

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



Correlación del índice de estrés hídrico con el contenido de humedad del suelo y desarrollo fenológico del maíz forrajero utilizando imágenes de satélite (Sentinel - 2)

Por:

Alan Torres Roaro

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Torreón, Coahuila, México
Abril 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Correlación del índice de estrés hídrico con el contenido de humedad del suelo y desarrollo fenológico del maíz forrajero utilizando imágenes de satélite (Sentinel - 2)

Por:

Alan Torres Roaro

TESIS

Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de:

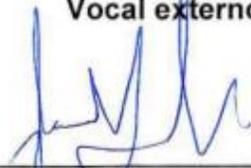
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobado por:


Dr. Ricardo Israel Ramirez Gottfried
Presidente


Dra. Nuria Aide López Hernández
Vocal externo


MC. José Guadalupe González Quirino
Vocal


MC. Armando Nahle Martínez
Vocal suplente


MC. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
Abril 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Correlación del índice de estrés hídrico con el contenido de humedad del suelo y desarrollo fenológico del maíz forrajero utilizando imágenes de satélite (Sentinel - 2)

Por:

Alan Torres Roaro

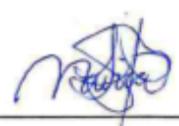
TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobado por el Comité de Asesoría:


Dr. Ricardo Israel Ramírez Gottfried
Asesor Principal


Dra. Nuria Aide López Hernández
Asesor externo


MC. José Guadalupe González Quiroz
Coasesor


MC. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
Abril 2025

AGRADECIMIENTOS

A Dios agradezco por ungir mi existencia con sus bendiciones, por trazar el curso de mi vida con su guía divina. Él, sostén inmutable, ha sido mi fiel acompañante en jornadas donde la soledad se cernía como sombra persistente. En Su gracia descubro mi esencia, desvelando quién soy y vislumbrando la estampa de quien anhelo ser.

Deseo expresar mi profundo agradecimiento a mi amada familia, fuente inagotable de apoyo incondicional, cuyas manos afectuosas han tejido el telar de mis sueños personales y académicos. Con su cálido respaldo, han sido los artífices que me han inspirado a emprender la búsqueda incesante de mis metas, sin claudicar ante las adversidades que la vida presenta. En su abrazo generoso he encontrado no solo aliento, sino también el sólido cimiento que sustenta mi existencia en todas sus dimensiones.

Deseo expresar mi profundo agradecimiento a mi amada, quien se erige como el faro primordial en el transitar de mi existencia hacia el éxito. Ella ha sido el ingrediente sublime que ha permitido alcanzar esta anhelada y noble victoria en la travesía de la vida. Culminar esta tesis con triunfo no solo constituye un logro académico, sino también la dicha de experimentar el privilegio de ser colmado, agradecido por la presencia constante de esa alma generosa que veló por mi bienestar en cada momento, siempre anhelando el mejor destino para mi porvenir.

A mis asesores, quiero expresar mi sincero agradecimiento por su orientación y apoyo constante durante la elaboración de mi tesis. Su dedicación y conocimientos fueron fundamentales para el éxito de este proyecto. Aprecio profundamente su mentoría excepcional y su capacidad para inspirarme a alcanzar estándares más altos. Gracias por ser parte esencial de mi éxito académico.

Expreso mi profundo agradecimiento a mis compañeros, quienes han trascendido la camaradería para convertirse en amigos, cómplices y hermanos de

esta travesía llamada vida. Agradezco por las horas que compartimos, los trabajos que juntos realizamos y las historias que tejimos con hilo invisible en el vasto tapiz del tiempo.

Asimismo, deseo expresar mi profundo agradecimiento a la venerable institución académica que, con su exigencia inquebrantable, me ha guiado por el intrincado camino del saber, otorgándome la preciada joya de un título anhelado. Reconozco y valoro la labor de cada directivo, cuya dedicación y astucia han erigido los cimientos y creado las circunstancias propicias para la adquisición de sabiduría.

Finalmente, deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por su invaluable apoyo como fuente financiera de este proyecto de tesis. Su respaldo ha sido crucial en cada etapa del proceso, agradezco profundamente su confianza y apoyo continuo, los cuales han sido esenciales en esta travesía académica.

DEDICATORIAS

Con fervor y gratitud, consagro este trabajo investigativo al **Gran Arquitecto del Universo**, fuente de inspiración que sostiene mi camino hacia la realización de mis más fervientes anhelos.

