



**Universidad
de Holguín**

**FACULTAD DE
CIENCIAS NATURALES y AGROPECUARIAS**

**Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero
Agrónomo**

**Título: Relación salinidad-cultivo caña de azúcar
determinada por teledetección en la Empresa Azucarera
Urbano Noris de Holguín.**

Autor: Luis Angel Estupiñan Sierra

Tutores: Ing. Roberto Alejandro García Reyes

Dr.C. Mario Damian González Posada-Dacosta

Ms C. Juan Alejandro Villazón Gómez

Holguín 2021

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar la relación existente entre la salinidad del suelo y el estado de la vegetación en áreas de la UEB Central Azucarero Urbano Noris en la provincia de Holguín. La imagen utilizada se corrigió radiométricamente con el uso del software QGis 3.10 A Coruña y se determinaron los índices NDVI y SI. Mediante un muestreo al azar en 10 unidades de producción se extrajeron los valores en 50 puntos separados a 100 metros para la determinación en el software Statgraphics Plus 5.0 del análisis de regresión entre el índice de salinidad y el de vegetación y la interpretación de sus estadígrafos. El uso del NDVI como indicador del estado de la vegetación arrojó la presencia de vastas áreas bajo estrés con valores inferiores a 0,5 al igual que el índice salino mostró una alta proporción de tierras con alto contenido de sales con índices negativos de -1 hasta 0. El uso de la teledetección para la determinación de la salinidad del suelo arrojó que entre estos existe una correlación negativa de un -88,44 % y una determinación de 71,25 % lo cual define una dependencia inversa entre ambas variables.

ABSTRACT

The objective of the research was to determine the relationship between soil salinity and the state of the vegetation in areas of the UEB Central Azucarero Urbano Noris in Holguín province. The image used was corrected radiometrically with the use of the QGis 3.10 A Coruña software and the NDVI and SI indices were determined. By means of a random sampling in 10 production units, the values were extracted in 50 points separated at 100 meters for the determination in the Statgraphics Plus 5.0 software of the regression analysis between the salinity index and the vegetation index and the interpretation of their statistics. The use of the NDVI as an indicator of the state of the vegetation showed the presence of vast areas under stress with values lower than 0.5, just as the saline index showed a high proportion of soils with high salt content with negative indices from -1 to 0. The use of remote sensing to determine soil salinity showed that between these there is a negative correlation of - 88.44% and a determination of 71.25%, which defines a inverse dependence between both variables.

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
Problema científico:	2
Hipótesis:	2
Objetivo general:.....	3
Objetivos específicos:.....	3
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
1. La salinidad de los suelos	4
1.1. Proceso de salinización de los suelos.....	4
1.2. Causas de la salinidad primaria o natural en los suelos agrícolas	5
1.3. Causas de salinidad secundarias o antrópicas	6
1.4. Efectos de la salinidad sobre las propiedades de los suelos y las plantas	6
1.4.1. Efectos sobre propiedades edáficas	7
1.4.2. Efectos sobre las plantas	7
2. Vertisoles	7
2.1. Los Vertisoles en Cuba.....	9
2.2. Factores limitantes de los Vertisoles	9
3. Factores edáficos limitantes en la producción de caña de azúcar	11
4. Teledetección aplicada al estudio del suelo y los cultivos	13
4.1. Técnicas geomática aplicadas a la agricultura.....	13
4.2. La teledetección o sensoramiento remoto	14
4.2.1. Espectro electromagnético.....	14
4.2.2. Interacción de la radiación y la materia.....	15
4.2.3. Comportamiento espectral del agua	16
4.2.4. Comportamiento espectral del suelo	17
4.2.5. Comportamiento espectral de la vegetación.....	17
4.2.6. Efectos atmosféricos en las observaciones por satélite	18
4.2.7. Corrección atmosférica	19

4.2.8. Fuentes de distorsión geométrica en imágenes	19
4.2.9. Corrección geométrica	20
MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
CONCLUSIONES.....	29
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30

INTRODUCCIÓN

La salinización es un proceso edafológico que afecta, con frecuencia, a los suelos de las regiones áridas y semiáridas según Wang *et al.* (2020), lo cual limita el número de especies cultivadas que puedan desarrollarse en estos suelos.

La salinidad de un suelo viene determinada por el conjunto de todas las sales solubles contenido en el suelo y puede ser estimada por la medición de la conductividad eléctrica (CE) de una solución extraída del suelo. Son comúnmente evaluados mediante pruebas de laboratorio, lo cual conlleva a un mayor gasto de tiempo y de recursos (El Harti *et al.*, 2016).

Ante esta situación se hace más factible la utilización del sensoramiento remoto o teledetección. Esta novedosa técnica de gran potencial para la toma de datos del suelo, y ha sido utilizada para la detección de la salinidad tanto en forma espacial como temporal (Allbed *et al.*, 2014). Su estudio se basa en las características espectrales del suelo. Las bases del monitoreo de la salinidad del suelo se sustentan por el incremento de la reflectancia del suelo a medida que incrementa la salinización refractadas en las bandas del infrarrojo visible, de corto y largo alcance (Sidike *et al.*, 2014).

En investigaciones realizadas en Cuba por Lau *et al.* (2003, 2005); verificó el uso de la teledetección como una herramienta de apoyo para el manejo de la salinidad del suelo en cultivos, en particular un método para enmascarar la salinidad del suelo mediante mapas de salinidad, que es un factor causante del estrés en el crecimiento de la caña de azúcar.

La caña de azúcar constituye uno de los principales cultivos a nivel mundial. Tiene su origen en el sureste asiático y los países con mayores superficies y niveles de producción son Brasil, India, China y Paquistán (Dancé y Saéncz, 2016).

Es una de las plantas de más altos rendimientos en biomasa por área y unidad de tiempo y produce el azúcar, que es el alimento energético de consumo humano más completo y difundido en el mundo. Además de suplir una parte de sus necesidades de fertilizantes, y de la energía necesaria para su elaboración industrial constituye la

materia prima de alrededor de un centenar de productos derivados de gran valor para el desarrollo humano. A estas cualidades excepcionales se suma su adaptabilidad a condiciones adversas del medio ambiente, su resistencia a plagas y enfermedades, y una fijación de CO₂, comparable a la de los bosques tropicales; características que la convierten en un cultivo paradigmático para la agricultura sostenible, cuando es manejado adecuadamente por el hombre (Herrera *et al.*, 2009).

Desde el siglo XVII la producción azucarera, a partir de la caña de azúcar, ha sido la principal fuente económica de Cuba. Aunque en la actualidad la cantidad de área dedicada a este cultivo ha disminuido, todavía es significativa su extensión (Díaz *et al.*, 2010).

Alrededor del 32% de la superficie cultivada de Cuba está ocupada por Vertisoles, que se distribuyen a lo largo de todo el país. Estos son usados intensivamente para la producción de caña de azúcar (en regadío y secano), arroz (de regadío) y otros cultivos en menor escala (Cid *et al.*, 2016).

En Holguín, buena parte de los cultivos se encuentran establecidos en suelos propensos a compactarse, con un alto contenido de arcillas y difíciles de manejar por sus características. Sin embargo son suelos profundos y fértiles, a los que realizándoles un adecuado uso y manejo pueden incrementar los rendimientos en los cultivos y alcanzar su máximo potencial productivo (Núñez *et al.*, 2010).

Por lo antes expuesto se plantea como

Problema científico:

¿Cuál es la relación que existe entre la salinidad y el estado del cultivo de la caña de azúcar, determinada mediante teledetección en áreas de la Empresa Azucarera Urbano Noris, de Holguín?

Hipótesis: La teledetección permite determinar la relación entre la salinidad y el estado del cultivo de la caña de azúcar mediante teledetección en áreas de la Empresa Azucarera Urbano Noris, de Holguín.

Objetivo general: Determinar la relación entre la salinidad-cultivo de caña de azúcar determinada por teledetección en áreas de la Empresa Azucarera Urbano Noris, de Holguín.

Objetivos específicos:

1. Calcular el NDVI y el SI correspondiente a la fecha y al área de estudio mediante imágenes del satélite Landsat 8 OLI/TIRS.
2. Determinar la relación existente entre NDVI y el SI correspondiente a la fecha y al área de estudio mediante imágenes del satélite Landsat 8 OLI/TIRS.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. La salinidad de los suelos

La actividad antrópica ha incrementado la extensión de áreas salinizadas al ampliarse las zonas de regadío con el desarrollo de grandes proyectos hidrológicos, los cuales han provocado cambios en la composición de sales en el suelo.

