

USO DE ÍNDICES DE HUMEDAD NDWI Y MSI COMO HERRAMIENTAS PARA BUSCAR EL MOMENTO ÓPTIMO DE COSECHA DE CAÑA DE AZÚCAR

Braulio Villatoro¹; Rodolfo Fuentes², Carlos Barrera³

¹Especialista en Agricultura de Precisión y Cosecha, CENGICAÑA;

²Sistemas de Información Geográfica, Ingenio Madre Tierra;

³Técnico en Agricultura de Precisión, CENGICAÑA.

RESUMEN

En el año 2020 se entregó por parte de CENGICAÑA una metodología para poder utilizar los índices de humedad NDWI y MSI como herramientas para buscar el momento óptimo de cosecha de caña de azúcar. Durante la zafra 2020/2021, la metodología fue adoptada por el ingenio Madre Tierra, se realizaron en total 13,281 muestras, se realizó un análisis con las coordenadas reales de la ubicación de las muestras, se hizo una depuración de aquellas muestras realizadas en áreas con nubes o sombras de nubes y se obtuvieron al final 11,547 muestras para el análisis. Los resultados de humedad de caña, Pol caña, Brix, pureza, sacarosa, fibra, porcentaje de jugo, rendimiento real y rendimiento probable fueron analizados en el laboratorio. Se hizo un análisis de obtener el promedio para diferentes porcentajes de humedad. Para analizar la relación entre las variables se realizaron gráficas de dispersión y se obtuvo el coeficiente de correlación, el modelo y el coeficiente de determinación de Pearson. Se generaron 15 análisis de determinación. Cuatro para determinar si existe dependencia entre los índices NDWI-11, NDWI-12, MSI-11, MSI-12 y la humedad de caña. Dos para determinar si existe dependencia entre la humedad de caña y el Pol caña y el rendimiento real. También se hicieron análisis para determinar si existe dependencia entre los índices NDWI-11 y MSI-11 con la humedad de caña a través de los distintos muestreos realizados (tres análisis de cada índice). El último análisis fue para saber la dependencia entre la humedad de la caña y el Pol caña (porcentaje) en los tres muestreos realizados. Al analizar la correlación entre los índices de vegetación y la humedad de caña se obtuvieron los siguientes valores de R^2 , 0.9692 para NDWI-11; 0.9620 para NDWI-12; 0.9576 para MSI-11 y 0.9521 para MSI-12. Entre la humedad de la caña y el Pol caña y el rendimiento real se obtuvieron valores de coeficiente de determinación R^2 de 0.9369 y 0.9369 respectivamente.

Palabras clave: NDWI, MSI, Sentinel-2, humedad de caña, Pol caña, caña de azúcar.

ABSTRACT

In 2020, CENGICAÑA delivered a methodology to be able to use the NDWI and MSI humidity indices as tools to find the optimal time to harvest sugar cane. During the 2020/2021 harvest, the methodology was adopted by the mill Madre Tierra, a total of 13,281 samples were carried out, an analysis was carried out with the real coordinates of the location of the samples, a purification of those samples carried out in areas with clouds or cloud shadows and 11,547 samples were ultimately obtained for analysis. The results of cane moisture, cane Pol, Brix, purity, sucrose, fiber, juice percentage, real yield and probable yield were analyzed in the laboratory. An analysis was made to obtain the average for different percentages of humidity. To analyze the relationship between the variables, scatter graphs were made and the correlation coefficient, the model and the Pearson coefficient of determination were obtained. 15 determination runs were generated. Four to determine if there is a dependency between the NDWI-11, NDWI-12, MSI-11, MSI-12 indices and cane moisture. Two to determine if there is a dependency between the cane humidity and the cane Pol and the real Yield. Analyzes were also carried out to determine if there is dependence between the NDWI-11 and MSI-11 indices with the cane moisture through the different samplings carried out (three analyzes of each index). The last analysis was to know the dependence between the cane humidity and the Pol cane (percentage) in the three samplings carried out. When analyzing the correlation between the vegetation indices and the cane humidity, the following values of R^2 were obtained, 0.9692 for NDWI-11; 0.9620 for NDWI-12; 0.9576 for MSI-11 and 0.9521 for MSI-12. Between the humidity of the cane and the Pol cane and the real Yield values of coefficient of determination R^2 of 0.9369 and 0.9369 respectively were obtained.

Keywords: NDWI, MSI, Sentinel-2, cane moisture, Pol cane, sugar cane.

USO DE ÍNDICES DE HUMEDAD NDWI Y MSI COMO HERRAMIENTAS PARA BUSCAR EL MOMENTO ÓPTIMO DE COSECHA DE CAÑA DE AZÚCAR

Braulio Villatoro¹; Rodolfo Fuentes², Carlos Barrera³
¹Especialista en Agricultura de Precisión y Cosecha, CENGICAÑA; ²Sistemas de Información Geográfica, Ingenio Madre Tierra; ³Técnico en Agricultura de Precisión, CENGICAÑA.

INTRODUCCIÓN

Un trabajo constante en el cultivo de la caña de azúcar en cualquier agroindustria del mundo es obtener la mayor cantidad de azúcar por hectárea en cada época de cosecha. Se han desarrollado diversidad de tecnologías para lograr esta mayor concentración de azúcar, de forma natural o de forma inducida principalmente de forma química. La práctica más extendida es aplicar un producto madurador semanas antes de la fecha en la que se programó la cosecha. Al mismo tiempo se le suspende el riego para que se detenga el crecimiento de la planta y pueda ocurrir una mayor concentración de azúcar. Recientemente el principal producto químico utilizado se está cambiando por ser un herbicida y se están buscando opciones que sean no herbicidas. También se está implementando el uso de productos denominados premadurantes, que consiste en aplicar nutrientes vegetales durante la mayor parte del ciclo de crecimiento de la caña, enfocado en aumentar la concentración de azúcar al final del proceso.

Al mismo tiempo del desarrollo de tecnologías para aumentar la concentración del azúcar un punto muy importante es poder cortar la caña de azúcar en el momento oportuno, en el cual se obtenga la mayor concentración de azúcar. En la búsqueda de ese momento oportuno se utilizan una combinación de factores que ayuden a tomar la mejor decisión. Depende de cada empresa que factores utiliza, uno de los más comunes entre empresas es el muestreo precosecha, desde el momento de la aplicación del madurador químico, se realizan muestreos semanales o quincenales para ir obteniendo la condición que va presentando el cañaveral. Dependiendo del producto se ha analizado que el período entre aplicación de madurador y cosecha es entre cuatro y siete semanas. Los factores que se obtienen a través del muestreo son analizados en el laboratorio, entre los que se evalúan están: Brix, pol, humedad de la caña, otros. El muestreo representa un trabajo importante en recursos y horas de los técnicos de los ingenios.

Utilizando herramientas tecnológicas de reciente implementación como el uso de índices de vegetación obtenidos de imágenes satelitales, se pueden obtener los valores que al momento de cosecha indican una mayor concentración de azúcar, para poder cosechar la caña en su momento óptimo. El objetivo de este trabajo fué analizar la implementación de la metodología para utilizar los índices de vegetación NDWI y MSI obtenidos de imágenes satelitales Sentinel-2 para monitoreo de humedad como indicador de momento óptimo de cosecha de caña de azúcar, entregado en el 2020 por parte del área de Agricultura de Precisión de CENGICAÑA (Villatoro, 2020) implementada por el ingenio Madre Tierra durante la zafra 2020/2021. Con este trabajo se da cumplimiento con el indicador del Mapa Estratégico 2021 de ASAZGUA del área de Agricultura de Precisión de CENGICAÑA.

OBJETIVOS

- Validar la metodología para poder utilizar los índices de vegetación de humedad NDWI y MSI obtenidos de imágenes satelitales Sentinel-2 para monitoreo de humedad como indicador de momento óptimo de cosecha de caña de azúcar.

- Determinar la correlación existente entre el valor de NDWI, MSI y los indicadores de laboratorio: humedad de caña y Pol caña.
- Obtener los valores de los diferentes índices de vegetación en el cual se encuentra el mayor rendimiento de azúcar (Kg azúcar/TC), priorizando ese valor al momento de la labor de cosecha para obtener una mayor concentración de sacarosa.

REVISIÓN DE LITERATURA

Satélite Sentinel-2:

La misión completa de SENTINEL-2 comprende satélites gemelos de órbita polar en la misma órbita, en fases a 180° entre sí. La misión supervisa la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre, su ancho de franja y alto tiempo de revisión (10 días en el ecuador con un satélite, y cinco días con dos satélites en condiciones libres de nubes) apoyan el monitoreo de cambios de la vegetación dentro de la temporada de crecimiento. (*European Space Agency (ESA), 2015*)

Descripción General

SENTINEL-2 cuenta con instrumentos de captura multispectral, está fundamentada en las misiones SPOT (Francia) y los Satélites de la misión Landsat (Estados Unidos). La cámara multispectral es la más avanzada de su tipo, de hecho es la primera misión óptica de la observación de la Tierra de su clase, debido a que incluye tres bandas en el “*red edge*” que proporciona información clave sobre el estado de la vegetación. Integra dos grandes planos focales visibles del infrarrojo cercano y de onda corta del infrarrojo, cada una equipada con 12 detectores y la integración de 450,000 píxeles. Los píxeles que pueden fallar en el curso de la misión pueden ser reemplazados por píxeles redundantes. Dos tipos de detectores integran filtros de alta calidad para aislar las bandas espectrales perfectamente. (ESA, 2015)

Características

Cada uno de los satélites Sentinel-2 pesa aproximadamente 1.2 toneladas, y está diseñado para ser compatible con los pequeños lanzadores como VEGA y Rockot. La vida útil de cada satélite es de 7.25 años, que incluye una fase de puesta de tres meses en órbita. Baterías y propulsores se han proporcionado para dar cabida a 12 años de operaciones, incluida al final de la vida maniobras de órbita. Dos satélites idénticos SENTINEL-2 funcionan de forma simultánea, por etapas a 180° entre sí, en una órbita sincronizada con el sol a una altitud media de 786 km. La posición de cada satélite SENTINEL-2 en su órbita se medirá por un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) receptor de doble frecuencia. La exactitud Orbital es mantenida por un sistema de propulsión dedicado. El sistema de satélites SENTINEL-2 fue desarrollado por un consorcio industrial liderado por Astrium GmbH (Alemania). Astrium SAS (Francia) es responsable del instrumento multispectral (MSI). (ESA, 2015)

Características de funcionamiento

- Órbitas *Sun-synchronous* se utilizan para asegurar que el ángulo de la luz solar sobre la superficie de la Tierra se mantenga constante. Aparte de pequeñas variaciones estacionales, anclaje de la órbita de los satélites al ángulo del sol minimiza el impacto potencial de las sombras y los niveles de iluminación en el suelo. Esto asegura la consistencia en el tiempo y es fundamental en la evaluación de los datos de series de tiempo.
- La altitud media de la órbita de la constelación SENTINEL-2 es de 786 km.
- La inclinación de la órbita es 98.62°
- Medio Local Hora Solar (MLST) en el nodo descendente: 10:30 (de la mañana). Este valor de MLST fue elegido como un compromiso entre un nivel adecuado de iluminación solar y la minimización del potencial de la cobertura de nubes. El valor MLST es cerca de la hora local del paso elevado LANDSAT

y casi idéntica a la del SPOT-5, lo que permite la integración de datos de SENTINEL-2 con las misiones existentes e históricas, y contribuir a la recopilación de datos de series de tiempo a largo plazo.

- Adquiere sistemáticamente datos sobre zonas terrestres y costeras en una banda de latitud que se extiende desde los 56° Sur (Isla Hornos, el cabo de Hornos, América del Sur) a 83° norte (arriba Groenlandia). (León, 2015)

Acceso y descarga de datos Sentinel-2

La Agencia Espacial Europea (ESA) ha creado un portal de acceso de datos, de los productos del proyecto COPERNICUS, en la cual se tiene acceso a la información de las tomas de imágenes de los satélites SENTINEL-1 y SENTINEL-2, este portal se puede acceder mediante el link <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> en el cual se pueden realizar diferentes tipos de búsqueda realizando ciertos filtros.

