



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ciencias en Geomática

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PRODUCTOS SATELITALES SENTINEL-2 Y LANDSAT-8 PARA LA ESTIMACIÓN DE HUMEDAD Y ESTRÉS HÍDRICO EN LA PLANTA DE CAÑA DE AZÚCAR

Ing. Rodolfo Eduardo Fuentes Gómez

Asesorado por el Mtro. Ing. José Alfredo Suárez Urrutia

Guatemala, noviembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PRODUCTOS SATELITALES SENTINEL-2 Y LANDSAT-8 PARA LA ESTIMACIÓN DE HUMEDAD Y ESTRÉS HÍDRICO EN LA PLANTA DE CAÑA DE AZÚCAR

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. RODOLFO EDUARDO FUENTES GÓMEZ
ASESORADO POR EL MTRO. ING. JOSÉ ALFREDO SUÁREZ URRUTIA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL EVALUADOR QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
EXAMINADOR	Ing. Juan Miguel Indekeu Rivas
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PRODUCTOS SATELITALES SENTINEL-2 Y LANDSAT-8 PARA LA ESTIMACIÓN DE HUMEDAD Y ESTRÉS HÍDRICO EN LA PLANTA DE CAÑA DE AZÚCAR

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 31 de marzo de 2020.

Ing. Rodolfo Eduardo Fuentes Gómez



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102

DTG. 627.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PRODUCTOS SATELITALES SENTINEL-2 Y LANDSAT-8 PARA LA ESTIMACIÓN DE HUMEDAD Y ESTRÉS HÍDRICO EN LA PLANTA DE CAÑA DE AZÚCAR**, presentado por el Ingeniero **Rodolfo Eduardo Fuentes Gómez**, estudiante de la **Maestría en Ciencias en Geomática**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2021.

AACE/cc



Guatemala, noviembre de 2021

LNG.EEP.OI.081.2021

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PRODUCTOS SATELITALES SENTINEL-2 Y LANDSAT-8 PARA LA ESTIMACIÓN DE HUMEDAD Y ESTRÉS HÍDRICO EN LA PLANTA DE CAÑA DE AZÚCAR”

presentado por **Rodolfo Eduardo Fuentes Gómez** quien se identifica con carné **201790708** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Geomática**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director



**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**



Guatemala, 05 de septiembre 2020.

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

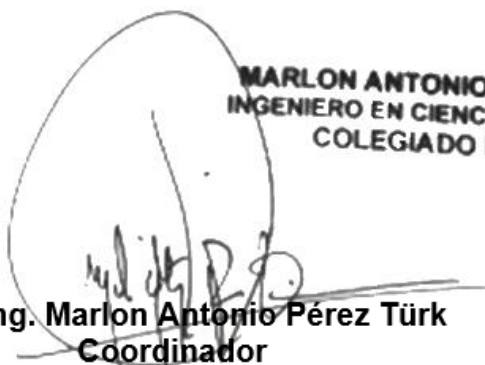
M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **TRABAJO DE GRADUACIÓN** titulado: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PRODUCTOS SATELITALES SENTINEL-2 Y LANDSAT-8 PARA LA ESTIMACIÓN DE HUMEDAD Y ESTRÉS HÍDRICO EN LA PLANTA DE CAÑA DE AZÚCAR" del estudiante Rodolfo Eduardo Fuentes Gómez quien se identifica con número de carné 201790708 del programa de **Maestría en Geomática**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,



MARLON ANTONIO PEREZ TURK
INGENIERO EN CIENCIAS Y SISTEMAS
COLEGIADO No. 4492

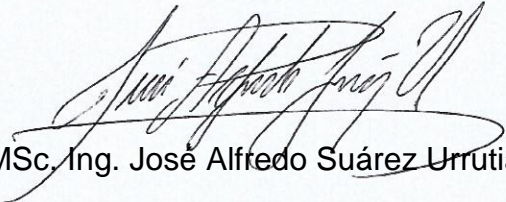
MSc. Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
Coordinador
Maestría en Tecnologías de la Información y la Comunicación
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 02 de octubre de 2020

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Agrónomo en Cultivos Tropicales **Rodolfo Eduardo Fuentes Gómez** quien se identifica con carnet 201790708, procedo a dar el aval correspondiente a la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PRODUCTOS SATELITALES SENTINEL-2 Y LANDSAT-8 PARA LA ESTIMACIÓN DE HUMEDAD Y ESTRÉS HÍDRICO EN LA PLANTA DE CAÑA DE AZÚCAR”** quien se encuentra en el programa de **Ciencia en Geomática** en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

“Id Y Enseñad A Todos”



MSc. Ing. José Alfredo Suárez Urrutia
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Mi guía y fortaleza, de donde nace la sabiduría para lograr triunfos, aprendizajes y las abundantes bendiciones.
- Mi mamá** Nora Velásquez, mi cariño y admiración hacia ella, presente en mis triunfos y también en mis derrotas, en quien ciegamente confío.
- Mi papá** Rodolfo Fuentes, mi guía y también la persona a quien más admiro, un ejemplo de lucha, responsabilidad y superación.
- Mis hermanos** Mario y Guillermo Fuentes Gómez, gracias por todo el apoyo incondicional, por ser parte importante de la familia y ser mis primeros amigos y personas en las que más confío.
- Mi esposa** Claudia Saput, gracias por tu apoyo incondicional y comprensión, por formar parte importante de mi vida y ser mi mejor compañera de clases. Te amo.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser una importante influencia en mi carrera, útil en aprender cosas fundamentales para mi desarrollo profesional y personal.

Facultad de Ingeniería

Por ser una importante influencia en mi carrera y desarrollo profesional.

**Mis amigos de la
Facultad**

Erick Mejía y Mario Chávez, por ser personas sinceras y soporte fundamental durante el desarrollo de la maestría

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XIX
MARCO METODOLÓGICO	XXI
INTRODUCCIÓN	XXXV
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Tratamientos de imágenes satelitales	1
1.2. Aplicaciones de los datos numéricos obtenidos de los índices de vegetación	2
1.3. Nuevas aplicaciones del uso de las imágenes satelitales.....	5
2. JUSTIFICACIÓN	7
3. ALCANCES	9
3.1. Resultados.....	9
3.2. Técnicos	10

3.3.	Investigativos.....	10
4.	MARCO TEÓRICO	13
4.1.	Comparación de precisión de índices de vegetación	13
4.2.	Agricultura de precisión	13
4.3.	Sensoramiento remoto	14
4.4.	Imágenes satelitales.....	14
4.5.	Imágenes Landsat-8.....	14
4.6.	Imágenes Sentinel-2.....	15
4.7.	Tratamiento de imágenes.....	17
4.8.	Misiones satelitales evaluadas	17
4.8.1.	Misión Landsat-8 LDCM.....	18
4.8.2.	Misión Copernicus EMS	18
4.9.	Índices de vegetación.....	18
4.9.1.	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	19
4.9.2.	Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)	20
4.9.3.	Índice de estrés hídrico (MSI).....	20
4.10.	Planta de caña de azúcar	21
4.10.1.	Área foliar	21
4.11.	Resolución de las imágenes satelitales.....	22
4.11.1.	Resolución espacial.....	22
4.11.2.	Resolución espectral	23
4.11.3.	Resolución radiométrica	23
4.11.4.	Resolución temporal	23
4.12.	Análisis estadístico	24
4.12.1.	Gráficos de dispersión	24
4.12.2.	Modelo estadístico.....	25
4.12.3.	Coeficiente de variación de <i>Spearman</i>	25

5.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	27
5.1.	Productos satelitales analizados.....	27
5.2.	Muestreos de campo	27
5.3.	Comparación de las resoluciones de las imágenes Sentinel-2 y Landsat-8.....	28
5.4.	VARIABLES ESTADÍSTICAS POR FINCA	29
5.5.	Análisis de regresión lineal, satélite Sentinel-2: porcentaje de humedad vs. NDWI.....	34
5.6.	Análisis de regresión lineal, satélite Sentinel-2: porcentaje de humedad vs. MSI	36
5.7.	Análisis de regresión lineal, satélite Landsat-8: porcentaje de humedad vs. NDWI.....	39
5.8.	Análisis de regresión lineal, satélite Landsat-8: porcentaje de humedad vs. MSI”	41
5.9.	VARIABLES ESTADÍSTICAS POR PRODUCTO SATELITAL.....	47
5.10.	Gráficos estadísticos por producto satelital	48
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
	CONCLUSIONES	55
	RECOMENDACIONES.....	57
	REFERENCIAS	59
	APÉNDICES	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ecuación del índice NDVI.....	19
2.	Ecuación del índice NDWI.....	20
3.	Ecuación del índice MSI.....	21
4.	Gráfica de estudentizados Sentinel-2: porcentaje de humedad vs. NDWI.....	35
5.	Gráfica Sentinel-2: porcentaje de humedad vs. NDWI.....	36
6.	Gráfica de estudentizados Sentinel-2: porcentaje de humedad vs. MSI.....	38
7.	Gráfica Sentinel-2: porcentaje de humedad vs. MSI.....	38
8.	Gráfica de estudentizados Landsat-8: porcentaje de humedad vs. NDWI.....	40
9.	Gráfica Landsat-8: porcentaje de humedad vs. NDWI.....	41
10.	Gráfica de estudentizados Landsat-8: porcentaje de humedad vs. MSI.....	43
11.	Gráfica Landsat-8: porcentaje de humedad vs. MSI.....	43
12.	Gráfica Sentinel-2: edad (días) vs. NDVI (Ciclo 2019/2020).....	46
13.	Gráfica Landsat-8: edad (días) vs. NDVI (Ciclo 2019/2020).....	47
14.	Gráfica Sentinel-2 y Landsat-8: porcentaje de humedad vs. NDWI.....	49
15.	Gráfica Sentinel-2 y Landsat-8: porcentaje de humedad vs. MSI.....	50
16.	Gráfica Sentinel-2 y Landsat-8: edad (días) vs. NDVI.....	50

TABLAS

I.	Épocas de muestreo de tallos de caña de azúcar	XXVII
II.	Variables obtenidas en los análisis de laboratorio	XXIX
III.	Variables utilizadas en el análisis de regresión lineal simple y cuadrático.....	XXXII
IV.	Variables estadísticas para obtener los modelos estadísticos.....	XXXIII
V.	Longitud de onda y resolución espacial de la imagen Landsat-8.....	15
VI.	Longitud de onda y resolución espacial de la imagen Sentinel-2.....	16
VII.	Ubicación geográfica y número de muestras por finca	28
VIII.	Prueba de medias (T) por producto satelital	29
IX.	Coeficientes de regresión utilizando el índice NDWI de las imágenes satelitales Sentinel-2	30
X.	Coeficientes de regresión utilizando el índice NDWI de las imágenes satelitales Landsat-8	31
XI.	Coeficientes de regresión utilizando el índice MSI de las imágenes satelitales Sentinel-2	32
XII.	Coeficientes de regresión utilizando el índice MSI de las imágenes satelitales Landsat-8	33
XIII.	Coeficiente de regresión lineal NDWI satélite Sentinel-2.....	34
XIV.	Coeficiente de regresión y estadísticos asociados NDWI satélite Sentinel-2	34
XV.	Análisis de la varianza (SC tipo III) NDWI satélite Sentinel-2.....	35
XVI.	Coeficiente de regresión lineal MSI satélite Sentinel-2	36
XVII.	Coeficientes de regresión y estadísticos asociados MSI satélite Sentinel-2.....	37
XVIII.	Análisis de la varianza (SC tipo III) MSI satélite Sentinel-2.....	37

XIX.	Coeficiente de regresión lineal NDWI satélite Landsat-8.....	39
XX.	Coeficiente de regresión y estadísticos asociados NDWI satélite Landsat8.....	39
XXI.	Análisis de la Varianza (SC tipo III) NDWI satélite Landsat-8.....	40
XXII.	Coeficiente de regresión lineal MSI satélite Landsat-8.....	41
XXIII.	Coeficiente de regresión y estadísticos asociados MSI satélite Landsat-8	42
XXIV.	Análisis de la varianza (SC tipo III) MSI satélite Landsat-8.....	42
XXV.	Edad del cultivo y valores de NDVI de las imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat-8.....	44
XXVI.	Coeficiente de regresión cuadrático NDVI satélite Sentinel-2.....	45
XXVII.	Coeficiente de regresión y estadísticos satélite Sentinel-2.....	45
XXVIII.	Coeficiente de regresión cuadrático NDVI satélite Landsat-8.....	45
XXIX.	Coeficiente de regresión y estadísticos satélite Landsat-8.....	46
XXX.	Variables estadísticas porcentaje de humedad vs. NDWI.....	47
XXXI.	Variables estadísticas porcentaje de humedad vs. MSI	48
XXXII.	Variables estadísticas edad (días) vs. NDVI	48

GLOSARIO

Correlación	Es una medida que permite conocer el grado de asociación lineal entre dos variables cuantitativas (X, Y).
Dispersión	Serie de valores que indican que tan concentrados o separados están los datos entre sí y respecto a la media.
EMS	Emergency Management Service
Geoespacial	Estudia las relaciones espaciales entre los diferentes elementos gráficos que representan las características geográficas y su posición en el mapa.
KML	Keyhole Markup Language
LDCM	Landsat Data Continuity Mission
Multitemporal	Análisis de tipo espacial que se realiza mediante la comparación de las coberturas interpretadas en dos imágenes de satélite o mapas de un mismo lugar en diferentes fechas.
MSI	Multi Spectral instrument

MSI	Moisture Stress Index
MTD	Desired Territorial Model
MTL	Territorial Liberation Movement
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
OLI	Operational Land Imager
PDF	Portable Document Format
SAR	Synthetic Aperture Radar
Satélite	Es un objeto que ha sido puesto en órbita intencionadamente para fotografías la tierra.
SCP	Semi- Automatic Classification Plugin
Teledetección	Detección a distancia de informaciones que se producen en la superficie de la Tierra.
TCH	Toneladas de Caña por Hectárea
TIF	Tagged Image File Format
TIRS	Thermal InfraRed Sensor

UTM Universal Transverse Mercator

WGS World Geodetic System

RESUMEN

El uso de imágenes satelitales en cultivos extensivos para monitorear humedad, estrés hídrico y biomasa ha ido en aumento en los últimos años y el cultivo de caña de azúcar no es la excepción. Actualmente los ingenios azucareros de Guatemala están utilizando imágenes Sentinel-2 y Landsat-8 para el monitoreo del cultivo. Por el uso intensivo de productos satelitales es necesario saber el coeficiente de regresión lineal y cuadrática que estos generan respecto a datos obtenidos de análisis de laboratorio que normalmente son solicitados para tomar decisiones en las labores de riego, aplicación de madurantes y la prioridad de la cosecha.

Este estudio demuestra que utilizando las imágenes Sentinel-2 se logran coeficientes de regresión lineal y cuadrático altos al estimar humedad vegetal, estrés hídrico vegetal y biomasa del cultivo de caña de azúcar comparado con los resultados obtenidos al utilizar datos de las imágenes Landsat-8.

Los gráficos de regresión lineal y cuadrático fueron creados para saber cuál de los productos satelitales evaluados genera el mejor coeficiente estadístico, obtenidos al relacionar el porcentaje de humedad de la caña de azúcar calculado por análisis de laboratorio versus el índice NDWI y MSI mientras, la medición de biomasa se obtuvo de relacionar edad del cultivo (días) versus el índice NDVI.

En la investigación se identificó que la estimación de humedad vegetal (NDWI) utilizando los productos satelitales Sentinel-2 se obtiene un coeficiente de regresión lineal de 0.52 (R^2) y con Landsat-8 0.43 (R^2), mientras la estimación de estrés hídrico vegetal (MSI) con imágenes Sentinel-2 se obtuvo un coeficiente

de 0.45 (R^2) y con Landsat-8 0.43 (R^2), y la medición de la biomasa del cultivo (NDVI) a través de los productos satelitales Sentinel-2 se obtuvo un coeficiente de regresión cuadrático de 0.97 (R^2) y con Landsat-8 0.93 (R^2).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

En la agroindustria azucarera de Guatemala se está implementando el uso de imágenes satelitales con el propósito de apoyar las prácticas agrícolas en el cultivo de caña de azúcar, las imágenes que se están utilizando en la actualidad son las captadas por el satélite Landsat-8.

Las escenas del satélite Landsat-8 proporcionan una resolución espacial de 30*30 metros y una resolución temporal de 16 días, pero se sabe que existen otros satélites que presentan mejores resoluciones y una opción accesible económicamente es el caso del uso de las imágenes captadas por el satélite Sentinel-2, ya que este sensor ofrece una resolución espacial de 10*10 metros y una resolución temporal de 5 días. Además, este satélite posee la ventaja que los sensores también captan anchos de bandas con firmas espectrales similares a las captadas por el satélite Landsat-8, lo que permite comparar imágenes de ambos satélites y no perder datos históricos de análisis multitemporal.

