

TELEDETECCIÓN EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN: ESTADO DEL ARTE DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Recibido: 15/septiembre/2020
Aceptado: 29 de septiembre de 2020

A. M. Piedad Rubio¹
D. R. Hernández López²
H. R. Lárraga Altamirano³
E. Zacarías González⁴

RESUMEN

El presente documento describe el estado del arte de los índices de vegetación más utilizados en el monitoreo de cultivos, permite establecer las bases para el desarrollo de nuevas investigaciones conducentes a la aplicación de la Agricultura de Precisión (AP). El método utilizado fue la investigación documental cuyo objeto de estudio lo constituyeron 25 investigaciones integradas por artículos científicos, tesis de grado, libro y publicaciones técnicas en revistas especializadas en el período comprendido entre los años 1994 al 2018, siendo la unidad de análisis cada uno de estos estudios. Se utilizó como instrumento de recolección de información una matriz para la selección de investigaciones. Las categorías de análisis fueron: historia, contextualización, uso, tipos, líneas de conclusiones y recomendaciones, en el análisis de la información se utilizó una matriz de análisis de las investigaciones según categorías y se basó en la hermenéutica. En los resultados se identificaron 11 índices de la literatura consultada, los cuales se describieron para conocer las características y funcionalidades de cada índice. El estado del arte permitió identificar el índice de vegetación más utilizado para ayudar en el monitoreo de la vegetación.

PALABRAS CLAVE: índice de vegetación, agricultura de precisión, tipos de índices, monitoreo, cultivos.

ABSTRACT

This document describes the state of the art of the most used vegetation index in crop monitoring, it allows establishing the basis for the development of new research leading to the application of Precision Agriculture (PA). The method used was the documentary research whose object of study was constituted by 25 researches integrated by scientific articles, degree thesis, book and technical publications in specialized magazines in the period from 1994 to 2018, being the unit of analysis each one of these studies. A matrix was used as an instrument of information collection for the selection of researches. The categories of analysis were: history, contextualization, use, types, lines of conclusions and recommendations. In the analysis of the information, a matrix of analysis of the investigations according to categories was used and it was based on hermeneutics. In the results, 11 indexes of the consulted literature were identified, which were described to know the characteristics and functionalities of each index. The state of the art allowed identifying the most used vegetation index to help in vegetation monitoring.

KEY WORDS: vegetation index, precision agriculture, types of indexes, monitoring, crops.

¹ Profesora de Tiempo Completo. Tecnológico Nacional de México, Campus Ciudad Valles, ana.piedad@tecvalles.mx

² Profesora de Tiempo Completo. Tecnológico Nacional de México, Campus Ciudad Valles, dalia.hernandez@tecvalles.mx

³ Profesor de Tiempo Completo. Tecnológico Nacional de México, Campus Ciudad Valles, hugo.larraga@tecvalles.mx

⁴ Residente de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales. Tecnológico Nacional de México, Campus Ciudad Valles, 15690189@tecvalles.mx

INTRODUCCIÓN

En el presente artículo se estudian los índices de vegetación, los tipos, sus ventajas y limitaciones, así como el uso de los mismos en diferentes cultivos. Un índice de vegetación puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Gilbert, Younis, Garcia-Haro, & Melia, 1997). También, corresponde a un número generado por alguna combinación de bandas espectrales y que puede tener alguna relación con la cantidad de la vegetación presente en un píxel dado. Estos índices, son utilizados para mejorar la discriminación entre el suelo y la vegetación, reduciendo el efecto del relieve en la caracterización espectral de las diferentes cubiertas. Los valores bajos de los índices de vegetación, usualmente indican vegetación poco vigorosa, mientras que los valores altos, indican vegetación muy vigorosa.

Los índices de vegetación, o índices verdes, son transformaciones que implican efectuar una combinación matemática entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen (Speranza & Zerda, 2005). Son adimensionales e indican el vigor de la vegetación a partir de su clorofila. Los índices de vegetación pueden ser cualitativos o cuantitativos y han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la vegetación. Como una gran variedad de factores afecta directamente a la producción de biomasa, los índices pueden emplearse para determinar la influencia de dichos factores en una zona. Así, pueden usarse para determinar el efecto sobre la biomasa de sequías, anegamientos, incendios, desmontes, granizo, plagas, o deficiencias nutricionales (Towers, 2002).