Procesamiento de imágenes de satélite Sentinel-2

El área de Agricultura de Precisión de CENGICAÑA está descargando, procesando y entregando las imágenes del satélite Sentinel-2 a los técnicos de los ingenios azucareros clientes de CENGICAÑA. La metodología para procesar las imágenes del satélite Sentinel-2 se estableció en el año 2019 (Fuentes, 2019).

ÍNDICES DE VEGETACIÓN UTILIZADOS EN LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA DE GUATEMALA

Se están entregando tres índices de vegetación obtenidos de las imágenes de satélite Sentinel-2:

- NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), Índice de vegetación de diferencia normalizada. Para su cálculo se utilizan las bandas del espectro visible y el infrarrojo cercano. (Villatoro, 2015)
- NDWI (*Normalized Difference Water Index*), Índice de agua de diferencia normalizada. Para su cálculo se utilizan las bandas del infrarrojo cercano y del infrarrojo medio (De León y Villatoro, 2017)
- MSI (*Moisture Stress Index*), Índice de estrés hídrico. Para su cálculo se utilizan las bandas del infrarrojo cercano y del infrarrojo medio. (De León y Villatoro, 2017)

Infrarrojo

Asociado generalmente al calor, se encuentra en la frecuencia de onda desde 0.7 a 100 micrómetros, puede subdividirse en dos categorías, basadas en las propiedades de la radiación, la primera reflejada y utilizada en teledetección de manera similar al visible y la segunda térmica o emitida, por la radiación de la superficie de la tierra en forma de calor. (Chuvienco, 1995).

Infrarrojo cercano

(IRC: 0.7 a 1.3 μ m) denominado infrarrojo próximo. Fotográfico o reflejado, ya que parte de él, puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales, es de especial importancia por su capacidad de diferenciar masas vegetales y concentraciones de humedad. (Chuvienco, 1995).

Infrarrojo medio

(IRM: 1.3 a 8 μ m) denominado infrarrojo medio, en el cual se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. El primer caso se encuentra entre las bandas (1.3 y 2.5) y denominada infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR), región idónea para la estimación del contenido de humedad en la vegetación o los suelos. La segunda entre (3 y 5 μ m) y suele denominarse más propiamente como infrarrojo medio (IRM), siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura, como incendios o volcanes activos. (Chuvienco, 1995). En la Figura 2 se presentan las zonas del infrarrojo medio que indican las áreas influenciadas por la presencia o ausencia del agua en la planta.

NDWI

Es un índice de vegetación identificado por las siglas del nombre en inglés (*Normal Difference Water Index*). Este índice es sensible a los cambios en el contenido de agua en el dosel de la vegetación debido a la reflectancia a 857 nm y 1241 nm; tiene propiedades de absorción de agua líquida similar pero ligeramente diferente. La dispersión de la luz por los doseles de vegetación aumenta la débil absorción de agua líquida a 1241 nm. Las aplicaciones incluyen el análisis de estrés del dosel de los bosques, los estudios de índice de área foliar en la vegetación densa foliada, modelaje de productividad de las plantas y los estudios de susceptibilidad de fuego. El valor de este índice varía de -1 a 1. El intervalo común para la vegetación verde es -0.1 a 0.4 (Gao, 1995). La fórmula propuesta por Gao (1995) para calcular el NDWI es $NDWI = ((\rho_{857} - \rho_{1241}) / ((\rho_{857} + \rho_{1241})))$. Laurentino (2014) presenta la fórmula de manera general siguiente $NDWI = ((NIR - SWIR) / ((NIR + SWIR)))$.

Considerando las bandas disponibles del satélite Sentinel-2, existe la posibilidad de utilizar dos bandas para calcular el NDWI. En el caso del SWIR, existen dos bandas la banda 11 y la banda 12. Se utilizaron ambas para el cálculo del índice y se identificaron como NDWI-11, cuando se utilizó la banda 11 como SWIR y NDWI-12, cuando se utilizó la banda 12 como SWIR.

MSI

Es un índice de vegetación identificado por las siglas del nombre en inglés (*Moisture Stress Index*). Este índice es una medida de reflectancia que es sensible al aumentar el contenido de agua de la hoja. A medida que el contenido de agua en la copa de las plantas aumenta, la fuerza de la absorción alrededor de 1599 nm aumenta. La absorción a 819 nm casi no es afectada por el cambio de contenido de agua, por lo que se utiliza como la referencia. Las aplicaciones incluyen el análisis del estrés del dosel, la predicción de la productividad y el modelamiento, análisis del estado del riesgo de incendio, y los estudios de la fisiología del ecosistema. El MSI tiene relación inversa con los otros índices de vegetación de agua, los valores más altos indican un mayor estrés hídrico y por lo tanto un menor contenido de agua. El valor de este índice varía de 0 a más de 3. El intervalo común para la vegetación verde es de 0.4 a 2. (Hunt y Rock, 1989; Ceccato, 2001). Ceccato (2001) para calcular el MSI propone la siguiente fórmula $MSI = \rho_{1599} / \rho_{819}$. Laurentino (2014) presenta de manera general la fórmula siguiente $MSI = SWIR / NIR$.

Considerando las bandas disponibles del satélite Sentinel-2 existe la posibilidad de utilizar dos bandas para calcular el MSI. En el caso del SWIR, existen dos bandas la 11 y la 12. Se utilizaron ambas para el cálculo del índice y se identificaron como MSI-11, cuando se utilizó la banda 11 como SWIR y MSI-12, cuando se utilizó la banda 12 como SWIR.

MADURACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR

El cultivo de caña de azúcar muestra durante su desarrollo cuatro etapas: Iniciación, macollamiento, elongación o gran crecimiento y maduración. La etapa de iniciación comprende generalmente desde la germinación hasta 45 días después de la siembra. La etapa de macollamiento tiene una duración promedio de tres meses. La elongación ocurre en un periodo de seis meses; esta etapa es la más importante en términos de crecimiento del cultivo. La última etapa es la de maduración con una duración media de 45 días. (Espinoza, 2012)

En la etapa de maduración la planta de caña de azúcar disminuye su ritmo de crecimiento y comienza a acumular sacarosa en el tallo. En general, el proceso de maduración es gradual hasta llegar a un punto máximo, después del cual el contenido de sacarosa en los tallos de caña declina. Según Buenaventura (1986)

citado por Espinoza (2012), la concentración de sacarosa en el jugo depende de varios factores como la oscilación de la temperatura entre el día y la noche (15°C), la humedad del suelo o precipitación (30-100 mm/mes) y la luminosidad (11.5-12.5 horas luz) entre cuatro y seis semanas antes de la cosecha. Esta etapa es clave por ser la etapa de la concentración del producto industrial final de interés: la sacarosa. En la mayoría de los países productores de caña de azúcar, las condiciones climáticas marcan la época de cosecha. En Guatemala, las condiciones ambientales antes mencionadas ocurren entre noviembre y abril que es el período donde se realiza la zafra.

En muchos países productores de caña se utiliza la maduración artificial, que consiste en proporcionar al cultivo ciertas condiciones para inducir su maduración, cuando éstas no se dan naturalmente, como, la reducción en la humedad del suelo, y las oscilaciones en la temperatura (Deuber, 1998; Caputo *et al.*, 2008; Alexander, 1973 y Legendre, 1975) citados por Espinoza, 2012. En Guatemala la caña de azúcar que se cosecha al principio de la zafra tiene en general baja concentración de sacarosa, debido a que está iniciando su maduración y aún conserva un alto contenido de humedad en los tallos. La aplicación de maduradores permite la mayor acumulación de sacarosa en ese período inicial de la zafra. Conforme avanza el período de cosecha, se obtienen valores mayores de concentración de sacarosa en los tallos y especialmente en febrero se obtiene una mejor acumulación, debido a que las condiciones del clima coinciden con las indicadas anteriormente como favorables para la acumulación de sacarosa en ese período del año.

En términos generales, la aplicación de maduradores forma parte de la estrategia de cosecha para inducir incrementos en la concentración de azúcar. Los resultados indican que la aplicación de maduradores ayuda a anticipar la maduración de la planta, mejorando la concentración de sacarosa (Villegas, 2003; Caputo *et al.*, 2008 y Leite, 2005) citados por Espinoza, 2012.

Maduración natural de la caña de azúcar

La maduración natural de la caña de azúcar, inicia cuando se disminuye la tasa de crecimiento del tallo, hay menor humedad en el suelo y bajas temperaturas; sin embargo, en Guatemala esto es un problema cuando se inicia la zafra, debido a que no se cumplen esas condiciones porque el exceso de humedad en la planta y el suelo hacen que la planta continúe creciendo (Espinoza, 2012).

Maduradores químicos

Los maduradores químicos en su mayoría son compuestos con propiedades herbicidas que, aplicados en dosis bajas inhiben, fomentan o alteran de alguna manera procesos fisiológicos en la planta de la caña de azúcar (Lavanholi *et al.*, 2002 y Almeida *et al.*, 2003) citados por Espinoza, 2012.

La aplicación de maduradores tiene como objetivo alterar o modificar las condiciones morfológicas y fisiológicas de la planta de caña de azúcar. Estas modificaciones pueden ser cualitativas y cuantitativas, tales como: anticipa la maduración, retarda o inhibe el desarrollo vegetativo, promueve el incremento de sacarosa, sobre todo en los entrenudos inmaduros cercanos al ápice del tallo, permite un corte de punta más alto, disminuye el material extraño que va del campo a la fábrica (*Trash*), provoca el desecamiento temprano del follaje y mejora la eficiencia de la cosecha y la calidad de la materia prima (Espinoza, 2012).

Los maduradores químicos modifican el desarrollo de la planta en el nivel de las enzimas que catalizan la acumulación de sacarosa, lo cual favorece mayor concentración de azúcar en el tallo. En general la maduración es un proceso fisiológico resultado del balance entre la fotosíntesis (proceso que produce azúcares) y la respiración (proceso que consume azúcares). Estos compuestos son capaces de modificar la morfología y fisiología de la planta, paralizando el desarrollo vegetativo de la caña de azúcar, induciendo a la translocación y el almacenamiento de azúcares, principalmente sacarosa, pudiendo ocasionar modificaciones cualitativas y cuantitativas de la producción (Castro, 1999) citado por Espinoza, 2012.

Los productos maduradores más utilizados en Guatemala son herbicidas químicos no selectivos, que contienen como ingrediente activo la molécula de Glifosato. También se utilizan herbicidas selectivos graminicidas y en los últimos tres años, CENGICAÑA juntamente con los ingenios azucareros de Guatemala, han investigado una serie de opciones entre estos maduradores no herbicidas, tales como nutrientes con base en potasio y boro entre otros reguladores de crecimiento. En la actualidad se están buscando opciones de mezclas de herbicidas con elementos mayores o menores, tales como boro (B) y potasio (K) (Espinoza y Corado, 2011).

Los maduradores basados en elementos como boro, potasio y fósforo son una opción, debido a la función fisiológica de cada elemento nutricional, que tienen un efecto aditivo en la acumulación de sacarosa; para el caso de boro, tiene la función de acelerar el transporte de la molécula de sacarosa en el floema, de las hojas al tallo, a través del complejo sacarosa-borato. Otras funciones del boro son: síntesis de paredes celulares, lignificación de la pared celular, estructura de paredes celulares, metabolismo de carbohidratos, metabolismo de ARN y ácido indol acético (AIA), respiración, metabolismo fenólico, metabolismo de ascorbato e integridad de la membrana plasmática. Dentro de las funciones anteriores, dos son bien definidas en el proceso fisiológico de la planta: síntesis de la pared celular e integridad de la membrana plasmática (Cakmak&Römheld, 1997).