Por ser parte de las herramientas de apoyo importantes para mejorar las labores agrícolas del cultivo de caña de azúcar, es necesario conocer los resultados de la aplicabilidad de las imágenes que captan escenas con mejor resolución espacial y temporal comparadas con las utilizadas en la actualidad. Por eso en este estudio se evaluaron las imágenes Sentinel-2 con la característica de tener una tecnología económicamente viable (gratuitas) y elementos geospaciales similares a los que presentan las imágenes Landsat-8, lo que permitió comparar los productos. Esta comparación se realizó utilizando los datos obtenidos de los índices de vegetación calculados a partir de las dos

misiones (Sentinel-2 y Landsat-8) propuestas en el estudio y en el transcurso de su desarrollo se determinó el producto que presentó mejor coeficiente de regresión lineal y cuadrático respecto a los resultados de análisis de laboratorio de materiales vegetales (tallos) de caña de azúcar y así apoyar con una nueva herramienta en la ejecución de labores agrícolas del cultivo de caña de azúcar.

Para desarrollar la investigación se planteó la siguiente pregunta general:

¿Qué producto estima mejor la humedad y estrés hídrico de la planta de caña de azúcar, si los obtenidos de las imágenes Sentinel-2 o Landsat-8?

Y las preguntas específicas seleccionadas para cumplir con el desarrollo de la investigación son las siguientes:

¿La resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal de las imágenes Sentinel-2 y Landsat-8 afecta el valor de los índices de vegetación calculados a partir de cada producto satelital?

¿Cuál producto satelital genera información con mejor relación respecto a los datos de los análisis de laboratorio, si los obtenidos de las imágenes Sentinel-2 o Landsat-8?

¿Es el mismo comportamiento gráfico del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del cultivo de caña de azúcar al utilizar imágenes Sentinel-2 y Landsat-8?

OBJETIVOS

General

Comparar los productos satelitales Sentinel-2 y Landsat-8 para la determinar cuál es mejor para la estimación de humedad y estrés hídrico en la planta de caña de azúcar.

Específicos

- Identificar si la resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal de las imágenes Sentinel-2 y Landsat-8 afectan el valor de los índices de vegetación calculados a partir de cada producto satelital.
- Calcular los coeficientes de regresión lineal y cuadrático del valor de los índices de vegetación obtenidos del proceso de las bandas de las imágenes Sentinel-2 y Landsat-8 versus los datos obtenidos de los análisis de laboratorio.
- Generar dos curvas con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del cultivo de caña de azúcar, una utilizando los productos obtenidos de las imágenes Sentinel-2 y la otra utilizando las imágenes Landsat-8 para identificar su comportamiento gráfico.

HIPÓTESIS

De las imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat-8 se obtienen productos satelitales de mediana resolución llamados *índices de vegetación*, se considera que la detección de humedad, estrés hídrico y biomasa del cultivo de caña de azúcar es estadísticamente confiable determinarlo con cualquier producto satelital ya sea Sentinel-2 o Landsat-8.

Se ha comprobado que analizando los tallos de caña en un laboratorio para obtener el porcentaje de humedad este valor generado por la muestra es estadísticamente confiable tal como utilizar valores numéricos proyectados por el índice de Diferencia Normalizado de Agua (NDWI) y valores numéricos del índices de Estrés Hídrico Vegetal (MSI), mientras que la medición del crecimiento del cultivo es estadísticamente confiable determinarla a través del Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) obtenido de cualquiera de los dos productos satelital propuestos en este estudio.

MARCO METODOLÓGICO

- Tipo de investigación

El estudio se enmarca en un enfoque *cuantitativo* porque se utilizaron mediciones numéricas y análisis estadísticos (regresiones lineales y cuadráticas junto a su estadística descriptiva) realizados para probar la hipótesis, además se hizo uso de variables que corresponden a los índices de vegetación calculados a partir de dos productos satelitales para estimar humedad y estrés hídrico en la planta de caña de azúcar y compararlos con datos obtenidos de análisis de laboratorio, también graficar el comportamiento del crecimiento del cultivo a través de la medición de la edad del cultivo después de su cosecha o siembra. El estudio es de carácter *experimental* y pertenece a la línea de investigación de *Teledetección aplicada al medio ambiente*.

- Diseño de investigación

La perspectiva investigativa se basó en utilizar metodologías adecuadas para descargar y procesar imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat-8, el producto que se obtuvo de las imágenes satelitales se utilizó para calcular tres índices de vegetación (NDWI, MSI y NDVI), seguidamente se realizó una recopilación de datos de productividad de los períodos 2019 a 2020 y 2020 a 2021.

El perfil de la investigación la clasifica como de alcance correlacional ya que los porcentajes de humedad vegetal reportados por el laboratorio se compararon con los datos numéricos obtenidos de los índices de vegetación, los datos de

laboratorio fueron obtenidos de los análisis de las muestras de tallos de cañas ingresadas diariamente en el período de muestreo precorte que comprendió del 28 de octubre de 2019 al 13 de abril de 2020.

- Procedimiento metodológico

En este apartado se describe la metodología utilizada para alcanzar los objetivos planteados en esta investigación.

- Descarga de imágenes satelitales

Se descargaron las imágenes satelitales de los años 2018, 2019 y 2020 de la misión Landsat-8 a través del portal *web* <https://earthexplorer.usgs.gov/> y las imágenes Sentinel-2 en el portal *web* <https://scihub.copernicus.eu/>.

Las imágenes Landsat-8 se descargaron con una periodicidad de 16 días, considerando la siguiente secuencia de pasos:

- Ingresar a un navegador web (*Google Chrome*).
- Escribir la dirección web <https://earthexplorer.usgs.gov/> y seleccionar *Earthexplorer-Home*.
- Ingresar usuario y contraseña (previamente creada).
- Seleccionar la ventana *Search Criteria* y clicar en la pestaña *Path/Row* (Columna/Fila) que corresponde a la transcripción de código 20 en *Path* y 50 en *Row*.

- Clicar sucesivamente en las siguientes pestañas: primero *show* para desplegar la ubicación de la escena en el mapa luego clicar en *Date set* seguido de clicar en la pestaña *Landsat* después clicar en el producto *Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1* y por último clicar en *Results*.
- Clicar en el botón *Download Options* y seleccionar el producto con el nombre *Level-1 GeoTIFF Data Product*.
- Esperar que se descargue el producto seleccionado y cerrar sesión.
- Las imágenes Sentinel-2 se descargaron con una periodicidad de 5 días, considerando la siguiente secuencia de pasos:
- Ingresar a un navegador (*Google Chrome*).
- Escribir la dirección web <https://scihub.copernicus.eu/> y seleccionar *Open Hub*.
- Seleccionar la Mission = Sentinel-2, seguidamente asignar las variables: *Satellite Platform = S2A_** o *S2B_**, y *Product Type =S2MSI1C*.
- Seleccionar con el cursor el área de interés sobre el mapa de la plataforma.
- Clicar en el botón buscar y esperar escenas disponibles.

- Seleccionar las escenas de interés, descargarla y cerrar sesión.

- Procesamiento de imágenes satelitales

Las imágenes Landsat-8 se procesaron a través de la siguiente secuencia de pasos:

- Abrir el programa de QGIS y ubicar el menú *SCP*.
- Seleccionar la herramienta *Preprocesamiento* y luego la opción *Landsat*.
- Emerge una nueva ventana donde primero se debe direccionar las bandas de la imagen Landsat-8 ya que estas se encuentran en la carpeta original descargada y luego clicar en el botón seleccionar carpeta.
- Después cargar el archivo de metadato ubicado en la carpeta original descargada que es identificable por tener la extensión *MTL.txt* y clicar en abrir.
- Luego clicar en la opción *aplicar la corrección atmosférica DOS1*.
- Clicar en el botón *RUN* para direccionar la carpeta, guardar el resultado y esperar que la herramienta se ejecute.

Las imágenes Sentinel-2 se procesaron a través de la siguiente secuencia de pasos:

- Abrir el programa de QGIS y ubicar el menú *SCP*.
- Seleccionar la herramienta *Preprocesamiento* y luego la opción *Sentinel-2*.

- Emerge una nueva ventana donde primero se debe direccionar las bandas de la imagen Sentinel-2 ya que estas se encuentran en la carpeta original descargada y luego clicar en el botón seleccionar carpeta.
- Después cargar el archivo de metadato ubicado en la carpeta original descargada identificable por tener la extensión *MTD_MSIL1C.xml* y clicar en abrir.
- Desactivar la opción de crear juego de bandas.
- Luego clicar en la opción *Aplicar la corrección atmosférica DOS1*.
- Clicar en el botón *RUN* para direccionar la carpeta y guardar el resultado.
- Esperar que la herramienta se ejecute.

Los parámetros utilizados para la corrección radiométrica de las imágenes satelitales analizadas fueron los siguientes:

- Resolución: 10 y 30 metros
 - Estación del año: verano
 - Nivel de proceso: NB 1
 - Ozono: h - 331
 - Filtro mediano: NF 0
 - Wv corrección: Nivel 1
 - Aerosol: rural
- Cálculo de índices de vegetación en formato *raster*

Se calcularon los siguientes tres productos satelitales: NDVI, NDWI y MSI a través de la herramienta *Calculadora raster* del software QGIS.

Los productos satelitales calculados a partir de las imágenes Landsat-8 se obtuvieron a través de la siguiente secuencia de pasos:

- Abrir el programa de QGIS y ubicar el menú *Raster* luego seleccionar la herramienta *Calculadora raster*.
- Se despliega una nueva ventana con varios parámetros de edición, primero seleccionar la ruta de almacenamiento del archivo que desea generar, luego seleccionar la proyección de coordenadas *WGS1984/UTM zone 15N* y guardar el archivo en formato *raster extensión .TIF*.
- En el apartado *Expresión de la calculadora raster* de la herramienta calculadora raster se transcriben las fórmulas matemáticas que corresponden a los índices de vegetación calculados.
- Las fórmulas utilizadas se transcribieron en el siguiente orden: $NDVI = (Banda\ 5 - Banda\ 4) / (Banda\ 5 + Banda\ 4)$, $NDWI-6 = (Banda\ 5 - Banda\ 6) / (Banda\ 5 + Banda\ 6)$ y $MSI-6 = (Banda\ 6) / (Banda\ 5)$.

Los productos satelitales calculados a partir de las imágenes Sentinel-2 se obtuvieron a través de la siguiente secuencia de pasos:

- Abrir el programa de QGIS y ubicar el menú *Raster* luego seleccionar la herramienta *Calculadora raster*.
- Se despliega una nueva ventana con varios parámetros de edición donde primero seleccionar la ruta de almacenamiento del archivo que desea generar luego

seleccionar la proyección de coordenadas *WGS1984/UTM zone 15N* y guardar el archivo en formato *.TIF*.

- En el apartado *Expresión de la calculadora raster* de la herramienta calculadora raster se debe transcribir las fórmulas matemáticas que corresponden a los índices de vegetación calculados.
 - Las fórmulas utilizadas se transcribieron en el siguiente orden: $NDVI = (Banda\ 8 - Banda\ 4) / (Banda\ 8 + Banda\ 4)$, $NDWI-11 = (Banda\ 8 - Banda\ 11) / (Banda\ 8 + Banda\ 11)$ y $MSI-11 = (Banda\ 11) / (Banda\ 8)$.
- Plan de muestreo de campo

A través del programa digital de aplicación de madurantes de cada uno de los lotes sembrados con caña del ingenio Madre Tierra se diseñó una base de datos donde se calculó matemáticamente las fechas para realizar los tres muestreos de tallos a cada uno de los lotes de la empresa, considerando las categorías que se detallan en la tabla I.

Tabla I. Épocas de muestreo de tallos de caña de azúcar

No. Muestreo	Días	Observación
Primero	10	Antes de aplicar madurante
Segundo	25	Después de aplicar madurante
Tercero	35	Después de aplicar madurante

El primer muestreo cumple la función de visualizar la concentración de azúcar antes de aplicar madurante y ayuda a determinar la dosis.

Fuente: elaboración propia.

Seguidamente se generaron mapas a nivel de finca con su conjunto de lotes en formato .PDF, diseñados y exportados a través del software de Geoprocesamiento ArcGIS v.10.8.

Semanalmente se asignaba una cantidad de mapas de muestreo al personal encargado de recolectar los tallos en cada una de las estaciones de muestreo, la visualización de los mapas donde se mostraba la ubicación geográfica de cada estación de muestreo programada se realizó a través de la aplicación móvil gratuita *Avenza Maps*, los datos recolectados en cada estación de muestreo fue la siguiente:

- Coordenadas Geográficas reales de la estación recolectada
- Fotografías
- Observaciones de manejo agronómico del cultivo (maleza, plagas, suelo, variedad, entre otros)

Diariamente se le solicitaba al personal de muestreo la data recolectada de cada una de las estaciones de muestreo a través de un archivo geográfico en formato .KML, exportado directamente de la aplicación móvil *Avenza Maps*.

La recopilación de reportes de laboratorio se realizó a través del Sistema Oracle del ingenio Madre Tierra, se descargaba diariamente el reporte de los análisis de jugos realizados a cada una de las muestras de tallos ingresadas el día anterior al laboratorio y se fue enriqueciendo una base de datos con la colección de reportes analíticos de laboratorio diarios del período 28 de octubre de 2019 al 13 de abril de 2020.

Los análisis de jugos solicitados por estación de muestreo se muestran en la tabla II.

Tabla II. Variables obtenidas en los análisis de laboratorio

No.	Variable	No.	Variable
1	Nombre de finca	13	Caña fibra (%)
2	Nombre de lote	14	Jugo Absoluto (%)
3	Código de lote	15	Pol en caña (%)
4	Variedad	16	Rendimiento real (lb/ton)
5	Brix (°)	17	Humedad (%)
6	Pureza (%)	18	Azúcares reductores (%)
7	Edad (meses)	19	Fecha de muestreo
8	Área (ha)	20	Índice glucósico (%)
9	No. de cortes	21	Número de muestreo
10	Fecha de corte	22	Estación de muestreo
11	Jugo (%)	23	Coordenada programada (X, Y)
12	Sacarosa (%)	24	Coordenada real (X, Y)

Cada una de las muestras de tallos analizadas en el laboratorio dispone de 24 variables para realizar múltiples análisis.

Fuente: elaboración propia.

- Recolección de muestras de tallos de caña

La recolección de muestras de tallos de caña fue a través de la metodología recomendada por el Dr. Jesús Larrahondo asesor del ingenio Madre Tierra y se resumen en los siguientes pasos:

- Calcular la cantidad de muestras por lote, dividiendo el área del lote en hectáreas entre 3.5 hectáreas/estación de muestreo.

- Ubicar las estaciones de muestreo, 20 metros hacia dentro del cultivo medido de la calle hacia lo interno del lote.
 - Limpiar la zona de la estación de muestreo e identificar la variedad de caña sembrada y compararla con la descrita en el maestro de lotes.
 - Cortar 10 tallos completos en línea recta, si es caña para cosecha mecanizada no se despunta y si es para cosecha manual se despunta.
 - Armar el paquete de tallos y colocarle un carnet con código QR para su identificación en todo el proceso de análisis de laboratorio.
 - Con el dispositivo móvil activar la APP de muestreo para llenar la plantilla de condiciones agronómicas del cultivo y escanear el carnet con código QR.
- Cálculo del valor de los índices de vegetación por estación de muestreo

Una vez concluido el muestreo de campo y descarga de los reportes de análisis de jugos de laboratorio se utilizó el software de Geoprocesamiento ArcGIS v.10.8 para los siguientes procesos:

- Primero se convirtió la base de datos a un archivo geográfico a través de la herramienta *Display XY Data*.

- Luego se calculó el valor de los índices NDVI, NDWI y MSI por estación de muestreo a través de la herramienta *Extrac Multi Values to Points*.
 - Seguidamente se exportó la tabla de atributos del archivo *shapefile* de puntos en formato *DBase* para ser leído por una hoja de cálculo de *Microsoft Office Excel*.
- Diseño de base de datos para análisis de la información

Se unió la base datos construida a través de los reportes de análisis de jugos de laboratorio a nivel de estación de muestreo con la base datos que contiene los valores de los índices de vegetación NDVI, NDWI y MSI a nivel de estación de muestreo.

- Técnicas de análisis de la información

Todo el proceso de análisis de información se realizó utilizando graficas de correlación lineal simple y cuadrática, el coeficiente obtenido permitió medir el peso de la asociación entre dos variables en cada gráfica (regresora y dependiente), todo el proceso se trabajó en el software *InfoStat*.

Las tablas III y IV muestran las variables que se relacionaron y sus respectivas unidades de medición:

Tabla III. **Variables utilizadas en el análisis de regresión lineal simple y cuadrático**

Análisis de correlación: R²			
No.	Eje (X)	Eje (Y)	R²
1	Porcentaje de humedad de caña de azúcar	MSI	
2	Porcentaje de humedad de caña de azúcar	NDWI	
3	Edad del cultivo (días)	NDVI	

Los coeficientes se obtienen al realizar gráficas de dispersión lineal simple y cuadrática de una variable independiente (X) y una dependiente (Y).