A mis padres, **Martin Torres Hernandez e Imelda Roaro Merino**, les tributo mi más profundo reconocimiento por su amor inquebrantable, labor incansable y sacrificio a lo largo de los años. Gracias a su guía, hemos alcanzado este punto y nos hemos forjado en lo que somos. Es un honor y un privilegio ser sus hijos, pues en ustedes encontramos los más nobles ejemplos de paternidad.

A mis hermanos, el **Lic. César Torres Roaro** y la **Ing. Karen Torres Roaro**, les agradezco su constante respaldo, su presencia incondicional y el aliento moral que me han brindado en esta travesía de la vida.

A mi amada, **Fabiola Reséndiz Perales**, cuya presencia colma mi existencia de dicha y propósito. Agradezco su infinita paciencia, su compañía inquebrantable y el amor que día a día me impulsa a alcanzar mis metas.

A mis cuñados, la **Ing. Janeth A. Sánchez Morales** y el **Ing. Jesús Iván Ramos Hernandez**, les reconozco su altruismo y generosidad, así como su invaluable ayuda y disposición.

A todas aquellas personas que han brindado su apoyo y han contribuido al éxito de este trabajo, especialmente a aquellos que nos han brindado su sabiduría y han abierto las puertas hacia el conocimiento compartido, les expreso mi más sincero agradecimiento.

RESUMEN

El maíz forrajero, fundamental para la ganadería en México, ha experimentado un crecimiento significativo en producción a pesar de enfrentar desafíos como el estrés hídrico. Este estudio se enfoca en la región de la Comarca Lagunera, conocida por su agricultura intensiva en un entorno naturalmente árido, utilizando la teledetección agrícola como herramienta crucial para monitorear y comprender estos desafíos.

Se emplearon imágenes satelitales del satélite Sentinel-2 para analizar la correlación entre el contenido de humedad del suelo y el Índice de Estrés Hídrico (MSI) en el cultivo de maíz. Se generó un mapa del área de interés para identificar zonas con altos y bajos niveles de MSI, indicativos de estrés en las plantas.

El estudio se realizó en una superficie delimitada, evaluando parámetros como altura, diámetro del tallo, número de hojas, temperatura de hojas y suelo, y niveles de clorofila. Se aplicaron pruebas estadísticas como regresión lineal y coeficientes de correlación para analizar la relación entre niveles de MSI y parámetros evaluados.

Los resultados revelaron una correlación baja entre MSI y contenido de humedad del suelo, mejorada con un modelo polinómico de segundo orden. Se observaron relaciones entre MSI y variables fisiológicas como número de hojas, grosor del tallo y temperatura del suelo. Aunque la concentración de clorofila no mostró correlación directa, un modelo polinómico de tercer orden permitió estimarla en condiciones de bajo MSI.

Este estudio destaca la importancia de considerar diversos factores para comprender y predecir con precisión el rendimiento de los cultivos en entornos con estrés ambiental, contribuyendo al desarrollo de estrategias agrícolas más efectivas.

Palabras clave: Índice de Estrés Hídrico (MSI), Teledetección, Maíz forrajero

ABSTRACT

Forage maize, fundamental for livestock farming in Mexico, has experienced significant growth in production despite facing challenges such as water stress. This study focuses on the Comarca Lagunera region, known for its intensive agriculture in a naturally arid environment, using agricultural remote sensing as a crucial tool to monitor and understand these challenges.

Satellite images from the Sentinel-2 satellite were used to analyze the correlation between soil moisture content and the Water Stress Index (MSI) in the maize crop. A map of the area of interest was generated to identify zones with high and low MSI levels, indicative of plant stress.

The study was conducted in a delimited area, evaluating parameters such as height, stem diameter, number of leaves, leaf and soil temperature, and chlorophyll levels. Statistical tests such as linear regression and correlation coefficients were applied to analyze the relationship between MSI levels and evaluated parameters.

The results revealed a low correlation between MSI and soil moisture content, improved with a second order polynomial model. Relationships were observed between MSI and physiological variables such as leaf number, stem thickness and soil temperature. Although chlorophyll concentration did not show direct correlation, a third-order polynomial model allowed estimating it under low MSI conditions.

This study highlights the importance of considering diverse factors to understand and accurately predict crop performance in environmentally stressed environments, contributing to the development of more effective agricultural strategies.