Humedad del suelo: En algunos ingenios se recomienda limitar el riego hacia los 30-45 días antes de la cosecha, con el fin de facilitar a la planta el transporte de azúcares hacia el tallo. Cuando no se cumple con esa recomendación se le puede dar a la planta “una señal” de utilizar el azúcar para continuar su crecimiento y, por lo tanto, disminuir la concentración de azúcar en los tallos. Debido a lo anterior, es importante aumentar la dosis de madurador cuando existen condiciones de alta humedad en el suelo (Villegas, 2003).

Monitoreo post-aplicación y durante la cosecha

Normalmente después de la aplicación de madurador se realizan muestreos pre-cosecha, con el fin de conocer el efecto madurador en la acumulación de sacarosa y de esta manera planificar la cosecha en su punto de máxima acumulación. Los muestreos precosecha se efectúan en al menos cinco puntos de un lote de 20 ha; en cada estación o punto de muestreo se obtienen cinco tallos molederos cortados continuos en al menos un m lineal, o una macolla completa. Cada tallo se corta en trozos de entre 40 y 50 cm de longitud. En el laboratorio se analizan los jugos para determinar Brix, pol % caña y azúcares reductores y se calculan los valores de pureza del jugo en porcentaje, rendimiento potencial y comercial (kg de azúcar/tonelada métrica de caña).

COSECHA DE CAÑA DE AZÚCAR

El proceso de cosecha en Guatemala se realiza de dos formas: manual y mecanizado. El proceso manual está compuesto de cinco etapas y tres sistemas de operación. Las cinco etapas del proceso son: muestreo pre-cosecha, quema de la caña de azúcar, corte manual, alce y transporte. Los sistemas de operación son: granel (chorra continua y chorra discontinua), tramos y maletas. El proceso de cosecha mecanizada se realiza en verde o en quemado y a través de tres procesos específicos de cosecha mecanizada. (Villatoro, 2017a)

Para este trabajo es importante mencionar el proceso de muestreo pre-cosecha, porque es parte fundamental en la metodología a desarrollar como resultado del artículo.

Muestreo pre-cosecha

El objetivo del muestreo es obtener muestras representativas para que los resultados de los análisis, permitan conocer el grado de madurez de la caña, el rendimiento de kilogramos de azúcar por tonelada de caña, enfermedades y otros indicadores involucrados en el control de la calidad. Con base en los parámetros aceptables, se determinan los criterios de selección de lotes para el orden de corte de la caña de azúcar; los

resultados de los muestreos son esenciales para la toma de decisiones de la coordinación de cosecha, como apoyo complementario al manejo del orden de corte; con esto se obtiene una tendencia de la calidad de la caña que se entregará a molienda. (Villatoro, 2017a).

a. Preparación del muestreo

Se recomienda programar el muestreo con base en los planos de los cañaverales debidamente lotificados y codificados, estableciendo las estaciones de muestreo según las dimensiones y topografía de los lotes a muestrear. Se recomienda establecer una estación de muestreo, dejando entre cada muestra el área establecida por el ingenio. Se asignará un código de acuerdo a lo establecido por cada ingenio. Se recomienda establecer los grupos de muestreo de acuerdo al número de lotes, programando debidamente la actividad semanal de cada grupo (cantidad de muestras, finca, lote, etc.). Se debe proporcionar un juego de planos de los lotes a muestrear, con las estaciones debidamente localizadas en el correspondiente plano, así como las boletas de información de campo y etiquetas para identificar las muestras, (Villatoro, 2017a).

b. Ubicación de los puntos a muestrear

Los puntos a muestrear se deben determinar utilizando un índice de vegetación base para su ubicación, considerando para el número de muestras el área del mismo. Al ubicar los puntos de muestreos, se procederá a la elaboración de las brechas, con un mínimo de 20 metros dentro del cañaveral. Las entradas o brechas donde se toma la primera muestra deben marcarse con el procedimiento establecido por el ingenio para facilitar la ubicación de los muestreos posteriores, (Villatoro, 2017a).

c. Toma de la muestra

Para la primera muestra se procederá a cortar el número de tallos establecido por cada ingenio, no tomando tallos tiernos (mamones) menores de 1 metro de longitud. Los tallos no deben despuntarse sino hasta el momento de la preparación de la muestra; el despunte debe ser en el punto de quiebre del tallo. Si hubiera presencia de lalas en los tallos que componen las muestras no deben eliminarse. Si existe daño de plagas en las cañas que conforman la muestra, deben tomarse en cuenta esos tallos dañados. El corte de la caña debe ser a ras de suelo y el despunte a la altura en que normalmente el cortador despuntaría la caña que se envía al ingenio. Luego se deshojan y se acomodan en paquetes los cuales se amarran o sujetan con pita de nylon.

d. Identificación de la muestra

Una vez obtenida la muestra, el paquete se identifica con una etiqueta, la que se amarra con la punta de la pita que sujeta al paquete. Se recomienda que contenga al menos la siguiente información: finca, código de finca, lote, variedad, fecha de muestreo, número de muestreo, número de estación, responsable.

Época adecuada de cosecha

La recolección de caña inmadura o sobre madura mediante un método inadecuado de cosecha, provoca pérdidas en la producción de caña y en la recuperación de azúcar, produciendo un jugo de mala calidad y también causa problemas en la molienda, debido a la presencia de cuerpos extraños, (Vered, sf.).

Una cosecha adecuada debe asegurar que:

La caña sea cosechada en su máximo estado de madurez, evitando cortar caña sobre madura o inmadura.

- El corte de la caña debe ser hasta el suelo, para cosechar los entrenudos inferiores ricos en azúcar, aumentando la producción y el rendimiento de azúcar.
- El despunte debe hacerse a una altura adecuada para eliminar los entrenudos superiores inmaduros.
- La caña debe estar limpia, removiendo los cuerpos extraños, tales como hojas, basura, raíces, etc.
- La caña cosechada debe enviarse rápidamente al ingenio, (Vered, sf.).

La consideración de los siguientes criterios permite cosechar la caña en el momento adecuado, mediante los procedimientos apropiados:

Parámetros de Calidad de cosecha

Los más importantes parámetros cualitativos para determinar la madurez de la caña son los Brix del jugo, el porcentaje de sacarosa o Pol y la pureza aparente.

- **Brix del jugo:** Los Brix del jugo se refieren al contenido de sólidos solubles totales presentes en el jugo, expresados como porcentaje. Los Brix incluyen a los azúcares y a compuestos que no son azúcares. Los Brix pueden ser medidos en el campo, en la misma plantación, utilizando un refractómetro manual para Brix o HR Brix. Para esto se perforan varias plantas en el campo y se colecta su jugo para formar una muestra compuesta que será analizada. Luego se pone una gota del jugo compuesto en el refractómetro manual y se hace la medición de grados Brix. El campo circular del visor se oscurece a medida que aumenta el nivel de Brix, que puede ser leído fácilmente. El refractómetro manual para Brix tiene graduaciones de 0 a 32 por ciento. Las lecturas de Brix pueden tomarse por separado en la parte superior o inferior del cultivo. Un rango estrecho de lectura indica madurez de la caña, mientras que un rango amplio indica que la caña ya está demasiado madura. Por otro lado, si la parte inferior de la caña tiene un menor valor de Brix que la parte superior, esto indica que la caña está sobremadura y que está ocurriendo reversión del azúcar, (Vered, sf.).
- **Sacarosa del jugo o porcentaje Pol:** El porcentaje de sacarosa del jugo es el contenido real de azúcar de caña presente en el jugo. Se determina con un polarímetro, de ahí que el porcentaje de sacarosa también sea llamado como porcentaje Pol. Para efectos prácticos el porcentaje de sacarosa y el porcentaje Pol son sinónimos. En la actualidad existe un instrumento llamado sucrolisador, que también determina el porcentaje de sacarosa en el jugo, (Vered, sf.).
- **Coefficiente de Pureza:** Se refiere al porcentaje de sacarosa respecto al contenido total de sólidos solubles del jugo. Una mayor pureza indica que existe un contenido mayor de sacarosa que de sólidos solubles en el jugo. El porcentaje de pureza junto con el porcentaje de sacarosa ayudan en la determinación de la época de madurez. Un cultivo de caña de azúcar está apto para la cosecha cuando ha alcanzado un mínimo de 16 por ciento de sacarosa y 85 por ciento de pureza, (Vered, sf.).

$$\text{Porcentaje de Pureza} = (\% \text{ Sacarosa} / \text{HR Brix}) * 100$$

- **Azúcares Reductores:** Se refiere al porcentaje de otros azúcares (fructosa y glucosa) presentes en el jugo. Un menor nivel de azúcares reductores indica que la mayoría de ellos han sido convertidos en sacarosa, (Vered, sf.).
- **Azúcar Comercial de Caña:** El azúcar comercial de caña (ACC) se refiere al porcentaje de todo el azúcar recuperable de la caña. Se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\text{ACC (ton/ha)} = [\text{Producción (ton/ha)} \times \text{Recuperación de Azúcar (\%)}] / 100$$

$$\text{Recuperación de Azúcar (\%)} = [S - 0.4 (B - S)] \times 0.73$$

donde, S= % de Sacarosa en el jugo y B= Brix corregidos (%)

La relación que existe entre Pol y rendimiento de azúcar es bien notorio en cuanto si se tiene buenos resultados analíticos de Pol desde ese momento se puede pensar que se tendrá un buen rendimiento de azúcar, solo que se tiene que mencionar que el Pol tiene relación directa con el Brix ya que si se tiene un buen dato de Pol se tendría que tener un buen valor de Brix.

El Brix no tiene un 100 por ciento relación con el rendimiento de azúcar por motivos que en ocasiones se puede tener un brix alto y Pol bajo esto debido a la calidad de la caña que en muchas ocasiones esto suele suceder porque la caña ya está sobre madura o muy deteriorada.

HUMEDAD DE LA CAÑA DE AZÚCAR

La humedad de la caña tiene una relación muy cercana a la concentración de azúcar, esto es porque la humedad es la que indica que la caña tiene mucha agua saturada, para poder obtener un buen rendimiento debemos de tener poca humedad existente.

Lo que afecta que la concentración de azúcar sea baja depende de muchos factores que suelen ser desde campo hasta la fábrica o proceso.

Cuando se habla de campo se pueden mencionar algunos factores tales como: tipo de suelo, variedad, riego, MIP, malezas, fertilización, radiación solar, edad del cultivo y el momento adecuado de la cosecha cuando se tiene una humedad de cultivo adecuada que oscila entre un 67 a 69 por ciento para poder obtener un mayor rendimiento de azúcar. Para poder saber el porcentaje de humedad existente que tiene en campo los bloques a cosechar se realizan muestreos pre cosecha antes de realizar la labor de cosecha, esto para tener el conocimiento si dichos bloques ya están en las condiciones esperadas en cuanto a humedad y rendimiento de azúcar.

Cuando se logra hablar de fábrica o el proceso dentro de ella es importante el tema de fabricación ya que si el proceso es muy eficiente se puede aprovechar al máximo la calidad de la caña y extraer todo el potencial en cuanto a rendimiento de azúcar.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

La metodología fue presentada por Villatoro (2020) y fue adoptada por el ingenio Madre Tierra durante la zafra 2020-2021 en sus campos de cultivo de caña de azúcar. Se utilizaron imágenes del satélite Sentinel-2 para la ubicación de los muestreos.