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Variables estadísticas para obtener los modelos estadísticos**

Modelos estadísticos: $y = ax + b$			
No.	Eje (X)	Eje (Y)	$y = ax + b$
1	Porcentaje de humedad de caña de azúcar	MSI	
2	Porcentaje de humedad de caña de azúcar	NDWI	
3	Edad del cultivo (días)	NDVI	

Los modelos estadísticos se obtienen al realizar gráficas de dispersión de una variable independiente (X) y una dependiente (Y).

Fuente: elaboración propia.

- Instrumentos de recolección de información

En la fase de campo fue necesario utilizar la aplicación móvil *Avenza Maps*, ya que sirvió como plataforma de ubicación geográfica de estaciones de

muestreo, también recolectora de datos del manejo agronómico del cultivo y localización geográfica exacta del sitio donde se recolectó cada muestra.

Y la fase de gabinete comprendió la descarga y ordenamiento de la información obtenida de los análisis de laboratorio almacenada en el sistema Oracle disponible en un servidor web de circuito cerrado del ingenio Madre Tierra.

La información descargada de la plataforma Oracle se almacenó en hojas de cálculo de *Microsoft Office Excel* para su análisis en el software *InfoStat*, seguidamente obtener la interpretación y generación de resultados presentados en la sección de resultados de este estudio, además se utilizaron herramientas geoespaciales de almacenamiento del software de licenciamiento privado ArcGIS v.10.8 y el software de QGIS 3.12.1 licenciamiento gratuito.

INTRODUCCIÓN

Las imágenes satelitales de funcionamiento pasivo se han convertido en herramientas indispensables para apoyar en las labores de manejo de los cultivos extensivos en la costa sur de Guatemala, específicamente en las áreas que son utilizadas para la producción de caña de azúcar de forma intensiva.

Actualmente los ingenios azucareros de Guatemala están utilizando las imágenes captadas por el satélite Landsat-8, este proyecto de imágenes fue adoptado y desarrollado por el Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA) desde el año 2015, como una herramienta de apoyo a las actividades del manejo agronómico del cultivo.

De las imágenes Landsat-8 se generan productos satelitales de alta calidad que se manejan en archivos de tipo *raster* (matriz de celdas) capaces de almacenar información basada en valores numéricos denominados *índices de vegetación*, estos archivos obtenidos tiene la capacidad de medir biomasa a través del índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), humedad vegetal a través del índice NDWI (Índice de Agua por Diferencia Normalizada) y medir estrés hídrico vegetal a través del índice MSI (Índice de Estrés Hídrico), todos los productos se derivan de las escenas Landsat-8 con resolución espacial de 30*30 metros por pixel y resolución temporal de 16 días.

Como la tecnología es parte de la visión hacia el futuro y está en constante cambio con actualizaciones continuas, es por esta razón que una empresa para ser competitiva debe estar en constante adaptación tecnológica, por eso es necesario que la agroindustria azucarera de Guatemala disponga de escenas con

mejores resoluciones y brindar mejor apoyo a las prácticas agronómicas que se realizan en el cultivo de caña de azúcar, a raíz de esta necesidad los ingenios azucareros de Guatemala han estado utilizando escenas de imágenes satelitales captadas por el satélite Sentinel-2 que han mostrado mejores capacidades de precisión no comprobadas ayudando a mejorar las aplicaciones y los detalles de la alta calidad de información, porque constan de características sofisticadas como una resolución espacial que incluye pixeles de 10*10 metros y resolución temporal de 5 días.

Por eso, el presente estudio comparó los productos satelitales derivados del análisis de las imágenes Sentinel-2 y Landsat-8, con el propósito de disponer de nuevas opciones de productos satelitales que ayuden en el desarrollo de las prácticas del manejo agronómico del cultivo de caña de azúcar con datos comprobados, ya que las imágenes satelitales se han convertido en una herramienta indispensable para actividades de visualizaciones geoespaciales dentro del cultivo, además este documento presenta un orden lógico iniciando con el capítulo uno *Antecedentes*, capítulo dos *Justificación*, capítulo tres *Alcances*, capítulo cuatro *Marco Teórico*, capítulo cinco y seis *Presentación de Resultados y Discusión de Resultados respectivamente*.

1. ANTECEDENTES

1.1. Tratamientos de imágenes satelitales

El Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA) adoptó una Metodología para procesamiento de las imágenes satelitales Landsat-8 donde proponen utilizar del software ArcGIS v.10.2 desarrollado por *Environmental Systems Research Institute* (ESRI) para la creación y análisis multitemporales para luego obtener el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) (Villatoro, 2015).

Investigadores del área de Agricultura de Precisión de CENGICAÑA recomiendan utilizar el término de Agricultura de Precisión que es generado a partir de un ciclo de procesamientos que incluyen: recurso humano, bases de datos, hardware y software, ya que este ciclo inicia con la utilización materiales y herramientas de información espacial, principalmente el uso de imágenes satelitales para los estudios multitemporales que se pueden desarrollar a partir de los índices de vegetación (Villatoro, 2016).

Un aporte importante que ha realizado CENGICAÑA es implementar el uso de los índices de vegetación, dentro de ellos NDVI, NDWI y MSI, obtenidos al procesar las imágenes Landsat-8 como lo describen en el estudio de Análisis Exploratorio de la dependencia entre los índices de vegetación NDWI y MSI relacionados con muestreos de humedad de la caña de azúcar y humedad del suelo realizados en Finca Monte Alegre y San Luis del ingenio La Unión (Villatoro, Cancino, Rodríguez, Aguirre y Saenz, 2018).

Otros estudios desarrollados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) demuestran que se interesaron en la aplicación de los productos Landsat-8 y lograron recopilar información para escribir el libro titulado Descripción y Corrección de Productos Landsat-8 LDCM, este estudio describe detalladamente las razones de la creación del programa Landsat, diferencias y semejanzas de todos los satélites Landsat anteriores a la versión 8, el futuro de LDCM, los instrumentos en el satélite Landsat-8 y las novedades de las correcciones radiométricas en las imágenes LDCM de Landsat-8 (Ariza, 2013).

1.2. Aplicaciones de los datos numéricos obtenidos de los índices de vegetación

El estudio desarrollado en la costa sur de Guatemala denominado *Modelo de estimación de la producción de caña de azúcar a través de imágenes de satélite en los ingenios La Unión y Santa Ana*, el investigador logró estimar producción de caña de azúcar para los ingenios La Unión y Santa Ana utilizando el índices de vegetación NDVI obtenido del procesamiento de las imágenes satelitales Landsat-8, y los resultados obtenidos fueron; un coeficiente de regresión de 0.1269 R^2 para el ingenio La Unión y de 0.0349 R^2 para el ingenio Santa Ana, considerándose estadísticamente no significativos por efecto de la baja resolución espacial de las imágenes según conclusiones del investigador (Fuentes, 2017).

Las imágenes satelitales Landsat-8 al ser procesadas para obtener índices de humedad y datos numéricos de estrés hídrico generan una alta correlación comparado con los resultados obtenidos de análisis de laboratorio, como lo demostró el estudio denominado *Análisis exploratorio de la dependencia entre los índices de vegetación NDWI y MSI obtenidos de las imágenes de satélite Landsat 8, la humedad de la caña de azúcar y la humedad del suelo*, donde los

investigadores utilizaron los valores numéricos de los índices de vegetación NDWI y MSI que relacionaron con los porcentajes de humedad del suelo y de la planta. Los índices de determinación entre la humedad de los tallos de caña y los índices NDWI-6 y MSI-6 generaron un coeficientes de determinación (R^2) de 0.92 y 0.86 respectivamente, mientras que los índices de determinación entre la humedad suelo y los índices NDWI-6 y MSI-6 generaron un coeficientes de determinación (R^2) de 0.52 y 0.55, también relacionaron la humedad de los tallos de caña y humedad del suelo donde encontraron un valor de determinación de (R^2) 0.52, el estudio mostró una alta correlación de las variables comparadas y una significancia estadística alta de las variables relacionadas (de León y Villatoro, 2017).

Otro estudio ayudó a crear una metodología para reconstruir series de tiempo donde no se disponen de los valores de NDVI, todo se originó a partir de la creación de una base de datos llamada TISSBERT y generó el estudio con el nombre igual a la base de datos, consideraron como punto de referencia para la validación y comparación de los métodos de reconstrucción de series de tiempo NDVI, que es una herramienta de tipo genérica para realizar una simulación realista de áreas contaminadas por nubes y poder disponer de mayor información cuando las condiciones climáticas no lo permitan (presencia de nubes) (Julien y Sobrino, 2018).

La misión Landsat-8 es una de las más usadas en la actualidad para procesos de Teledetección, pero existen otras misiones con mejores características en los productos, tal es el caso de Sentinel-2, ya que estas imágenes disponen en sus bandas similares firmas espectrales a las imágenes Landsat-8 lo cual las hace comparables, demostrándose en el estudio denominado *Estimación del grado de severidad de incendios en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina, usando Sentinel-2 y su comparación con*

Landsat-8, donde los investigadores generaron un estudio de comparación de los valores numéricos de Sentinel-2 versus Landsat 8 para obtener el NDVI y calcular la *severidad de incendios*. Los resultados obtenidos al utilizar los productos Sentinel-2 fue una correlación (R^2) de 0.72 y utilizando Landsat 8 fue de (R^2) 0.63, demostrándose que para verificar *severidad de incendios* es recomendable utilizar las escenas del satélite Sentinel-2 (Delegido *et al.*, 2018).

Una aplicación importante del procesar imágenes satelitales es a través de *Estimar producción de cosecha de trigo* implementando procesos multitemporales de índices de vegetación, este estudio reporta la recolección de imágenes satelitales semanales en los períodos del año 2006 al 2011, asociados con datos de producción y rendimiento. Conjuntamente los investigadores obtuvieron coeficientes de determinación con valores (R^2) de 0.81, demostrando la alta correlación y buena significancia estadística (Egea, Rodríguez, Sánchez, y García, 2018).

Las imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat-8 por tener similares característica multitemporales son ampliamente utilizadas para monitorear cultivos extensivos, como lo demuestran en este estudio, donde desarrollaron la metodología y aplicación de los índices de vegetación para el *Mapeo de la recuperación de la vegetación quemada mediante la clasificación de índices espectrales pre y post incendio*, los investigadores resaltan la metodología utilizada para desarrollar análisis multitemporales de las imágenes captadas por los sensores Sentinel-2 y Landsat-8 en los periodos del año 2009 al 2014 (Peña y Ulloa, 2017).

Los investigadores del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA) han estado trabajando desde ya hace varios años los productos obtenidos de las imágenes satelitales Landsat-5 TM, Landsat-7 (ETM+),

Landsat-8 (OLI) y Terra EOS AM-1 (MODIS) para el *monitoreo y estudios del cultivo de caña*, de estos estudios han generado nuevas metodologías de estimación de la producción mediante la utilización de las imágenes captadas por los sensores utilizando la técnica de la Teledetección, además en los últimos años están implementando la utilización de imágenes captadas por aeronaves ultralivianas y en estudios recientes se sabe que están capturando imágenes visibles y multiespectrales usando RPAS (aeronaves no tripuladas) (García, Montero, Soto, y Valencia, 2017).

1.3. Nuevas aplicaciones del uso de las imágenes satelitales

Los productos de las imágenes Sentinel por presentar mejor resolución espacial y temporal comparada con las imágenes Landsat-8, se están utilizando para aplicaciones agrícolas y mejoramiento de las prácticas agrícolas en la producción de arroz en Colombia, este estudio demuestra las metodologías utilizadas para estimar producciones de arroz utilizando los datos proporcionados por el programa *Copernicus EMS* y la utilización de los archivos SAR (Radar de Apertura Sintética) del satélite Sentinel-1 junto con los datos ópticos obtenidos del satélite Sentinel-2 donde han logrado desarrollar algoritmos que ayudan a la discriminación de cultivos usando las firmas multiespectrales (Wooding, 2016).

Estudio desarrollado por un grupo de científicos ha demostrado el gran incremento de utilidades de las imágenes provenientes de los satélites Sentinel-1 y 2 para generar índices de vegetación que ayuden en la detección y separación de información de fenómenos que provocan desastres naturales a través de los productos disponibles en los servicios satelitales de *Copernicus EMS*, en este estudio se presenta una metodología para realizar análisis multitemporales de series de tiempo, implementando los datos numéricos de los índices de vegetación tales como: NDVI, NDWI y MSI (Donezar *et al.*, 2017).

En los últimos años varios investigadores han desarrollado proyectos donde se aplican de distintas formas los productos obtenidos del procesamiento de las imágenes Sentinel-1 y 2, un ejemplo es la detección y segmentación de la información que se genera al momento de suscitarse desastres naturales, otro proyecto es que durante varios años han recopilado información multitemporales de seis misiones que capturan una variedad de fenómenos y cambios que se están desarrollando en el planeta tierra, las misiones que han utilizado los investigadores son las siguientes: Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, Sentinel-4, Sentinel-5 y Sentinel-6, estas misiones han servido para segregar varias líneas de investigación tales como: detección de daños, estudio de deformaciones, estudio de inundaciones utilizando imágenes de coherencia y monitorización de algas (Donezar *et al.*, 2017).

2. JUSTIFICACIÓN

Como aporte al conocimiento y la importancia para la Agroindustria Azucarera de Guatemala se desarrolló este estudio que pertenece a la línea de investigación de *Teledetección aplicada a medio ambiente*, como seguimiento a la mejora continua del proceso agronómico del cultivo de caña de azúcar. Datos reportados por la Asociación de Azucareros de Guatemala - ASAZGUA (2020), describen que el cultivo de caña de azúcar es el principal producto agroindustrial que exporta Guatemala y representa el 9.3 % de exportaciones totales del país, actualmente se cultiva en un área de 275,000 hectáreas ubicadas en los departamentos de Retalhuleu, Suchitepéquez, Escuintla y Santa Rosa.

Las labores agrícolas con mayor importancia es la detección de humedad vegetal, estrés hídrico vegetal y medición de biomasa, actividades importantes para crear la logística de cosecha, alce y transporte de caña de azúcar, siendo las tres labores mencionadas anteriormente las que destacan para el aprovechamiento máximo del cultivo, porque de ellas depende en alto grado el éxito de la producción de azúcar y así poder suplir la demanda del mercado local y mundial.

Los ingenios azucareros de Guatemala a través de su departamento de investigación y evaluaciones desarrolladas por el Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICANÑA) han estado generando metodologías y ensayos de campo sobre la utilización de las imágenes satelitales Landsat-8, aunque se sabe que existen otros satélites que generan mejor información pero lamentablemente no existe metodologías y

estudios que muestren su aplicabilidad a las condiciones del manejo agronómico del cultivo en Guatemala.

Se tiene la visión que una buena opción es el uso de las imágenes satelitales Sentinel-2 ya utilizadas por algunos ingenios azucareros empíricamente porque los técnicos de Teledetección ya las procesan y además su disponibilidad es gratuita, mejores resoluciones y escenas con valores espectrales más cortos en los rangos del ancho de banda que almacenan datos numéricos con una mejor precisión aplicables en actividades de campo, comparadas con las obtenidas utilizando las imágenes satelitales Landsat-8.

Con el uso de los índices de vegetación provenientes del satélite Landsat-8 se están generando metodologías para identificar estados de humedad y niveles de estrés hídrico de la vegetación, además se han generado modelos estadísticos para medir biomasa. Resultados de estos estudios han aclarado el panorama demostrando la alta correlación estadística que existe entre los índices de vegetación (NDVI, NDWI y MSI) y las variables de estudio que se analizaron en esta investigación, tal es el caso de la humedad vegetal, estrés hídrico vegetal y biomasa.

Por eso la agroindustria azucarera de Guatemala está necesitada en disponer de una herramienta más, que les permita a los técnicos a mejorar la precisión y asegurar la calidad de la información obtenida del tratamiento y uso de imágenes satelitales para acercarse más a los valores reales de humedad vegetal, estrés hídrico vegetal y biomasa, utilizando imágenes satelitales de funcionamiento pasivo que incluyan las características multiespectrales con mejor presión.

3. ALCANCES

3.1. Resultados

- Se generó una metodología para descargar y procesar imágenes satelitales Landsat-8 y Sentinel-2 junto a una base de datos con información histórica de producción de caña de azúcar del ingenio Madre Tierra del período (zafra) 2019 a 2020 y 2020 a 2021.
- Se obtuvieron coeficientes estadísticos para consultar humedad vegetal antes de una aplicación de madurador e inhibidor de floración y priorizar lotes de riego basados en el nivel de estrés hídrico que presente la plantación.
- Se demostró estadísticamente que los productos satelitales Sentinel-2 expresan una mejor precisión que los productos satelitales Landsat-8.
- Los resultados de este estudio van enfocados a que en un futuro se disminuyan el proceso de muestreo precorte y disponer de modelos estadísticos que indiquen una predicción de estados humedad vegetal, estrés hídrico vegetal y biomasa para complementar actividades de manejo agronómico del cultivo como: aplicación de riego, aplicación de madurador e inhibidor de floración y monitoreo del cultivo.