Key words: Moisture Stress Index (MSI), Remote sensing, Forage corn

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIAS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INDICE GENERAL	vi
INDICE DE TABLAS.....	ix
INDICE DE FIGURAS	xi
I. Hipótesis	2
II. Objetivos	2
3.1 Objetivo general	2
3.2 Objetivos específicos	2
III. Justificación	3
IV. Revisión de literatura.....	4
5.1 Origen y distribución del maíz	4
5.2 Clasificación botánica y morfología	4
5.2.1 Clasificación Botánica.....	5
5.2.2 Descripción Botánica	5
5.2.3 Fenología.....	6
5.3 Importancia del maíz forrajero.....	8
5.4 Importancia del agua en el crecimiento y desarrollo vegetal	9
5.5 Estrés Hídrico.....	10
5.5.1 Efectos del Estrés Hídrico en el Desarrollo y Rendimiento del Maíz	11
5.5.2 Mecanismos de tolerancia al estrés hídrico	13
5.6 Determinación del estrés hídrico basados en planta.....	14
5.6.1 Potencial Hídrico (Ψ)	14

5.6.2	Conductancia estomática.....	15
5.7	Teledetección.....	16
5.7.1	Definición.....	16
5.7.2	Ventajas de la observación espacial	19
5.7.3	Desarrollo actual	19
5.7.4	Resolución.....	20
5.7.5	Bandas	20
5.7.5.5	MSI (Moisture Stress Index)	21
5.7.6	Satélite Sentinel-2	22
V.	Materiales y métodos	23
6.1	Tipo de investigación.....	23
6.2	Ubicación y descripción del sitio de la investigación	24
6.3	Metodología	25
6.3.1	Obtención de imágenes satelitales	25
6.3.2	Procesamiento de imágenes	26
6.3.3	Medición de variables fenológicas	27
6.3.4	Medición de variables fisiológicas.....	28
6.3.5	Obtención de la humedad de suelo	29
6.3.6	Análisis estadístico	30
VI.	Resultados y Discusión	33
7.1	Contenido de humedad en el suelo.....	33
7.2	Número de hojas	38
7.3	Grosor del tallo	40
7.4	Altura de planta	43
7.7	Temperatura de la planta	46

7.5 SPAD (Clorofila)	49
7.6 Temperatura del suelo	53
VII. Conclusiones	58
VIII. Bibliografía.....	59

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de instrumentos de teledetección pasiva	17
Tabla 2 Tipos de instrumentos de teledetección pasiva	18
Tabla 3 Instrumentos del satélite Sentinel-2.....	23
Tabla 4 Fechas en las que tomaron las imágenes del satélite Sentinel-2.....	26
Tabla 5 Coeficientes de correlación de las medias muestrales del contenido de humedad en el suelo en Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).	35
Tabla 6 medias muestrales del número de hojas, la altura de la planta y el contenido de humedad en el suelo para el Tratamiento 1 (MSI alto) y el Tratamiento 2 (MSI bajo).....	36
Tabla 7 Coeficientes de correlación de las medias muestrales del número de hojas en Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).....	39
Tabla 8 Medias muestrales del número de hojas, la altura de la planta y el contenido de humedad del suelo del Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo)	40
Tabla 9 Coeficientes de correlación de las medias muestrales del grosor de tallo en Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).....	42
Tabla 10 Tabla de medias muestrales del grosor del tallo, y el número de hojas para el Tratamiento 1 (MSI alto) y el Tratamiento 2 (MSI bajo).....	43
Tabla 11 Coeficientes de correlación de las medias muestrales de la altura de planta en Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).....	45
Tabla 12 Medias muestrales de la altura de la planta, el contenido de humedad en el suelo (H) para el Tratamiento 1 (MSI alto) y el Tratamiento 2 (MSI bajo).....	46
Tabla 13 Coeficientes de correlación de las medias muestrales de la altura de planta en Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).....	48
Tabla 14 Medias muestrales de la temperatura de la planta, la temperatura del suelo y el contenido de humedad en el suelo para el Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).....	49
Tabla 15 Medias muestrales del contenido relativo de clorofila en unidades SPAD, la temperatura del suelo y MSI para Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).	51

Tabla 16 Coeficientes de correlación de las medias muestrales de la clorofila (unidades SPAD) de Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).	51
Tabla 17 Coeficientes de correlación de las medias muestrales de la temperatura del suelo de Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).	54
Tabla 18 Medias muestrales de la temperatura del suelo (TS), el contenido de humedad en el suelo y MSI, en Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo)	55