MATERIALES

1. Software de Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS)
2. Imágenes satelitales obtenidas del satélite Sentinel-2 (se pueden descargar de la página <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)
3. Índices de vegetación NDWI y MSI obtenidos de las imágenes satelitales. La metodología para descargar y procesar las imágenes se entregó por parte del área de Agricultura de Precisión de CENGICAÑA en el año 2019 (Fuentes, 2019)
4. *Shapefile* de ubicación de fincas del bloque de cosecha seleccionado.
5. Dispositivo electrónico para ubicación de muestras en el campo (*Smartphone*)
6. Aplicación para dispositivo electrónico generada por el ingenio Madre Tierra (aplicación para Android con la cual se suben al sistema del ingenio las muestras y pueden ser visualizadas por los equipos de muestreo en el campo, permite grabar las coordenadas reales del muestreo)
7. Machete
8. Cinta métrica
9. Cintas de nylon
10. Etiquetas para identificación de muestras
11. Boletas para registro de muestreo realizado

METODOLOGÍA

La metodología se compuso de cuatro fases: Gabinete 1 (mapa con ubicación de muestras); Campo (obtención de muestras); Análisis de laboratorio (resultados de humedad y azúcar) y Gabinete 2 (análisis de resultados).

Fase de Gabinete 1. Realización de mapa con ubicación de muestras. Fue realizada por el área de Sistemas de Información Geográfica del ingenio Madre Tierra, a cargo del Ing. Rodolfo Fuentes.

1. Se obtuvo la imagen satelital Sentinel-2 de la fecha deseada.
2. Se abre el software ArcGIS.
3. Se cargó el *shapefile* de ubicación de fincas a evaluar.
4. Se seleccionaron las fincas, los lotes y los bloques a muestrear.
5. Se cargó el *raster* de la imagen NDWI-11, éste fue el índice utilizado como base para programar los muestreos.
6. Se hizo un análisis visual de los valores presentes en el área de interés.
7. Se creó un *shapefile* de puntos para georeferenciar las muestras a realizar en el campo.
8. Sobre el nombre del *shapefile* generado se hizo lo siguiente *click derecho* > *Open attribute table*, para abrir la tabla de atributos y poder agregar 3 columnas nuevas.
9. En la base de datos se ubicó la pestaña *Table options* > *click izquierdo* > *Add field*, y se agregaron las columnas: área, porcentaje y muestras.
10. En la columna de área se agregó el área del rango en hectáreas.
11. En la columna porcentaje se agregó el porcentaje del área de cada rango.
12. En la columna muestras se agregó el número de muestras que corresponde a cada rango. Se obtuvo una muestra por cada 5 hectáreas.
13. Se ubicaron las muestras dentro del bloque, siguiendo la recomendación de hacerla no más allá de 50 metros de una orilla del lote.
14. Se generó la orden de trabajo en la aplicación propia del ingenio Madre Tierra, para que los equipos de muestreo ubiquen las muestras en el campo

Fase de Campo. Obtención de muestras

El ingenio Madre Tierra cuenta con dos equipos de muestreo en campo. Cada equipo cuenta con un supervisor de muestreo y dos muestreadores, equipados con un vehículo para llegar a los puntos de muestreo y poder llevar las muestras al laboratorio.

Con la orden de trabajo generada en la fase anterior se procedió a realizar las muestras en campo, siguiendo la siguiente metodología.

1. Se identificó la finca y bloque a muestrear.
2. Se abrió en la aplicación de ingenio Madre Tierra, la orden obtenida en la fase anterior.
3. Se procedió a buscar los puntos de muestreo marcados.
4. Al llegar al punto de muestreo se obtuvo la muestra.
5. Se cortaron 15 tallos lineales sin importar la presencia de mamones y mezcla dentro del punto.
6. Se procedió a obtener las coordenadas reales del punto de muestreo con la función para eso dentro de la aplicación de ingenio Madre Tierra.
7. Cada muestra realizada se etiquetó utilizando un sistema de código de barras generado por el ingenio, ese código de barras contiene la información de cada muestra y sirve para que en el laboratorio del ingenio se pueda obtener la información. Contiene la siguiente información: Finca, Lote o Unidad de manejo, número de muestra, variedad, fecha, producto, dosis, días después de aplicación (estos últimos tres se llenaban si fue aplicado el bloque).

8. Se transportaron las muestras realizadas al laboratorio de caña de ingenio Madre Tierra para su respectivo análisis. El laboratorio utilizó las metodologías rutinarias de trabajo.
9. El laboratorio fue subiendo los resultados al sistema del ingenio Madre Tierra creado para el proyecto.

Se realizaron muestreos en diferentes épocas identificadas con el número de muestreo, el primero se realizó antes de la aplicación de madurador, el segundo se realizó para un control de la maduración y el último se realizó como un muestreo pre-quema, antes del proceso de cosecha.

Fase Análisis de Laboratorio (resultados de humedad y azúcar)

Las muestras se procesaron por el laboratorio del ingenio Madre Tierra según las metodologías internas de muestreo pre-cosecha.

Se midieron las siguientes variables:

- Humedad de caña
- Pol% caña
- Brix jugo
- Pureza % jugo
- Sacarosa
- Fibra
- % Jugo
- Rendimiento real (libra por tonelada de caña)
- Rendimiento real (kilogramos por tonelada de caña)
- Rendimiento probable (libra por tonelada de caña)
- Rendimiento probable (kilogramos por tonelada de caña)

Fase Gabinete 2. Análisis de información.

Se utilizó la humedad de la caña como el parámetro comparador para las variables analizadas. Se obtuvo por cada valor unitario de humedad de caña el promedio de las siguientes variables:

- NDWI-11
- NDWI-12
- MSI-11
- MSI-12
- Pol % caña
- Rendimiento real (kilogramos por tonelada de caña)

Para analizar la relación entre las variables se realizaron gráficas de dispersión y se obtuvo el coeficiente de correlación, el modelo de regresión y el coeficiente de determinación de Pearson, método estadístico que explica cuánto del resultado depende de la variedad independiente y la puntuación que existe entre ambas. (Nieves y Dominguez, 2016). Se generaron 15 análisis de correlación. Los primeros cuatro para determinar si existe dependencia entre los índices NDWI-11, NDWI-12, MSI-11, MSI-12 y la humedad de caña (porcentaje). Dos para determinar si existe dependencia entre el porcentaje de humedad de caña y el Pol caña (porcentaje) y el Rendimiento real en kilogramos por tonelada de caña. También se hicieron análisis para determinar si existe dependencia entre los índices NDWI-11 y MSI-11 con la humedad de caña a través de los distintos muestreos realizados (tres análisis de cada índice). El último análisis fue para saber la dependencia entre la humedad de la caña y el Pol caña (porcentaje) en los tres muestreos realizados. En el Cuadro 1, se presentan los análisis realizados.

Cuadro 1. Análisis de correlación realizados.

| No. | Eje x | Eje y | Observaciones |
|-----|------------------------------|---------------------------------|---------------|
| 1 | NDWI-11 | Humedad de caña (porcentaje) | |
| 2 | NDWI-12 | Humedad de caña (porcentaje) | |
| 3 | MSI-11 | Humedad de caña (porcentaje) | |
| 4 | MSI-12 | Humedad de caña (porcentaje) | |
| 5 | Humedad de caña (porcentaje) | Pol caña (porcentaje) | |
| 6 | Humedad de caña (porcentaje) | Rendimiento real (Kg/ton. caña) | |
| 7 | NDWI-11 | Humedad de caña (porcentaje) | Muestreo 1 |
| 8 | NDWI-11 | Humedad de caña (porcentaje) | Muestreo 2 |
| 9 | NDWI-11 | Humedad de caña (porcentaje) | Muestreo 3 |
| 10 | MSI-11 | Humedad de caña (porcentaje) | Muestreo 1 |
| 11 | MSI-11 | Humedad de caña (porcentaje) | Muestreo 2 |
| 12 | MSI-11 | Humedad de caña (porcentaje) | Muestreo 3 |
| 13 | Humedad de caña (porcentaje) | Pol caña (porcentaje) | Muestreo 1 |
| 14 | Humedad de caña (porcentaje) | Pol caña (porcentaje) | Muestreo 2 |
| 15 | Humedad de caña (porcentaje) | Pol caña (porcentaje) | Muestreo 3 |

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la zafra 2020/2021 se realizaron un total de 13,281 muestras por parte del ingenio Madre Tierra. Después de realizar el análisis para obtener los índices de humedad con las coordenadas reales dónde se realizó el muestreo en el campo y una depuración de la base de datos general, se obtuvo un total de 11,547 muestras para el análisis final de resultados. Una gran cantidad de muestras se eliminaron por estar en áreas con nubes o en sombras de nubes, las cuales alteran el dato de los índices en la zona. En el Cuadro 2 se presentan los coeficientes de correlación r , los modelos de regresión y los coeficientes de determinación R^2 obtenidos de los distintos análisis realizados.

Cuadro 2. Coeficiente de correlación r , modelo de regresión y coeficiente de determinación R^2 de los escenarios analizados.

| No. | Eje x | Eje y | Observaciones | r | Modelo | R^2 |
|-----|------------------|---------------------|---------------|--------|-------------------------|--------|
| 1 | NDWI-11 | Humedad caña (%) | | 0.9845 | $y = 49.46x + 57.891$ | 0.9692 |
| 2 | NDWI-12 | Humedad caña (%) | | 0.9808 | $y = 47.171x + 43.597$ | 0.9620 |
| 3 | MSI-11 | Humedad caña (%) | | 0.9786 | $y = -38.262x + 93.632$ | 0.9576 |
| 4 | MSI-12 | Humedad caña (%) | | 0.9758 | $y = -57.005x + 86.463$ | 0.9521 |
| 5 | Humedad caña (%) | Pol caña (%) | | 0.9679 | $y = -0.6566x + 60.873$ | 0.9369 |
| 6 | Humedad caña (%) | Rendo. real (Kg/TC) | | 0.9679 | $y = -13.134x + 1217.6$ | 0.9369 |
| 7 | NDWI-11 | Humedad caña (%) | Muestreo 1 | 0.9658 | $y = 60.23x + 53.246$ | 0.9327 |
| 8 | NDWI-11 | Humedad caña (%) | Muestreo 2 | 0.9939 | $y = 61.962x + 54.796$ | 0.9879 |
| 9 | NDWI-11 | Humedad caña (%) | Muestreo 3 | 0.9856 | $y = 56.173x + 57.679$ | 0.9714 |
| 10 | MSI-11 | Humedad caña (%) | Muestreo 1 | 0.9577 | $y = -50.356x + 98.752$ | 0.9172 |
| 11 | MSI-11 | Humedad caña (%) | Muestreo 2 | 0.9912 | $y = -49.936x + 100.59$ | 0.9825 |
| 12 | MSI-11 | Humedad caña (%) | Muestreo 3 | 0.9868 | $y = -44.836x + 98.995$ | 0.9737 |
| 13 | Humedad caña (%) | Pol caña (%) | Muestreo 1 | 0.9914 | $y = -0.7376x + 66.721$ | 0.9828 |
| 14 | Humedad caña (%) | Pol caña (%) | Muestreo 2 | 0.9886 | $y = -0.7681x + 68.948$ | 0.9774 |
| 15 | Humedad caña (%) | Pol caña (%) | Muestreo 3 | 0.9917 | $y = -0.7512x + 67.764$ | 0.9835 |

Relación entre los índices de humedad NDWI-11, NDWI-12, MSI-11 y MSI-12 y la Humedad de la caña (porcentaje)

El análisis inicial se realizó para saber si existe relación entre los índices de humedad y la humedad de la caña expresada en porcentaje. Se obtuvo el promedio de los datos obtenidos en los muestreos realizados durante la zafra 2020/2021. Los datos promedio obtenidos se presentan en el Cuadro 3.

La gráfica de dispersión entre la humedad de la caña (porcentaje) y los índices de humedad NDWI-11, NDWI-12, MSI-11 y MSI-12 se presenta en las Figuras 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

En la Figura 1 se observa que existe una alta correlación positiva entre los valores de NDWI-11 y la humedad de la caña, de acuerdo a la teoría que indica que a mayor valor de índice NDWI-11 existe mayor humedad en la planta (Gao, 1995). Los resultados son similares a los obtenidos por De León y Villatoro (2017), en cuyo trabajo se analizó la correlación entre el NDWI obtenido de Landsat-8 y la humedad de la caña.