3.2. Técnicos

- Se creó una metodología para la descarga de las imágenes Sentinel-2 a través de la generación de una cuenta en el portal web <https://scihub.copernicus.eu/> y para las imágenes Landsat-8 se utilizó el portal web <https://earthexplorer.usgs.gov/> y las bases de productividad se descargaron del portal web <https://cengicana.org/> portal principal de CENGICAÑA.
- También se creó la metodología para el procesamiento de las imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat-8 realizado a través del software QGIS que es un Sistema de Información Geográfica de código abierto, mientras que para calcular las diferencias de precisión que existen entre la resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal de las imágenes Sentinel-2 y Landsat-8 se utilizó el software de licenciamiento comercial personal ArcGIS v.10.8.
- El análisis estadístico de los datos numéricos obtenidos de las imágenes Sentinel-2 y Landsat-8 a través de graficas de correlaciones lineales simples, donde se logró identificar que los coeficientes son mayores en los productos satelitales Sentinel-2 que al utilizar imágenes satelitales Landsat-8, todo el procesamiento estadístico se realizó en el software *InfoStat*.

3.3. Investigativos

- Validar una metodología práctica y con mejor calidad de técnicas de Teledetección para descargar y procesar las imágenes satelitales Landsat-8 y Sentinel-2 que captan escenas constantes de la costa sur de Guatemala.

- Validar una metodología práctica y con técnicas de Geoestadística para obtener tres productos satelitales por imagen satelital que corresponde a archivos ráster de los índices de vegetación NDVI, NDWI y MSI.
- Utilizar la base de datos de productividad del ingenio Madre Tierra de los períodos de producción 2019 a 2020 y 2020 a 2021 para realizar análisis estadísticos de regresión lineal simple y cuadrático, basado en el conocimiento geoespacial.
- Validación de la metodología para recolectar los tallos de caña por estación de muestreo y cumplir con los requerimientos que solicitó el laboratorio para realizar un análisis adecuado de jugos de caña de azúcar.
- Saber el nivel de precisión de los datos numéricos obtenidos de los productos satelitales a través de su correlación con cada una de las variables obtenidas del reporte del análisis de laboratorio.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Comparación de precisión de índices de vegetación

Este estudio consultado, demuestra la metodología para saber las variaciones que existe de la precisión al utilizar índices de vegetación obtenidos del procesamiento de las imágenes Sentinel-2 versus imágenes Landsat-8, donde las resoluciones espaciales, espectrales, radiométricas y temporales se compararon utilizando los datos numéricos de cada uno de los índices de vegetación. Donezar *et al.*, (2017) recomiendan utilizar productos obtenidos de las imágenes satelitales Sentinel ya que existe información disponible desde abril 2012, este proyecto europeo está integrado por seis misiones y dentro de ellas la que recomienda es Sentinel-2, porque los productos obtenidos de esta misión poseen una resolución espacial adecuada para interpretar índices de vegetación.

4.2. Agricultura de precisión

Las condiciones de los suelos y del cultivo que se está produciendo varían de un sitio a otro tanto en distancia como en profundidad, entonces es acá donde el Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur-PROCISUR (2006) definen que la Agricultura de Precisión es un conjunto de técnicas de uso de insumos agrícolas basados en la recolección y medición de la variabilidad espacial y temporal de los campos cultivados con un cultivo agrícola. Se ha determinado que, aplicando la cantidad correcta de insumos, según el potencial y requerimiento del manejo del cultivo, se llegaría a cumplir con el término de agricultura de precisión.

4.3. Sensoramiento remoto

Es un proceso metodológico donde se utilizan instrumentos con la capacidad de detectar señales electromagnéticas dentro de estos se capta la radiación emitida que es reflejada desde la tierra y la atmosfera para convertirla en un elemento físico que permite ser tratado y grabado. Según el estudio realizados por Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Unión Europea y Centro Internacional de Agricultura Tropical (2007), demostraron que los sensores remotos son capaces de convertir la señal electromagnética en un formato análogo (fotografía) o digital (imagen), pero las características registradas dependen de tipo del sensor utilizado, ya sea plataformas fijas o móviles tales como: grúas, aviones, drones, globos, satélites, entre otros.

4.4. Imágenes satelitales

Una imagen es la representación gráfica, sin importar el método de percepción remota que se utilice para captar, registrar la energía electromagnética y poder visualizarla en diferentes coloraciones, es así como lo analizó León (2002). Otro punto de vista es descrito por los investigadores Labrador, Évora, y Arbelo (2012), describen a las imágenes satelitales como archivos digitales integrados por pixeles y cada uno de ellos almacenan valores numéricos y por esa razón existe una clasificación de imágenes satelitales, dentro de ellas: imágenes multiespectrales (MS), hiperespectrales, pancromática (PAN), fusionada (PS) y estéreo.

4.5. Imágenes Landsat-8

En la tabla V, se describen las bandas que almacena el sensor OLI del satélite Landsat-8, estos mejoraron con la integración de dos nuevas bandas

espectrales: un canal visible azul profundo (banda 1) específicamente diseñado para recursos hídricos e investigación de zonas costeras y el otro producto es un canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus. Dos bandas térmicas (TIRS) capturan datos con una resolución mínima de 100 metros, pero se registran y se entregan con el producto de datos OLI de 30 metros de resolución espacial (Ariza, 2013).

Tabla V. **Longitud de onda y resolución espacial de la imagen Landsat-8**

BANDAS DE UNA ESCENA LANDSAT-8		
Banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1 - Ultra azul (costera / aerosol)	0.435 - 0.451	30
Banda 2 – Azul	0.452 - 0.512	30
Banda 3 – Verde	0.533 - 0.590	30
Banda 4 – Rojo	0.636 - 0.673	30
Banda 5 - infrarrojo cercano (NIR)	0.851 - 0.879	30
Banda 6 - Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1.566 - 1.651	30
Banda 7 - Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2.107 - 2.294	30
Banda 8 – Pancromática	0.503 - 0.676	15
Banda 9 – Cirro	1.363 - 1.384	30
Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 * (30)
Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 * (30)

Bandas, longitud de onda y resolución de la imagen Landsat-8, identificando las 11 bandas de una imagen

Fuente: Ariza (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM*.

4.6. Imágenes Sentinel-2

Las imágenes Sentinel-2, a través de la misión *Copernicus* tienen buena revisión y alta disponibilidad de escenas, cada una posee un ancho de 290 km.

Estas escenas poseen diversidad de resoluciones espaciales que van desde: 10, 20 y 60 metros (en el rango espectral VNIR a SWIR), además se pueden identificar detalles espaciales consistentes en un área de una hectárea unidad de mapeo mínima (Agencia Espacial Europea-ESA, 2020).

La Tabla VI, muestran las bandas que son importantes para procesos de Teledetección y la precisión de geolocalización de los datos de imágenes de Nivel 1b y 2b, están basados en el sistema de georreferencia WGS84 (Sistema Geodésico Mundial - 1984) considerando el elipsoide de Tierra con pixeles de 10, 20 y 60 metros sin necesidad de tener puntos de control en la tierra y muy buena calidad de imagen radiométrica (Agencia Espacial Europea-ESA, 2020).

Tabla VI. Longitud de onda y resolución espacial de la imagen Sentinel-2

BANDAS DE UNA ESCENA SENTINEL-2		
Banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1 - (VIS)	0.44	60
Banda 2 - Azul (VIS)	0.49	10
Banda 3 - Verde (VIS)	0.56	10
Banda 4 - Rojo (VIS)	0.67	10
Banda 5 - (VIS)	0.71	20
Banda 6 - (VIS)	0.74	20
Banda 7 - (VIS)	0.78	20
Banda 8 - (NIR)	0.84	10
Banda 8A - (NIR)	0.87	20
Banda 9 - (NIR)	0.94	60
Banda 10 - (SWIR)	1.38	60
Banda 11 - (SWIR)	1.61	20
Banda 12 - (SWIR)	2.19	20

Bandas, longitud de onda y resolución de la imagen Sentinel-2, identificando las 13 bandas de una imagen

Fuente: Portal de Observación de la Tierra (2020). *Copernicus: Sentinel-2*.

4.7. Tratamiento de imágenes

Soluciones Satelitales Aplicadas (2020), mencionan que el término de análisis espacial consiste en disponer de varias imágenes satelitales de un mismo lugar, pero de diferentes fechas que son comparadas entre sí para ir visualizando los cambios que han ocurrido en el área de estudio, ya que se debe considerar que los meses del año y los años entre sí cambian en sus características climáticas, los análisis multitemporales son mucho más amplios que el análisis de una sola imagen.

Portal de la Agencia Espacial Europea-ESA (2020), describen que los datos numéricos que cada pixel que integra una imagen, antes fueron captados por el sensor en formato de valores digitales (ND). Los valores digitales no tienen ninguna característica ya que no almacenan características biofísicas. Por eso es necesario realizar el proceso de correcciones radiométricas a las imágenes satelitales, básicamente se desarrolla en dos fases: la primera es convertir los archivos que contienen valores digitales a radiancia y la segunda es convertir los archivos que contienen valores de radiancia a datos de reflectancia.

4.8. Misiones satelitales evaluadas

La mayoría de las misiones satelitales que el hombre ha creado se basan en observación de la Tierra, y muchas de ellas se integran con misiones de otras Agencias Espaciales, conformando constelaciones satelitales para mejorar la calidad, cantidad y tipo de información.

4.8.1. Misión Landsat-8 LDCM

Surgió de una idea del año 1972, consistió en usar los satélites para vigilancia de la tierra, luego surgió una asociación integrada por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGC). Ya en la actualidad el programa se encuentra en la versión número ocho, llamada *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM) y continúa enlazando archivos de misiones anteriores, considerándose como un satélite de mediana resolución, este satélite capta imágenes multiespectrales manteniendo la misma calidad de los siete satélites anteriores (Ariza, 2013).

4.8.2. Misión Copernicus EMS

Programa de Observación de la Tierra de la Comisión Europea, fue una iniciativa europea presentada en octubre de año 1998, con el propósito de tener una supervisión global de Europa en el campo de medio ambiente y seguridad. En la actualidad su objetivo es desarrollar servicios de información operacional a escala mundial, basado en el sistema de espacio y la tierra. Su periodo inicial de exploración inició en el año 2001 (Agencia Espacial Europea-ESA, 2020).

4.9. Índices de vegetación

Son imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales. Este resultado permite obtener una nueva imagen donde se visualizan gráficamente los píxeles relacionados con parámetros de las coberturas vegetales sobre la superficie de la Tierra.

4.9.1. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Índice que se caracteriza por demostrar el estado de la biomasa vegetal presente en la superficie terrestre, además con este índice se puede definir el estado de salud vegetal, cantidad de biomasa, y el proceso de la actividad fotosintética que está desarrollando la vegetación de interés (Silva, 2014).

Para calcular el NDVI de los productos satelitales se debe de disponer de dos bandas principalmente, la banda roja que capta el color rojo de la luz visible propia de la clorofila y la otra es la banda NIR que capta el infrarrojo cercano donde se refleja la reflectividad de los componentes de las plantas. Este índice se mide en un rango de -1 y +1, los valores que se acercan más al uno teóricamente existen más vegetación y más cerca de -1 existe menos vegetación, también valores cercanos a -1 señalan presencia de rocas, nieve y suelos desnudo (Silva, 2014).

Figura 1. Ecuación del índice NDVI

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \qquad NDVI = \frac{(\rho_{760-900 \text{ nm}} - \rho_{630-690 \text{ nm}})}{(\rho_{760-900 \text{ nm}} + \rho_{630-690 \text{ nm}})}$$

Fuente: Silva (2014). *Aplicaciones de la teledetección en el análisis de daños en masas de coníferas en la provincia de Burgos – España.*

Donde:

NIR = banda del infrarrojo cercano

R = banda del rojo

4.9.2. Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

Este índice tiene la capacidad de mostrar el estado de humedad vegetal, este producto se puede aplicar a varios campos de la agricultura. Se calcula a partir de dos bandas, una es la del infrarrojo cercano (NIR) y la otra es la banda del infrarrojo medio (SWIR). El índice se mide en un rango de -1 y +1, los valores que se acercan más al +1 teóricamente indican que la vegetación dispone mayor humedad que lo más cercanos a -1 (Silva, 2014).

Figura 2. Ecuación del índice NDWI

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \qquad NDWI = \frac{(\rho_{857 \text{ nm}} - \rho_{1241 \text{ nm}})}{(\rho_{857 \text{ nm}} + \rho_{1241 \text{ nm}})}$$

Fuente: Silva (2014). *Aplicaciones de la teledetección en el análisis de daños en masas de coníferas en la provincia de Burgos – España.*

Donde:

NIR = banda del infrarrojo cercano

SWIR = banda del infrarrojo medio

4.9.3. Índice de estrés hídrico (MSI)

Es diferente a todos los demás porque no se mide basado en el verdor de la vegetación y se conoce como el índice de estrés hídrico, capaz de combinar la reflectividad captada en el infrarrojo cercano (NIR) y su relación con el infrarrojo medio (SWIR) obteniéndose un cociente que resulta de la relación de las dos bandas mencionadas anteriormente. Este cociente es el resultado de dividir la banda del infrarrojo medio que corresponde al numerador y el infrarrojo cercano que corresponde al denominador de la ecuación (Silva, 2014).

Figura 3. Ecuación del índice MSI

$$MSI = \frac{SWIR}{NIR} \qquad \mathbf{MSI} = \frac{(\rho_{1599 \text{ nm}})}{(\rho_{819 \text{ nm}})}$$

Fuente: Silva (2014). *Aplicaciones de la teledetección en el análisis de daños en masas de coníferas en la provincia de Burgos – España.*

Donde:

NIR = banda del infrarrojo cercano

SWIR = banda del infrarrojo medio

El MSI, determina el estrés hídrico de coberturas vegetales y está relacionado con las características climáticas del suelo. Los valores que miden este índice oscilan en el rango de 0 y +3, donde los valores cercanos a +3 indican que existe mayor estrés hídrico en la vegetación y valores cercanos a 0 indican una menor presencia de estrés hídrico (Silva, 2014).

4.10. Planta de caña de azúcar

La caña de azúcar es una gramínea tropical, suele denominarse como un pasto gigante con tallos de dos a cinco metros de longitud y entre cinco a seis centímetros de diámetro, el tallo contiene un jugo rico en azúcar (sacarosa), para su consumo se extrae y se cristaliza mediante procesos químicos.

4.10.1. Área foliar

Según la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-SAGARPA (2018), la caña la ubican en el grupo fotosintético C₄ por su anatomía *Kranz*. Sus hojas poseen un primer tipo de cloroplastos ubicados en

las células del mesofilo y el segundo tipo en las células de las vainas vasculares donde es capaz de fijar CO₂ por dos vías: por la vía normal C₃ y la vía alternativa C₄ a través de cuatro carbonos básicos como ácido málico, principalmente, ácido aspártico o ácido oxalacético y su tasa fotosintética aumenta con la luminosidad, hasta alcanzar valores superiores a 60 lux (lumen /m²) (600 w/m²) de intensidad, además presentan una variación entre 6.5 a 150 lux (65 a 1500 w/m²), depende de la variedad lo que provoca un elevado punto de saturación de luz.

4.11. Resolución de las imágenes satelitales

Se refiere a la capacidad de identificar objetos o detalles de un determinado tamaño en las imágenes captadas y deben de cumplir cuatro modalidades de resolución: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

4.11.1. Resolución espacial

Término utilizado por Mehta (2015), definen que es la capacidad de poderse visualizar los objetos dentro de un pixel, relacionado por el tamaño que pueda tener el pixel según la escala en metros que represente sobre la superficie real, pero esta resolución depende de ciertas variables como: altura del sensor respecto a la superficie terrestre, grados del ángulo de visión, velocidad de escaneado y las características de óptica de los lentes del sensor. Los productos que se utilizaron en este estudio disponen de pixeles de 10*10 metros en las imágenes Sentinel-2 y de 30*30 metros en los pixeles de las imágenes Landsat-8.

4.11.2. Resolución espectral

Término adaptado y descrito en la capacitación dictada por Mehta (2015), lo describe como la cantidad de canales espectrales que es capaz de captar un sensor, en el caso de los productos de las imágenes Sentinel-2 está integrado por 13 bandas con un ancho de banda que está en un rango de 440 a 2,190 nm mientras que los productos de las imágenes Landsat-8 se integran de 11 bandas con un ancho de banda que está en un rango de 435 a 1,251 nm. Cada una de las bandas cumple con la capacidad de almacenar diferentes secciones de la firma espectral de la vegetación.

4.11.3. Resolución radiométrica

Mehta (2015), describe este término como el número de niveles de gris que capta el sensor del satélite, para las imágenes del satélite Sentinel-2 y Landsat-8 la resolución es de 8 bits equivalentes a 256 niveles de gris.

4.11.4. Resolución temporal

Mehta (2015), indica que la resolución temporal es el tiempo en días que tarda un satélite en fotografiar el mismo punto de la superficie terrestre, y la revisita depende de varios factores que integran el funcionamiento del satélite específicamente de su órbita de movimiento. Para el satélite Sentinel-2 posee un ciclo de revisita de 5 días mientras que para el satélite Landsat-8 la revisita es de 16 días.

4.12. Análisis estadístico

Procedimiento importante para analizar grandes volúmenes de datos, ayuda a recopilarlos, explorarlos y presentarlos, además son un soporte para generar patrones y tendencias de implícitos.