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de micro localización del predio P.P. Palestina, del municipio de Francisco I. Madero, Coahuila de Zaragoza, México.	25
Figura 2. Imagen procesada con Qgis del Satélite Sentinel-2.....	27
Figura 3. Medición de plantas	28
Figura 4. Medición de clorofila con el SPAD 502 Plus (Konica Minolta Sensing Inc., Kosmos, México).....	28
Figura 5. Muestreo de humedad con barrena tipo T de 61 cm de longitud, con un tubo de muestreo de 30 cm.....	29
Figura 6 Gráfica de comparación de medias muestrales del contenido de humedad en el suelo mediante el método T de Student.	37
Figura 7(A) Grafica de dispersión de MSI alto con tendencia lineal. (B) Modelo ajustado de MSI alto con línea de tendencia polinómica de segundo grado. (C) Grafica de dispersión de MSI bajo con tendencia lineal. (D) Modelo ajustado de MSI bajo con línea de tendencia polinómica de segundo grado.	37
Figura 8 (A) Grafica de dispersión de MSI alto con tendencia lineal. (B) Modelo ajustado para alto MSI con línea de tendencia polinómica de segundo grado. (C) Grafica de dispersión de MSI bajo con tendencia lineal. (D) Modelo ajustado para alto MSI con línea de tendencia polinómica de segundo grado.	41
Figura 9 (A) Grafica de dispersión de MSI alto y altura de planta con línea de tendencia lineal. (B) Modelo ajustado de MSI alto con línea de tendencia polinómica de tercer grado. (C) Grafica de dispersión de MSI bajo y altura de planta con línea de tendencia lineal. (D) Modelo ajustado de MSI bajo con línea de tendencia polinómica de tercer grado.....	44
Figura 10 Grafica de dispersión de MSI alto con línea de tendencia lineal. (B) Modelo ajustado de MSI alto con línea de tendencia polinómica de tercer grado. (C) Grafica de dispersión de MSI bajo con línea de tendencia lineal. (D) Modelo ajustado de MSI bajo con línea de tendencia polinómica de tercer grado.	47
Figura 11 (A) Grafica de correlación lineal de MSI alto y niveles de clorofila unidades de SPAD 502 Plus (Konica Minolta Sensing Inc., Kosmos, México). (B) Modelo ajustado de MSI alto con línea de tendencia polinómica de tercer grado.	

(C) Grafica de correlación lineal de MSI bajo y niveles de clorofila unidades de SPAD 502 Plus (Konica Minolta Sensing Inc., Kosmos, México). (D) Modelo ajustado de MSI bajo con línea de tendencia polinómica de tercer grado.	50
Figura 12 Gráfica de comparación de las medias muestrales del contenido de clorofila en unidades SPAD de las plantas de maíz utilizando el método de la prueba T de Student. Donde: T1 corresponde al Tratamiento 1, con un índice de MSI alto; mientras que T2 se refiere al Tratamiento 2, con un índice de MSI bajo.	53
Figura 13 (A) Grafica de correlación lineal de MSI alto y la temperatura del suelo. (B) Modelo ajustado de MSI alto con línea de tendencia potencial. (C) Grafica de correlación lineal de MSI bajo y la temperatura del suelo. (D) Modelo ajustado de MSI bajo con línea de tendencia polinómica de tercer grado.	56
Figura 14 La gráfica compara las medias muestrales de la temperatura del suelo utilizando la prueba T de Student. T1 se asocia al Tratamiento 1, con un índice de MSI elevado, mientras que T2 se relaciona con el Tratamiento 2, que tiene un índice de MSI más bajo.	57

Introducción

El maíz forrajero es una variedad de maíz utilizada como forraje para el ganado, particularmente para las vacas lecheras y los animales de tiro. En México, es una de las principales fuentes de energía y nutrientes para el ganado, y su producción ha aumentado significativamente en los últimos años. En el año 2020, la producción de maíz forrajero en México alcanzó las 16,768,431 toneladas, lo que representó un aumento del 7.7% en comparación con el año anterior. Esta cifra fue resultado de la cosecha de 586,113 hectáreas, reflejando un incremento del 15.4% respecto al periodo anterior. Sin embargo, el rendimiento promedio nacional se situó en 28.6 toneladas por hectárea, mostrando una disminución del 6.6% (Axayacatl, 2023).

El estrés hídrico es un fenómeno frecuente en el cultivo del maíz, y puede tener un impacto considerable en la producción y calidad del grano. La sequía o la falta de agua en el suelo son causas comunes de este tipo de estrés en las plantas de maíz. Esto, a su vez, puede disminuir la capacidad de crecimiento del grano durante su etapa de llenado (Villalobos González et al., 2016)

La teledetección en la agricultura desempeña un papel crucial al proporcionar información detallada sobre los cultivos mediante el uso de sensores remotos. Esta tecnología nos brinda datos biofísicos que describen las diversas características de los sistemas agrícolas, tales como aspectos morfológicos, fisiológicos y fenológicos. Esto permite un monitoreo efectivo de la variabilidad de los cultivos tanto en el espacio como en el tiempo (Bribiesca Aguilar, 2021).