Para poder trabajar los índices es necesario utilizar previamente la teledetección, la cual es una técnica que permite obtener información de la superficie terrestre a través de instrumentos sin estar en contacto con ella (Schowengerdt, 2006). El uso de éstas nuevas tecnologías se aplica en la agricultura de precisión, considera: mapas de rendimiento, drones, sensores, imágenes satelitales, aplicaciones variables, etcétera, pero se puede considerar como un proceso de toma de decisiones facilitado por herramientas tecnológicas. La agricultura de precisión es un proceso continuo de toma de decisiones y mejoras, que se basa en la reducción del tamaño de las unidades de toma de decisiones buscando mejorar el manejo de las relaciones cultivo/ambiente y la optimización del uso de los recursos naturales e insumos (Martínez & López, 2019).

Historia

La cobertura vegetal fue uno de los primeros focos de la investigación de la evaluación y manejo de recursos naturales, usando imágenes de satélite, especialmente a partir del lanzamiento de la serie LANDSAT en 1972. Los sistemas satelitales de observación de la Tierra, LANDSAT, SPOT y NOAA entre otros, ofrecen imágenes multitemporales que son usadas ampliamente, para evaluar y monitorear el estado de la vegetación, en los niveles global, regional, nacional y local. Para lograr esto, la información satelital entregada a través de una imagen multibanda, debe ser categorizada y agrupada, para permitir discriminar un área con características particulares de otra. Una forma de expresar esta categorización o agrupamiento es mediante la elaboración de índices (Muñoz, 2013).

Las plataformas satelitales proporcionan una serie de bandas espectrales, entre dichas plataformas se encuentra la plataforma MODIS. Una de las utilidades que dichas plataformas

proporcionan es la posibilidad de analizar los índices de vegetación, que permite enfatizar y extraer propiedades de los objetos relacionadas con la vegetación en tanto que minimizan la influencia de factores distorsionantes, tales como el suelo, la radiación solar, el ángulo de elevación del Sol y la propia atmósfera (Huesca, 2007; Chuvieco, 1995).

Estos índices se calculan píxel a píxel, teniendo en cuenta que la vegetación vigorosa absorbe radiación en la zona del visible, especialmente en la banda del Rojo (R) con longitudes de onda entre 0.6-0.7 μm , en tanto que refleja gran parte de la que incide en el infrarrojo cercano (Near InfraRed, NIR) con longitudes de onda comprendidas entre el 0.7 y 1.0 μm . La vegetación afectada por clorosis, por infección o por senescencia, ofrece, por el contrario, una signatura espectral más plana, con valores de reflectancia más parecidos en ambas bandas, que llegan a ser prácticamente iguales cuando la vegetación está marchita o cuando se trata de suelos desnudos y por tanto carentes de vegetación (Ruiz, 2011).

En la última década el utilizar RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) ha revolucionado la realización de trabajos aéreos orientados a la toma de imágenes para aplicaciones agrícolas (Paruelo, 2008). Estas herramientas sirven de apoyo a un número creciente de estudios en campos muy diversos, entre ellos la agricultura de precisión. Esto implica una adecuada variabilidad espacial y temporal, así como información georreferenciada para mejorar la producción agrícola (Meneses & Mosquera, 2015). Los recientes avances en monitoreo de culturas agrícolas y AP de la producción primaria y la cartografía de la cubierta terrestre pueden hacer posible el monitoreo y la estimación precisa del estado del cultivo de caña de azúcar en una región determinada a escala predio o unidad productiva, debido a la longevidad del cultivo, el bajo costo adquisición de imágenes, su cobertura espacial y la posibilidad de generar los índices de sus bandas espectrales (Zhang, Ander, Tan, Huang, & Myneni, 2005).

METODOLOGÍA

Se realizó una investigación documental orientada a analizar el estado del arte en el tema de índices de vegetación. El objeto de estudio lo constituyeron 25 investigaciones integradas por artículos científicos, tesis de grado, libros y publicaciones técnicas en revistas especializadas en el período comprendido entre los años 1994 al 2018, siendo la unidad de análisis cada uno de esos estudios **Tabla No. 1**.