4.12.1. Gráficos de dispersión

Según Spotfire Web Player-TIBCO (2020), los gráficos de dispersión se usan para interaccionar puntos de datos de interés a través de un eje vertical y otro horizontal, además para demostrar el efecto de una variable a la otra. También señala que la relación entre dos variables se llama *Correlación*. Las correlaciones se pueden representar de diferente forma, según Soporte de Minitab (2020) los tipos de relaciones que puede modelar una línea ajustada de regresión pueden ser: lineal positiva o negativa, curva cuadrática, curva cúbica y ninguna relación.

Descripción utilizada por Shmoop (2020), señala que las presentaciones de datos en diagramas de dispersión es una de las formas fáciles y precisas para la expresión de datos que dependen de dos variables y mejorar el resultado de las predicciones, caso contrario ocurre con el uso de histogramas y gráficos de cajas donde no se pueden visualizar datos individuales. Las relaciones entre las dos variables se conocen como correlaciones y pueden clasificarse de la siguiente forma: positiva; cuando las dos variables aumentan, negativa; cuando una de las dos variables aumenta y el otro no, sin correlación; las variables están equilibradas y no hay diferencias estadísticas.

4.12.2. Modelo estadístico

Un modelo estadístico, es la representación de un sistema real, para aumentar la comprensión, desarrollar predicciones y llevar un adecuado control de la información que se está analizando según el análisis generado por Nuñez, Steyerberg, y Nuñez (2011), donde clasifican los modelos en físicos, análogos y simbólicos que son los que normalmente utilizamos para análisis de nuestra información. Además, señalan que para obtener un buen modelo es necesario contar con leyes que ayuden a describir el comportamiento del sistema, experiencia, intuición, imaginación, simplicidad y habilidad para poder manejar las variables que estamos estudiando, donde se debe poner en práctica la aclaración del supuesto de la relación entre la variable dependiente e independiente.

4.12.3. Coeficiente de variación de Spearman

Es una medida aplicada en la ciencia de las estadísticas, que relaciona la desviación estándar y la media aritmética de un conjunto de datos definiendo la dispersión relativa de la muestra en estudio. El cual mide la magnitud de la variabilidad de la distribución de la muestra del estimador, es decir, es el indicador del grado de aproximación con que se estiman las características del universo según los análisis realizados, este análisis fue generado por (Dicovski 2016).

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos de la comparación de los productos satelitales Sentinel-2 y Landsat-8 para estimar humedad, estrés hídrico y biomasa del cultivo caña de azúcar, en su totalidad los resultados son clasificados como cuantitativos.

5.1. Productos satelitales analizados

Para este estudio se descargaron y procesaron 110 escenas del satélite Sentinel-2 (*Path* 208, *Row* 40) y 35 escenas del satélite Landsat-8 (*Path* 20, *Row* 50) del departamento de Escuintla las cuales cubren las 9 fincas incluidas en esta investigación. El periodo de descarga de las imágenes Sentinel-2 y Landsat-8 comprendió del mes de noviembre de 2018 al mes de mayo de 2020.

A cada escena se le cálculo tres tipos de índices de vegetación los cuales son:

- NDWI (Índice de agua de diferencia normalizada)
- MSI (Índice de Estrés Hídrico).
- NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada)

5.2. Muestreos de campo

Para la investigación se seleccionaron 9 fincas del Ingenio Madre Tierra las cuales se detallan en la Tabla VII. El muestreo consistió en levantar puntos de ubicación por cada categoría mostrada en cada uno de los índices de vegetación

analizados en el periodo de noviembre de 2018 a mayo de 2020, con el objetivo de comprobar la relación entre *la humedad real de campo del cultivo de caña de azúcar versus los valores de los índices de vegetación*.

En total se generaron 1,563 puntos de muestreo, distribuidos en las 9 fincas (ver tabla VII). Estas muestras de tallo de caña se trasladaron a laboratorio para su análisis y determinar el porcentaje de humedad.

Tabla VII. **Ubicación geográfica y número de muestras por finca**

No.	Finca	Ubicación		Muestreo				Total finca
		Latitud	Longitud	1	2	3	4	
1	El Jute y Anexos 2	14° 19' 8.532" N	91° 14' 7.882" W	70	65	12	0	147
2	El Porvenir	13° 58' 21.571" N	91° 5' 13.921" W	49	38	48	0	135
3	Jabalí 1	14° 14' 18.954" N	91° 9' 56.248" W	17	19	8	0	44
4	La Bolsa	14° 19' 43.871" N	91° 23' 40.611" W	63	52	17	0	132
5	La Encantadora	13° 53' 19.498" N	90° 14' 30.715" W	68	64	20	0	152
6	Las Flores	13° 54' 36.124" N	90° 15' 18.662" W	21	22	22	2	67
7	Málaga	14° 12' 36.824" N	91° 27' 46.503" W	43	8	17	0	68
8	Mirador	14° 5' 27.801" N	91° 12' 33.478" W	184	143	125	48	500
9	Mixqueño	14° 19' 49.891" N	91° 13' 16.058" W	166	104	46	2	318
Total muestreo				681	515	315	52	1,563

Cada una de las fincas de muestreo se seleccionó estratégicamente para lograr la mayor representación geográfica de producción del ingenio Madre Tierra

Fuente: elaboración propia.

5.3. Comparación de las resoluciones de las imágenes Sentinel-2 y Landsat-8

Para la comparación de las resoluciones de las imágenes Sentinel-2 y Landsat-8 se realizó la recopilación de información general de cada producto satelital, además de realizar un análisis de geoprocésamiento con herramientas SIG.

El análisis se realizó en la finca Canoas ubicada geográficamente en 14° 13' 48.522" Latitud Norte y 91° 19' 9.618" Longitud Oeste del municipio de Tiquisate, Escuintla. Se comparó la resolución de la escena Sentinel-2 de fecha 26 de marzo de 2020 y la escena Landsat-8 del 25 de marzo de 2020, en la Tabla VIII se muestra la prueba de medias (*T*) realizada a los productos satelitales comparados.

Tabla VIII. **Prueba de medias (T) por producto satelital**

S (1)	L (2)	N	Media (dif)	Media (1)	Media (2)	LI (95%)	LS (95%)	T	Bilateral
NDWI		30	-0.10	0.20	0.30	-0.11	-0.09	-22.48	<0.0001
MSI		30	0.14	0.69	0.55	0.12	0.15	19.92	<0.0001
NDVI		40	-0.13	0.50	0.62	-0.13	-0.12	-40.80	<0.0001
S = Sentinel-2				L = Landsat-8					

La prueba de medias ejecutada a cada producto satelital utilizando un 95% de confianza señala que las resoluciones satelitales de Sentinel-2 son diferentes a Landsat-8

Fuente: elaboración propia.

5.4. Variables estadísticas por finca

Para calcular el grado de precisión de la información de laboratorio con los valores obtenidos de los índices de vegetación (NDWI, MSI y NDVI) se realizaron análisis de correlación lineal simple por cada producto satelital considerando las 9 fincas (tabla VII) seleccionadas para desarrollar el estudio.

En las tablas IX, X, XI y XII respectivamente se muestran los coeficientes de regresión lineal simple obtenidos a nivel de finca, colocando como variable independiente (X) el valor del porcentaje de humedad de caña de azúcar obtenido de los análisis de laboratorio y como variable dependiente (Y) el valor de cada índice de vegetación (NDWI y MSI).

Tabla IX. **Coefficientes de regresión utilizando el índice NDWI de las imágenes satelitales Sentinel-2**

Coefficientes de regresión: Porcentaje de humedad vs NDWI					
No.	Finca	Muestreo	Eje (X) Porcentaje Humedad	Eje (Y) NDWI	R² Sentinel-2
1	El Jute	1	70.83	0.23	0.94
		2	70.92	0.20	
		3	69.00	0.12	
2	El Porvenir	1	70.73	0.30	0.98
		2	69.42	0.20	
		3	68.96	0.14	
3	Jabalí 1	1	71.18	0.22	0.97
		2	70.21	0.11	
		3	69.50	0.07	
4	La Bolsa	1	72.00	0.25	0.94
		2	70.81	0.21	
		3	68.47	0.18	
5	La Encantadora	1	71.03	0.30	0.97
		2	69.53	0.25	
		3	68.80	0.20	
6	Las Flores	1	72.10	0.35	0.98
		2	71.09	0.29	
		3	69.64	0.23	
		4	68.00	0.17	
7	Málaga	1	69.81	0.18	0.94
		2	68.00	0.14	
		3	68.00	0.15	
8	Mirador	1	70.72	0.32	0.94
		2	70.73	0.29	
		3	70.05	0.23	
		4	69.67	0.20	
9	Mixqueño	1	69.33	0.18	0.91
		2	69.27	0.14	
		3	68.91	0.13	
		4	68.00	0.07	

Los coeficientes obtenidos por cada finca muestreada se derivan de graficas de regresión lineal simple.

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. Coeficientes de regresión utilizando el índice NDWI de las imágenes satelitales Landsat-8

Coeficientes de regresión: Porcentaje de humedad vs NDWI					
No.	Finca	Muestreo	Eje (X) Porcentaje Humedad	Eje (Y) NDWI	R ² Landsat-8
1	El Jute	1	70.83	0.31	0.99
		2	70.92	0.30	
		3	69.00	0.22	
2	El Porvenir	1	70.73	0.40	0.89
		2	69.42	0.35	
		3	68.96	0.28	
3	Jabalí 1	1	71.18	0.32	0.87
		2	70.21	0.20	
		3	69.50	0.19	
4	La Bolsa	1	72.00	0.34	0.78
		2	70.81	0.27	
		3	68.47	0.25	
5	La Encantadora	1	71.03	0.40	0.96
		2	69.53	0.35	
		3	68.80	0.30	
6	Las Flores	1	72.10	0.43	0.99
		2	71.09	0.39	
		3	69.64	0.34	
		4	68.00	0.30	
7	Málaga	1	69.81	0.31	0.81
		2	68.00	0.26	
		3	68.00	0.23	
8	Mirador	1	70.72	0.40	0.95
		2	70.73	0.40	
		3	70.05	0.32	
		4	69.67	0.31	
9	Mixqueño	1	69.33	0.26	0.96
		2	69.27	0.25	
		3	68.91	0.24	
		4	68.00	0.10	

Los coeficientes obtenidos por cada finca muestreada se derivan de graficas de regresión lineal simple.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Coefficientes de regresión utilizando el índice MSI de las imágenes satelitales Sentinel-2**

Coefficientes de regresión: Porcentaje de humedad vs MSI					
No.	Finca	Muestreo	Eje (X) Porcentaje Humedad	Eje (Y) MSI	R² Sentinel-2
1	El Jute	1	70.83	0.64	0.91
		2	70.92	0.68	
		3	69.00	0.79	
2	El Porvenir	1	70.73	0.54	0.97
		2	69.42	0.67	
		3	68.96	0.75	
3	Jabalí 1	1	71.18	0.64	0.72
		2	70.21	0.91	
		3	69.50	0.88	
4	La Bolsa	1	72.00	0.63	0.97
		2	70.81	0.67	
		3	68.47	0.72	
5	La Encantadora	1	71.03	0.54	0.96
		2	69.53	0.61	
		3	68.80	0.67	
6	Las Flores	1	72.10	0.48	0.99
		2	71.09	0.56	
		3	69.64	0.63	
		4	68.00	0.70	
7	Málaga	1	69.81	0.71	0.86
		2	68.00	0.76	
		3	68.00	0.79	
8	Mirador	1	70.72	0.53	0.97
		2	70.73	0.56	
		3	70.05	0.63	
		4	69.67	0.70	
9	Mixqueño	1	69.33	0.72	0.95
		2	69.27	0.78	
		3	68.91	0.79	
		4	68.00	0.98	

Los coeficientes obtenidos por cada finca muestreada se derivan de graficas de regresión lineal simple.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Coeficientes de regresión utilizando el índice MSI de las imágenes satelitales Landsat-8**

Coeficientes de regresión: Porcentaje de Humedad vs MSI					
No.	Finca	Muestreo	Eje (X)	Eje (Y)	R²
			Porcentaje Humedad	MSI Landsat-8	
1	El Jute	1	70.83	0.54	0.98
		2	70.92	0.55	
		3	69.00	0.64	
2	El Porvenir	1	70.73	0.42	0.84
		2	69.42	0.48	
		3	68.96	0.58	
3	Jabalí 1	1	71.18	0.51	0.83
		2	70.21	0.68	
		3	69.50	0.68	
4	La Bolsa	1	72.00	0.51	0.98
		2	70.81	0.58	
		3	68.47	0.67	
5	La Encantadora	1	71.03	0.43	0.95
		2	69.53	0.49	
		3	68.80	0.55	
6	Las Flores	1	72.10	0.40	0.99
		2	71.09	0.43	
		3	69.64	0.50	
		4	68.00	0.54	
7	Málaga	1	69.81	0.53	0.76
		2	68.00	0.59	
		3	68.00	0.64	
8	Mirador	1	70.72	0.43	0.94
		2	70.73	0.43	
		3	70.05	0.52	
		4	69.67	0.53	
9	Mixqueño	1	69.33	0.59	0.95
		2	69.27	0.62	
		3	68.91	0.63	
		4	68.00	0.81	

Los coeficientes obtenidos por cada finca muestreada se derivan de graficas de regresión lineal simple.

Fuente: elaboración propia.

También se generó el análisis de regresión lineal simple a nivel de producto satelital Sentinel-2 (ver tablas XIII, XIV, XV, XVI, XVII y XVIII) y la gráfica de estudentizados y regresión lineal simple (ver figuras 4, 5, 6 y 7), la variable independiente (X) es el porcentaje de humedad y la variable dependiente (Y) el valor del índice de vegetación (NDWI, MSI), obteniendo los siguientes análisis:

5.5. Análisis de regresión lineal, satélite Sentinel-2: Porcentaje de humedad vs. NDWI

Derivado del análisis estadístico se presentan a continuación los coeficientes de regresión lineal obtenidos:

Tabla XIII. **Coefficiente de regresión lineal NDWI satélite Sentinel-2**

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
NDWI	30	0.52	0.5	0.0029	-89.78	-85.57

Coefficiente obtenido al relacionar % humedad vs el índice NDWI de las imágenes Sentinel-2.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Coefficiente de regresión y estadísticos asociados NDWI satélite Sentinel-2**

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const	-2.87	0.56	-4.02	-1.72	-5.12	<0.0001		
Porcentaje de HUMEDAD	0.04	0.01	0.03	0.06	5.48	<0.0001	30.03	1.00

Indicadores estadísticos asociados al relacionar % Humedad vs el índice NDWI de las imágenes Sentinel-2.

Fuente: elaboración propia.

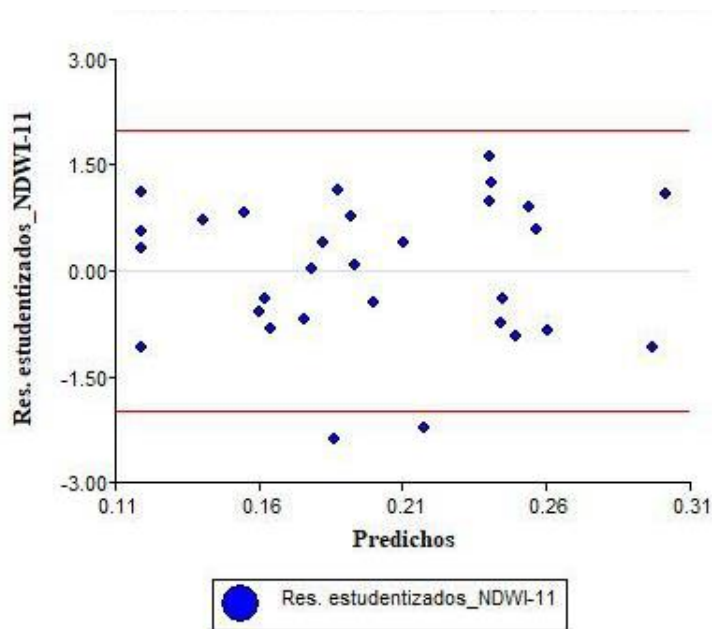
Tabla XV. **Análisis de la Varianza (SC tipo III) NDWI satélite Sentinel-2**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.08	1.00	0.08	30.03	<0.0001
Porcentaje de HUMEDAD	0.08	1.00	0.08	30.03	<0.0001
Error	0.07	28.00	0.00		
Total	0.15	29.00			

Análisis de la varianza de la relación % Humedad vs el índice NDWI de las imágenes Sentinel-2.