Es importante el dato de la Figura 1 porque da total confianza en utilizar el índice de vegetación NDWI-11 como un estimador de la humedad de la caña, lo cual cumple con el objetivo específico dos del proyecto. En las Figuras 2, 3 y 4 también se observa una muy buena relación entre los índices de vegetación evaluados y la humedad de la caña. De acuerdo al Cuadro 2 se tienen valores de Coeficiente de Determinación R^2 de 0.9692 para el índice NDWI-11; 0.9620 para el índice NDWI-12; 0.9576 para el índice MSI-11 y 0.9521 para el índice MSI-12. Los datos anteriores indican que no importa cuál índice de humedad propuesto por CENGICAÑA (De León y Villatoro, 2017) se utilice, con cualquiera de los cuatro existe alta correlación y los modelos de regresión tienen poco error para estimar la humedad de la caña, lo cual ayudará a disminuir el número de muestras a realizar cada año como muestreo pre-cosecha.

Cuadro 3. Datos promedio del total de muestras realizadas

| NO. DATOS | HUMEDAD | NDWI-11 | NDWI-12 | MSI-11 | MSI-12 | Pol caña (%) | REND Kg |
|------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------------|----------------|
| 4 | 65.64 | 0.166 | 0.475 | 0.730 | 0.363 | 16.23 | 324.60 |
| 22 | 66.80 | 0.153 | 0.462 | 0.741 | 0.373 | 16.56 | 331.17 |
| 124 | 67.63 | 0.196 | 0.507 | 0.680 | 0.331 | 16.46 | 329.21 |
| 554 | 68.58 | 0.216 | 0.530 | 0.650 | 0.311 | 15.99 | 319.85 |
| 547 | 69.26 | 0.229 | 0.544 | 0.633 | 0.299 | 15.73 | 314.59 |
| 749 | 69.76 | 0.241 | 0.557 | 0.618 | 0.289 | 15.56 | 311.17 |
| 954 | 70.26 | 0.254 | 0.572 | 0.600 | 0.275 | 15.27 | 305.33 |
| 1090 | 70.74 | 0.266 | 0.585 | 0.585 | 0.266 | 14.95 | 298.96 |
| 1072 | 71.24 | 0.277 | 0.594 | 0.573 | 0.260 | 14.58 | 291.55 |
| 1112 | 71.75 | 0.287 | 0.606 | 0.560 | 0.249 | 14.17 | 283.43 |
| 1074 | 72.24 | 0.300 | 0.620 | 0.543 | 0.237 | 13.79 | 275.82 |
| 962 | 72.74 | 0.311 | 0.630 | 0.532 | 0.231 | 13.37 | 267.37 |
| 802 | 73.24 | 0.322 | 0.642 | 0.518 | 0.222 | 12.98 | 259.53 |
| 706 | 73.74 | 0.323 | 0.641 | 0.517 | 0.222 | 12.56 | 251.15 |
| 976 | 74.45 | 0.337 | 0.654 | 0.502 | 0.212 | 11.90 | 238.08 |
| 496 | 75.40 | 0.354 | 0.673 | 0.481 | 0.197 | 11.05 | 220.98 |
| 221 | 76.41 | 0.358 | 0.676 | 0.477 | 0.195 | 10.10 | 202.04 |
| 82 | 77.34 | 0.367 | 0.684 | 0.466 | 0.189 | 9.27 | 185.31 |

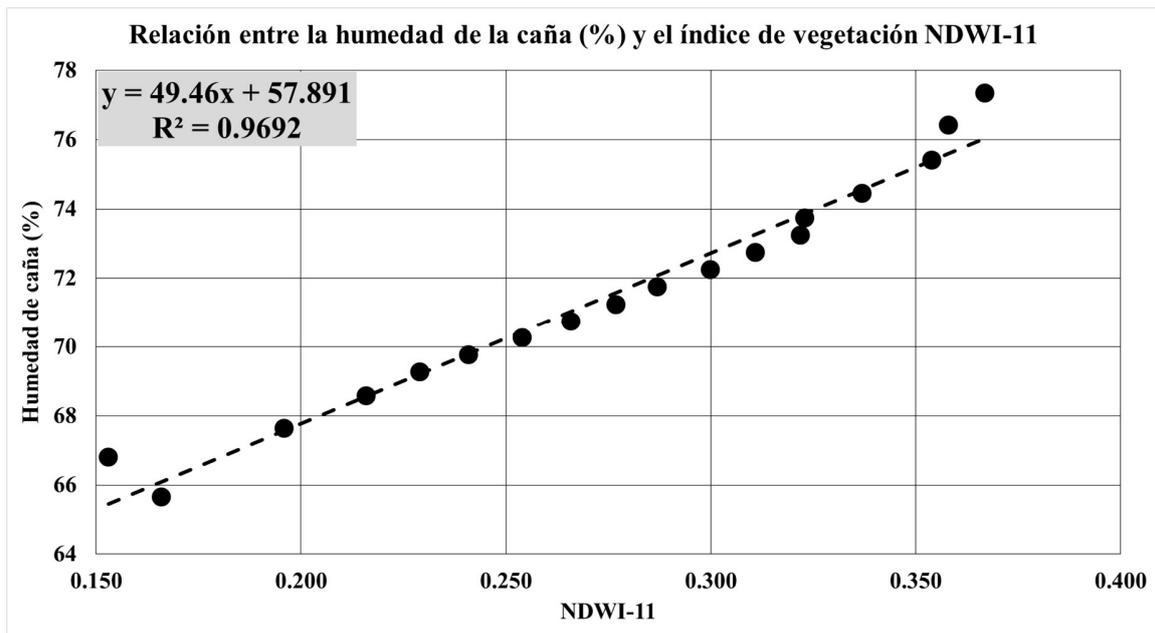


Figura 1. Gráfica de dispersión y regresión entre humedad de caña (%) y NDWI-11

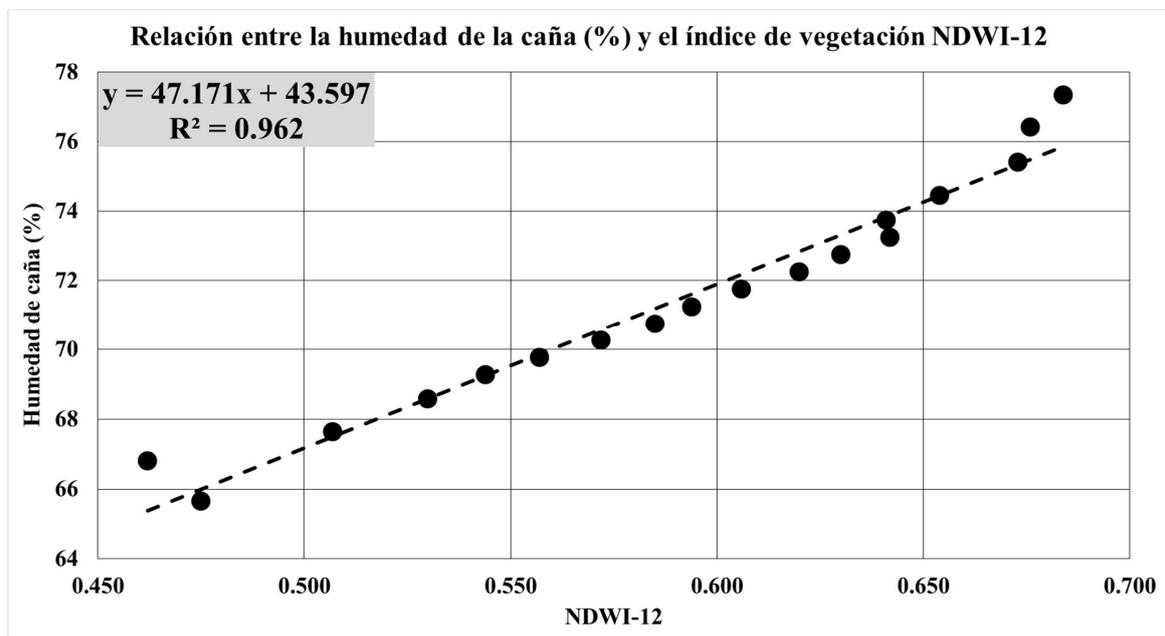


Figura 2. Gráfica de dispersión y regresión entre humedad de caña (%) y NDWI-12

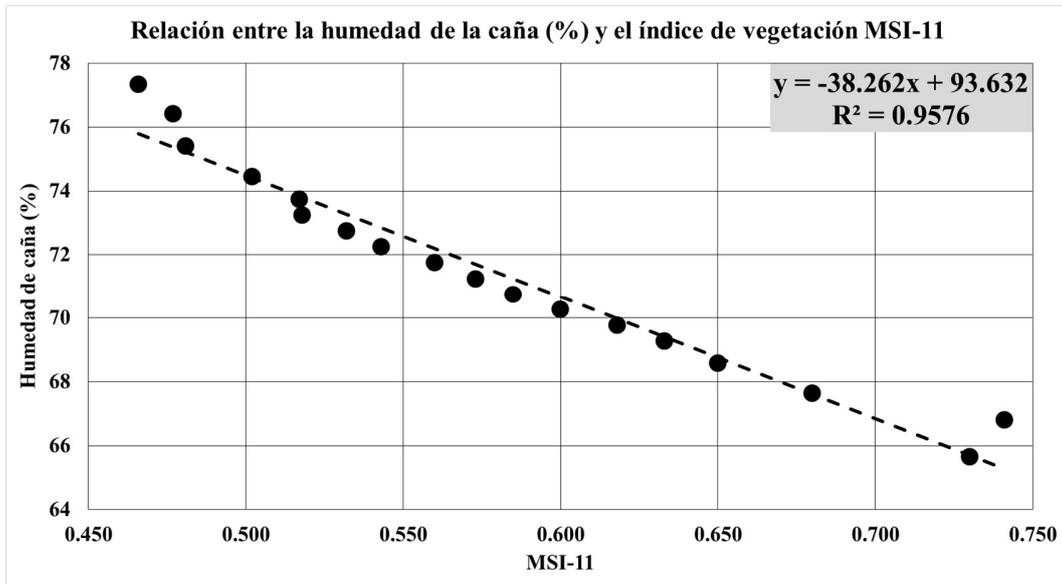


Figura 3. Gráfica de dispersión y regresión entre humedad de caña (%) y MSI-11

En las Figuras 3 y 4 se observa que existe una alta correlación entre los valores de MSI-11, MSI-12 y la humedad de la caña respectivamente. La teoría de MSI indica que es un índice con comportamiento de correlación negativo, es diferente a los otros índices de humedad utilizados, a mayor valor de índice, menor valor de humedad en la planta. En las Figuras 3 y 4 se observa que a menor valor de índice MSI existe mayor humedad en la caña (Hunt y Rock, 1989; Ceccato, 2001). Los resultados son similares a los obtenidos por De León y Villatoro (2017), en cuyo trabajo se analizó la correlación entre el MSI obtenido de Landsat-8 y la humedad de la caña.