Tabla No.1 Investigaciones objeto de estudio

Tipo de Documento	Tesis	Artículos Científicos	Publicaciones técnicas	Libro
Cantidad	10	9	5	1

Se utilizó como instrumento de recolección de información una matriz para la selección de investigaciones **Tabla No. 2**, en la cual se registraron los datos esenciales de cada trabajo revisado. Se elaboró una segunda matriz para el análisis de las investigaciones, dividida en categorías las cuales fueron: historia, contextualización, uso, tipos, líneas de conclusiones y recomendaciones **Tabla No. 3**. El análisis de la información de la segunda matriz se basó en la hermenéutica.

Tabla No.2 Matriz de selección de las investigaciones revisadas

Título de la publicación	Autor o autores	Año de publicación	Referencia completa de la obra (datos editoriales)	Enlace o alojamiento en Internet	Tipo de archivo (imagen, vídeo, artículo científico, ensayo, tesis u otros)	Resumen de la publicación
25 investigaciones						

Tabla No.3 Matriz de análisis de las investigaciones revisadas

Historia	Contextualización	Usos	Tipos	Líneas de conclusiones y recomendaciones
25 investigaciones				

RESULTADOS

El uso de los índices de vegetación es cada vez más común en el ámbito de la agricultura, para determinar cuál o cuáles pudieran ser los más adecuados, se debe elegir en función de lo que se quiera obtener, de las necesidades específicas, así como el tipo de cultivo y la etapa en la que se encuentre, por lo tanto, es necesario conocer las características y funcionalidades de cada índice. Se identificaron 11 índices de la literatura consultada, los cuales se enlistan en la **Tabla No. 4** y posteriormente se describen a detalle:

Tabla No. 4 Índices de vegetación considerados en el estudio

1	NDVI	Normalized Difference Vegetation Index ó Índice Normalizado de Vegetación
2	GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index ó Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde
3	RVI	Ratio Vegetation Index
4	GVI	Green Vegetation Index o Índice Verde de Vegetación
5	NGRDI	Normalized Green Red Difference Index ó Índice de Diferencia Verde Rojo Normalizado
6	RG	Red Green ó Rojo Verde
7	DVI	Difference Vegetation Index ó Índice de Diferencia de Vegetación
8	SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index ó Índice de vegetación ajustado al suelo
9	TSAVI	Turned Soil Adjusted Vegetation Index ó Índice ajustado al suelo transformado
10	OSAVI	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index ó Índice de Vegetación Ajustado de Suelo Optimizado Verde
11	DSWI	Disease and Stress Water Index ó Índices de estrés de la enfermedad y el agua

NDVI

Este índice, desarrollado en la década de los 70's, considera la cantidad de energía roja que es absorbida por la clorofila y la cantidad de energía del infrarrojo cercano que es reflejada por la estructura celular de la hoja.

Este índice se define de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{ROJO}}{\text{NIR} + \text{ROJO}}$$

Donde: el NIR y el Rojo son las respectivas reflectancias en las bandas del infrarrojo cercano y el rojo, respectivamente. El cálculo de esta relación entrega valores entre -1 y +1, que correlacionan directamente con la biomasa o vigor del cultivo.

Con una alta biomasa o vigor, el valor de NDVI se acerca a la unidad, mientras que en suelo desnudo los valores se acercan a cero. Valores negativos generalmente corresponden a nieve, nubes, agua, etc. Áreas de alto vigor (densidad vegetal) poseen una mayor reflectancia en el infrarrojo cercano y una menor reflectancia en el rojo, debido a esto poseen un mayor índice NDVI (Esser & Ortega, 2003).