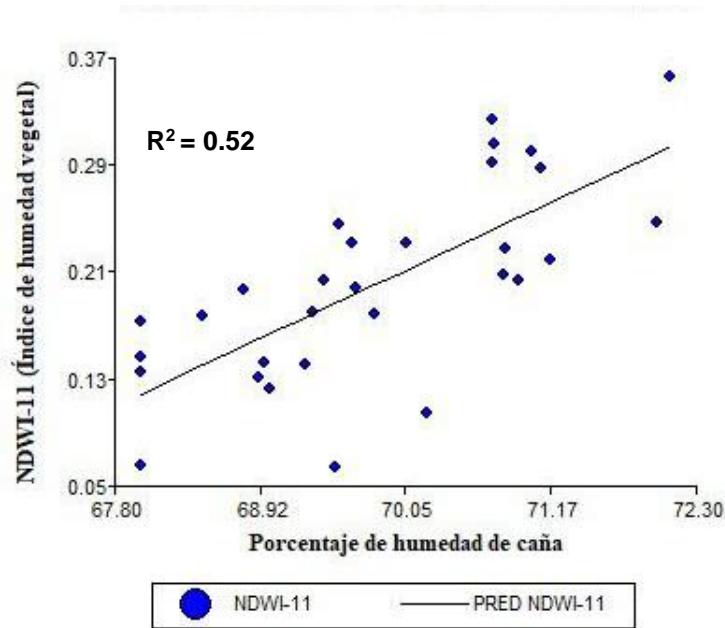
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Gráfica de estudentizados Sentinel-2: porcentaje de humedad vs. NDWI**



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Gráfica Sentinel-2: porcentaje de humedad vs. NDWI



Fuente: elaboración propia.

5.6. Análisis de regresión lineal, satélite Sentinel-2: porcentaje de humedad vs. MSI

Derivado del análisis estadístico se presentan a continuación los coeficientes de regresión lineal obtenidos:

Tabla XVI. Coeficiente de regresión lineal MSI satélite Sentinel-2

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
MSI	30.00	0.45	0.43	0.01	-56.88	-52.68

Coeficiente obtenido al relacionar el porcentaje de humedad vs. el índice MSI de las imágenes Sentinel-2.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Coefficientes de regresión y estadísticos asociados MSI satélite Sentinel-2**

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	5.31	0.97	3.32	7.29	5.47	<0.0001		
Porcentaje de humedad	-0.07	0.01	-0.09	-0.04	-4.77	0.0001	22.71	1.00

Indicadores estadísticos asociados al relacionar el porcentaje de humedad vs. el índice MSI de las imágenes Sentinel-2.

Fuente: elaboración propia.

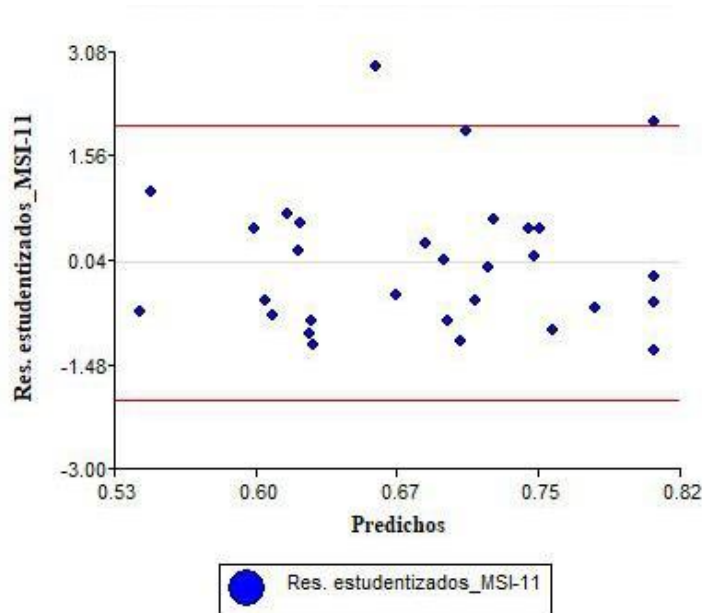
Tabla XVIII. **Análisis de la Varianza (SC tipo III) MSI satélite Sentinel-2**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.18	1.00	0.18	22.71	0.0001
Porcentaje de HUMEDAD	0.18	1.00	0.18	22.71	0.0001
Error	0.22	28.00	0.01		
Total	0.39	29.00			

Análisis de la varianza de la relación del porcentaje de humedad vs. el índice MSI de las imágenes Sentinel-2.

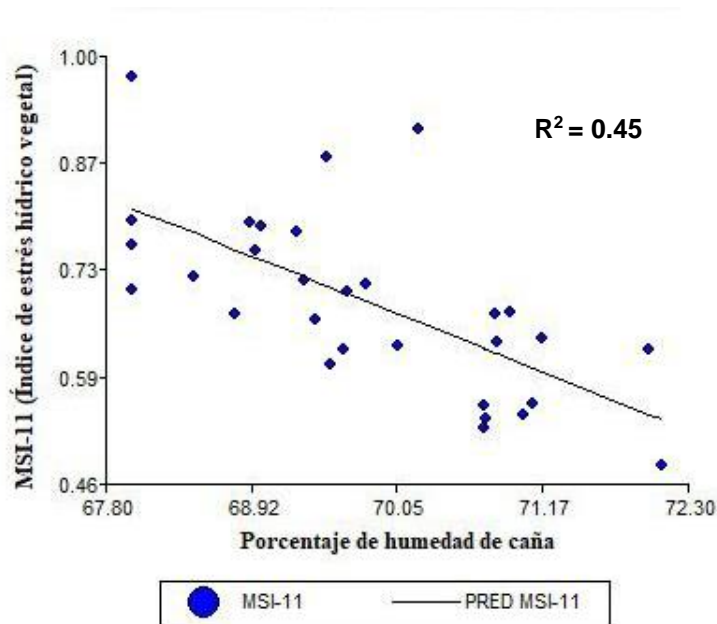
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Gráfica de estudentizados Sentinel-2: porcentaje de humedad vs. MSI



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Gráfica Sentinel-2: porcentaje de humedad vs. MSI



Fuente: elaboración propia.

De la misma forma se generó el análisis de regresión lineal simple a nivel de producto satelital Landsat-8 (ver tablas XIX, XX, XXI, XXII, XXIII Y XIV) y la gráfica de estudentizados y regresión lineal simple (ver Figuras 8, 9, 10 y 11), la variable independiente (X) es el porcentaje de humedad y la variable dependiente (Y) el valor del índice de vegetación (NDWI, MSI), obteniendo los siguientes análisis:

5.7. Análisis de regresión lineal, satélite Landsat-8: porcentaje de humedad vs. NDWI

Derivado del análisis estadístico se presentan a continuación los coeficientes de regresión lineal obtenidos:

Tabla XIX. **Coficiente de regresión lineal NDWI satélite Landsat-8**

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
NDWI	30.00	0.43	0.41	0.00	-82.59	-78.39

Coficiente obtenido al relacionar el porcentaje de humedad vs. el índice NDWI de las imágenes Landsat-8.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Coficiente de regresión y estadísticos asociados NDWI satélite Landsat-8**

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-2.59	0.63	-3.88	-1.30	-4.10	0.00		
Porcentaje de HUMEDAD	0.04	0.01	0.02	0.06	4.58	0.00	20.94	1.00

Indicadores estadísticos asociados al relacionar el porcentaje de humedad vs. el índice NDWI de las imágenes Landsat-8.

Fuente: elaboración propia.

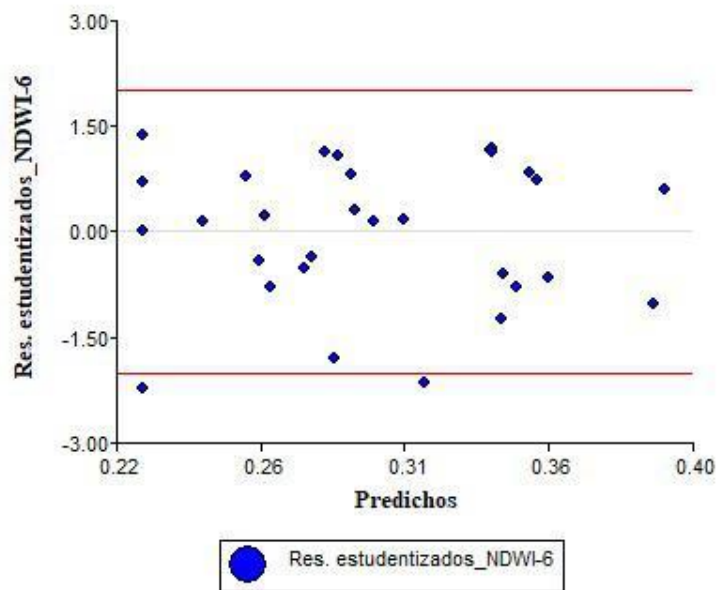
Tabla XXI. **Análisis de la Varianza (SC tipo III) NDWI satélite Landsat-8**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.07	1.00	0.07	20.94	0.0001
Porcentaje de HUMEDAD	0.07	1.00	0.07	20.94	0.0001
Error	0.09	28.00	0.00		
Total	0.16	29.00			

Análisis de la varianza de la relación % Humedad vs el índice NDWI de las imágenes Landsat-8.

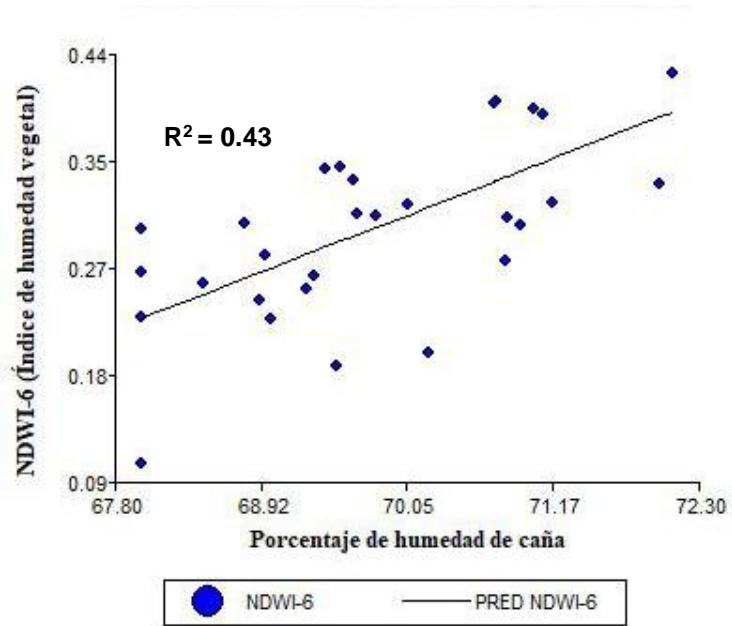
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Gráfica de estudentizados Landsat-8: porcentaje de humedad vs. NDWI**



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Gráfica Landsat-8: porcentaje de humedad vs. NDWI



Fuente: elaboración propia.

5.8. Análisis de regresión lineal, satélite Landsat-8: porcentaje de humedad vs. MSI

Derivado del análisis estadístico se presentan a continuación los coeficientes de regresión lineal obtenidos:

Tabla XXII. Coeficiente de regresión lineal MSI satélite Landsat-8

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
MSI	30.00	0.43	0.41	0.01	-68.40	-64.19

Coeficiente obtenido al relacionar % Humedad vs el índice MSI de las imágenes Landsat-8.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Coefficiente de regresión y estadísticos asociados MSI satélite**

Landsat-8

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	4.21	0.80	2.57	5.85	5.26	<0.0001		
Porcentaje de HUMEDAD	-0.05	0.01	-0.08	-0.03	-4.57	0.00	20.89	1.00

Indicadores estadísticos asociados al relacionar % Humedad vs el índice MSI de las imágenes Landsat-8.

Fuente: elaboración propia.

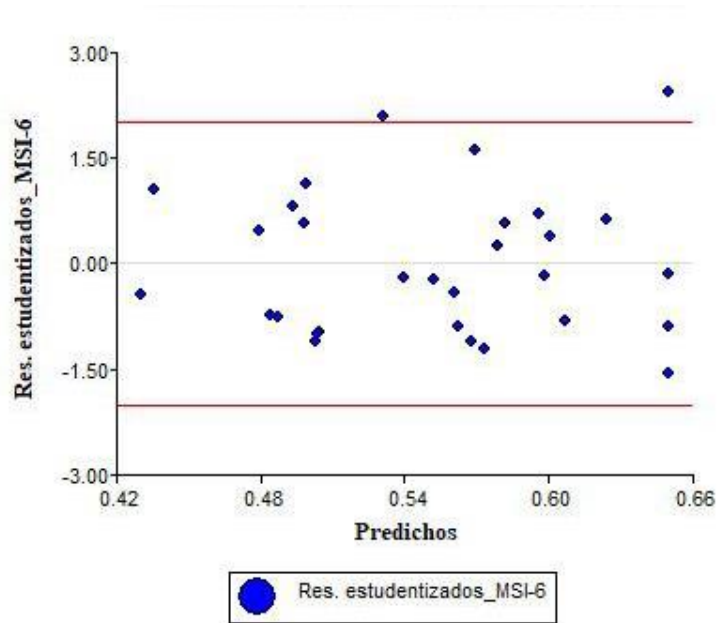
Tabla XXIV. **Análisis de la Varianza (SC tipo III) MSI satélite Landsat-8**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.11	1.00	0.11	20.89	0.0001
Porcentaje de HUMEDAD	0.11	1.00	0.11	20.89	0.0001
Error	0.15	28.00	0.01		
Total	0.26	29.00			

Análisis de la varianza de la relación % Humedad vs el índice MSI de las imágenes Landsat-8.

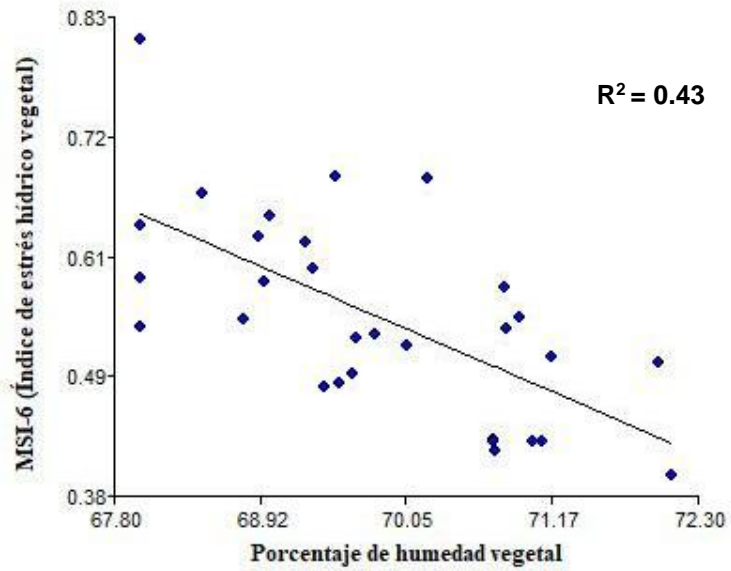
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Gráfica de estudentizados Landsat-8: porcentaje de humedad vs. MSI**



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Gráfica Landsat-8: porcentaje de humedad vs. MSI**



Fuente: elaboración propia.

Para medir el grado de precisión del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se utilizaron graficas de dispersión de comportamiento cuadrático, considerando como variable independiente (X) *Edad del cultivo (días)* y la dependiente el “NDVI” obtenido de las imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat-8 utilizando información del período 2019-2020, los datos analizados se muestran en la tabla XXV.

Tabla XXV. Edad del cultivo y valores de NDVI de las imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat-8

Ciclo de crecimiento: 2019-2020			Ciclo de crecimiento: 2019-2020		
Edad (días)	NDVI		Edad (días)	NDVI	
	Sentinel-2	Landsat-8		Sentinel-2	Landsat-8
5	0.18	0.31	205	0.62	0.74
15	0.19	0.34	215	0.62	0.73
25	0.23	0.37	225	0.62	0.73
35	0.27	0.40	235	0.61	0.73
45	0.32	0.47	245	0.61	0.73
55	0.37	0.53	255	0.60	0.72
65	0.41	0.55	265	0.59	0.71
75	0.44	0.59	275	0.58	0.69
85	0.47	0.61	285	0.57	0.68
95	0.50	0.65	295	0.56	0.66
105	0.53	0.67	305	0.54	0.66
115	0.55	0.68	315	0.52	0.63
125	0.56	0.71	325	0.50	0.61
135	0.55	0.71	335	0.48	0.58
145	0.57	0.72	345	0.47	0.57
155	0.58	0.72	355	0.44	0.55
165	0.60	0.72	365	0.42	0.55
175	0.62	0.72	375	0.45	0.60
185	0.64	0.73	385	0.41	0.56
195	0.63	0.73	395	0.41	0.52

Se calculó la edad del cultivo de caña de azúcar de las fincas administradas del ingenio Madre Tierra en el período de producción 2019-2020 utilizando escenas satelitales Sentinel-2 y Landsat-8.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados estadísticos obtenidos al relacionar la edad del cultivo (días) versus el NDVI de las imágenes Sentinel-2 y Landsat-8 se muestran en las tablas XXVI, XXVII, XXVIII y XXIX, también se obtuvo dos gráficas de dispersión cuadrático (ver figuras 12 y 13).