Los suelos salinos son aquellos que contienen cantidades importantes de sales más solubles que el yeso, lo que interfiere con el crecimiento de la mayoría de los cultivos y plantas sensibles. La salinidad se mide por medio de la Conductividad Eléctrica (CE) en la solución intermicelar o solución del suelo, y el umbral para considerar que un suelo es salino se ha establecido en $CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$ a 25°C .

En la década del 90 se estimaba que la proporción de suelos afectados por salinidad estaba alrededor de un 10 % del total mundial y que entre un 25 y un 50 % de las zonas de regadío estaban salinizadas. En la actualidad, no existe referencia alguna de los niveles de áreas afectadas por este factor, pero, sí está claro, que esta situación se agudiza cada día más en las áreas cultivadas a nivel mundial, producto de la falta de conciencia medioambiental y de la explotación de los recursos hídricos irracionalmente, además de otros factores edafoclimáticos que influyen directamente sobre la salinidad de los suelos como, por ejemplo, el desmonte de tierras para volcarlas a la producción, esto conlleva a un ascenso de sales de la capa freática.

Más de 800 millones de hectáreas de suelo son afectadas por salinidad y sodicidad a lo largo del mundo, lo que es equivalente a más del 6% del área total mundial y aproximadamente el 20% del área cultivable total. Este porcentaje podría incrementar se a un 50% del total de suelo cultivable en el 2050. A partir de estos números podemos dimensionar que es un tema de suma importancia y cada vez requerirá mayores estudios.

1.1. Proceso de salinización de los suelos

Al disminuir las lluvias, en los sectores planos y deprimidos, los suelos se van secando por infiltración y evapotranspiración. Es entonces cuando comienza a generarse el

proceso de salinización quedando interrumpido el ciclo productivo en amplias superficies de la región. En este proceso, se pueden reconocer tres fases: la primera de ellas se relaciona con el ascenso de la solución salina por capilaridad.

La evapotranspiración se incrementa con el aumento de las temperaturas y vientos de primavera, actuando como una verdadera bomba que succiona en forma ascendente a la solución salina, a través del espacio poroso del suelo. La segunda fase consiste en la concentración salina en el horizonte superficial en función de los factores mencionados anteriormente.

La tercera fase del proceso de salinización es la formación de las costras salina en superficie, que es particularmente visible en épocas calurosas, ventosas y secas. Estas eflorescencias y costras salinas expresan el grado más intenso de salinización y en estos suelos, se superan los 20 ds m^{-1} de conductividad eléctrica (Casas y Rossi, 2011).

El problema más común de afectación de estos suelos por sales y sodio se debe principalmente a la presencia de carbonato de sodio que se acumula en superficie, transformándose en parte a carbonato de sodio provocando una fuerte alcalinización de los suelos con pH por encima de nueve. La presencia de sodio provoca la dispersión de las arcilla y la materia orgánica, cuya consecuencia es la compactación de los suelos que se tornan duros en seco e impermeables en húmedo.

La situación consignada afecta el crecimiento y desarrollo de muchas especies vegetales al limitar el crecimiento de las raíces por la resistencia mecánica y falta de aireación en el suelo. El resultado final es la formación de suelos sódicos del tipo conocidos como “álcali negro” debido a la presencia de materia orgánica dispersa en superficie, con pH superiores a nueve y con problemas de disponibilidad de algunos nutrientes tales como el fósforo y los microelementos (Casas y Rossi, 2011).

1.2. Causas de la salinidad primaria o natural en los suelos agrícolas

La principal causa natural de salinidad de los suelos es el ascenso capilar de napa freática con características salinas, siendo la fuente de salinidad la meteorización del

material original del suelo de naturaleza salina. En este caso el micro relieve juega un rol determinante en la presencia de mayor o menor cantidad de sales. Este fenómeno está asociado a regiones áridas, semiáridas y estepas, donde la precipitación es menor a la evapotranspiración potencial, generando un balance hídrico negativo. Sin embargo, también puede aparecer en lugares con prolongados períodos de sequía, como en zonas climáticas templadas y tropicales secas.

Otra causa natural de salinización de los suelos es la cercanía al mar. Zonas costeras que normalmente son inundadas con agua de mar, reciben constantemente aporte de sales, lo cual lleva a estos suelos a la salinización.

1.3. Causas de salinidad secundarias o antrópicas

El origen de este tipo de salinización puede ser por:

- I. Riego con aguas salinas.
- II. Mal uso del riego (aunque las aguas sean de buena calidad) que provocan ascensos de capas freáticas salinas.
- III. Uso de fertilizantes (algunos fertilizantes contienen altos niveles de sales que son potencialmente perjudiciales, tales como cloruro de potasio o sulfato de amonio) y otros insumos, especialmente en zonas de agricultura intensiva en las que el suelo es poco permeable y las posibilidades de lixiviación son limitadas.
- IV. Contaminación de suelos por uso de agua y subproductos industriales salinos (por ejemplo, riego con vinaza).
- V. Cambio brusco del uso de la tierra (por ejemplo, desmonte) que provoca revenimientos salinos desde profundidad hacia las capas superficiales del suelo.

1.4. Efectos de la salinidad sobre las propiedades de los suelos y las plantas

Los procesos de salinización se presentan en suelos con régimen de humedad ascensional epipercolativo (humedad ascensional) donde la evapotranspiración potencial supera a las precipitaciones, con translocaciones capilares ascendentes a partir de una napa freática salina (halohidromorfismo) y una dinámica de lixiviado restringido en época de lluvias.

Estos procesos pueden tener lugar en **ambientes áridos y semiáridos**. Por lo general las sales tienden a acumularse en posiciones topográficas de fondo, con drenaje deficiente a donde han sido llevadas por el agua de escorrentía superficial o subsuperficial.

1.4.1. Efectos sobre propiedades edáficas

Físicas: La salinización es un proceso mediante el cual tiene lugar la acumulación de sales, por lo general, cloruros y sulfatos de sodio y magnesio, lo que provoca una concentración elevada en la fase líquida del suelo. Esta alta concentración tiene un efecto físico favorable en los suelos ya que la doble capa eléctrica constituida por la micela coloidal y la nube de contraiones y coiones que neutralizan cargas) se encuentra comprimida lo que favorece el proceso de floculación.

Esto se traduce en una buena fertilidad física de los suelos salinos (hay formación de agregados y eso es estructura).

Químicas: En un suelo salino la elevada concentración de iones Na^+ y Cl^- , produce una interferencia en la absorción de nutrientes (K^+ , Ca^{2+} , NO_3^-) e impide la captación de los mismos, lo cual puede alcanzar niveles tóxicos para el metabolismo celular.

1.4.2. Efectos sobre las plantas

Los efectos sobre las plantas dependen tanto de la tolerancia de cada especie y cultivar, como también del estado de desarrollo de la misma. La acumulación de sales más solubles que el yeso en la cama de siembra, puede provocar un retardo o una inhibición en la emergencia, un tamaño menor de la planta, necrosis en las hojas, disminución de rendimientos y la muerte de la planta antes de completar el ciclo. Ello podría deberse a efectos osmóticos que dificultan la absorción de agua (sequía fisiológica) y a efectos ión-específicos origen de diferentes toxicidades.

2. Vertisoles

El nombre Vertisol deriva del latín *vertex* que significa mezclado. Son suelos que presentan un 30% o más de arcilla en todos los horizontes hasta una profundidad de 50

cm, caras de deslizamiento, agregados en forma de cuña y grietas que se abren y se cierran periódicamente. El contenido de arcilla puede ser hasta del 90%, en particular para Vertisoles que se originan de depósitos piroclásticos. Además, estos tienen cambios pronunciados en el volumen con la variación del contenido de humedad y evidencias de movimiento del suelo en las caras de deslizamiento (WRB, 2006).