(Benedetti & Rossini, 1993) consideran al NDVI como un buen estimador de la biomasa, es universalmente usado y ha resultado el más consistente para monitoreo de vegetación en los ambientes y situaciones más diversos; se utiliza ampliamente para evaluar de manera rápida, a escala regional, la productividad de los cultivos, con un nivel aceptable de precisión y tiene correlación con el contenido de humedad de la planta y puede ser aplicado —incluso en la agricultura de precisión— en el control de los cultivos, debido a que las observaciones espectrales del follaje pueden, por tanto, usarse para monitorear las variaciones del crecimiento; las que subsecuentemente, pueden utilizarse como indicadores de estrés del cultivo e indirectamente de la productividad del cultivo (Xavier, Vettorazzi, & Machado, 2004).

Es el más usado porque retiene la habilidad de minimizar los efectos topográficos y a su vez producir una escala de medida lineal. Considerando que los errores de división por cero son reducidos en gran medida. La escala de medida posee la apreciada propiedad de oscilar de -1 a 1 con el 0 representando el valor aproximado de la falta de vegetación. Los valores negativos representan las superficies sin vegetación. Es estable como para permitir comparaciones significativas de cambios estacionales e interanuales del crecimiento y actividad de la vegetación. El principal problema de este índice es la influencia que ejercería el suelo sobre la reflectancia en el rojo y el infrarrojo y que puede enmascarar la de la vegetación (Índices de vegetación y transformación Tasseled Cap, 2015).

El NDVI presenta problemas en la estimación de la cubierta vegetal, por ejemplo, este índice comienza a saturar cuando la cubierta vegetal es superior al 50% (Gill, Phinn., Armston, & Pailthorpe, 2009), y no es sensible al verde cuando la cubierta vegetal es baja. Por este motivo puede sobre o subestimar la cubierta vegetal, dando información errónea en algunas zonas (Zhongminga, Lees, Feng, Wanning, & Haijing, 2009).

GNDVI

Éste es una variante del NDVI que utiliza la banda del verde en lugar de la del rojo (Kemerer, Di Bella, Melchiori, Benench, & Alvarez, 2007) . Su fórmula es la siguiente:

$$\text{GNDVI}=\text{NIR}-\text{green}/\text{NIR}+\text{green}$$

Este índice se ha mostrado muy útil para estimar el rendimiento del cultivo de arroz inundado.

RVI

(Person & Miller, 1972) son considerados como los pioneros de la historia de los índices de vegetación al proponer el primer índice, éste es el RVI (Ratio Vegetation Index), como su nombre indica, es el cociente entre la reflectividad en el infrarrojo cercano y la reflectividad en la banda del rojo, estando este basado en la diferencia espectral en la vegetación en las longitudes de onda del rojo y del infrarrojo cercano.

$$\text{RVI}=\text{NIR}/\text{RED}$$

Se utiliza principalmente en estimaciones de biomasa del área foliar. Es mejor en cuanto a la determinación de áreas donde no se encuentra vegetación o suelos descubiertos (Juzga, 2016)

GVI

(Green Vegetation Index) Índice de vegetación verde o como también se le conoce GRVI (Green Ratio Vegetation Index), (Sripada, Heiniger, White, & Meijer, 2006) como su nombre indica, es el cociente entre la reflectividad en el infrarrojo cercano y la reflectividad en la banda del verde.

$$\text{GVI}=\text{NIR}/\text{GREEN}$$

Este índice, está compuesto por una serie de algoritmos que corrigen los problemas que presenta el índice NDVI. La principal ventaja del GVI por sobre el NDVI, es que las imágenes GVI están debidamente calibradas, para eliminar la influencia de la humedad del suelo o la atmósfera (Esser & Ortega, 2003).

NGRDI

Este índice es el (Normalized Green Red Difference Index). también llamado VIgreen (VIg), Vegetation Index Green (Gitelson, Kaufman, Stark, & Rundquist, 2002).

$$\text{NGRDI}=\text{GREEN}-\text{RED}/\text{GREEN}+\text{RED}$$

El cálculo del NGRDI implica el uso de una simple fórmula con dos bandas, el verde (GREEN) y el rojo (RED).

