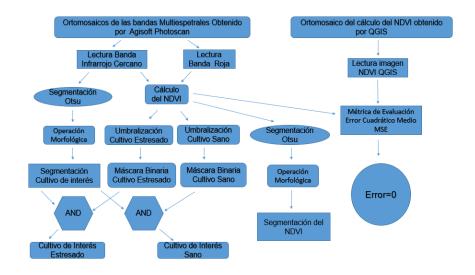


Figura 8: Diagrama de flujo para la detección del cultivo de caña de azúcar estresado.

Los ortomosaicos se leen desde la línea de comando de MATLAB (véase

Figura 9), incorporándolos así al espacio de trabajo de esta aplicación y a las variables correspondientes. Las imágenes que aparecen después del procesamiento con el software Agisoft Photoscan.

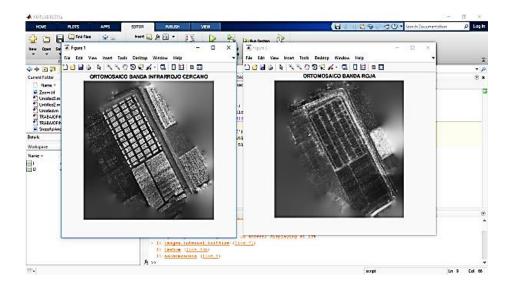


Figura 9: Lectura de las Bandas roja e infrarrojo cercano en MATLAB.

Este método demostró su utilidad en la identificación y evaluación del cultivo de caña de azúcar. Puede utilizarse como indicador del estrés a que está sometido el cultivo e indirectamente de la productividad del mismo. El cálculo en MATLAB se determina empleando las bandas (rojo e Infrarrojo cercano) e implementando la sintaxis que aparece en (2).

Con los valores obtenidos del cálculo del NDVI se puede detectar el cultivo sano y estresado. Mientras más próximo a la unidad se encuentre este índice mayor será el vigor de la vegetación analizada. Este índice se calcula para la imagen completa por lo que es necesario establecer un umbral para delimitar el píxel con vegetación sana de la estresada. La mayoría de los artículos revisados concuerdan que índices mayores que 0.4 corresponden a cultivo sano y aquellos en el rango entre 0.2 y 0.3 corresponden al cultivo estresado [1]. Aplicando la umbralización global al índice NDVI calculado se obtienen dos máscaras binarias que representa el contenido de todo el cultivo sano y estresado.

El Método de Otsu se usa para realizar automáticamente el umbral de imagen basado en clústeres. El algoritmo asume que la imagen contiene dos clases de píxeles siguiendo el histograma bimodal (píxeles de primer plano y píxeles de fondo), luego calcula el umbral óptimo que separa las dos clases para que su dispersión combinada (varianza intraclase) sea mínima, o equivalentemente (porque la suma de las distancias cuadradas por pares es constante), de modo que su varianza entre clases es máxima. Se aplica el umbral de Otsu, utilizando (3). Se convierte la imagen de intensidad gradual a imagen binaria con (4).

$$level = graythresh(I); (3)$$

$$I2 = imbinarize(I,level);$$
 (4)

Luego de segmentar las imágenes con el método Otsu se realizan eliminaciones por área de componentes conexos, con el objetivo de obtener sólo la mayor parte del cultivo de interés. Para eliminar pequeñas áreas se utilizó la función (5), que se encarga de eliminar todos los componentes conexos que tienen un área menor que 50 píxeles, de la imagen binaria BW.

$$BW2=bwareaopen(BW(:,:,1),50); (5)$$

ISSN 1729-3804

Para la detección del cultivo de interés de caña de azúcar estresado y saludable se realiza la operación lógica AND entre la segmentación de la banda infrarroja cercana y cada máscara binaria (estresada y saludable), ello se realiza a través de (6) y (7).

4.- RESULTADOS DE DETECCIÓN DE ESTRÉS DEL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR.

Estas imágenes multiespectrales fueron procesadas con el software Agisoft Photoscan, para obtener los ortomosaicos de las bandas de interés para su posterior cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada en el Matlab. En la figuras 10a y 10b se pueden visualizar los ortomosaicos a partir de las imágenes captadas por el VANT, corregidas las distorsiones geométricas, ortorectificadas y organizadas como mosaicos a partir de la colección de las bandas de las imágenes multiespectrales.

A partir del ortomosaico de la banda roja se evidencia una baja reflectancia de la vegetación de caña de azúcar, sin embargo, utilizando el correspondiente al infrarrojo cercano se manifiesta una mayor reflectancia por parte de la vegetación, distinguiéndose el suelo del cultivo de caña de azúcar. La relación entre estas dos bandas se utiliza en los procesos de determinación de estrés en los cultivos.