Se caracterizan por formarse a partir de sedimentos arcillosos ricos en esmécticas, con un espesor considerable (igual o mayor de 60 cm) y están bajo el proceso de Vertisolización, que da lugar a un horizonte principal de diagnóstico Vértico. Las características que distinguen a estos suelos son el espesor arcilloso, plasticidad, el color oscuro, la formación de bloques prismáticos mayores de 15 cm con caras de deslizamiento, además de la presencia de grietas y micro relieve gilgai (Hernández *et al.*, 2015).

Las condiciones ambientales que conducen a la formación de un horizonte vértico o propiedades vérticas son aquellas donde ocurre precipitación suficiente para permitir el intemperismo de los materiales parentales, pero no tan alta como para producir lixiviación de bases; además de periodos secos, drenaje restringido y altas temperaturas (Torres *et al.*, 2016).

Son suelos sialíticos con relaciones moleculares $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ del orden de 4 y con predominio del Mg sobre el Ca, tanto en la masa de suelo como en la fracción arcillosa. Los suelos están saturados en bases y el pH tiende a ser generalmente neutro o alcalino. Entre los cationes cambiables, en ocasiones, el magnesio iguala o supera al calcio, sobre todo en los horizontes inferiores de los suelos que toleraron con mayor intensidad el proceso de gleyzación. Durante el proceso de formación, la materia orgánica se acumula (aunque en cantidades no muy altas), pero penetra por las grietas generalmente a bastante profundidad.

Esta materia orgánica se une muy estrechamente con la arcilla (complejo arcillo-húmico), dando una tonalidad entre gris oscura y negra a todo el perfil en los casos más representativos de este fenómeno, aunque en ocasiones puede ser pardo oscura. La

relación H/F es mayor que 2, y puede llegar hasta 4 en el horizonte con propiedades vérticas más desarrolladas, el porcentaje de huminas es de 35-40% y la relación C/N es de 13-20 (Corella *et al.*, 2002).

2.1. Los Vertisoles en Cuba

Los Vertisoles ocupan una extensión en nuestro país de 695 000 ha, presentándose en casi todas las provincias de Cuba, la de mayor extensión la provincia de Granma donde ocupan un área de 228 000 ha; y las de menor extensión Pinar del Río (700 ha), Matanzas (12 500 ha) y la antigua provincia Habana (14 100 ha) (Hernández *et al.*, 2014).

2.2. Factores limitantes de los Vertisoles

La degradación de suelos es un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que afectan la productividad de los ecosistemas. Los cambios producidos en el suelo por este proceso pueden llegar a ser irreversibles y tener consecuencias sociales, económicas, ecológicas y políticas negativas. El proceso de degradación se relaciona íntimamente con el uso inadecuado de los recursos agua, suelo, flora y fauna por el hombre (Alejo *et al.*, 2012) y sobreexplotación de nutrientes (FAO, 1995).

Uno de los factores limitantes en estos suelos es la salinización, provocada por la acción antropogénica, la cual puede afectar seriamente terrenos de cultivos de buena productividad por efecto acumulativo de las sales durante la explotación agrícola de áreas susceptibles a la salinización, por la extracción excesiva de agua de los pozos en época de sequía y la práctica de aplicación de altas dosis de fertilizantes químicos en suelos de mal drenaje y con manto freático alto (Álvarez, 2002).

A nivel mundial, se indica que existen más de 800 millones de hectáreas de suelos afectados por altas concentración de diferentes tipos de sales, por lo que se cataloga como uno de los problemas más importantes de la agricultura, debido a que la salinidad tiene efectos perjudiciales sobre la germinación de las semillas y atrofiar el crecimiento de las plantas, causándole la muerte (Narváez *et al.*, 2014).

Nuestro país, por su condición de insularidad, presenta áreas con salinidad primaria, sin embargo, la mayoría de los suelos afectados se debe a la actividad antrópica, iniciada en el siglo XVI, básicamente por la deforestación despiadada de tierras altas y ciénagas costeras. Esta situación fue agravada durante el siglo XX por el uso, para el riego, de aguas salinizadas de acuíferos con intrusión marina, así como otras aguas de baja calidad y esencialmente por la elevación del manto freático salinizado como consecuencia de la intensificación del riego y construcción de embalses, sin haber considerado la construcción de sistemas de drenaje que controlaran y evacuaran al manto freático, las sales disueltas (Otero *et al.*, 2011).

En la actualidad, más del 40% de los suelos cubanos presentan afectaciones por erosión lo cual es alarmante si se considera que el primer signo de la reacción en cadena desatada por la erosión es la disminución del rendimiento agrícola. Según estudios del Instituto de Suelos los cultivos más afectados por esta problemática son: la caña de azúcar (*Saccharum officinarum L*), los pastos y el arroz (*Oriza sativa L*), aunque la salinización se extiende a otros cultivos. En relación con el suelo, el fenómeno no solamente se presenta en un solo tipo genético definido pues además de los Solanchak, existe salinidad potencial o real, también en los suelos Gley, Vérticos y Aluviales, e incluso en los suelos Pardos y Ferralíticos compactados (Olivera, 2012).

En la provincia de Holguín el factor antrópico es el principal desencadenante de los procesos de degradación, debido fundamentalmente al mal manejo de los suelos, y pueden influir también los factores climáticos y genéticos (Corella *et al.*, 2002).

El estudio ejecutado por De Miguel y Sánchez (2011) en los suelos del Valle del Cauto arrojó como resultado, que las condiciones hidrogeológicas existentes representan una de las principales fuentes de salinización actual de los suelos presentes en este territorio y que se desarrolla anualmente en cientos de hectáreas en menor o mayor grado.

Se produce por la conjugación de factores naturales presentes y la actividad antrópica que en este territorio se desarrolla, sobre todo en la explotación agrícola de los suelos,

donde se aplica riego sin la debida argumentación del mismo y con falta de drenaje que corresponda a las características hidrogeológicas del territorio, además que en la agricultura desde hace varios años se aplica la mecanización con equipos de alto tonelaje lo que por las condiciones existentes pueden provocar la compactación de los suelos, la reducción de porosidad del suelo y estratos subyacentes, se incrementa en estos sedimentos las propiedades de ascenso capilar y al tener una fuente de salinización a poca profundidad la salinización de los suelos se desarrolla a un ritmo más rápido.

En las regiones tropicales la erosión hídrica constituye el proceso de degradación de suelos más importante. Su magnitud depende, en primer lugar, de la energía cinética de las precipitaciones y del agua de escorrentía. Igualmente, también incide el relieve, pues el grado y la longitud de la pendiente aceleran la velocidad del escurrimiento superficial. Sobre esta forma de erosión influye, además, la susceptibilidad del suelo al desprendimiento y arrastre de partículas y el uso y manejo del medio edáfico (Moreira, 2014).

Hasta finales de los 90, la labranza limpia y la intensificación de las actividades agrícolas predominaron en la agricultura cubana, debido entre otras causas a la modernización que se introdujo en las últimas décadas. La utilización de implementos y maquinarias potentes para la preparación de las tierras, agravadas por el uso de sistemas de riego de alta productividad, unida al progresivo abandono de la utilización de diferentes fuentes orgánicas y al incremento del uso de agroquímicos, conllevaron a un deterioro físico y químico gradual de la estructura, manifestada en la disminución de la materia orgánica, desaparición de la actividad faunística, incremento del pH, disminución de la flora edáfica y como consecuencia, la aparición de capas compactas al nivel de los 13-17cm (Olivera, 2012).

3. Factores edáficos limitantes en la producción de caña de azúcar

El potencial de productividad agrícola de un genotipo de caña de azúcar en determinado ambiente de producción depende del complejo vivo que se desarrolla

debajo de la superficie, el crecimiento de las raíces lo determinan factores como: resistencia mecánica, disponibilidad de agua, oxígeno y energía (Marasca *et al.*, 2015).

Las tecnologías de manejo de la producción de caña de azúcar han evolucionado en lo referente a máquinas e implementos, lo que provoca degradación en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos lo que disminuye la duración de la cepa y producción (Alcívar *et al.*, 2013).

Según Villegas (2010) existen factores que pueden afectar el desarrollo del sistema radicular como son factores químicos, encontrándose la acidez por altos contenidos de aluminio que inhibe la división celular en el periciclo y reducir la ramificación de las raíces, también la concentración de los nutrimentos en el suelo al aumentar o disminuir el diámetro de las raíces, el contenido de materia orgánica aumenta la actividad microbiana y la salinidad lo que provoca un aumento del potencial osmótico, disminuye la turgencia en la raíz y reduce la tasa de elongación.