RG

Se pretende calcular un índice que excluya la banda del infrarrojo cercano y ver la relación entre las bandas rojo y verde, con el índice de vegetación normalizado NDVI (Cetina, 2017)

$$\text{RG}=\text{RED}/\text{GREEN}$$

DVI

Es sugerido por (Richardson & Wiegand, 1977) como un algoritmo para el cálculo del índice de vegetación más fácil. La particularidad del DVI es que pesa la banda infrarroja cercana por la pendiente de la línea del suelo.

$$DVI = gMMS7 + MSS5$$

Donde: g = la pendiente de la línea del suelo

$MSS7$ = reflectancia en la banda 2 infrarroja cercana

$MSS5$ = reflectancia en la banda roja visible

SAVI

El SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) es índice de los suelos, la cual observa la reflectividad en las bandas roja e infrarroja cercana que suelen cambiar simultáneamente cuando cambia las condiciones del suelo aumentando o disminuyendo, es decir, cuando un suelo este húmedo refleja menos en el rojo, pero también menos en el Infrarrojo cercano y un suelo seco refleja más en ambas bandas (Gonzaga, 2014; Díaz, 2015). SAVI nació de la necesidad de disminuir las alteraciones del valor del NDVI en aplicaciones en zonas áridas, ya que el mismo valor de NDVI puede corresponder a cubiertas vigorosas, pero poco densas, o a cubiertas densas, pero con poca vitalidad (INIA, 2010).

Este Índice de vegetación ajustado al suelo se calcula mediante la siguiente expresión: Ecuación 2 Índice de vegetación ajustada al suelo (Gonzaga, 2014).

$$SAVI = \frac{\text{Infrarrojo Cercano} - \text{Rojo}}{\text{Infrarrojo Cercano} + \text{Rojo} + L} (1 + L)$$

Infrarrojo Cercano = Infrarrojo cercano.

Rojo = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente a la banda roja

L = es un parámetro que varía según la densidad de la vegetación, para densidades intermedias se toma 0,5.

Este índice se recomienda en las etapas tempranas de desarrollo del cultivo, así como también en áreas donde exista poca cubierta vegetal (menos del 40% de cubierta vegetal).

TSAVI

TSAVI es un indicador que fue diseñado para minimizar el efecto de fondo del suelo. El concepto del TSAVI se basa en que el punto de convergencia está más cerca del origen que el de SAVI. La mejora de TSAVI sobre SAVI fue tomar en cuenta la pendiente de la línea del suelo (X) e interceptar (i), mientras que SAVI asumió que eran 1 y 0, respectivamente (Qi, Chehbouni, Huete, & Sorooshian, 1994).

Ecuación 3 Índice justado al suelo transformado (TSAVI)

$$TSAVI = \frac{\text{Infrarrojo Cercano} - (a * \text{Rojo}) - b}{a}$$

$$\text{Infrarrojo Cercano} + \text{Rojo} - a * b + X (1 + a^2)$$

Donde: Infrarrojo cercano= Infrarrojo cercano Rojo= Banda roja a= 1,22 b=0,03 X= 0,08

OSAVI

Índice de Vegetación Ajustado de Suelo Optimizado Verde, éste índice se basa en el índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI). Utiliza un valor estándar de 0,16. Roudeaux, determina que este calor proporciona mayor variación del suelo que salvado para una cubierta de vegetación baja, mientras que demostrar la mayor sensibilidad a la vegetación cubrirá más del 50%. Este índice se utiliza mejor en áreas con vegetación realmente poca donde el suelo es visible (Harris Geospatial, 2017).

$$\text{OSAVI} = \frac{\text{Infrarrojo Cercano} - \text{Verde}}{\text{Infrarrojo Cercano} + \text{Verde} + Y}$$

Donde: Infrarrojo cercano= Infrarrojo cercano Verde= Banda verde Y= Constante 0,16

DSWI

Índices de estrés de la enfermedad y el agua, éste índice se creó para proporcionar un marco sistemático en la formulación y la evaluación de la detección de enfermedades en la vegetación.

$$\text{DSWI} = \frac{\text{Verde}}{\text{Rojo}}$$

Dónde: Verde = Banda verde Rojo= Banda Roja.

Estos índices fueron desarrollados por (Apan, Held, Phinn, & Markley, 2003), y su aplicación fue orientada a la detección de la enfermedad Roya anaranjada (*Puccinia kuehnii*) en Caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L). Estos índices involucran la región del infrarrojo cercano, ya que investigaciones anteriores indican la capacidad de detección de estrés hídrico en la región del infrarrojo cercano (Jacquemoud & Ustin, 2008).