Con los ortomosaicos obtenidos de las bandas roja e infrarroja cercana se realiza el cálculo del NDVI utilizando el MATLAB. En la Fig. 1c se puede observar el resultado del cálculo del NDVI con una paleta de colores 'jet' del MATLAB . Los resultados están dentro del intervalo entre cero y uno al corresponder con los valores del NDVI, para un pixel dado en la región de interés. Esto facilita la interpretación directa de los parámetros biofísicos del cultivo. Se pueden estimar las variaciones del vigor vegetal y los niveles de clorofila del cultivo de caña de azúcar.

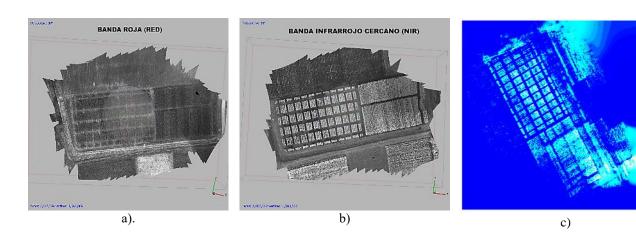
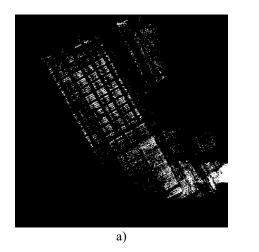


Figura 10: Ortomosaico a) en la banda roja, b) infrarroja, c) infrarroja con el NDVI superpuesto.

Con estos ortomosaicos obtenidos se puede clasificar todo el cultivo en saludable y estresado utilizando la umbralización binaria. En la Fig. 11a se puede percibir la máscara binaria para la cual cada pixel de color blanco es clasificado como cultivo saludable. Puede verse que la mayoría están marcada en la región de interés del cultivo de la caña de azúcar. En la Fig. 11b se muestra lo contrario; en la máscara binaria cada pixel marcado de color blanco representa el cultivo de caña de azúcar estresado. Es importante destacar como se percibe mayor cantidad de pixeles asociados a los de caña de azucar estresada que a la sana.



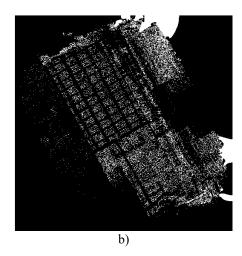


Figura 11: Máscara binaria del cultivo de caña de azúcar a) saludable, b) estresado.

En una primera aproximación se segmenta la imagen del NDVI ya que ésta brinda la información relacionada con la salud del cultivo. Para ello se emplea el Método de Otsu y se procesa para eliminar áreas de objetos menores de 50 píxeles. El resultado se puede apreciar en la Fig. 12a, en la que se observa como existen regiones que no pertenecen al cultivo de interés, razón por la que se decidió experimentar con la banda NIR.

En la banda NIR (véase la Fig. 12b) se puede observar un mayor contraste entre la vegetación y el suelo, esto es ventajoso para usar el Método de Otsu. En la Fig. 12c se muestra la segmentación del cultivo de interés, en la que se permite distinguir con mejor calidad que en la Fig. 12b. Ésta es la razón por la que se elige esta banda para segmentar el cultivo de interés.

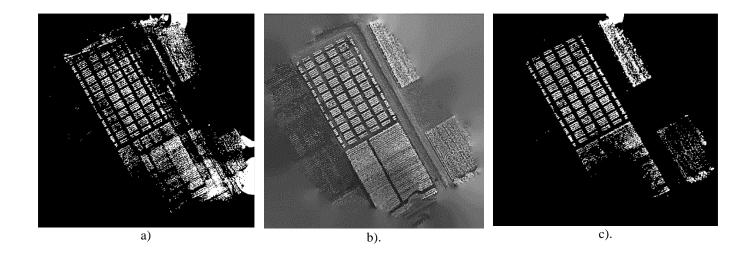


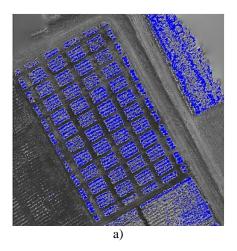
Figura 12: a) Segmentación del NDVI del cultivo de caña de azúcar, b) Banda infrarrojo cercano, c) cultivo de interés.

En la Fig. 13a se expone el cultivo de interés de la caña de azúcar marcado de color azul. Para diferenciar la zona de cultivo sano del estresado se efectúan multiplicaciones lógicas entre imagen correspondiente a la banda infrarroja cercana segmentada y las máscaras binarias de los cultivos saludable y estresado. En la Fig. 13b se muestra sombreado en verde el cultivo saludable y en rojo el cultivo estresado constitiuyendo el resultado más importante de esta propuesta. Se debe destacar la existencia de considerables áreas de cultivo estresado (coloreado en rojo), esto significa



ISSN 1729-3804

que estas zonas son detectables mediante este procesamiento de las bandas multiespectrales que de otra forma no sería perceptibles para la visión humana.