Los factores físicos como la pobre aireación y exceso de agua suprimen la aparición de pelos radicales, disminuyen la ramificación y cambia su distribución en el perfil del suelo; la resistencia mecánica influye en la distribución y el crecimiento a través del tiempo de las raíces en el suelo reduce su elongación (Villegas, 2010).

Puede presentar dos tipos de raíces de la estaca original o primordial y las raíces permanentes; las cuales van a depender de su cantidad, longitud y la edad de factores como el tipo de suelo y la humedad. Ha sido reportado que en los suelos arcillosos puede reducirse la longitud de las raíces y las variedades con sistema radicular más profundo y denso pueden sufrir menos daño en los períodos de sequía (Amaya, 1995).

El estudio realizado por Contreras y Arzola (2006) arroja que existen limitantes en la producción de caña de azúcar como el drenaje, profundidad efectiva o contenido de gravas a determinado nivel o rango limita la formación de biomasa por el cultivo y ocasiona, una menor producción de caña y de azúcar por unidad de superficie y un mayor contenido de azúcar por tonelada de caña. Cualquiera de los factores mencionados, cuando son limitantes, pueden originar estrés hídrico y como respuesta

al mismo aumenta la concentración de ácido abscísico (ABA), hormona que ocasiona el cierre de los estomas, disminución de la transpiración y del crecimiento de la planta.

Al no crecer la planta, se afecta el rendimiento agrícola, pero se acumula sacarosa. Si los factores edáficos son limitantes y no se pueden corregir, disminuye la eficiencia de los fertilizantes, se requiere por esa razón de mayores dosis y se elevan los costos y la contaminación del entorno. Si este efecto es muy pronunciado, no resulta sostenible la producción de caña y debe buscarse otra opción de uso a la tierra.

4. Teledetección aplicada al estudio del suelo y los cultivos

4.1. Técnicas geomáticas aplicadas a la agricultura

Las tecnologías Geomáticas, Geoinformáticas o de Geoinformación, como se prefiera nombrarlas, son un conjunto de tecnologías geoespaciales, así como programas informáticos especializados empleados en el análisis de los datos sobre la tierra y su representación espacial. Hoy en día sería casi imposible gestionar los procesos agrarios sin recurrir al empleo de alguna de ellas, ya que los profesionales modernos de las ciencias agropecuarias, están necesitados de apreciar y evaluar acciones que provocan las fuerzas productivas y la naturaleza sobre la producción agropecuaria (Ponvert *et al.*, 2012).

Estas incluyen a los Sistemas Geodésicos de Referencia, los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), la Cartografía, la Fotogrametría, la Teledetección Espacial y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Las mismas, se sustentan en los sistemas de conocimientos, teorías y conceptos de las ciencias matemáticas, física, química, la astronomía, la geodesia física y la tecnología espacial; así como en el uso y manejo de bases de datos, computación gráfica y la inteligencia artificial.

La tendencia contemporánea en países desarrollados y en muchos países en vías de desarrollo es introducir y aplicar en un grado cada vez mayor estas tecnologías en los distintos procesos de la gestión agraria. Es lo algunos llaman la “geomatización de la agricultura”. En el caso particular de Cuba, la introducción de estas técnicas ha sido muy lenta, dado por varios factores entre los que cabe citar, en primer lugar, la falta de competencias y capacidades en parte del capital humano de las entidades agropecuarias (Ponvert *et al.*, 2012).

También, ha influido el costo relativo de estas tecnologías, productos derivados y servicios en el mercado internacional, y la inexistencia de una política adecuada que permita la introducción paulatina de las tecnologías y la formación de capacidades en los futuros técnicos, directivos y especialistas del sector. Aún con estas limitantes, en algunas entidades se aprecia el interés por su introducción y algunos resultados modestos.

Entre las aplicaciones tradicionales claves en áreas especiales de interés económico y profesional, una de las herramientas de Geoinformación que ha adquirido un desarrollo significativo en los últimos años ha sido la teledetección.

4.2. La teledetección o sensoramiento remoto

El principio físico de la percepción remota o teledetección, se basa en la ley de la conservación de la energía, mediante la cual una vez la energía llega a la superficie de la Tierra, una parte es absorbida, otra transmitida y otra reflejada. Durante la transmisión a través de un objeto la energía es absorbida selectivamente por los componentes químicos del objeto y luego es reflejada. En el caso de las plantas, la energía transmitida a una hoja sufrirá una absorción selectiva por los pigmentos de la hoja como la clorofila y luego será reflejada desde las paredes celulares (McCloy, 1995).

Estas características son la base para identificar los objetos mediante sensores que pueden captar la energía reflejada por los cuerpos y convertirla en valores digitales. En particular, las imágenes de satélite almacenan las señales espectrales en diferentes longitudes de onda, y después de diversos análisis se efectúa la interpretación; de allí se obtiene la información sobre las características y los tipos de objeto presentes en el área de estudio.

4.2.1. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de ondas que según el valor de su frecuencia reciben una denominación especial: ondas de radio, microondas, ondas infrarrojo, visible (luz), ultravioleta, rayos (x) y rayos gama. Esta onda electromagnética es la propagación simultánea de los campos eléctrico y magnético producidos por una

carga eléctrica en movimiento, que no necesita un medio para propagarse, ya que puede transmitirse en el vacío o cualquier otro medio, y a la misma velocidad.

Los límites de las regiones dentro del espectro electromagnético son más o menos arbitrarios y dependen de la capacidad para poder producir o detectar dichas áreas. Las unidades de medida que se emplean para estas ondas van desde las micras (μm) para las más cortas, mientras que para las más largas se usa el centímetro o metro; estas últimas se emplea valores de frecuencia en hercios (Hz).

Las ondas de radio reciben esta denominación debido a que se las usa para la transmisión de radiocomunicación o radiodifusión, presentan frecuencias bajas de 102 hasta 108 Hz (o ciclos). Las microondas presenta frecuencias de 109 a 1011 Hz se emplean mucho en las telecomunicaciones para las señales de tv o transmisiones telefónicas por medio de satélites estacionarios.

En la región del infrarrojo las frecuencias oscilan entre 1011 y 1014 Hz; los átomos se encuentran en constante e intensa vibración provocando calor, y emitiendo la radiación infrarroja; el infrarrojo frecuentemente se subdivide en cuatro subregiones: Infrarrojo cercano (NIR, 780-3000 nm), Infrarrojo (MWIR, 3000-6000 nm), Infrarrojo lejano (LWIR, 6000-15000 nm) y el extremo infrarrojo (0,015-1,0 mm).

En la “región visible” del espectro electromagnético llamada así porque es la única radiación perceptible por el ojo humano, constituye una región estrecha con frecuencias que van desde 670 hasta aproximadamente 460 nm; en la que suelen distinguirse tres bandas elementales, denominadas azul (0.4 a 0.5 μm), verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.7 μm).

4.2.2. Interacción de la radiación y la materia

Cuando se produce la interacción de la materia con la radiación incidente o irradiancia pueden sufrir los siguientes procesos: absorbancia, transmitancia, reflectividad, refracción y dispersión. Se conoce como absorción a la fracción de la radiación incidente de una longitud de onda específica del espectro, que es absorbida por un material, y a la diferencia entre la energía total que incide y la energía absorbida como reflectividad o energía que se refleja; la transmitancia es la porción de energía incidente que es transmitida por dicho objeto; mientras que al

cambio de dirección de la onda de luz al pasar a través de un material a otro se lo conoce como refracción.

La proporción de energía en cada uno de estos procesos puede variar dependiendo el tipo de superficie, material y condición del objeto que está recibiendo dicha radiación y son estas diferencias las que mediante teledetección permiten discriminar un objeto de otro. La radiación que proviene directamente del sol (en línea recta) se la conoce como radiación directa y la radiación difusa es la que proviene de diversas direcciones al haber sido reflejada, desviada o dispersada por las nubes, la turbidez atmosférica, los accidentes topográficos o simplemente haber sido difundidos al atravesar un material transparente o traslucido.

En las plantas la radiación directa es recibida por las hojas superiores o altas provocando sombra en las partes bajas, sin embargo, la radiación difusa al ser adireccional penetra mejor en el cultivo llegando especialmente a las hojas inferiores. La señal lumínica detectada por los sensores es la energía reflejada y transmitida, del total de radiación incidente. Cada material, suelo, vegetación, agua, etc. refleja la proporción de radiación recibida de diferente manera.