Ante la elevada oferta de índices de vegetación, es inevitable preguntarse ¿Qué índice de vegetación se debe usar? (Terrill, 1994), opina lo siguiente: NDVI. Casi todos los que hacen mucha teledetección en vegetación usan NDVI, ya que es simple, cuenta con el mejor rango dinámico de cualquiera de los índices y tiene la mejor sensibilidad a los cambios en la cubierta vegetal. Es moderadamente sensible a un segundo plano de suelo y a la atmósfera, excepto en la baja cubierta o densidad vegetacional. Para hacer una vista rápida y cualitativa de la cubierta vegetal en una imagen, no se puede superar NDVI, a menos que usted este buscando en un área con baja densidad vegetal.

Un tema recurrente en el uso de índices de vegetación, es saber cuán buenas son estas herramientas en condiciones no ideales, tales como los paisajes semi-áridos, donde la vegetación es de baja cobertura o densidad. Ante la pregunta, ¿Qué tan bien estos índices de vegetación, trabajan en áreas con bajo % de cubierta vegetal?, (Terrill, 1994), responde que “.....en general, muy mal. Cuando la cubierta de vegetación es baja, los valores espectrales observados por la teledetección, están dominados por el suelo. No todos los suelos tienen el

mismo valor espectral, aun cuando se estén usando bandas de espectro bastante amplio. Tanto, Huete et al. (1985), Elvidge y Lyon (1985), demostraron que el fondo de la vegetación o suelo, puede tener un impacto profundo, donde los valores del índice de vegetación, en zonas con suelos brillantes, estarían produciendo valores menores que en la vegetación con fondos oscuros. Elvidge y Lyon (1985) mostraron que muchos materiales de fondo (suelo, roca, planta, hojarasca) varían en su pendiente "Rojo-NIR", y estas variaciones impactan seriamente las Mediciones de los índices de vegetación."

¿Cuándo se habla de baja cobertura vegetal, cuánto es demasiado bajo para estos índices? "...Asumiendo que se trata solo de reglas generales y que sus umbrales pueden variar, podemos decir:

RVI, NDVI, IPVI = Solo son útiles por sobre el 30% de cobertura

SAVI, MSAVI1, MSAVI2 = 15%

DVI = 30%

PVI, WDI, GVI = 15%

Mientras más uniforme sea el suelo, más se pueden bajar estos valores" (Terrill, 1994).

Tema importante a considerar es que el mejor índice a ser usado en un ambiente particular, debe ser calibrado con mediciones en terreno. De no haber mediciones disponibles, esas imágenes de índices, sólo serán indicadores útiles de la cantidad relativa de vegetación presente. Los valores bajos de los índices de vegetación, por lo general indican vegetación poco vigorosa, al contrario de los valores altos, que indican vegetación muy vigorosa. Sin embargo, en algunos casos (como los índices RVI y NRVI) el valor del índice de vegetación es inversamente proporcional a la cantidad de vegetación presente en el área, por lo que se recomienda documentarse sobre este punto, al momento de interpretar alguno de ellos (Muñoz, 2013).

Discusión de resultados

Para el caso de estudio de la caña de azúcar se deberá entonces plantear un esquema de monitoreo que permita seguir el ciclo fenológico de la misma, el cálculo de diversos índices es deseado tales como:

- NDVI para conocer el estado de vigorosidad del dosel.
- SAVI para determinar volumen de producción, sobre todo en etapas tempranas del crecimiento de la caña.
- DSWI para determinar algún grado de estrés hídrico.

De esa manera se contará con información de la respuesta espectral del cultivo en diferentes fases del crecimiento, además se podrá comparar la efectividad de la medición entre índices, es decir, más de uno puede evaluar la misma característica, por ejemplo, la productividad.