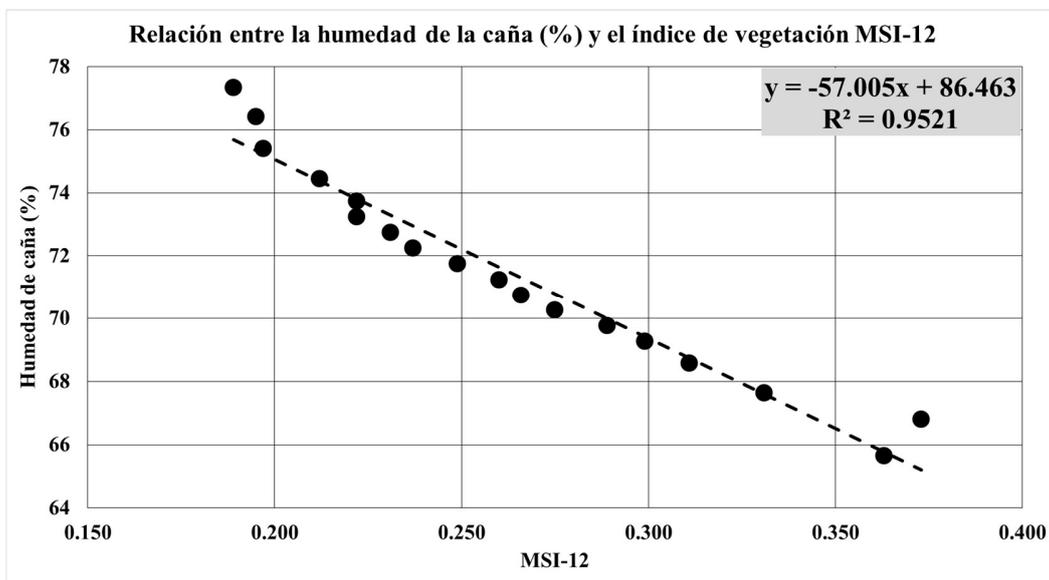


Figura 4. Gráfica de dispersión y regresión entre humedad de caña (%) y MSI-12

En las Figuras 1 y 2 se observa alto ajuste en los modelos de regresión entre los índices NDWI-11, NDWI-12 y la humedad de la caña, lo que se debe considerar a la hora de utilizar cualquiera de los dos, es la

diferencia que existe entre los valores de uno y otro. Los valores de NDWI-11 indican la humedad en valores más bajos, comparados con el índice NDWI-12. Para validar lo indicado se realizó la Figura 5, en la cual se observa que los valores de NDWI-11 están entre 0.15 y 0.38 para la humedad entre 66 y 78 por ciento respectivamente. En el caso del índice NDWI-12 los valores se ubican entre 0.45 y 0.69 para la humedad entre 66 y 78 por ciento respectivamente. Los valores de ajuste de los modelos son de $R^2=0.9692$ y 0.962 .

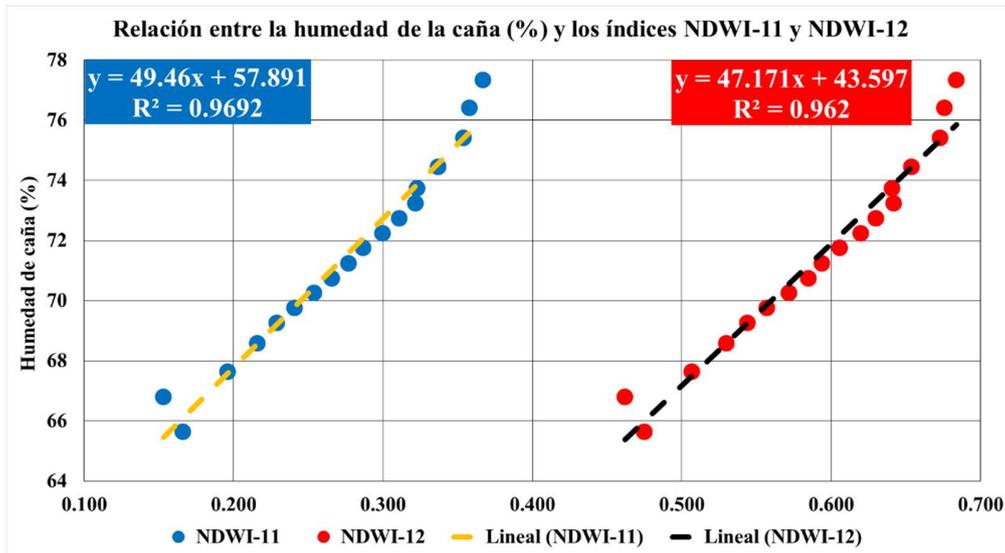


Figura 5. Gráficas de dispersión entre humedad de caña (%) y NDWI-11 y NDWI-12

En las Figuras 3 y 4 se observa un alto ajuste en los modelos de regresión entre los índices MSI-11, MSI-12 y la humedad de la caña, al igual que con NDWI, es importante considerar a la hora de utilizar cualquiera de los dos la diferencia que existe entre los valores de uno y otro. Los valores de MSI-11 indican la humedad en valores más altos, comparados con el índice MSI-12. Para validar lo indicado se realizó la Figura 6, en la cual se observa que los valores de MSI-11 están entre 0.75 y 0.45 para la humedad entre 78 y 66 por ciento respectivamente. En el caso del índice MSI-12 los valores se ubican entre 0.40 y 0.15 para la humedad entre 78 y 66 por ciento respectivamente. Los valores de ajuste de los modelos son de $R^2 = 0.9521$ y 0.9369 .

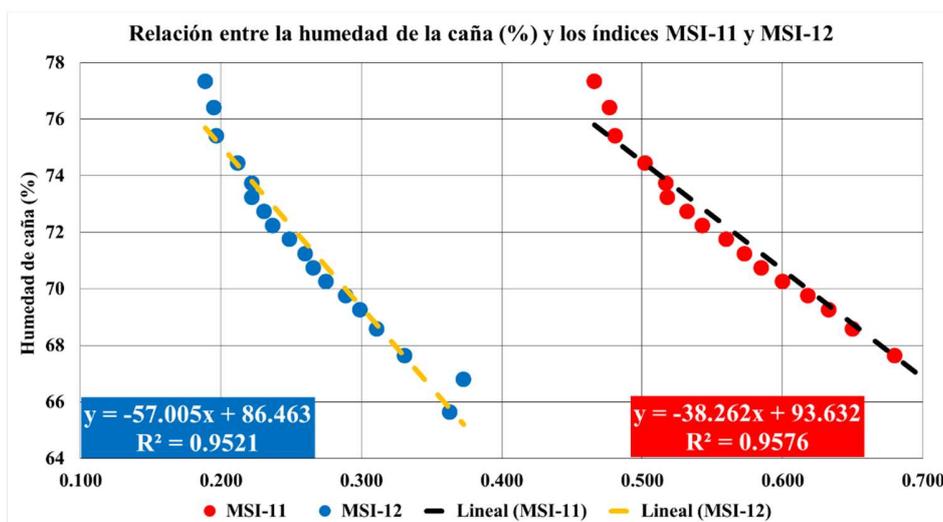


Figura 6. Gráficas de dispersión entre humedad de caña (%) y MSI-11 y MSI-12

Un análisis importante es validar la relación entre la humedad de la caña (porcentaje) y el Pol caña (porcentaje), también la relación entre la humedad de la caña (porcentaje) y el rendimiento real (kg/TC), porque lo que se puede estimar con las imágenes es la humedad de caña, el análisis se presenta en las Figuras 7 y 8.

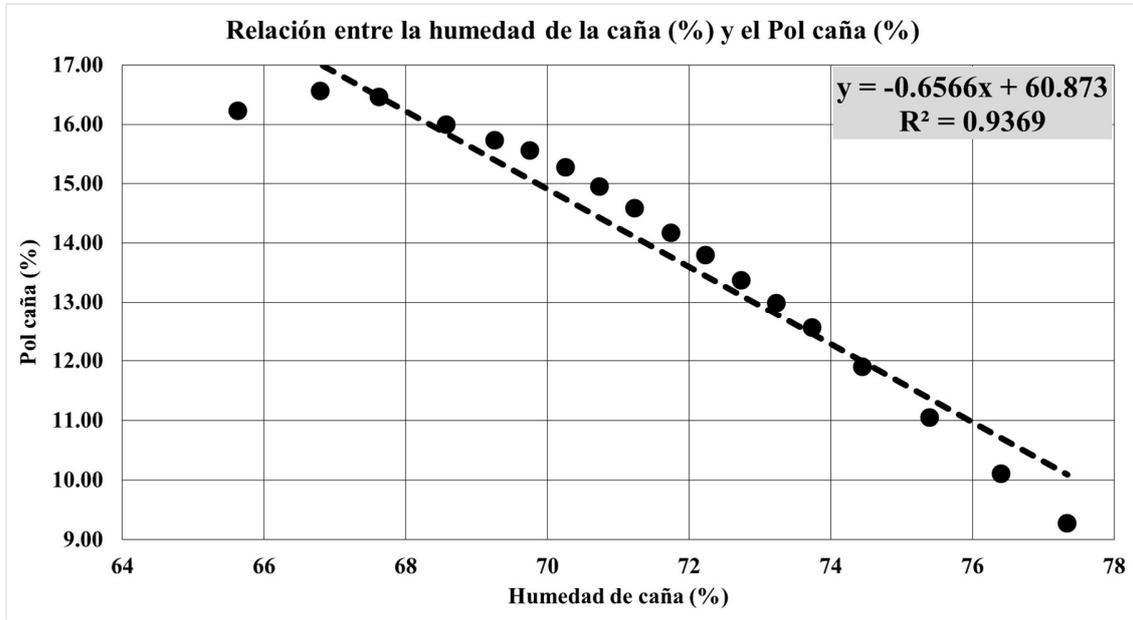


Figura 7. Gráfica de dispersión y regresión entre humedad de caña (%) y Pol caña (%)

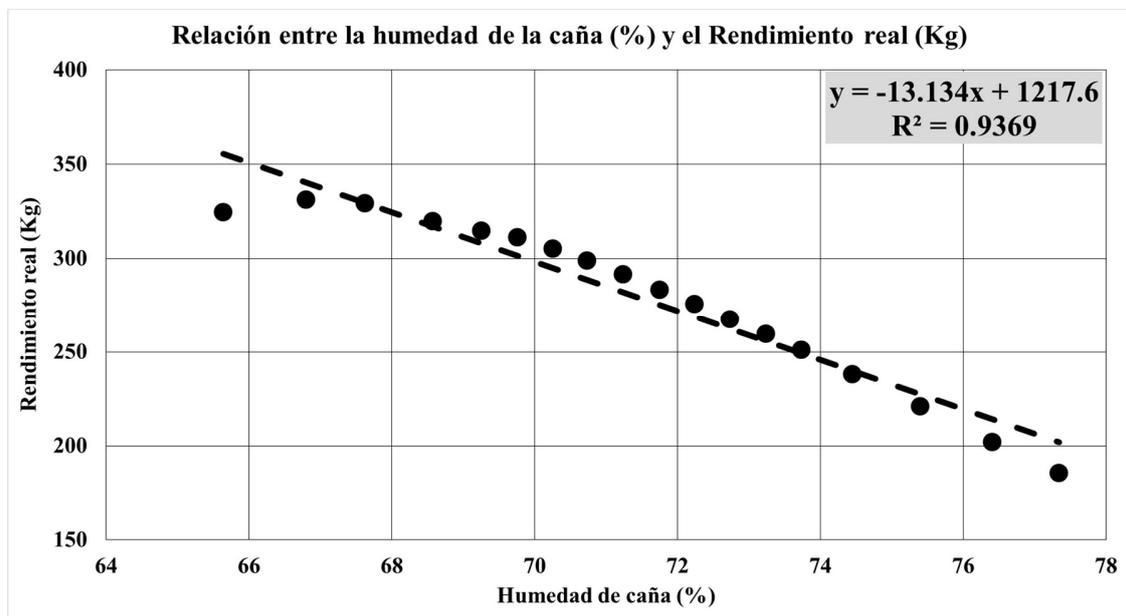


Figura 8. Gráfica de dispersión y regresión entre humedad de caña (%) y Rendimiento real (Kg/tonelada de caña)

Se observa en las Figuras 7 y 8 que existe un alto ajuste en los modelos de regresión entre la humedad de la caña (porcentaje) y el Pol caña (porcentaje) y el Rendimiento real (Kg/TC), con valores de coeficiente de determinación R^2 de 0.9369 y 0.9369 respectivamente. Para escoger el momento adecuado de cosecha es importante los datos obtenidos, porque a través de los índices NDWI y MSI se estimará la Humedad de caña, la cual tiene buena relación con los valores de Pol caña y Rendimiento real, los cuales sirven para estimar la productividad de azúcar que se obtendrá en los campos sembrados con caña de azúcar. Con esto se cumple el objetivo específico 3.