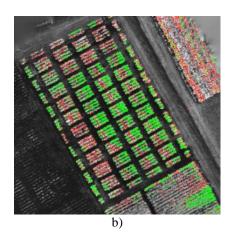


Figura 13: a) Detección del cultivo de interés de la caña de azúcar, b) cultivo estresado y saludable.

Para evaluar estos resultados se utiliza la imagen del NDVI obtenida del cálculo programado en Matlab y la imagen NDVI obtenida por el software profesional QGIS como referencia. Esto se realiza ya que no se cuenta con una imagen de referencia o *ground truth* de zonas estresadas y sanas del cultivo. Además, el cálculo NDVI es la base principal del método propuesto. Para medir la semejanza entre ambos NDVI se utilizó el error cuadrático medio (MSE) definido en (8).

$$MSE = \frac{1}{m*n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2$$
 (8)

donde:

m y n son las dimensiones de las imágenes, éstas deben ser las mismas.

I y K son las dos imágenes a comparar, NDVI en QGIS y NDVI en MATLAB.

i y j son las filas y las columnas de las coordenadas de los píxeles.

Esta evaluación mostró como resultado MSE = 0 error entre las imágenes del NDVI en MATLAB y QGIS. Así quedó demostrado que se garantiza la confiabilidad de los resultados obtenidos en la propuesta implementada en MATLAB.

5.- CONCLUSIONES

En este trabajo se logró diseñar e implementar una propuesta de algoritmo que permite detectar el cultivo estresado de la caña de azúcar en imágenes multiespectrales usando las herramientas del *toolbox* de procesamiento digital de imágenes del software MATLAB. Esta propuesta constituye un paso significativo para el desarrollo automatizado de la agricultura en Cuba, ya que hasta el momento no se contaba con técnicas de teledetección y que permitieran discernir con antelación el estrés en este cultivo. La efectividad del algoritmo estuvo avalada por el cálculo del error cuadrático medio MSE entre el NDVI calculado en el MATLAB y el NDVI obtenido por el software de referencia profesional QGIS. El mayor contraste observado entre la vegetación y el suelo que revela la banda NIR permiten recomendarla para la segmentación del cultivo sano y el suelo. Para futuros trabajos, se sugiere la experimentación con mayor cantidad y diversidad de imágenes a manera de comprobar la robustez de la propuesta.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a los integrantes del Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad "Marta Abreu" de Villa Clara, instituciones que apoyaron el desarrollo del trabajo por los datos entregados para el análisis, tiempo concedido a los autores para el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] Rueda Calier F, Peñaranda Mallungo LA, Velásquez Vargas WL, Díaz Báez SA. Application of a method of analysis of remote sensing data obtained by targeting the estimated productivity in cane for quantifying panela NDVI (normalized difference vegetation index). Ciencia y Tecnología Agropecuaria. 2015;16(1):25–40.
- [2] Samy Kharuf-Gutierrez, Luis Hernández-Santana, Rubén Orozco-Morales, Osmany de la C. Aday Díaz, Irenaldo Delgado Mora. Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. Revista de Ingenieria Electrónica, Automática y Comunicaciones. 2018;XXXIX(2):79–91.
- [3] DA SILVA DC, TOONSTRA GWA, SOUZA HLS, PEREIRA TÁJ. Qualidade de ortomosaicos de imagens de VANT processados com os softwares APS, PIX4D e PHOTOSCAN. V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife-PE. 2014;
- [4] Sona G PD, Pinto L PD, Masseroni D OB. UAV multispectral survey to map soil and crop for precision farming applications. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016;
- [5] Walsh OS, Shafian S, Marshall JM, Jackson C, McClintick-Chess JR, Blanscet SM. Assessment of UAV Based Vegetation Indices for Nitrogen Concentration Estimation in Spring Wheat. Advances in Remote Sensing. 2018;
- [6] Kharuf-Gutierrez S, Orozco-Morales R, Díaz O de la CA, Ruiz EP. Sistema de procesamiento de imágenes multiespectrales aereas para agricultura de precision. Sistemas & Telematica. 2018;16(47):45-59..
- [7] Kharuf Gutierrez S. Análisis de imágenes multiespectrales de sembrados de caña de azúcar adquiridas con vehículos aéreos no tripulados [Tesis doctoral]. Universidad Central «Marta Abreu»; 2018.
- [8] Martí SP de. Agricultura de precisión y protección de cultivos |. Revista de ingieneria 47. 2018;10–9.
- [9] Khaliq A, Comba L, Biglia A, Ricauda Aimonino D, Chiaberge M, Gay P. Comparison of satellite and UAV-based multispectral imagery for vineyard variability assessment. Remote Sensing. 2019;11(4):436.
- [10] Habibie MI, Noguchi R, Shusuke M, Ahamed T. Land suitability analysis for maize production in Indonesia using satellite remote sensing and GIS-based multicriteria decision support system. GeoJournal. 2019;1–31.
- [11] Robertson S, Azizpour H, Smith K, Hartman J. Digital image analysis in breast pathology—from image processing techniques to artificial intelligence. Translational Research. 2018;194:19–35.
- [12] Cabrera JBZ, Quevedo-Guerrero JN, León-Salto MB, Mora-Encalada CP. Algoritmo Semiautomático para Mapear Incendios Forestales y Estimar la Recuperación Vegetal Mediante Imágenes Landsat-8: Semi-Automatic Algorithm to Map Forest Fires and Estimate Vegetation Recovery Using Landsat-8 Images. Revista Tecnológica-ESPOL. 2020;32(2):35–42.
- [13] Lukac R. Perceptual digital imaging: methods and applications. CRC Press; 2017.
- [14] Popović T, Latinović N, Pešić A, Zečević Ž, Krstajić B, Djukanović S. Architecting an IoT-enabled platform for precision agriculture and ecological monitoring: A case study. Computers and electronics in agriculture. 2017;140:255–65.
- [15] Roman-Gonzalez A, Vargas-Cuentas NI. Análisis de imágenes hiperespectrales. Revista Ingenieria & Desarrollo. 2013;9(35):14-7.
- [16] Gómez Rivera, AF, Velázquez Clavijo F, Jiménez López AF. Agricultura de precisión y sensores multiespectrales aerotransportados [Internet]. Disponible en: http://cici.unillanos.edu.co/media2016/memorias/CICI_2016_paper_106.pdf.