La gestión eficaz de los recursos hídricos y la agricultura sostenible son pilares fundamentales en la seguridad alimentaria global. En este contexto, la correlación entre el Índice de Estrés Hídrico, el contenido de humedad del suelo y el desarrollo fenológico del maíz forrajero emerge como un área de estudio crucial. La utilización de imágenes satelitales de Sentinel-2 ofrece una perspectiva para comprender estas interrelaciones a escala regional y global. En esta investigación,

se exploraron herramientas tecnológicas que permiten una evaluación integral y dinámica de la salud vegetal y el estado hídrico del suelo, que ofrecen una base sólida para la toma de decisiones en la gestión agrícola y la mitigación de los impactos del cambio climático.

I.Hipótesis

Existe una relación entre el Índice de Estrés Hídrico (MSI) y el contenido de humedad del suelo que influyen directamente en la salud fisiológica y el desarrollo de las plantas de maíz.

II.Objetivos

3.1 Objetivo general

Determinar la relación entre el MSI y el contenido de humedad del suelo, y su influencia en la salud fisiológica y el desarrollo de las plantas de maíz en la región semiárida de la Comarca Lagunera.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar el valor del MSI a partir de imágenes del satélite Sentinel-2 del sitio de estudio e identificar las áreas correspondientes a los valores máximos y mínimos del índice para evaluar el nivel de estrés hídrico en las plantas de maíz.
- Determinar el contenido de humedad presente en el suelo en las áreas donde se identificó el MSI, tanto en sitios caracterizados con estrés como en aquellos sin estrés para confirmar si el índice refleja las condiciones de humedad del suelo.

- Identificar si existe correlación entre el valor del MSI y el contenido de humedad del suelo para determinar si los valores del MSI pueden ser utilizados como un predictor confiable de las condiciones de humedad del suelo en el área de estudio.
- Analizar la relación entre el valor del MSI y el estado fisiológico y el desarrollo fenológico de las plantas de maíz forrajero, con el fin de determinar si el MSI puede ser utilizado como una herramienta para evaluar dichos parámetros en estas plantas.

III. Justificación

El maíz desempeña un papel fundamental en la agricultura y la cadena alimentaria. En la Comarca Lagunera, el maíz forrajero es esencial para la industria de alimentos balanceados para el ganado, por lo que, es imprescindible comprender los factores que pueden afectar la producción del cultivo, especialmente ahora que la variabilidad climática afecta la disponibilidad de los recursos hídricos en la región.

El agua desempeña un papel crucial en el crecimiento y desarrollo de las plantas. La relación entre la disponibilidad de agua y la producción de biomasa es directa, afectando la calidad y cantidad del maíz forrajero.

El estrés hídrico por déficit o exceso de agua representa un peligro para la salud y el desarrollo de las plantas, lo cual tiene implicaciones directas en la producción agrícola. Detectar el estrés hídrico es esencial para adaptarse y mitigar los efectos del cambio climático en la agricultura, mediante una aplicación oportuna del riego. Una manera de detectar el estrés hídrico es a partir de índices de vegetación determinados con imágenes satelitales.

La importancia de esta investigación radica en hallar una relación entre el índice de Estrés Hídrico (Moisture Stress Index, MSI) y el contenido de humedad

del suelo en el cultivo de maíz forrajero en la región semiárida de la Comarca Lagunera, para optimizar el uso del agua del riego bajo condiciones de cambio climático.

Los resultados de esta investigación podrían proporcionar información valiosa para la toma de decisiones y la gestión sostenible de los recursos hídricos en la Comarca Lagunera y regiones con condiciones climáticas similares.

IV.Revisión de literatura

5.1 Origen y distribución del maíz

El maíz, palabra de origen indio caribeño, significa literalmente “lo que sustenta la vida” (FAO, 1993), denominado científicamente como *Zea mays*, constituye el único cereal endémico del hemisferio occidental. Este organismo pertenece a la familia *Poaceae* o *Gramineae* y figura como uno de los granos comestibles más ancestrales registrados. Se trata de una planta domesticada de alta productividad que no prospera de manera silvestre, dependiendo en su totalidad de la intervención humana para su desarrollo (ASERCA, 2018a).

Su origen se encuentra en México, desde donde se propagó hacia el norte hasta alcanzar Canadá y hacia el sur hasta llegar a Argentina. Tras el descubrimiento de América, se produjo una importante difusión del maíz hacia continentes como Europa, Asia y África. A nivel global, el maíz constituye aproximadamente el 5,4% de la ingesta total de alimentos por parte de la población humana (Gonzalez Alquinzones, 1995).

5.2 Clasificación botánica y morfología

Según el consenso de 2003 de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2003), se clasificó el maíz de la siguiente manera:

5.2.1 Clasificación Botánica

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Subclase: Commelinidae

Orden: Poales

Familia: Gramineas.