Esto depende directamente del tipo de superficie del material u objeto, existen dos tipos de superficies: aquellas que reflejan la radiación solar directamente con un ángulo igual al ángulo incidente (superficies especulares) y aquellas que reflejan la radiación hacia todas las direcciones (superficies lambertianas).

Las características de reflectancia, están íntimamente asociadas a la composición misma de los cuerpos naturales, tanto en sus propiedades químicas como físicas, lo que se denomina “respuesta espectral” que es propia de cada elemento y permite distinguirlos entre sí.

4.2.3. Comportamiento espectral del agua

El agua es muy buena trasmisora de la radiación electromagnética en el espectro visible y de absorción en el infrarrojo. En la curva de reflectividad se muestra un pico en la región del verde que va reduciéndose hasta el infrarrojo, y es esta característica la que permite diferenciarla entre aéreas de tierra. La reflectividad del agua líquida

permanece sujeta a: la profundidad, los materiales del fondo o en suspensión (Clorofila, arcillas y nutrientes) y la rugosidad de la superficie.

Cuando el agua presenta turbidez la respuesta espectral depende del tipo de turbidez, por ejemplo si se trata de fitoplancton aparecerán importantes alteraciones en el verde (aumenta) y en el azul (disminuye), la rugosidad de la superficie favorece a la reflexión difusa, en el caso de aguas con superficie tranquilas presentan una radiación especular.

4.2.4. Comportamiento espectral del suelo

Tanto en rocas como es suelos la reflectancia aumenta a medida que se va incrementando la longitud de onda desde el intervalo del visible del espectro electromagnético al infrarrojo cercano.

Los factores que condicionan la reflectividad de los suelos son: contenido de humedad, textura, estructura, la composición, predominio de materia orgánica, el contenido de óxidos en el suelo.

El color del suelo está determinado por el contenido de óxido de hierro y la cantidad de materia orgánica, el tipo de textura determina la capacidad de retención de agua; la reflectividad es mayor para suelos más finos y apelmazados. En cuanto al contenido de agua los suelos secos poseen mayor reflectividad que los húmedos.

4.2.5. Comportamiento espectral de la vegetación

La radiación solar controla los procesos de fotosíntesis, morfogénesis y regula en mayor o menor medida otros procesos como la respiración, movimientos estomáticos, metabolismos del carbono entre otros. La radiación PAR (Photosynthetically Active Radiation) o radiación fotosintéticamente activa, coincide aproximadamente con la radiación solar visible, que está comprendida entre los 400 y 700 nm y corresponde a la porción aprovechable que tiene influencia sobre el proceso fotosintéticos, interviniendo en el flujo de fotones. Las propiedades reflectivas de la vegetación dependen de tres tipos de variables:

- Estructura de la cubierta vegetal, caracterizadas por el índice de área foliar, orientación de las hojas y por su distribución y tamaño.
- Propiedades ópticas de los elementos reflectantes (tallos, hojas, flores y frutos).

- Geometría de la observación, directamente relacionado con la posición geográfica de la planta: pendiente, orientación relativa entre el sol, asociación con otras especies, reflectividad del sustrato, geometría de plantación, condiciones atmosféricas.

4.2.6. Efectos atmosféricos en las observaciones por satélite

Los efectos atmosféricos como el cambio en la intensidad de radiación electromagnética en una determinada longitud de onda, por efectos de la absorción y *scattering* por las moléculas y aerosoles presentes en la atmósfera. La absorción por los gases atmosféricos en el espectro solar se debe principalmente a:

- Oxígeno
- Ozono
- Vapor de agua
- Bióxido de carbono
- Metano
- Óxido nitroso

Estos elementos químicos se pueden considerar constantes y uniformemente mezclados en la atmósfera, la concentración de oxígeno y agua, dependen de la ubicación y el tiempo. Los gases absorben la radiación mediante cambios en los estados rotacionales, vibratorios o en el nivel de energía de los electrones. La energía de rotación es débil y corresponde a la emisión o absorción de fotones de frecuencia amplia, que se ubica en la porción de microondas e infrarrojo lejano del espectro electromagnético.

La transición vibratoria es más fuerte que la rotación y extiende su rango de absorción hacia el infrarrojo cercano. Finalmente la transición de los estados de energía de los electrones es muy fuerte lo que provoca bandas de absorción en la porción ultravioleta y visible del espectro electromagnético.

Dado que las transiciones en los niveles de energía ocurren en valores discretos (saltos cuánticos), los coeficientes de absorción varían rápidamente con la frecuencia y presentan una estructura compleja, se muestran como líneas de absorción del espectro electromagnético.

4.2.7. Corrección atmosférica

Las imágenes de la superficie terrestre, adquiridas en el espectro solar y que son tomadas por satélite de observación, se encuentran contaminadas por la luz solar dispersada hacia el sensor por las moléculas atmosféricas, los aerosoles y las nubes en suspensión. Además, la energía solar que es reflejado desde la Tierra se encuentra atenuada por los efectos atmosféricos.

Estos efectos atmosféricos son dependientes de la longitud de onda, siendo variables en tiempo y espacio, así mismo de la reflectividad de la superficie y su variación espacial. La corrección de estos efectos atmosféricos puede producir señales de teledetección que se encuentran mejor correlacionadas con las características de la superficie.

4.2.8. Fuentes de distorsión geométrica en imágenes

Las imágenes obtenidas por teledetección contienen distorsiones geométricas debido a muchos factores y pueden clasificarse en sistemáticas y no sistemáticas. Las distorsiones son sistemáticas, tales como el **sesgo de escaneado**, causado por el movimiento de avance de la plataforma durante el tiempo requerido para cada barrido del espejo; **velocidad del espejo de escaneado**, la velocidad de éste usualmente no es constante durante un dado ciclo, produciendo una distorsión geométrica a lo largo del escaneado; **efectos panorámicos y curvatura terrestre**, el efecto panorámico deriva del hecho de que los sensores de plataformas satelitales el IFOV (instantaneous field of view) angular es constante.

El tamaño del pixel sobre el terreno será mayor en los extremos de la oscilación que en el nadir, también la curvatura terrestre conduce a un efecto similar, aunque para satélites de barrido poco extenso, como el Landsat (185 km) o el SPOT (120 km) el efecto es despreciable, a diferencia de lo que ocurre con los NOAA, con 2700 km de FOV (field of view); **velocidad de la plataforma**, si la velocidad de la plataforma cambia, la cobertura terrestre a lo largo de su traza terrestre para sucesivos escaneos también cambiará, se producirá una distorsión de escala a lo largo del trayecto; **rotación de la Tierra**, a medida que el sensor escanea el terreno la Tierra se desplaza de oeste a este, de modo que un punto del terreno registrado al fin del escaneado va a estar más al oeste que cuando comenzó el barrido.

Como casos de distorsiones geométricas no sistemáticas se tiene los efectos por altitud y actitud; **altitud**, si la plataforma se desvía de su altitud normal o si aumenta la elevación del terreno se producen distorsiones de escala; **actitud**, hace referencia a la orientación del satélite en el espacio tridimensional en que se desplaza.

En tal sentido podemos definir un sistema de tridimensional de coordenadas ortogonales centrado en el centro de gravedad de la plataforma considerada. De acuerdo con esto puede definirse la orientación de la plataforma por la contribución de los movimientos respecto a estos ejes principales. Estos movimientos se definen como: balanceo (roll), cabeceo (pitch) y desvío (yaw).

4.2.9. Corrección geométrica

La corrección geométrica implica un proceso de transformación para situar biunívocamente cada píxel de las diferentes imágenes, en su correcta posición geográfica de la superficie terrestre. La necesidad de realizar este tipo de corrección surge por las diferentes distorsiones que pueden darse por las condiciones del desplazamiento y adquisición de la información en la plataforma satelital.

Los procedimientos matemáticos que resuelven este problema y las metodologías usadas para su implementación mediante algoritmos en las aplicaciones informáticas de teledetección son muy variados.