ISSN 1729-3804

- [17] Pedrali LD. Aplicação de sensor multiespectral a bordo de VANT na determinação de graus de severidade de Erwinia psidii em Eucalyptus urograndis [Internet] [Dissertação de Mestrado]. [Santa Catarina, Brasil]: Universidade Federal de Santa Maria; 2017. Disponible en: http://repositorio.ufsm.br/handle/1/13558
- [18] Posada-Asprilla W, Medina-Sierra M, Cerón-Muñoz M. Estimación de la calidad y cantidad de pasto kikuyo (Cenchrus clandestinum (Hochst. ex Chiov.) Morrone) usando imágenes multiespectrales. Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica. 2019;22(1).
- [19] Arias DM, Roldan MVHP, Vélez MU. Uso del índice normalizado de vegetación para la elaboración de planos de cultivo. Opuntia Brava. 2019;11(2):261-5..
- [20] Gavhale KR, Gawande U. An overview of the research on plant leaves disease detection using image processing techniques. IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE). 2014;16(1):10-6.
- [21] Shelestov AY, Kravchenko A., Skakun S., Voloshin S. Geospatial information system for agricultural monitoring. Cybernetics and Systems Analysis. 2013;49:124–32.
- [22] E. por N. Morales, "NDVI y por qué las plantas son verdes", Agriculturers.com | Red de Especialistas en Agricultura, dic. 20, 2017. https://agriculturers.com/ndvi-y-por-que-las-plantas-son-verdes/ (accedido dic. 03, 2021).

SOBRE LOS AUTORES

Andrés Subert Semanat: Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica desde 1982. Doctor en Telecomunicaciones por la Escuela Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Valladolid desde 1997. España y Profesor Titular del Departamento de Telecomunicaciones de la Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. asubert@uo.edu.cu No. ORCID: 0000-0002-3610-5512. Sus intereses de investigación son la agricultura de precisión y los sistemas y redes de telecomunicaciones.

Lídices Reyes Hung: Ingeniera en Telecomunicaciones y Electrónica, desde 2019, trabaja en Aguas Santiago, Santiago de Cuba, Cuba, lidices.reyes@eaaas.ays.cu . ORCID:0000-3793-3819

David Castro Piñol: Obtuvo el grado con honores de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica en el 2015 en la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. davidpinol@uo.edu.cu Desde entonces ha trabajado en la Universidad de Oriente, primero en el Centro de Estudios de Neurociencias, Procesamiento de Imágenes y Señales y actualmente en estudios de maestría en el extranjero. No. ORCID: 0000-0003-2906-6532. Sus intereses de investigación son el procesamiento de imágenes digitales para aplicaciones de teledetección, compresión y medicina.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses de los autores o de las instituciones a las cuales pertenecen en relación al contenido del artículo aquí reflejado.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Andres Subert: Líder, Metodología, Conceptualización, Administración de proyecto, Adquisición de fondos, Supervisión.
- Lídices Reyes: Curación de datos, Investigación, Análisis formal, redacción.
- David Castro: Supervisión, Redacción, revisión.

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-

NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