Género: Zea

Especie: mays

Nombre Científico: Zea mays L.

5.2.2 Descripción Botánica

La planta de maíz es de porte robusto de fácil desarrollo de producción anual.

5.2.2.1 Tallo

El tallo es simple recto, de longitud elevada, es robusto y sin ramificaciones. La parte inferior y subterránea tiene entrenudos muy cortos de los que slane las raíces principales y los brotes laterales. Los entrenudos superiores y cilíndricos, la epidermis está formada de paredes gruesas y haces vasculares cuya función principal es la conducción de agua y sustancias nutritivas del suelo o elaboradas en las hojas.

5.2.2.2 Inflorescencia

El maíz presenta ambos sexos en sí misma, es decir, es monoica. Muestra su inflorescencia masculina en forma de panícula (vulgarmente conocida como espiga) de coloración amarilla que posee una cantidad muy elevada de polen (20 a 25 millones de granos de polen). En cada florecilla que compone la panícula se presentan tres estambres donde se desarrolla el polen. Por otro lado, la inflorescencia femenina, la futura mazorca, marca un menor contenido de granos de polen (alrededor de 800 a 1000 granos) y se forman en unas estructuras vegetativas denominadas espádices que se disponen de forma lateral.

5.2.2.3 Hojas

Constituida de vaina, cuello y lámina. La vaina es una estructura cilíndrica, abierta hasta la base, que sale de la parte superior del nudo. El cuello es la zona de transición entre la vaina envolvente y la lámina abierta. La lámina es una banda angosta y delgada de hasta 1.5 m de largo por 10 cm. de ancho, que termina en un ápice muy agudo. El nervio central está bien desarrollado, es prominente en el envés de la hoja y cóncavo en el lado superior.

5.2.2.4 Raíces

Son fasciculadas y su misión es aportar un perfecto anclaje a la planta, además de aportar alimento a la planta.

5.2.3 Fenología

Etapas vegetativas

Germinación y emergencia (etapa VE): Los coleóptilos alcanzan y atraviesan la superficie del suelo. Después de la siembra, la semilla de maíz absorbe agua y nutrientes del suelo (aproximadamente del 30 al 35 por ciento de su peso en agua). Las temperaturas del suelo influyen en la germinación, siendo óptimas alrededor de 10 °C. Las raíces primarias y adicionales emergen para formar el sistema radicular. La planta muestra una emergencia hipogea, con el cotiledón bajo tierra. La luz solar afecta el crecimiento del coleóptilo y la posición de la raíz principal. El crecimiento del sistema radicular semilla disminuye en la etapa V3. Las hojas emergen progresivamente, siendo la primera hoja verdadera la V1 o VC.

Crecimiento vegetativo (etapas, V1, V2, V3... Vn): Son etapas marcadas por el número de hojas desplegadas. Durante las etapas vegetativas tempranas (V1 a V5), el crecimiento del tallo es mínimo y depende de la temperatura del suelo. Antes de la etapa V5, el punto de crecimiento está bajo tierra, donde se inician los brotes de mazorca y hojas. En las etapas vegetativas intermedias (V6 a V11), las plantas de maíz

experimentan una rápida elongación del nodo interno, lo que las hace vulnerables a daños ambientales o mecánicos, la cantidad de hileras está influenciada por factores genéticos y ambientales, y el estrés durante estas etapas puede reducir la producción de hileras de granos.

Aparición de panojas (etapa VT): La última rama de la panícula es completamente visible, aunque los estigmas aún no han surgido. La floración de la VT coincide con la R1, cuando los estigmas son visibles antes de que la panoja haya emergido por completo.

Etapas reproductivas

Aparición de estigmas (etapa R1): Después de que un grano de polen cae en un estigma (ocurriendo la polinización), se desarrolla un tubo polínico que tarda alrededor de 24 horas en crecer hacia abajo hasta llegar al óvulo. Una vez que el tubo polínico alcanza el óvulo, se lleva a cabo la fertilización y este último se transforma en un grano. Durante esta etapa, los granos están casi completamente cubiertos por glumas (sépalos) y tienen un color blanco con un contenido claro y acuoso.

Etapa de "blíster" (etapa R2): Ocurre de 10 a 14 días después de la aparición de los estigmas. Durante esta etapa, los granos en desarrollo tienen alrededor del 85% de humedad y se asemejan a un blíster, con endospermo y fluido interno claros.