En la Figura 9 se presenta la relación la humedad de caña (porcentaje), el Pol caña (porcentaje) y el NDWI-11, el objetivo de la gráfica es analizar cuál es el valor de NDWI y de humedad con el que se obtiene el mejor rendimiento de azúcar.

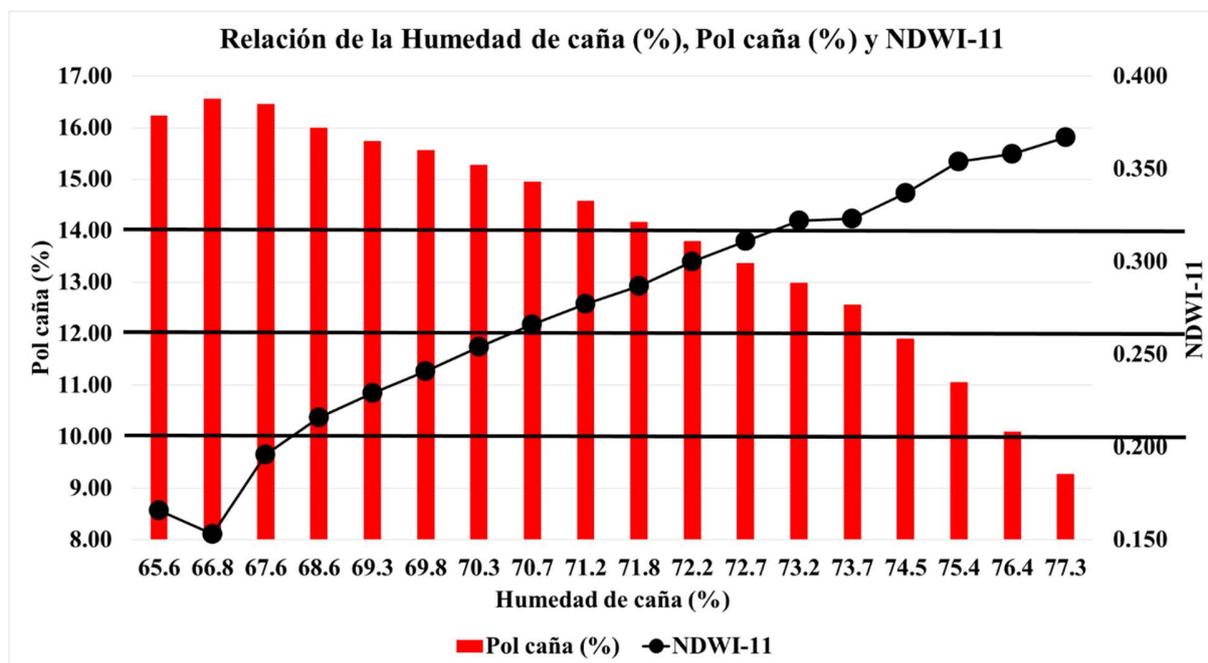


Figura 9. Relación de la Humedad de caña (%), Pol caña (%) y NDWI-11

Se utilizó en la Figura 8 como ejemplo el NDWI-11, pero el comportamiento es similar con cualquiera de los índices que se quiera utilizar por parte de los ingenios. Se observa en la Figura 8 como a menor humedad de caña, es mayor el Pol caña y menor el NDWI. A mayor humedad de caña, disminuye el Pol caña y aumenta el valor de NDWI. Lo cual indica que a mayor valor de NDWI al momento de cosecha, la humedad será mayor y el Pol caña será menor, por lo cual se debe de analizar el valor de NDWI a partir del cual se obtiene la mayor cantidad de azúcar. Utilizando la Figura 8 si se quieren obtener valores de Pol caña (porcentaje) superiores a 10 por ciento se debe de buscar áreas con NDWI-11 superiores a 0.200. Si se quieren valores de Pol caña (porcentaje) superiores a 12 por ciento se deben de buscar áreas con NDWI-11 superiores a 0.250 y si se quieren áreas con valores de Pol caña (porcentaje) superiores a 14 por ciento se deben de buscar áreas con NDWI-11 superiores a 0.320. Para los índices NDWI-12, MSI-11 y MSI-12 se presenta el análisis en las Figuras 10, 11 y 12 respectivamente.

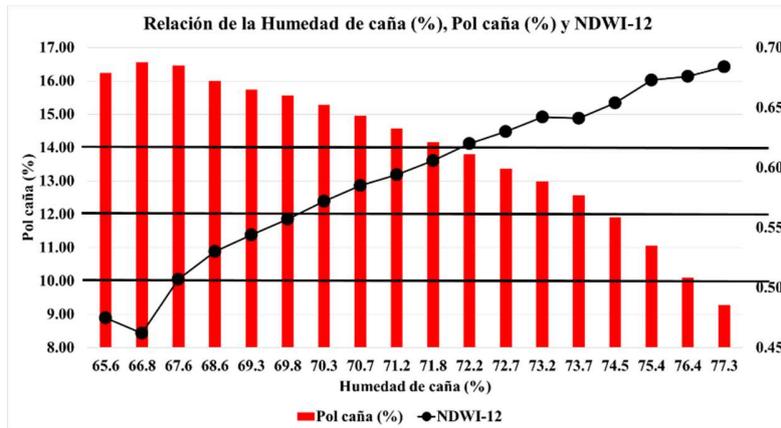


Figura 10. Relación de la Humedad de caña (%), Pol caña (%) y NDWI-12

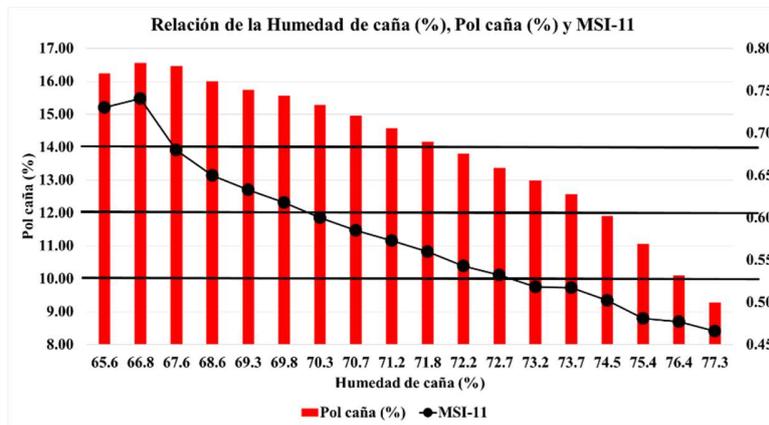


Figura 11. Relación de la Humedad de caña (%), Pol caña (%) y MSI-11

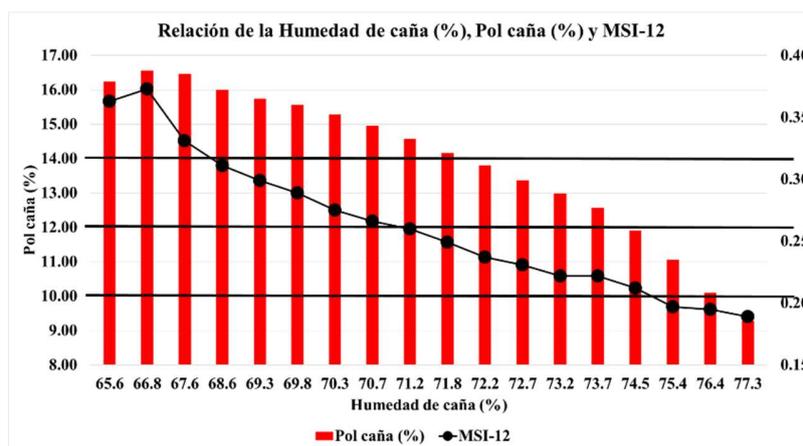


Figura 12. Relación de la Humedad de caña (%), Pol caña (%) y MSI-12

Análisis a través del tiempo (distintos muestreos)

Se realizaron distintos muestreos a través del tiempo, el primero se realizó antes de la aplicación del madurador, el segundo como seguimiento a la maduración de la caña y el tercero antes del proceso de la quema y corte de la caña. Para realizar el análisis se hizo la relación entre la humedad de caña (porcentaje) y NDWI-11 y MSI-11 a manera de ejemplo. El resultado se presenta en las Figuras 13 y 14.

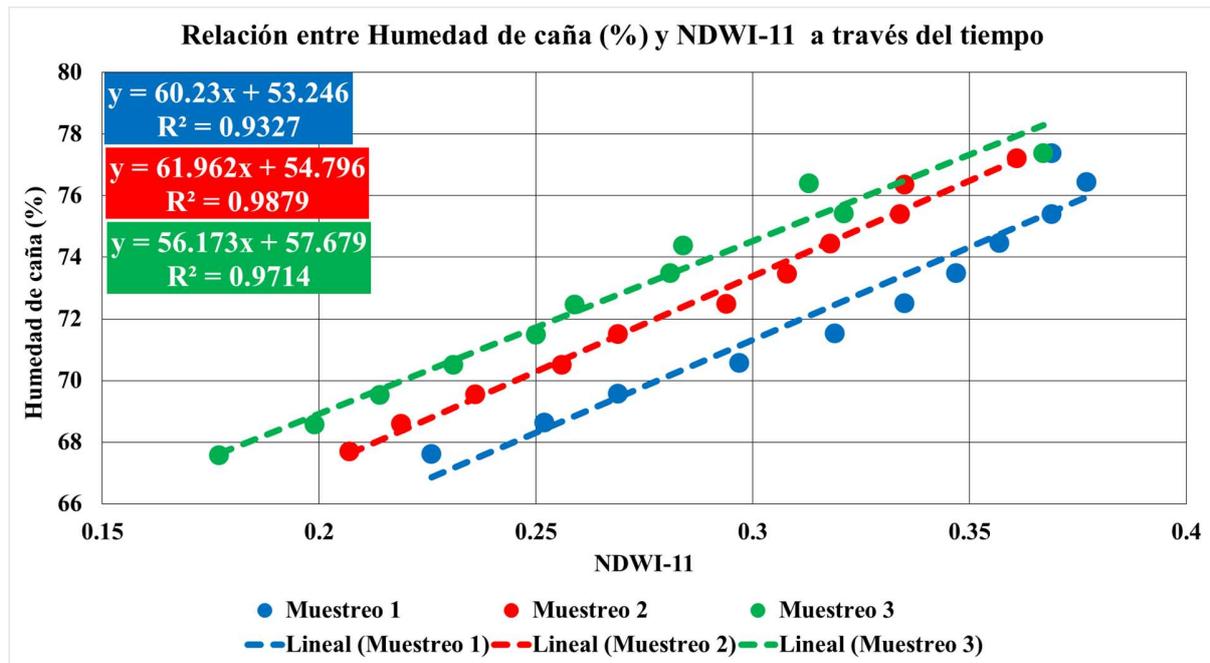


Figura 13. Gráfica de dispersión entre humedad de caña (%) y NDWI-11 a través de los muestreos

Se observa en la Figura 13 que el comportamiento a través de los distintos muestreos realizados es similar en los tres casos, para el caso de NDWI a mayor valor de índice, mayor humedad de caña. Lo que es importante considerar es que cambia el valor conforme avanza el tiempo, por eso es importante al utilizar los modelos obtenidos, la época de muestreo que se está analizando. Por ejemplo en el muestreo antes de aplicar madurador un valor de 0.25 de NDWI-11 significa una humedad de caña de 68.35 por ciento; en el muestreo realizado en etapa intermedia entre aplicación de madurador y cosecha (tres a cuatro semanas aproximadamente en el caso de aplicaciones con Roundup o dos a tres semanas en el caso de Moddus) el valor de 0.25 de NDWI-11 significa una humedad de 70.28 por ciento y al momento del muestreo antes de cosecha, un valor de 0.25 de NDWI-11 significa un valor de humedad de 71.72 por ciento.