Tabla XXVI. **Coefficiente de regresión cuadrático NDVI satélite Sentinel-2**

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
NDVI	40.00	0.97	0.96	0.00	-181.08	-174.32

Coefficiente obtenido al relacionar Edad del cultivo (días) vs. el índice NDVI de las imágenes Sentinel-2.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Coefficiente de regresión y estadísticos satélite Sentinel-2**

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0.17	0.01	0.14	0.19	14.74	<0.0001		
EDAD (DÍAS)	0.00	0.00	0.00	0.00	31.75	<0.0001	1009.07	16.04
EDAD (DÍAS) ²	0.00	0.00	0.00	0.00	-29.50	<0.0001	871.22	16.04

Indicadores estadísticos asociados al relacionar Edad del cultivo (días) vs. el índice NDVI de las imágenes Sentinel-2.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Coefficiente de regresión cuadrático NDVI satélite Landsat-8**

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
NDVI	40.00	0.93	0.93	0.00	-157.54	-150.79

Coefficiente obtenido al relacionar Edad del cultivo (días) vs el índice NDVI de las imágenes Landsat-8.

Fuente: elaboración propia.

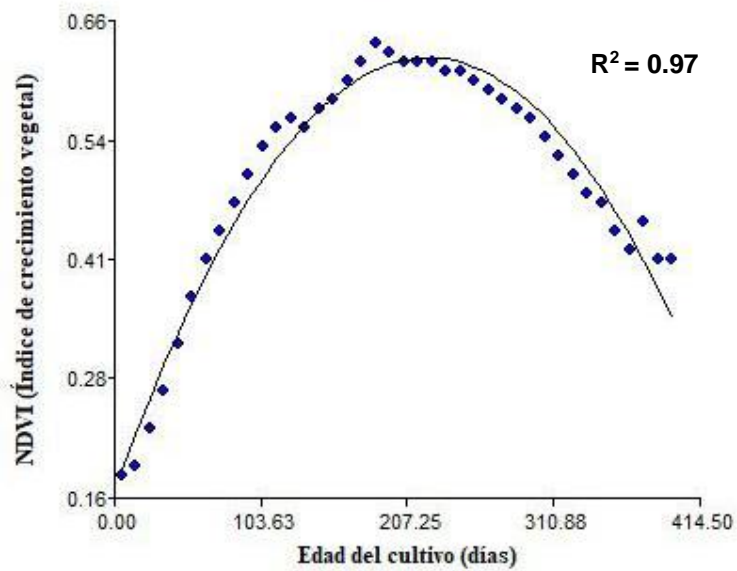
Tabla XXIX. **Coefficiente de regresión y estadísticos satélite Landsat-8**

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0.32	0.02	0.29	0.35	21.41	<0.0001		
EDAD (DÍAS)	0.00	0.00	0.00	0.00	21.99	<0.0001	484.73	16.04
EDAD (DÍAS)^2	0.00	0.00	0.00	0.00	-20.79	<0.0001	433.04	16.04

Indicadores estadísticos asociados al relacionar Edad del cultivo (días) vs el índice NDVI de las imágenes Sentinel-2.

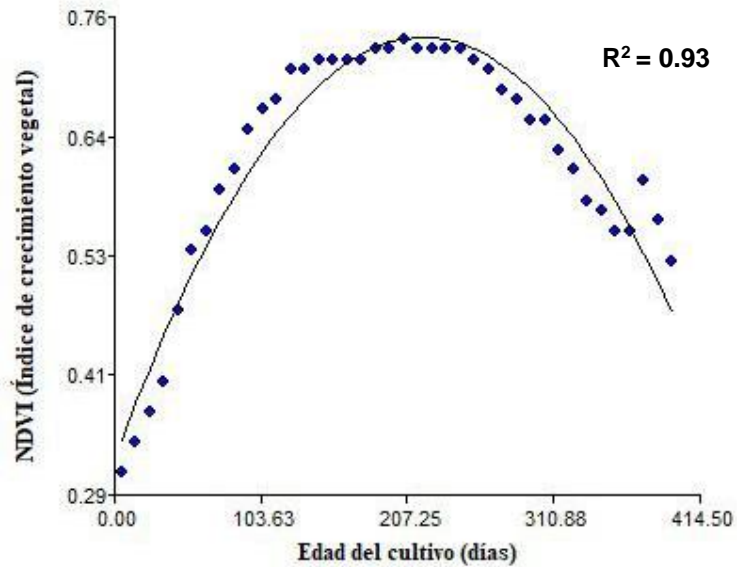
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Gráfica Sentinel-2: edad (días) vs. NDVI (Ciclo 2019/2020)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Gráfica Landsat-8: edad (días) vs. NDVI (Ciclo 2019/2020)



Fuente: elaboración propia.

5.9. Variables estadísticas por producto satelital

Las variables estadísticas obtenidas al relacionar porcentaje de humedad en caña de azúcar versus el índice de humedad vegetal (NDWI) y el índice de estrés hídrico vegetal (MSI) se muestra en las tablas XXX y XXXI.

Tabla XXX. Variables estadísticas porcentaje de humedad vs. NDWI

Eje (X)	Eje (Y)	Satélite	EMC	p-valor	R ²
Porcentaje de Humedad en caña de azúcar	NDWI	Sentinel-2	0.0029	<0.0001	0.52
		Landsat-8	0.0008	0.0001	0.43

Correlación lineal simple del porcentaje de humedad versus el índice de humedad vegetal (NDWI) en ambos productos satelitales.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Variables estadísticas porcentaje de humedad vs. MSI**

Eje (X)	Eje (Y)	Satélite	EMC	p-valor	R ²
Porcentaje de Humedad en caña de azúcar	MSI	Sentinel-2	0.01	0.0001	0.45
		Landsat-8	0.01	0.0001	0.43

Correlación lineal simple del porcentaje de humedad versus el índice de estrés hídrico vegetal (MSI) en ambos productos satelitales.

Fuente: elaboración propia.

VARIABLES ESTADÍSTICAS OBTENIDAS AL RELACIONAR EDAD DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR (DÍAS) VERSUS EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) SE MUESTRA EN LA TABLA XXXII.

Tabla XXXII. **Variables estadísticas edad (días) vs. NDVI**

Eje (X)	Eje (Y)	Satélite	EMC	p-valor	R ²
Edad de caña (días)	NDVI	Sentinel-2	0.00072	<0.0001	0.97
		Landsat-8	0.00130	<0.0001	0.93

Correlación cuadrática de la edad del cultivo (días) versus el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en ambos productos satelitales.

Fuente: elaboración propia.

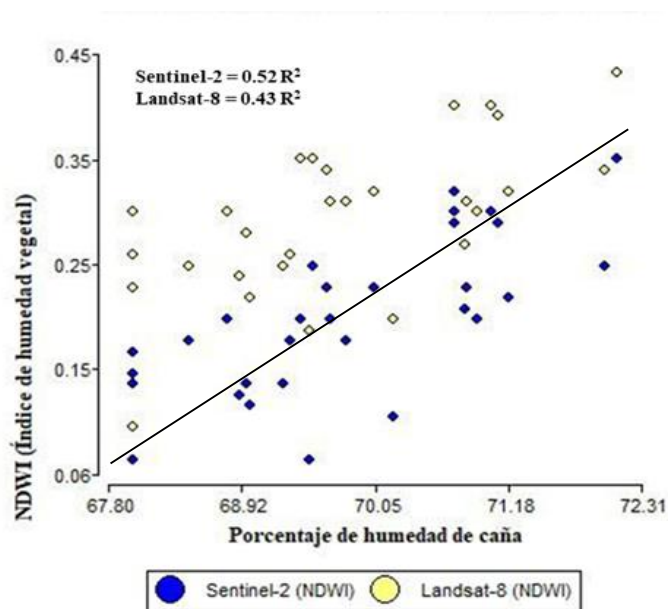
5.10. Gráficos estadísticos por producto satelital

La gráfica de regresión lineal muestra una tendencia ascendente positiva al relacionar el porcentaje de humedad de caña versus el índice de vegetación NDWI (ver figura 14).

La segunda gráfica de regresión lineal muestra una tendencia descendente negativa al relacionar el porcentaje de humedad de caña versus el índice de vegetación MSI (ver figura 15) comportamiento muy característico de este índice por tener una interpretación inversa a su comportamiento estadístico.

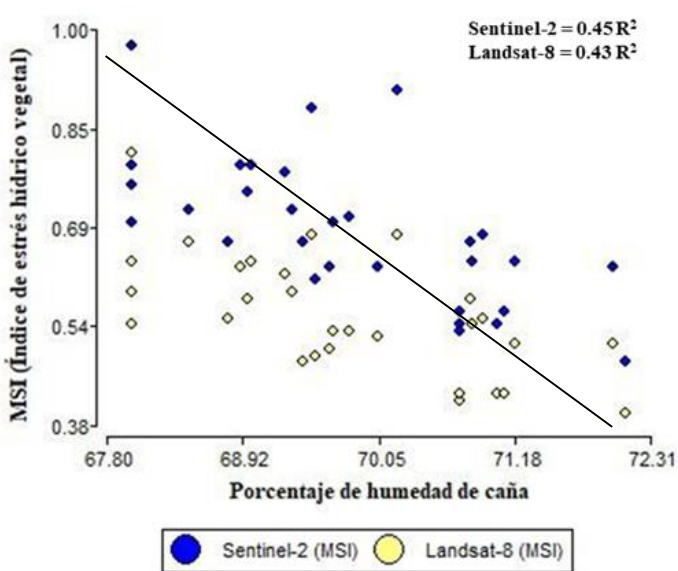
De igual forma el gráfico de regresión cuadrático muestra un comportamiento perfecto de una parábola expresando un buen ajuste de la serie de datos utilizada para relacionar Edad del cultivo (días) versus el índice de vegetación NDVI (ver figura 16).

Figura 14. **Gráfica Sentinel-2 y Landsat-8: porcentaje de humedad vs. NDWI**



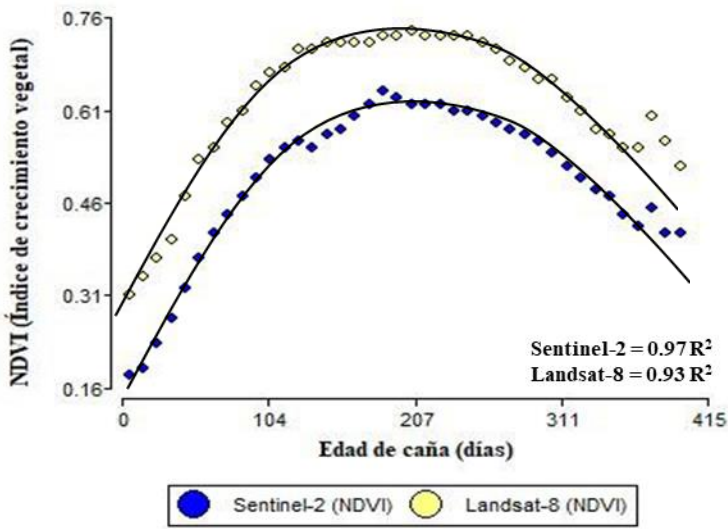
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Gráfica Sentinel-2 y Landsat-8: porcentaje de humedad vs. MSI



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Gráfica Sentinel-2 y Landsat-8: edad (días) vs. NDVI



Fuente: elaboración propia.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La calidad de información obtenida de los productos satelitales se define según el nivel de resolución que tenga el sensor óptico de las cámaras de los satélites, en este estudio se evaluaron dos productos satelitales siendo el satélite Sentinel-2 y Landsat-8 ambos de mediana resolución, y se identificó que al momento de analizar las imágenes y obtener los tres tipos de índices de vegetación (NDWI, MSI y NDVI) si existe diferencias estadísticas y diferencias visuales al comparar el mismo índice de vegetación obtenido en ambos productos satelitales, razón atribuida al cultivo utilizado en el estudio ya que la caña de azúcar es un cultivo extensivo donde la tendencia del comportamiento de la humedad, estrés hídrico y biomasa capturado por los dos sensores ópticos no sufre modificaciones al momento de representarlos en gráficos de regresión lineal y cuadrático junto a los archivos geográficos de formato *raster*.

Punto importante a resaltar es que la resolución espacial de ambos satélites si afecta la visualización de los tres tipos de índices de vegetación cuando se les aplica una clasificación predeterminada por el usuario y esto se debe al área útil de información capturada por cada sensor óptico, tal es el caso del satélite Sentinel-2 donde cada pixel genera un área de reconocimiento de 100 m² mientras que el satélite Landsat-8 el área de reconocimiento es de 900 m² siendo de mayor cobertura pero la precisión al identificar objetos se dificulta comparado con la cobertura del primer satélite mencionado, la prueba de medias pareadas (T) demostró que las resoluciones satelitales de Sentinel-2 son diferentes a Landsat-8 con p-valor de <0.0001 en todos los casos (ver tabla VIII).

Los coeficientes de regresión lineal obtenidos de las gráficas al relacionar *porcentaje de humedad de caña versus el índice de humedad vegetal (NDWI)*

clasifican a 5 fincas donde el satélite Sentinel-2 muestra mejor significancia estadística y a 4 fincas donde el satélite Landsat-8 muestra mejor significancia estadística, aspecto a resaltar son los valores de los coeficientes de regresión lineal ya que al utilizar imágenes Sentinel-2 se obtuvo un coeficiente de regresión menor de 0.91 en la Finca Mixqueño y el mayor en la Finca El Porvenir de 0.98, mientras que utilizando las imágenes Landsat-8 el coeficiente de regresión menor se obtuvo en la Finca La Bolsa con 0.78 y el mayor en las Fincas; El Jute y Anexos 2 con 0.99 y Las Flores con 0.99, la estabilidad estadística de los coeficientes de regresión es mayor utilizando las imágenes Sentinel-2 porque existe menor diferencia del coeficiente equivalente a 0.07, mientras que utilizando las imágenes Landsat-8 la diferencia es de 0.21 (ver tablas IX y X).

Al relacionar el porcentaje de humedad de caña versus el índice NDWI de todas las fincas muestreadas se encontró que la distancia de los puntos (EMC) con respecto a la recta de la regresión lineal es mayor al utilizar imágenes Sentinel-2 (0.0029) que Landsat-8 (0.0009), la fiabilidad de la relación (p-valor) es igual al utilizar ambos satélites (0.0001) y la expresión (R^2) de la variable porcentaje de humedad de caña (independiente) es mayor utilizando imágenes Sentinel-2 (0.52) que Landsat-8 (0.43) (ver tabla XXX y figura 14).

Para el segundo índice evaluado se relacionó “porcentaje de humedad de caña versus el índice de estrés hídrico vegetal (MSI)”, la relación clasificó a 4 fincas donde el satélite Sentinel-2 muestra mejor significancia estadística, 3 fincas donde el satélite Landsat-8 muestra mejor significancia estadística y 2 fincas donde la significancia estadística entre ambos satélites es igual, los valores de los coeficientes de regresión obtenidos muestran que utilizando las imágenes Sentinel-2 se obtuvo el coeficiente menor de 0.72 en la Finca Jabalí 1 y el mayor en la Finca Las Flores de 0.99, mientras que utilizando las imágenes Landsat-8 el coeficiente de regresión menor se obtuvo en la Finca Málaga con 0.76 y el

mayor en la Finca Las Flores con 0.99, la estabilidad estadística de los coeficientes de regresión es mayor utilizando las imágenes Landsat-8 porque existe menor diferencia del coeficiente equivalente a 0.23, mientras que utilizando las imágenes Sentinel-2 la diferencia es de 0.27 (ver tablas XI y XII).

La relación del porcentaje de humedad de caña versus el índice MSI de todas las fincas muestreadas mostró que la distancia de los puntos (EMC) con respecto a la recta de la regresión lineal es igual al utilizar ambos satélites (0.01), la fiabilidad de la relación (p-valor) es igual al utilizar ambos satélites (0.0001) y la expresión (R^2) de la variable porcentaje de humedad de caña (independiente) es ligeramente mayor utilizando imágenes Sentinel-2 (0.45) que Landsat-8 (0.43) (ver tabla XXXI y figura 15).

La medición del crecimiento del cultivo de caña de azúcar a través de la modelación gráfica de su biomasa es de vital importancia para procesos de monitoreo de cultivo, el análisis de 110 escenas del satélite Sentinel-2 y 35 escenas del satélite Landsat-8 se logró medir la edad del cultivo desde 5 días después de siembra hasta 395 días edad en que fue cosechado en el periodo de producción 2019 al 2020, las imágenes del satélite Sentinel-2 generan índices de vegetación de crecimiento (NDVI) con valores menores a los obtenidos de las imágenes Landsat-8, esta diferencia entre productos puede expresarse desde 0.09 a 0.14 unidades menos en Sentinel-2, pero la expresión gráfica de dispersión de ambos productos satélites muestran la misma tendencia gráfica (ver Figuras 12 y 13), en el caso de los coeficientes de regresión cuadrático si existen diferencias estadísticas ya que utilizando imágenes del satélite Sentinel-2 se obtuvo 0.97 para el período de producción 2019 al 2020, mientras que utilizando imágenes del satélite Landsat-8 se obtuvo 0.93 para el periodo de producción 2019 al 2020, siendo menor el coeficiente de regresión cuadrático de

las imágenes Landsat-8 en 0.04 unidades en el periodo 2019 al 2020 respecto a las imágenes Sentinel-2 (ver tablas XXVI, XXVII, XXVIII y XXIX).