Etapa de grano lechoso (R3): Ocurre entre 18 y 22 días después de la aparición de los estigmas, se caracteriza por el inicio del cambio de color de los granos hacia amarillo. Los granos tienen alrededor del 80% de humedad y un líquido interior blanco lechoso debido al almidón acumulado.

Grano pastoso (R4): El proceso ocurre entre 24 y 28 días después de que los estigmas aparecen. En este momento, los granos tienen

aproximadamente un 70 por ciento de humedad, y el líquido interior se espesa, adquiriendo una consistencia pastosa similar a la masa. Durante este periodo, los granos alcanzan su color final y alrededor de la mitad de su peso seco maduro.

Grano dentado (R5): Ocurre entre 35 y 42 días después de que los estigmas aparecen, lo cual representa casi la mitad del tiempo de desarrollo reproductivo. Los granos están compuestos por una capa externa de almidón duro que rodea un núcleo suave de almidón. A medida que este núcleo suave de almidón pierde humedad y se reduce, se forma una hendidura en la parte superior del grano. Se forma una línea "lechosa" que separa el almidón duro del almidón suave. Este proceso se lleva a cabo en la corona del grano y avanza hacia la base o la punta, lo cual suele tardar entre tres y cuatro semanas.

Madurez fisiológica (R6): se refiere a la madurez fisiológica del cultivo. Durante esta etapa, la planta de maíz alcanza su máxima acumulación de materia seca y los granos están fisiológicamente maduros. En este punto, los granos han alcanzado su peso máximo y el contenido de humedad comienza a disminuir.

5.3 Importancia del maíz forrajero

El maíz es una planta de tipo C4, lo que le confiere una destacada eficiencia en la captura y transformación de energía solar en carbohidratos. Esto se traduce en que posee el mayor potencial entre las plantas para la producción de carbohidratos por unidad de superficie por día, convirtiéndola en una opción altamente productiva para la obtención de biomasa vegetal (Simón y Golik, 2018).

La producción de maíz se divide en dos categorías distintas: maíz blanco, que está destinado para el consumo humano, y maíz amarillo, que se enfoca en abastecer a la industria y se utiliza en la fabricación de alimentos balanceados para

el ganado. Esta segmentación es esencial para satisfacer las diversas demandas y aplicaciones de este cultivo fundamental en la agricultura y la cadena de suministro alimentaria (ASERCA, 2018b).

Es un cereal esencial junto al trigo y el arroz, constituye una fuente fundamental de nutrientes para humanos y animales. Además, desempeña un papel central como materia prima en la fabricación de almidón, aceite, proteínas, bebidas alcohólicas, edulcorantes y, más recientemente, combustibles en la industria. Sus diversas partes, que incluyen la planta tierna, hojas secas y flores, se utilizan como forraje de alta calidad en la ganadería de pequeños agricultores en naciones en desarrollo (FAO, 1993).

Esta especie se destaca como una de las principales en la Comarca Lagunera. En el ciclo agrícola del año 2022, se cultivaron 20,300 hectáreas, logrando una impresionante producción de 934,492.11 toneladas y un rendimiento notable de 45.98 unidades por hectárea. Estos números subrayan su relevancia en la región, consolidándola como una especie de gran importancia económica y agrícola en la Comarca Lagunera durante el mencionado periodo agrícola (SIAP, 2023).

5.4 Importancia del agua en el crecimiento y desarrollo vegetal

El agua es esencial para la vida, y a pesar de ser abundante en la Tierra, su disponibilidad limita la productividad vegetal. Constituye la mayoría del peso fresco en plantas, con raíces que varían del 71 al 93%, tallos del 48 al 94%, hojas del 77 al 98%, frutos con un contenido alto entre 84 y 94%, y semillas con un contenido mínimo de 5 al 11%, aunque las de maíz tierno comestible pueden tener hasta un 85% de contenido de agua (Pérez Leal, 2017).

Sellés y Ferreyra, (2008) destacan que el agua desempeña diversas funciones vitales, siendo el componente principal de los tejidos vegetales, facilitando el transporte de nutrientes, actuando como reactivo en procesos bioquímicos,

proporcionando la fuerza mecánica que impulsa el crecimiento celular y tisular, y desempeñando un papel crucial en el control térmico.

La producción de nueva biomasa en cualquier cultivo o comunidad vegetal está fuertemente determinada por la cantidad de agua disponible en el suelo. Resulta evidente cuando se cuantifica la producción anual (cosecha o biomasa acumulada en kg/ha) y el agua utilizada (en m³/ha). La razón está en que el proceso base de la producción de nueva biomasa (la fotosíntesis) y el del gasto de agua (transpiración) se producen simultáneamente, y la entrada de dióxido de carbono y la salida de agua utilizan la misma vía, los estomas en las hojas. Cuanto más abiertos están, más fácilmente entra el CO₂, pero también más rápidamente se escapa el agua (Medrano et al., 2007).