El valor de NDWI va a significar distinto valor de porcentaje de humedad de caña dependiendo del momento de muestreo, muy importante considerar esto en los análisis a futuro. De forma general se puede concluir que conforme avanza la época de muestreo el valor de NDWI significa un valor mayor de humedad.

En la Figura 14 el comportamiento de MSI se observa que también cambia el valor de humedad de caña (porcentaje) que se obtiene con cada valor de MSI-11 conforme avanza el tiempo de muestreo. Por ejemplo en el muestreo antes de aplicar madurador, un valor de 0.55 de MSI-11 significa una humedad de caña de 71 por ciento; en el muestreo de seguimiento a la maduración un valor de 0.55 de MSI-11 significa una humedad de caña de 73 por ciento y en el muestreo antes de cosecha un valor de 0.55 de MSI-11 significa una humedad de caña de 74 por ciento. Para el caso de MSI se puede concluir que conforme avanza la época de muestreo un valor de MSI significa un valor mayor de humedad.

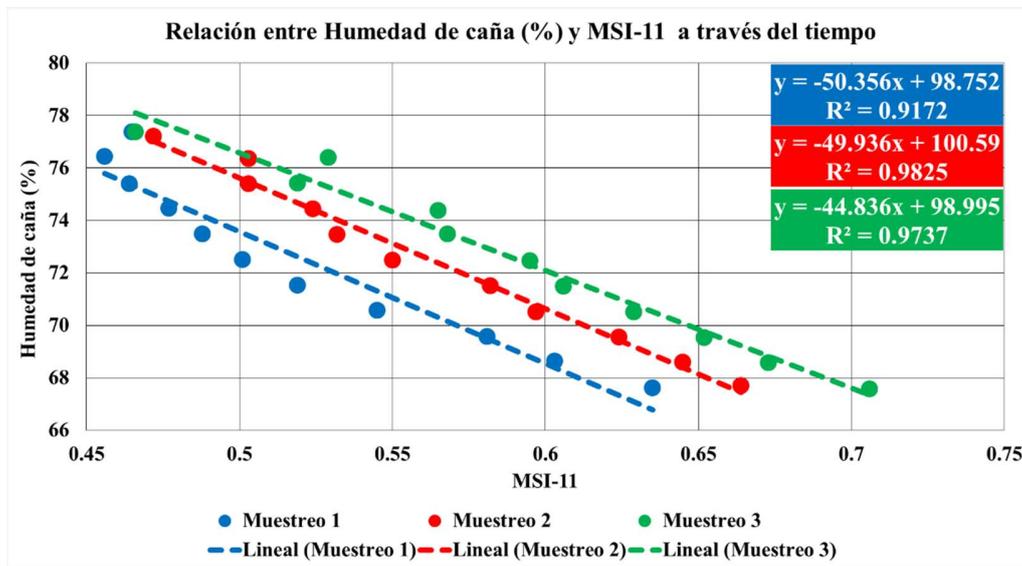


Figura 14. Gráfica de dispersión entre humedad de caña (%) y MSI-11 a través de los muestreos

Otro aspecto importante a considerar a través de las épocas de muestreos es si tiene algún impacto la distinta época de muestreo en la relación entre la Humedad de caña (porcentaje) y el Pol caña (porcentaje). Para eso se realizó el análisis que se presenta en la Figura 15.

Lo que se observa en la Figura 15 es que no existe diferencia entre los muestreos en la relación Humedad de caña y Pol caña, lo cual es muy bueno para los objetivos de este trabajo. Siempre un determinado valor de porcentaje de humedad de caña significa un mismo valor de porcentaje de Pol caña, por lo cual combinado con lo observado en las Figuras 13 y 14, lo que va a cambiar y se debe de ir buscando es el valor de NDWI o MSI como cambia durante los tipos de muestreo para saber cuál es el valor de humedad de caña que representa y de esa forma estimar el porcentaje de Pol caña que se puede obtener al momento de la cosecha.

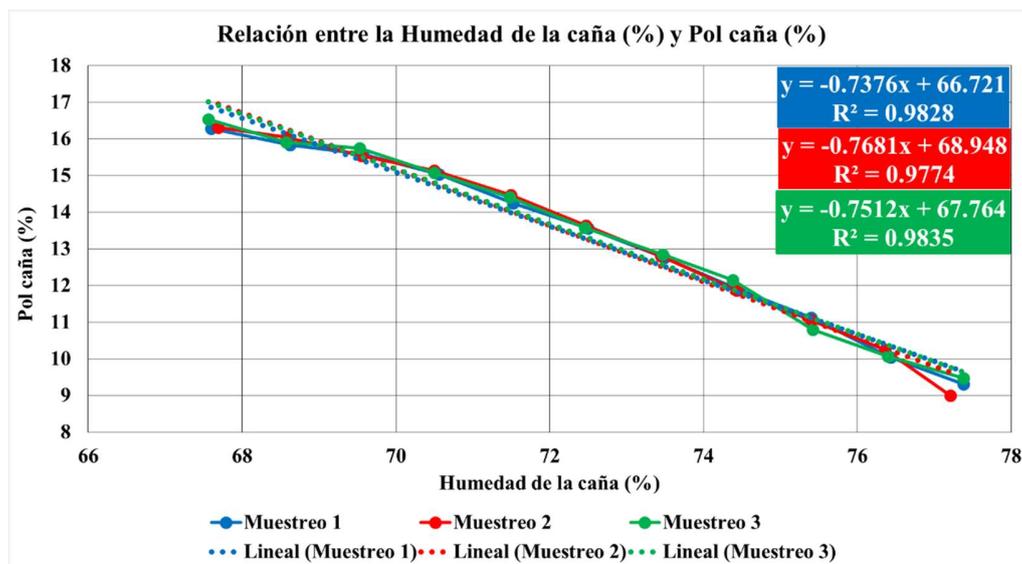


Figura 15. Gráfica de dispersión entre humedad de caña (%) y Pol caña (%) a través de los muestreos

CONCLUSIONES

- Se validó la metodología entregada por CENGICAÑA (Villatoro, 2020) por parte del ingenio Madre Tierra, durante la zafra 2020/2021, se realizaron un total de 13,281 muestras. Después de realizar el análisis de obtener los índices de humedad con las coordenadas reales dónde se realizó el muestreo en el campo y una depuración de la base de datos general, se obtuvo un total de 11,547 muestras para el análisis final de resultados. Una gran cantidad de muestras se eliminaron por estar en áreas con nubes o en sombras de nubes, las cuales alteran el dato de los índices en la zona.
- Al analizar el ajuste de los modelos de regresión a través del Coeficiente de Determinación R^2 entre los índices de vegetación y la humedad de caña se obtuvieron los siguientes valores de R^2 , 0.9692 para el índice NDWI-11; 0.9620 para el índice NDWI-12; 0.9576 para el índice MSI-11 y 0.9521 para el índice MSI-12. Se analizó también el ajuste de los modelos de regresión entre la humedad de la caña (porcentaje) y el Pol caña (porcentaje) y el Rendimiento real (Kg/TC), con valores de coeficiente de determinación R^2 de 0.9369 y 0.9369 respectivamente.
- Se entregan los modelos para estimar la productividad en diferentes momentos de muestreo para estimar con el valor de los índices NDWI-11, NDWI-12, MSI-11 y MSI-12 los valores de porcentaje de humedad en caña de azúcar y con eso estimar el valor de porcentaje de Pol caña.

RECOMENDACIONES

- Utilizar los modelos generados para cada índice de humedad analizado (NDWI-11, NDWI-12, MSI-11 y MSI-12) para estimar el porcentaje de humedad de caña y el porcentaje de Pol en caña.
- Tomar en cuenta los momentos de muestreo para interpretar los valores de índices de humedad utilizados, considerando que existe diferencia entre la época de muestreo.
- Implementar el uso de la metodología entregada por CENGICAÑA (Villatoro, 2020) en más ingenios como un indicador del momento óptimo de cosecha.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chuvieco, E. 1995. *Fundamentos de teledetección espacial*. España. Ediciones Rialp, S.A.
2. Chuvieco, E. 2008. *Teledetección ambiental*. España. Ariel, S.A.
3. De León, O.; Villatoro, B. 2017. *Análisis exploratorio de la dependencia entre los índices de vegetación NDWI y MSI obtenidos de imágenes de satélite Landsat 8, la humedad de la caña de azúcar y la humedad del suelo*. In: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2016-2017. Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. CENGICAÑA, GT. p. 344-360.
4. Espinoza, G. 2012. *Maduración de la caña de azúcar y floración de la caña de azúcar y su manejo*. In: El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala. CENGICAÑA. Guatemala.
5. Fuentes R. 2019. *Procesamiento de imágenes Sentinel-2 utilizando el software QGIS v.3.4.4*. Presentación de Power Point. Comité de Agricultura de Precisión 20/febrero/2019. CENGICAÑA, GT.
6. Gao, B. 1995. *Normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space*. Proceedings of SPIE 2480: 225-236.

7. Gutierrez, M., Branch, J., Botero, V. 2005. *Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: Landsat – ETM+*. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín. Vol.58 No.1, Colombia.
8. Hunt Jr., E., Rock, B. 1989. *Detection of changes in leaf water content using near and middle infrared reflectances*. Remote Sensing of environment 30: 43-54.
9. InfoStat. 2020. *InfoStat versión 2020*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
10. Laurentino, S. 2014. *Aplicaciones de la teledetección en el análisis de daños en masas de coníferas en la provincia de Burgos-España*. Instituto Nacional de investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. España.
11. Morales, J.; Espinoza, G. 2014. *Inducción química de la maduración en Caña de Azúcar (Saccharum spp) en la costa sur de Guatemala*. In: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2016-2017. Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. CENGICAÑA, GT. p. 377-391.
12. Nieves, A.; Dominguez, F. 2016. Probabilidad y Estadística para Ingeniería un enfoque moderno. Disponible en: http://www.mcgraw-hilleducacion.com/pye01e/cap13/13analisis_de_correlacion_y_regresion.pdf
13. Vered, E. sf. *Sugarcane Crops*. Netafim ACS Israel. Obtenido de: http://www.sugarcanecrops.com/s/agronomic_practices/harvesting_management/
14. Villatoro, B. 2015. *Procesamiento de imágenes de satélite Landsat 8 para estimación de NDVI para análisis multitemporal en el cultivo de caña de azúcar*. In: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2014-2015. Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. CENGICAÑA, GT. p. 300-307.
15. Villatoro, B. 2015. *Uso de imágenes de satélite Landsat 8 en el cultivo de caña de azúcar en Guatemala*. XIII Congreso de Técnicos Azucareros de Guatemala. ATAGUA. Guatemala.
16. Villatoro, B. 2017. *Manejo de Cosecha*. In: Guía de Buenas Prácticas Agrícolas en Caña de Azúcar. CENGICAÑA, GT. p. 66-76.
17. Villatoro, B.; Cancino, M.; Rodríguez, A.; Aguirre, I.; Saenz, L. 2019. *Uso de imágenes satelitales en el cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala*. In: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2018-2019. Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. CENGICAÑA, GT. p. 346-367.
18. Villatoro, B. 2020. *Uso de índices de vegetación NDWI y MSI obtenidos de imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat 8 para monitoreo de humedad, como indicador de momento óptimo de cosecha en caña de azúcar*. In: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2019-2020. Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. CENGICAÑA, GT. p. 225-243.