CONCLUSIONES

Muchas agencias han descubierto que el índice de vegetación, es útil como una medida relativa para fines de monitoreo. Por ejemplo, los programas sistema africano de información en tiempo real (ARTEMIS) de la Organización de Alimentación y Agricultura (FAO) de las Naciones Unidas (FAO, 2019), y el sistema de alerta temprana sobre el hambre (FEWS) del USAID, usan imágenes NDVI de escala continental derivadas del sistema NOAAVHRR,

para elaborar imágenes con el índice de vegetación para todo el continente africano cada diez días (Muñoz, 2013).

Para los cultivos de caña de azúcar, el índice normalizado de vegetación NDVI demostró ser un parámetro eficaz para supervisar las condiciones del dosel de este cultivo y como instrumento de evaluación rápido del estado de vigor vegetal de la caña en un momento determinado. Para, posteriormente, vigilar la variabilidad temporal que determina la interacción del cultivo con otros factores agroclimáticos y, por lo tanto, modelar la productividad agrícola (Aguilar, Galindo, Fortanelli, & Contreras, 2010).

El estudio de las series temporales basadas en el NDVI, muestran la tendencia del desarrollo de la vegetación natural y de los cultivos (Volante & Bianchi, 2003), por lo que suele ser de gran utilidad para la realización de análisis agrícolas o forestales en el tiempo. Destacan también la utilización de los índices de vegetación para análisis relativos al estudio de la pérdida de agua de las plantas por evaporación y transpiración, tal es el caso de los estudios realizados en (Nagler, Morino, Murray, Osterberg, & Glenn, 2009).

Cuando la cubierta vegetal es muy baja es difícil identificar la vegetación, pues existe una distorsión en las respuestas espectrales. Una forma de corregir es calculando índices corregidos por el suelo como el Índice de Vegetación Perpendicular PVI (Richardson & Wiegand, 1977) o el Índice de Vegetación Ajustado por Suelo Transformado TSAVI (Baret & Guyot, 1989). En ambos casos se estudia la llamada "línea de suelo" y se determina la distancia perpendicular desde esta línea hasta el valor total de reflectancia en rojo y NIR. Efectivamente lo que se realiza es restar la reflectancia propia del suelo del valor total de reflectancia, y se presume que la diferencia se debe a la vegetación (Towers, 2002).

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar N., O. L. (2013). Evaluación de aptitud de tierras al cultivo de caña de azúcar en la Huasteca Potosina, México, por técnicas geomáticas. *Geografía Norte Grande*, 16.
- Aguilar, N., Galindo, G., Fortanelli, J., & Contreras, C. (2010). Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. *Avances de Investigación Agropecuaria* 2010, 23.
- Apan, A., Held, A., Phinn, S., & Markley, J. (2003). Formulation and assessment of narrow-band vegetation indices from EO-1 hyperion imagery for discriminating sugarcane disease.
- Baret, F., & Guyot, G. (1989). TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. *Geoscience and Remote Sensing*
- Benedetti, R., & Rossini, P. (1993). On the Use of NDVI Profiles as a Tool for Agricultural Statistics: The case Study of Wheat Yield Estimates and Forecast in Emilia Romagna. *Remote Sensing of Environment*, 45 (3), 311-326.
- Cetina, N. (2017). Generación de curvas espectrales de vegetación, suelo y agua, a partir del análisis de imágenes multiespectrales, como herramienta indirecta de evaluación del estado del humedal "El Ocho" y Páramo de Letras. Tesis de grado.
- Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de teledetección espacial.