La corrección geométrica de las imágenes satélite puede abordarse de acuerdo a tres procedimientos. En el primero, denominado corrección orbital, se pretende modelar aquellas fuentes de error geométrico conocidas, a partir de aplicar transformaciones inversas a las que realiza el sensor en el momento de la adquisición. Para ello, es preciso disponer, con bastante precisión, de las características orbitales de la plataforma y de las especificaciones del sensor. Gracias a ellas se pueden corregir errores sistemáticos, como son los derivados de la rotación o curvatura terrestre y de la inclinación de la órbita.

El segundo enfoque resulta más empírico. Se trata de modelar el error geométrico a partir de una serie de puntos de coordenadas conocidas, que se denominan puntos de control, en este caso el error se modela inductivamente, ya que en las funciones de transformación se incluyen simultáneamente todas las fuentes de error, asumiendo

como es lógico, que esos puntos sean suficientemente representativos de la deformación geométrica que tiene la imagen.

El tercero es la ortorectificación o también llamada ortocorrección de imágenes que corrige el desplazamiento mediante el uso del modelo de elevación digital (DEM).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el mes de noviembre de 2020. Para la descarga de la imagen satelital, se accedió al Servicio Geológico de los Estados Unidos, en la cuadrícula 011/046 y se tomó la referente al mes de septiembre 19 de 2020 (*LC08_L1TP_011046_20200919_20201006_01_T1.tar*) del satélite Landsat 8 OLI/TIRS el cual tiene las siguientes características (Tabla 1):

TABLA 1. Características del sensor Landsat 8 OLI/TIRS según (USGS, 2020)

Bandas	Color de las bandas	Longitud de onda (μm)	Resolución (metros)
1	Aerosol costero	0.433-0.453	30
2	Azul	0.450-0.515	30
3	Verde	0.525-0.600	30
4	Rojo	0.630-0.680	30
5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.845-0.885	30
6	Infrarrojo de onda corta (SWIR1)	1.560-1.660	30
7	Infrarrojo de onda corta (SWIR2)	2.100-2.300	30
8	Pancromático	0.500-0.680	15
9	Cirrus	1.360-1.390	30
10	Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.30-11.30	100

11	Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50-12.50	100
----	-----------------------------	-------------	-----

Por su cúmulo y el tiempo, las imágenes Landsat tienen una resolución espacial de 30 m, resolución temporal de 16 días y una cobertura del terreno de 185 km. Para el análisis de la imagen satelital se proyectó en el software QGis 3.10 A Coruña en el sistema de coordenadas WGS 84 UTM Zona 18 Norte donde se realizó la corrección radiométrica, se procedió al cálculo de los índices espectrales de vegetación y salinidad (Tabla 2).

TABLA 2. Índices espectrales de vegetación y salinidad determinados a partir de la imagen satelital.

Índice espectral	Expresión	Referencias
NDVI <i>Normalizado</i> <i>Diferencia Vegetativa</i>	$\frac{(BNir - BRojo)}{(BNir + BRojo)}$	Rouse <i>et al.</i> (1974)
Salinity index <i>Salino</i>	$\frac{(BSWIR1 - BSWIR2)}{(BSWIR1 + BSWIR2)}$	Bannari <i>et al.</i> (2008)

Para la determinación de la relación salinidad cultivo de la caña de azúcar, se tuvo en cuanto que el suelo que presenta las unidades cañeras son del tipo Vertisol con propiedades gléyicas según Hernández *et al.* (2015). Se realizó un muestreo completamente aleatorizado en las unidades comprendidas de la uno a la diez de los bloques cañeros de la Empresa Azucarera Urbano Noris de Holguín, mediante la toma de 50 puntos separados a una distancia de 100 metros (Figura 1); los cuales se les extrajeron los valores que obtienen en los mapas de vegetación y de salinidad obtenidos.

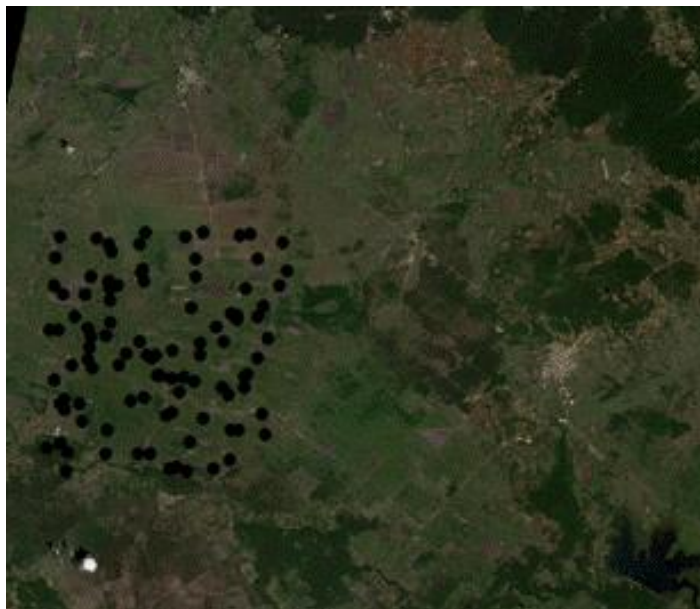


FIGURA 1. Esquema de muestreo completamente aleatorizado de los bloques cañeros en la Empresa Azucarera Urbano Noris de Holguín. Imagen corregida radiométrica y las combinaciones de las bandas 6-5-4.

Después de extraídos los valores de los puntos de muestreo, se creó una base de datos para la determinación de la relación existente entre el NDVI y el SI, aplicando como herramienta estadística el análisis de regresión lineal y las características de sus estadígrafos en el software Stargraphics Plus 5.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

entre valores de -1 a 1; para el cual Rawashdeh (2012) plantea una clasificación para este índice que para valores desde 0 hasta 0,5 se presenta una escasa vegetación en el área de estudio.

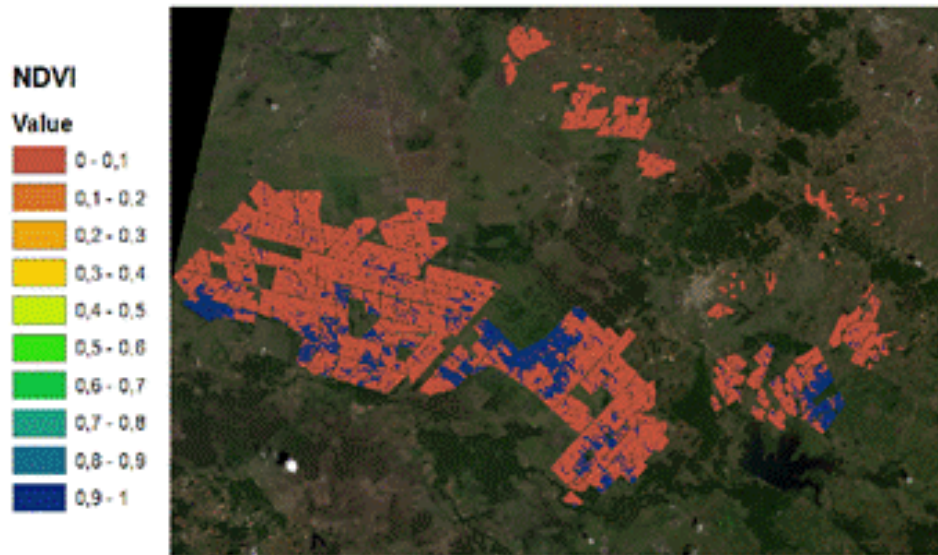


FIGURA 2. Determinación del índice de vegetación (NDVI) en áreas de la Empresa Azucarera Urbano Noris de Holguín.

La reflectividad de las cubiertas vegetales viene determinada, por características ópticas y distribución espacial de todos sus constituyentes, los cuales incluyen el suelo sobre el que se asienta la vegetación, así como por sus proporciones (Gilabert *et al.*, 1997). Meera *et al.* (2015) refieren que el decrecimiento del contenido de agua en el suelo por diversas razones en el ecosistema existe una tendencia a disipar el verdor de los cultivos y por ende los valores del NDVI.

Una de las causas de la variación del estado de la vegetación se encuentra por la absorción de la energía (radiación electromagnética absorbida en el interior del sensor). Esta energía es un proceso que está cuantizado, dichos rasgos se encuentran localizados en longitudes de onda concretas, que dependen de la presencia de

determinados componentes en el material según Baret (1995), así por ejemplo, los rasgos que son consecuencia de transiciones electrónicas como los debidos a la presencia de óxidos de hierro o a la presencia de clorofila se localizan en la región visible del espectro, mientras que los debidos a transiciones de tipo rotacional como los del ion OH^- se producen en la zona del infrarrojo cercano.