Esta tercera relación, entre la edad del cultivo de caña versus el índice NDVI mostró que la distancia de los puntos (EMC) con respecto a la recta de la regresión cuadrático es menor al utilizar imágenes Sentinel-2 (0.00072) que Landsat-8 (0.00130), la fiabilidad de la relación (p-valor) es igual al utilizar ambos satélites (<0.0001).

CONCLUSIONES

1. La estimación de humedad y estrés hídrico en la planta caña de azúcar es calculada con mejor precisión utilizando las imágenes Sentinel-2, porque presenta valores de correlación mayores que los obtenidos de las imágenes Landsat-8.
2. La prueba de medias muestra un *p-valor* de <0.0001 para los tres índices de vegetación (NDWI, MSI, NDVI) obtenidos por producto satelital evaluado, siendo inferior a 0.05 rechazando la hipótesis nula, es decir las resoluciones satelitales (temporal, espacial, radiométrica, espectral) de Sentinel-2 es diferente a las resoluciones satelitales de Landsat-8 y si afectan el valor de los índices de vegetación.
3. La estimación de humedad vegetal (NDWI) con imágenes Sentinel-2 generó un coeficiente de regresión de 0.52 (R^2) y con Landsat-8 0.43 (R^2) y la estimación de estrés hídrico vegetal (MSI) con imágenes Sentinel-2 generó un coeficiente de regresión de 0.45 (R^2) y con Landsat-8 0.43 (R^2).
4. La medición de la biomasa (NDVI) con imágenes Sentinel-2 generó un coeficiente de regresión de 0.97 (R^2) y con Landsat-8 0.93 (R^2).

RECOMENDACIONES

1. Si la estimación de humedad y estrés hídrico en la planta de caña de azúcar es calculada mejor utilizando los productos satelitales Sentinel-2 en comparación a Landsat-8, se recomienda utilizar imágenes satelitales con mejores características de resolución (imágenes Planet) para mejorar aún más la precisión de los productos satelitales obtenidos (índices de vegetación).
2. Realizar comparación de las resoluciones (temporal, espacial, radiométrica, espectral) de los productos satelitales Sentinel-2 y Landsat-8 a nivel de variedades de caña de azúcar, ya que por pertenecer a diferentes padres genotípicos existen diferencias fenotípicas que no son visibles al ojo humano, pero si afectan las estimaciones realizadas a través de sensores ópticos activos y pasivo.
3. Llevar a cabo estudios donde se utilicen los índices de vegetación obtenidos de productos satelitales para estimar la humedad del suelo y consolidar la relación “suelo-planta-agua” importante para la óptima producción del cultivo de caña de azúcar.
4. Hacer la estimación de humedad, estrés hídrico y biomasa por medio de índices de vegetación obtenidos de productos satelitales para todas las fincas sembradas con el cultivo de caña en la costa sur de Guatemala y generar un mapeo a nivel agroindustrial, útil para análisis globales y no individuales como se hacen en la actualidad.

REFERENCIAS

1. Agencia Espacial Europea [ESA]. (27 de febrero, 2020). *Copérnico: Sentinel-2. Copérnico: Sentinel-2 – La misión de imágenes ópticas para servicios terrestres*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-2>
2. Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission) Versión 1.0*. Colombia: Autor. Recuperado de <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
3. Asociación de Azucareros de Guatemala [ASAZGUA]. (27 de febrero, 2020). *Azúcar de Guatemala. El Azúcar de Guatemala en el mundo*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.azucar.com.gt/azucar-de-guatemala-en-el-mundo/>
4. Centro de Investigaciones Geoespaciales – CIG. (2002). *Introducción a las imágenes satelitales*. República Dominicana: CIG. Recuperado de https://nanopdf.com/downloadFile/introduccion-a-las-imagenessatelitales_pdf
5. de León, R. O., y Villatoro, B. R. (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. *Memoria Presentación de Resultados de*

Investigación 2016-2017, 344-360. Recuperado de <https://cengicana.org/files/20170927140015724.pdf>

6. Delegido, J., Pezzola, A., Casella, A., Winschel, C., Urrego, P., Jiménez-Muñoz, J., Sobrino, J., Soria, G., y Moreno, J. (2018). Estimación de la severidad del fuego en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina, utilizando Sentinel-2 y su comparación con Landsat-8. *Revista de Teledetección*, 0 (51), 47-60. doi: <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8934>
7. Dicovski, L. (2016). *Estadística Básica para Ingenieros*. Nicaragua: UNI Norte. Recuperado de https://www.academia.edu/30795212/Estad%C3%ADstica_B%C3%A1sica_para_Ingenieros
8. Donezar, U., Larrañaga, A., Tamés, A., Sánchez, C., Albizua, L., Ciriza, R., & del Barrio, F. (2017). Aplicabilidad de las imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 para la detección y delimitación de información de crisis en el ámbito de los servicios de Copernicus EMS. *Revista de Teledetección*, 0 (50), 49-57. doi: <https://doi.org/10.4995/raet.2017.8896>
9. Egea, V., Rodríguez, V., Sánchez, E., y García, M. (abril 2018). Predicción del rendimiento de trigo en Andalucía utilizando series de tiempo del Índice de Clorofila Terrestre (MTCI) de MERIS. *Revista de Teledetección*, 0, (51), 99-112. doi: <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8891>

10. Fuentes, R. (2017). *Modelo de estimación de la producción de caña de azúcar a través de imágenes de satélite en los ingenios La Unión y Santa Ana*. (Tesis de licenciatura). Universidad Rafael Landívar, Guatemala. Recuperado de <http://biblio3.url.edu.gt/publijrcifuentes/TESIS/2018/06/17/FuentesRodolfo.pdf>

11. García, C., Montero, D., Soto, M. y Valencia, J. (2017). Estimación de productividad en caña de azúcar desde la percepción remota. *Análisis Geográficos*, 53, 35-49. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/321973459_Estimacion_de_productividad_en_cana_de_azucar_desde_la_percepcion_remota

12. Instituto Geográfico Agustín Codazzi., Unión Europea, y Centro Internacional de Agricultura Tropical. (2007, 08 de marzo). [presentación de diapositivas]. DOCPLAYER. Recuperado de <https://docplayer.es/13303754-Mejora-de-los-sistemas-de-cartografia-del-territorio-colombiano.html>

13. Julien, Y., y Sobrino, J. (2018). TISSBERT: Un punto de referencia para la validación y comparación de métodos de reconstrucción de series de tiempo NDVI. *Revista de Teledetección*, 0 (51), 19-31. doi: <https://doi.org/10.4995/raet.2018.9749>

14. Labrador, M., Évora, J., y Arbelo, M. (2012). *Satélites de Teledetección para Gestión del Territorio*. España: Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias. Recuperado de http://www.pfcyl.es/sites/default/files/biblioteca/satelites_de_teledeteccion_para_la_gestion_del_territorio.pdf

15. Mehta, A. (2015, 19 al 22 de mayo). *Bienvenidos a la Capacitación NASA ARSET de Variabilidad Climática, Hidrología e Inundaciones*. [Presentación de diapositivas]. Recuperado de https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/disasters/Cartagena/Spain%20S1_P4_final.pdf
16. Nuñez, H., Steyerberg, E., y Nuñez, J. (2011). Estrategias para la elaboración de modelos estadísticos de regresión. *Revista Española de Cardiología*, 6(64), 501-507. Recuperado de <https://www.revespcardiol.org/es-estrategias-elaboracion-modelos-estadisticos-regresion-articulo-S0300893211003502?redirect=true>
17. Peña, M., y Ulloa, J. (2017). Mapeo de la recuperación de la vegetación quemada mediante la clasificación de índices espectrales pre- y post-incendio. *Revista de Teledetección*, 0(50), 37-48. doi: <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7931>
18. Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur - PROCISUR (2006). *Agricultura de Precisión: Integrando conocimiento para una agricultura moderna y sustentable*. Uruguay: Autor.
19. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación - SAGARPA (2018). *Ficha Técnica del cultivo de Caña de Azúcar*. México: Autor.
20. Shmoop. (27 de febrero, 2020). *Estadística básica y probabilidades Diagrama de dispersión y correlación*. [Mensaje en un blog].

Recuperado de <https://www.shmoop.com/estadistica-basica-probabilidades/diagrama-dispersion-correlacion.html>

21. Silva, M. (2014). *Aplicaciones de la teledetección en el análisis de daños en masas de coníferas en la provincia de Burgos – España*. (Tesis de maestría). Universidad de Valladolid, España. Recuperado de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/6649/TFM-L187.pdf?sequence=1>
22. Soluciones Satelitales Aplicadas [SCANTERRA]. (27 de febrero, 2020). *Líderes en la implementación de soluciones Geoespaciales aplicadas para el agro e industrias relacionadas*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://scanterra.com/>
23. Soporte de Minitab® 18. (27 de febrero, 2020). *Interpretar los resultados clave para Gráfica de dispersión*. [Mensaje en blog]. Recuperado de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/graphs/how-to/scatterplot/interpret-the-results/key-results/>
24. Spotfire Web Player. [TIBCO]. (27 de febrero, 2020). *Introducción y proceso estadístico mediante visualizaciones interactivas de TIBCO Spotfire Web Player*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de https://docs.tibco.com/pub/spotfire_web_player/6.5.0/doc/html/es_ES/GUID-2813F3F3-A2D5-4868-8B99-ABC358E5A41C.html
25. Villatoro, B. (2015). *Procesamiento de imágenes de satélite Landsat 8 para estimación de NDVI para análisis multitemporal en el cultivo de caña de azúcar*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://cengicana.org/files/20170102123350557.pdf>

26. Villatoro, B. (2016). *Agricultura de precisión en caña de azúcar*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://cengicana.org/files/2017092713573889.pdf>

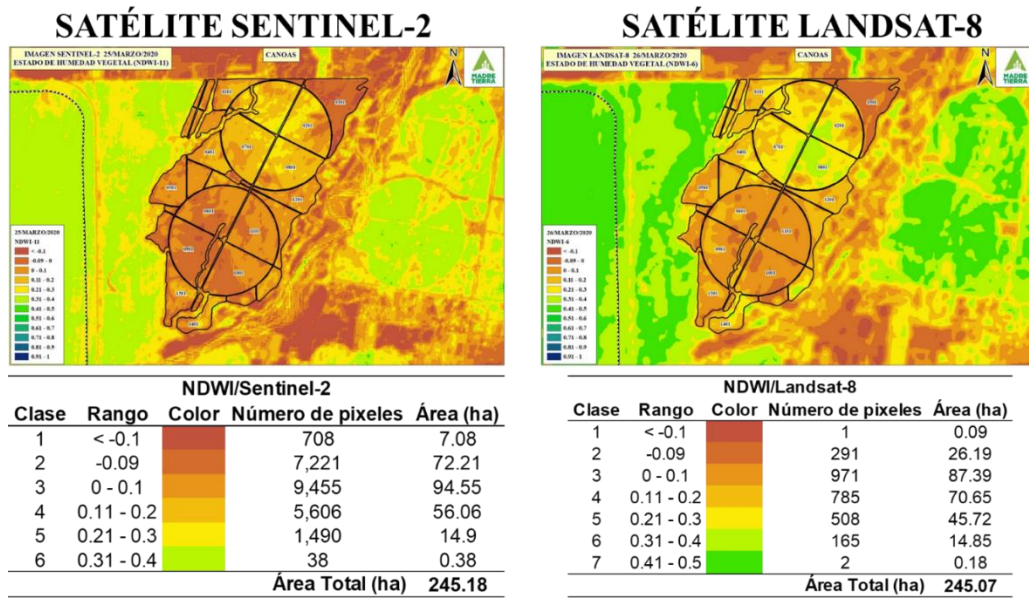
27. Villatoro, B., Cancino, M., Rodríguez, Á., Aguirre, I., y Saenz, L. (16 de junio de 2018). *Uso de imágenes satelitales en el cultivo de caña de azúcar en Guatemala*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://cengicana.org/files/20190930112936291.pdf>

28. Wooding, M. (2016, 25 de febrero). *Uso de datos de los Sentinel para aplicaciones agrícolas y mejoramiento de la producción de arroz en Colombia* [presentación de diapositivas]. Recuperado de <https://docplayer.es/67287350-Uso-de-datos-de-los-sentinel-para-aplicaciones-agricolas-y%20mejoramiento-de-la-produccion-de-arroz-en-colombia.html>

APÉNDICES

Apéndice 1. Índices de vegetación obtenidos de las imágenes Sentinel-2 y Landsat-8

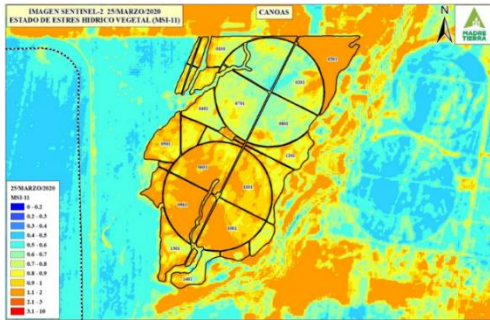
Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) y su clasificación



Continuación apéndice 1.

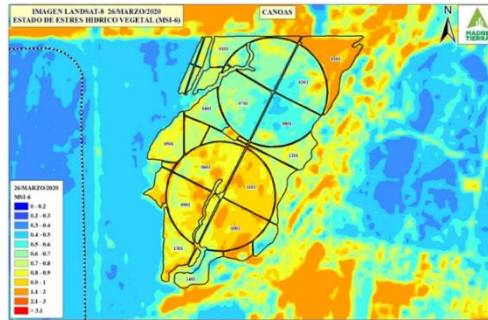
Índice de Estrés Hídrico (MSI) y su clasificación

SATÉLITE SENTINEL-2



MSI/Sentinel-2					
Clase	Rango	Color	Número de píxeles	Área (ha)	
4	0.4 - 0.5		8	0.08	
5	0.5 - 0.6		310	3.1	
6	0.6 - 0.7		2,306	23.06	
7	0.7 - 0.8		3,718	37.18	
8	0.8 - 0.9		4,656	46.56	
9	0.9 - 1		5,609	56.09	
10	1.1 - 2		7,911	79.11	
Área Total (ha)				245.18	

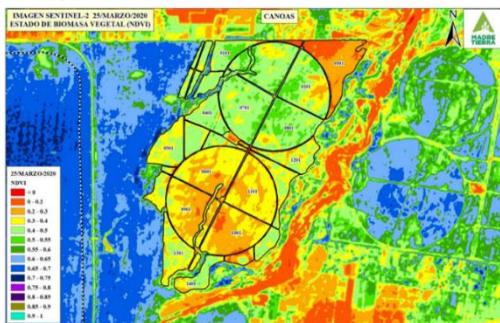
SATÉLITE LANDSAT-8



MSI/Landsat-8					
Clase	Rango	Color	Número de píxeles	Área (ha)	
4	0.4 - 0.5		57	5.13	
5	0.5 - 0.6		297	26.73	
6	0.6 - 0.7		508	45.72	
7	0.7 - 0.8		514	46.26	
8	0.8 - 0.9		530	47.70	
9	0.9 - 1		525	47.25	
10	1.1 - 2		292	26.28	
Área Total (ha)				245.07	

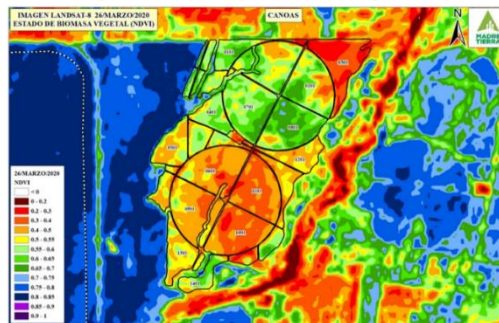
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y su clasificación

SATÉLITE SENTINEL-2



NDVI/Sentinel-2					
Clase	Rango	Color	Número de píxeles	Área (ha)	
2	0 - 0.2		918	9.18	
3	0.2 - 0.3		5,459	54.59	
4	0.3 - 0.4		8,004	80.04	
5	0.4 - 0.5		8,352	83.52	
6	0.5 - 0.55		1,667	16.67	
7	0.55 - 0.6		99	0.99	
8	0.6 - 0.65		16	0.16	
9	0.65 - 0.7		2	0.02	
10	0.7 - 0.75		1	0.01	
Área Total (ha)				245.18	

SATÉLITE LANDSAT-8



NDVI/Landsat-8					
Clase	Rango	Color	Número de píxeles	Área (ha)	
2	0 - 0.2		3	0.27	
3	0.2 - 0.3		132	11.88	
4	0.3 - 0.4		458	41.22	
5	0.4 - 0.5		714	64.26	
6	0.5 - 0.55		420	37.8	
7	0.55 - 0.6		428	38.52	
8	0.6 - 0.65		332	29.88	
9	0.65 - 0.7		201	18.09	
10	0.7 - 0.75		23	2.07	
11	0.75 - 0.8		10	0.9	
12	0.8 - 0.85		2	0.18	
Área Total (ha)				245.07	

Fuente: elaboración propia, utilizando ArcGIS.