- Díaz, J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Tesis de grado. (F. d. Historia, Ed.) Universidad Complutense de Madrid.
- Esser, A., & Ortega, R. (2003). Uso de percepción remota o teledetección para el manejo sitio-específico de viñedos. *Agronomía y Forestal UC* (20).
- FAO. (2019). Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Gill, T., Phinn, S., Armston, J., & Pailthorpe, B. (2009). Estimating tree-cover change in Australia: challenges of using the MODIS vegetation index product. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 1547–1565.
- Gitelson, A., Kaufman, Y., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction. *REmote Sensing of Environment*.
- Gonzaga, C. (2014). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la provincia de Loja, Ecuador. Tesis.
- Harris Geospatial. (2017). Obtenido de <http://www.harrisgeospatial.com/docs/BroadbandGreenness.html#Optimize>
- Huesca, M. (2007). Diseño de un índice dinámico de riesgo de incendios forestales basado en el Fire potential Index de Burgan. Proyecto fin de Carrera. (E. T. Montes., Ed.) Universidad Politécnica de Madrid.
- Indices de vegetación y transformación Tasseled Cap. (2015). Recuperado el 20 de 08 de 2020, de http://cursosihlla.bdh.org.ar/LP_curso_Agro/Rivas_Dia2/9_Indices_de_Vegetacion_1CH%5B1%5D.pdf
- INIA. (2010). Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo SAVI, Región de Magallanes y la Antártica Chilena. Riesgo Climático. Instituto de Investigacione Agropecuarias. Chile: Ministerio de Agricultura.
- Jacquemoud, S., & Ustin, S. L. (2008). Modeling Leaf Optical Properties. *Photobiological Sciences Online*.
- Juzga, M. (2016). Comparación de índices de vegetación en el Cerro de la Conejera de la Ciudad De Bogotá. Tesis. (E. e. Geomática, Ed.) Universidad Militar Nueva Granada.
- Kemerer, A., Di Bella, C., Melchiori, R., Benench, A., & Alvarez. (2007). Comparación de índices espectrales para la predicción del IAF en campos de maíz. Congreso de teledetección: hacía mejor entendimiento de la dinámica global y regional.
- Martínez, N., & López, M. (2019). Agricultura de Precisión, El futuro ya llegó. *Visión Rural* (129)

- Meneses, V., & Mosquera, J. (2015). Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. *Ciencia y tecnología alimentaria*, 13 (1).
- Muñoz, P. (Abril de 2013). Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación. Apuntes. Chile.
- Nagler, P., Morino, K., Murray, S., Osterberg, J., & Glenn, E. (2009). (2009). An Empirical Algorithm for Estimating Agricultural and Riparian Evapotranspiration Using MODIS Enhanced Vegetation Index and Ground Measurements of ET. II. Application to the Lower Colorado River, U.S. *Remote Sensing*, 1, 1125-1138. *Remote Sensing*, 26.
- Paruelo, J. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Revista Científica y técnica de ecología y medio ambiente*.
- Person, R., & Miller, M. (1972). Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. (C. S. College of Forestry and Natural Resources, Ed.) USA: Dept. of Watershed Sciences.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing Environment*.
- Richardson, A., & Wiegand, C. (1977). Distinguishing Vegetation from Soil Background Information. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING*.
- Ruiz, A. (2011). Comportamiento y análisis de descriptores de texturas en imágenes MODIS. Tesis.
- Schowengerdt, R. (2006). *Remote Sensing*. Academic Press.
- SIAP. (2019). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Obtenido de <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Speranza, F., & Zerda, H. (2005). Potencialidad de los índices de vegetación para la discriminación de coberturas forestales COBERTURAS FO.
- Sripada, R., Heiniger, R., White, J., & Meijer, A. (2006). Aerial Color Infrared Photography for Determining Early In-Season Nitrogen Requirements in Corn. *Agronomy Journal*, 968–977.
- Terrill, R. (1994). A FAQ on Vegetation in Remote Sensing. *Remote Sensing*
- Towers, P. (2002). Conceptos Iniciales sobre Teledetección y su Aplicación al Agro. 138 p.
- Volante, J., & Bianchi, A. (2003). ÍNDICE VERDE: Índice de vegetación normalizado diferencial (NDVI) de las Yungas y del Chaco semiárido en el noroeste argentino. Técnicos Investigadores de la Estación Experimental Agropecuaria. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Xavier, A., Vettorazzi, C., & Machado, R. (2004). Relação entre índice de área foliar e frações de componentes puros do modelo linear de mistura espectral, usando imagens ETM+/Landsat. *Eng. Agríc.* 24. (Botucatu, Ed.) *Engenharia Agrícola* (24).

- Zhang, P., Ander, B., Tan, B., Huang, D., & Myneni, R. (2005). Potential monitoring of crop production using a satellite-based Climate-Variability Impact Index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132, 344-358.
- Zhongminga, W., Lees, B., Feng, J., Wanning, L., & Haijing, S. (2009). Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impacton soil erosion. *Catena*.