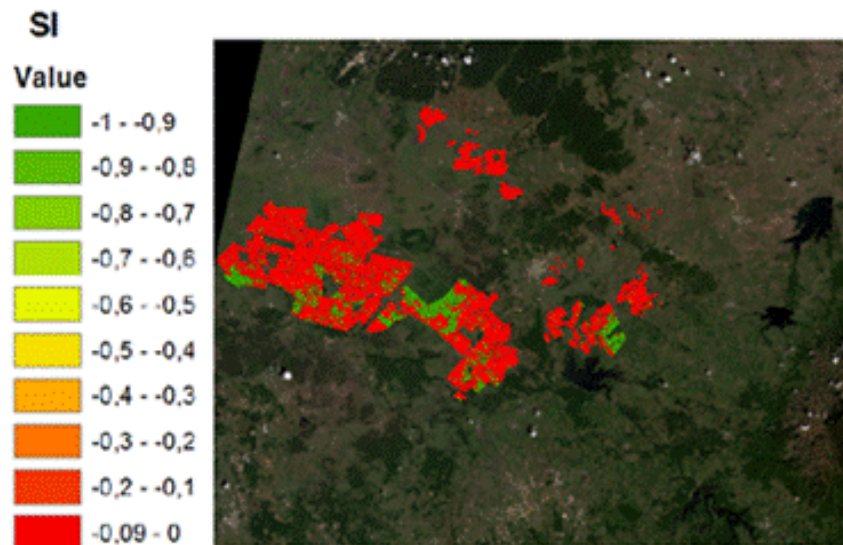


FIGURA 3. Índice de salinidad (SI) determinado en áreas de la Empresa Azucarera Urbano Noris de Holguín.

La teledetección de la salinidad a partir del NDVI ha sido ampliamente utilizada, dado que se presenta el estado de la vegetación ante el estrés por salinidad (Allbed *et al.*, 2014). La Figura 3 ilustra la determinación del índice salino; para el cuál Elhag (2016) reporta que los valores indican el estado de la salinidad del suelo varía desde -1 (presencia alta de sales en el suelo) a 1 (baja presencia de sales en el suelo).

En la región del visible, los pigmentos de las hojas absorben la mayor parte de la luz que reciben, en el infrarrojo cercano estas sustancias son bastante transparente. Por esta razón, el cultivo de la caña de azúcar en un buen estado vegetativo ofrece baja reflectividad en la banda roja del espectro y alta en el infrarrojo cercano, de manera que

cuanto mayor sea el vigor que presenta el cultivo, mayor será el contraste entre los valores de reflectancia captadas en ambas bandas.

Bajos valores de reflectancia en el infrarrojo cercano y un incremento en el visible indica que el cultivo de la caña de azúcar se encuentra en mal estado, una de las causas es la salinidad del suelo (Soca, 2015).

Platonov *et al.* (2013) describen que para identificar el estado de la vegetación ante el estrés salino se hace necesario el análisis de grandes extensiones debido a la variación del uso y manejo del suelo por los productores (Muller, 2017).

La Figura 4 referida al análisis de regresión lineal entre los índices espectrales SI y NDVI, para los cuales se obtuvo una fuerte correlación negativa de un - 84,41 % expresada en el coeficiente de Pearson y una determinación de 71,25 % para la cual existe un fuerte dependencia inversa entre ambos índices espectrales de suelo y vegetación.

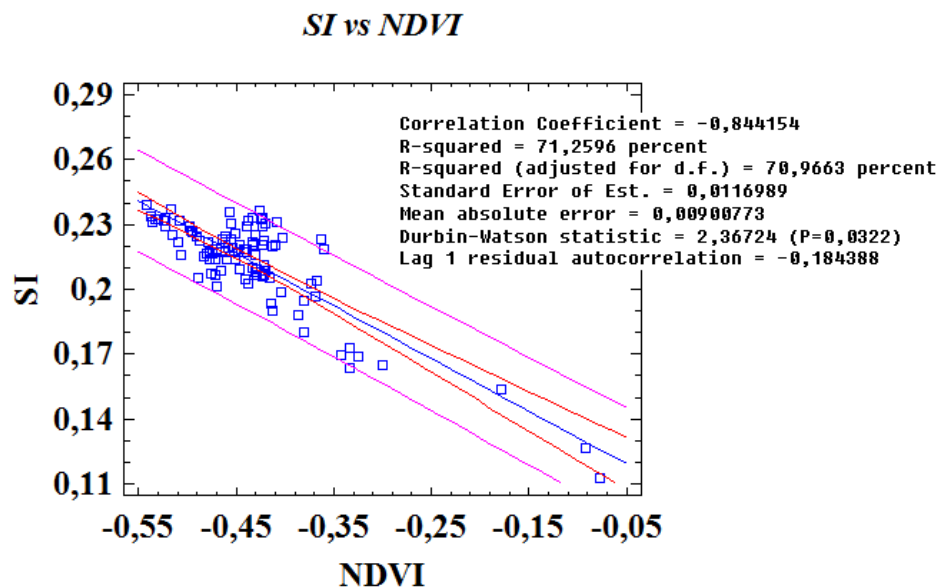


FIGURA 4. Análisis de regresión lineal de los índices espectrales calculados en la investigación.

Ding & Yu (2014) y Ivushkin *et al.* (2017) afirman que la salinidad del suelo captada por sensoramiento remoto guarda relación con índices de vegetación, los cuales tienen efectos directos con la información espectral, dado por la aparición de zonas oscuras. Además, los índices de vegetación y el índice espectral salino son usados comúnmente como indicadores para detectar los cambios en el estado de la cobertura vegetal.

Scudiero *et al.* (2015) plantean que en zonas áridas y semiáridas los errores más frecuentes en la determinación de la relación entre el contenido de sales y el estado de la vegetación mediante teledetección son la estructura del dosel de las plantas, el tipo de manejo del suelo, la cantidad de precipitaciones y temperatura anuales y el tipo de arcillas del suelo han sido las características de los estudios realizados.

CONCLUSIONES

El uso del NDVI como indicador del estado de la vegetación arrojó la presencia de vastas áreas bajo estrés con valores inferiores a 0,5 al igual que el índice salino mostró una alta proporción de tierras con alto contenido de sales con índices negativos de -1 hasta 0.

El uso de la teledetección para la determinación de la salinidad del suelo arrojó que entre estos existe una correlación negativa de un - 88, 41 % y una determinación de 71,25 % lo cual define una dependencia inversa entre ambas variables.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcívar, Fernanda., Bernal, Norge y Contreras, Vilma. (2013). Estudio del sistema radicular en caña de azúcar en diferentes suelos y su relación con el rendimiento potencial. Ingenio Ecados., III Congreso AETA Guayaquil-Ecuador. pp. 1-8.
- Alejo, Gelasio., Salazar, Fredy., García, J., Arrietta, Beatriz., Jiménez, Victor y Sánchez, Ana. (2012). Degradación físico-química de suelos agrícolas en San Pedro Launillas, Nayarit. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 15: 323-328.
- Álvarez, Jorge. (2002). Caracterización y manejo de los principales factores edáficos limitantes de la agroproduktividad de los suelos., Universidad Camilo Cienfuegos, Facultad de Agronomía, Matanzas, Cuba. pp. 31.
- Amaya, Á. (1995). El cultivo de la caña de azúcar en la zona azucarera de Colombia CENICAÑA, Colombia.
- Bannari, A., Guedon, A.M., El-Harti, A., Cherkaoui, F.Z y El-Ghmari, A. (2008). Characterization of slightly and moderately saline and sodic soils in irrigated agricultural land using simulated data of advanced land imaging (EO-1) sensor. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*, 39(19-20): 2795-2811.
- Baret, F. (1995). Use of spectral reflectance variation to retrieve canopy biophysical character en Danson, F. M. and Plummer, S. E. (eds.) *Advances in Environmental Remote Sensing*. John Wiley & Sons. Ltd. ch.3.
- Casas, R.R. y M.S. Rossi. 2011. Manejo de campos salinos. *Ciencia y tecnología. Supercampo*. Año XVII, N° 196.
- Cid, G., Herrera, Julián., López, Teresa y González, Felicita. (2016). Resultados de algunas investigaciones en suelos Vérticos de Cuba. *Revista de Ingeniería Agrícola*, 6:51-56.

- Contreras, Vilma y Arzola, Nelson. (2006). Estudio de factores edáficos potencialmente limitantes del rendimiento de la caña de azúcar., Intendente de Fitosanidad e Investigaciones agrícolas, Ingenio ECUDOS S.A., Ecuador. Instituto Nacional de Investigaciones de la caña de azúcar de Cuba.
- Corella, T., Andérez, M., Taboada, M. M y Taboada, M. T.(2002). Principales aspectos edafológicos de la provincia de Holguín (Cuba). Uso y manejo de los suelos. *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña* 27:103-115.
- Dancé, José y Sáenz, Domingo. (2016). La cosecha de caña de azúcar: impacto económico, social y ambiental., Dirección de Investigación FCCEF - USMPPerú. pp. 1-18.
- De Miguel, Constantino y Sánchez, Yumisledis. (2011). Factores hidrogeológicos que influyen en la salinidad de los suelos: ejemplo del estudio Valle del Cauto provincia Holguín. *GEO 12-P5* 30:14.
- Díaz, Bárbara., Cairo, Pedro., Pineda, Enma., Mas, Rafael., Acosta, Fidel., Becerra, Everaldo., Clavelo, Betsy y Quiñones, Reinaldo. (2010). La aplicación de fertilizantes orgánicos y minerales naturales en el cultivo de la caña de azúcar (parte II): efecto a largo plazo sobre el rendimiento y la calidad del suelo. *Centro Azúcar* 37: 35-42.
- Ding, J y Yu, D. (2014). Monitoring and evaluating spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the Werigan –Kuqa Oasis, China, using remote sensing and electromagnetic induction instruments. *Geoderma*, 235-236(4): 316-322.
- Elhag, M. (2016). Evaluation of Different Soil Salinity Mapping Using Remote Sensing Techniques in Arid Ecosystems, Saudi Arabia”, *Journal of Sensors*, Doi.org/10.1155/2016/7596175; 1-8.

- FAO. (1995). Comercio internacional, medio ambiente y desarrollo agrícola sostenible. En: El estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación., Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación., Roma, Italia.
- Gilabert, M. A., González, J y García, J. (1997). Acerca de los Índices de Vegetación. *Revista de Teledetección*, (8): 1-10.
- Harti, A.E., Lhissou, R., Chokmani, K., Ouzemou, J., Hassouna, M., Bachaoui, E.M y Ghmari, A.E. (2016). Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla Plain (Morocco) using satellite spectral indices. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf*, 50: 64-73.
- Hernández, A., Llanes, Violeta., López, Dagoberto y Rodríguez, Jesús. (2014). Características de Vertisoles en áreas periféricas de La Habana. *Cultivos Tropicales*, 35: 68-74.
- Herrera, A., Milanés., Nelson., Molina, Fortino., Ordóñez, Pedro., Elorza, Pablo., Castillo, Adolfo., Enríquez, Vidal y Rodríguez, Daniel.(2009 a). Efecto del manejo de los residuos de cosecha de la caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) sobre el rendimiento de campo en Veracruz, México. *Revista UDO Agrícola*, 9: 517-521.
- Jacobus, Sybrand. (2017). Indirect soil salinity detection in irrigated areas using earth observation methods. Thesis presented in fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in the Faculty of Science at Stellenbosch University.
- Kumar, Allbed y Aldakheel. (2014). Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated región”, *Geoderma*, 230-231: 1-8. Doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.025

- Lau, Q. A., Garea, E. L. y Ruiz, M. E. (2005), Estimación de la salinidad de los suelos utilizando una imagen espectrozonal y el sistema de información geográfica Telemap, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 14(1): 47-54.
- Lau, Q. A., S. Lhermitte, S. Gilliams y M. E. Ruiz (2003), Relación de la salinidad del suelo con la reflectancia multispectral de la caña de azúcar cultivada en condiciones extremas, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 12(3): 19-29.
- Marasca, I., Barbosa, Reginaldo., Pereira, Maria., Paz, Antonio y Pereira, Kleber. (2015). Morphology of sugar cane in preparation and deep bed soil. *IDESIA* 33(4): 23-29.
- McCloy, K.R. (1995). Resource management information systems process and practice. Taylor y Francis, London.
- Meera, G., Parthiban, S., Thummalu, Nagaraj y Christy, A. (2015). NDVI: Vegetation change detection using remote sensing and gis-A case study of Vellore District. *Procedia Computer Science*, 57: 1199-1210.
- Moreira, B. (2014) Erosão hídrica pós-plantioem florestas de eucalipto nabacia do rio Paraná, no leste do Mato Grosso do Sul.. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38: 1565-1575.
- Narváez, M., Combatt, E y Bustamante, I. (2014). Distribución espacial de la salinidad en suelos del área de influencia de la desembocadura del río Sinú(Córdoba, Colombia). *U.D.C.A Act. & Div. Cient* 17: 433-443.
- Núñez, Ramón., López, Vilma., Ricardo, Sandro y Paz, Antonio. (2010). Estudio de la resistencia de penetración de un suelo Vertisol con el uso del penetrómetro de impacto en la localidad de "Antonio Maceo". *Cacocum*. Holguín. Cuba. *Ciencias Holguín*,pp.3.
- Olivera, Dilier. (2012). *La Degradación de los Suelos en Cuba*, Juan José Ibáñez, Cuba.

- Otero, Lázara., Morles, Roberto y Vento, Mirna. (2011). Salinidad del suelo: un problema que incumbe a todos. *Agricultura Orgánica* 1:1-2.
- Platonov, A., A. Nobley., R y Kuziev, R. (2013). Soil salinity mapping using multi-temporal satellite images in agricultural fields of Syrdarya province of Uzbekistan. In Shahid SA, Abdelfattah MA, and Taha FK (eds) *Developments in soil salinity assessment and reclamation: Innovative thinking and use of marginal soil and water resources in irrigated agriculture*. Dordrecht: Springer.
- Ponvert Delisles., Dámaso R., Kelly, F. Samuel y Reyes, I. (2012). Las técnicas geomáticas aplicadas en la agricultura: El catastro agrícola *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(4): 84-92 ISSN: 1010-2760.
- Rawashdeh, S. B. A. (2012). Assessment of Change Detection Method Based on Normalized Vegetation Index in Environmental 10 Studies. *Internatinal Journal of Applied Science and Engineering*, 10(2): 89-97.
- Richards, L. A. (1954), *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*, United States Salinity Laboratory Staff, *Agriculture Handbook* (60): 1-160.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A y Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: *NASA Special Publication*. 351. pp. 309.
- Scudiero, E., Skaggs, T.H y Corwin, D.L. (2015). Regional-scale soil salinity assessment using Landsat ETM plus canopy reflectance. *Remote Sens. Environ*, 169: 335-343.
- Sidike, A., Zhao, S y Wen, Y. (2014). Estimating soil salinity in Pingluo County of China using QuickBird data and soil reflectance spectra. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf*, 26: 156-175.
- Torres, C., Gutiérrez, María., Ortiz, Carlos y Gutiérrez, Edgar. (2016). Manejo agronómico de los Vertisoles en México. *Terra Latinoamericana* 34: 457-466.

Villegas, F. (2010). Sistema radical de la caña de azúcar.El sistema radical de las plantas y la absorción de nutrimentos. *Tecnicaña*, (25): 25-29.

Wang, Jingzhe., Ding, Jianli., Yu, Danlin., Teng, Dexiong., He, Bin., Chen, Xiangyue., Ge, Xiangyu., Zhang, Zipeng., Wang, Yi., Yang, Xiaodong., Shi, Tiezhu y Su, Fenzhen. (2020). Machine learning-based detection of soil salinity in an arid desert region, Northwest China: A comparison between Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI. *Science of the Total Environment*, 707 (136092): 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136092>

WRB. (2006). World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication., in: W. S. R. Report (Ed.), IUSS-ISRIC and FAO (International Union of Soil Sciences-Information Soil Reference and Information Centre and Food and Agriculture Organization). Rome, Italy.