5.5 Estrés Hídrico

Las plantas están expuestas a diversas circunstancias adversas que perturban su funcionamiento, generando estrés. Munns y Tester, (2008) mencionan que el estrés hídrico en las plantas ocurre cuando hay una escasez de agua en el ambiente, lo que provoca que la tasa de transpiración exceda la absorción de agua por las raíces. Este estrés resulta de la alteración fisiológica de factores que rompen el equilibrio, como la sequía, la salinidad y las variaciones extremas de temperatura (Abdul Jaleel y Manivannam, 2009).

Dada la significativa relevancia del agua en el desarrollo de las plantas, es posible afirmar que un suministro insuficiente o excesivo de agua puede desencadenar condiciones desfavorables o situaciones estresantes para ellas, (Moreno, 2009). El estrés hídrico puede originarse por dos condiciones: escasez o saturación de agua. El Estrés Hídrico por Déficit de Agua (EHDA) se produce cuando hay escasez, mientras que el Estrés Hídrico por Exceso de Agua (EHEA) ocurre en situaciones de saturación (Luna-Flores et al., 2015).

Cuando la escasez de agua se desarrolla gradualmente, las plantas pueden mostrar adaptaciones que afectan su crecimiento, como la reducción en la expansión de las hojas y el incremento en el desarrollo de las raíces (Potters et al., 2007; Shao et al., 2008). Otra estrategia de defensa a nivel fisiológico es el cierre de los estomas, que son las estructuras responsables de la mayor parte de la pérdida de agua en las plantas (Lázar, 2003).

La magnitud y la duración del estrés hídrico representan factores cruciales que ejercen una influencia significativa en los resultados y la capacidad de las plantas para afrontar este desafío (Engelbrecht y Kursar, 2003). El fenómeno causa efectos adversos significativos en el crecimiento y salud de las plantas. Esto se manifiesta en una menor altura, tallos más cortos, un sistema de raíces subdesarrollado, menos hojas, menor peso foliar específico y una disminución en la biomasa (Singh y Singh, 2006).

5.5.1 Efectos del Estrés Hídrico en el Desarrollo y Rendimiento del Maíz

El estrés hídrico afecta el crecimiento del maíz de diversas maneras, dependiendo del momento en que se produce. La disponibilidad hídrica es crucial para el desarrollo del maíz, y la falta de agua puede provocar reducciones significativas en el rendimiento. Por ejemplo, el estrés hídrico durante el periodo crítico de floración o el llenado de grano puede ocasionar pérdidas de rendimiento de hasta un 50% del potencial (Giménez, 2012).

El maíz es menos sensible en los primeros estadios, por lo que un estrés en la floración o al inicio del llenado del grano impacta mucho más que un estrés en las primeras etapas fenológicas, en los que la demanda de agua es inferior (Tribó, 2018). El estrés hídrico también puede afectar la actividad fotosintética, el crecimiento y la elongación celular, la expansión foliar y la translocación de asimilados en el maíz (Villalobos González et al., 2016).

El estrés hídrico puede afectar significativamente el desarrollo y el rendimiento del maíz. El alcance de la reducción del rendimiento depende de la intensidad, duración y momento del estrés. El estrés hídrico durante las diferentes etapas de desarrollo del maíz puede reducir el rendimiento final del grano en diferentes grados (Çakir, 2004).

El rendimiento del maíz es más sensible al estrés hídrico durante las etapas de floración y polinización, seguidas por las etapas de llenado del grano y finalmente de crecimiento vegetativo. El estrés hídrico durante el desarrollo vegetativo reduce la expansión de las células del tallo y las hojas, lo que resulta en una altura reducida de la planta y una menor área foliar (Lauer, 2018).

El estrés por sequía después de la polinización y fertilización puede provocar granos abortados o un llenado deficiente del grano, lo que provoca un peso específico bajo y un rendimiento reducido (Thelen, 2007). El estrés por sequía durante el período vegetativo puede provocar una reducción de la tasa de crecimiento, prolongar la etapa de crecimiento vegetativo, redirigir las raíces y alterar la distribución de carbohidratos en el maíz (Wang et al., 2019).

Los síntomas del estrés hídrico en las plantas de maíz incluyen enrollamiento de las hojas, reducción del alargamiento de las hojas y altura de la planta, así como un sistema de raíces más pequeño. Las plantas pueden parecer menos verdes debido a la producción de clorofila afectada y la eficiencia general del crecimiento puede reducirse, lo que lleva a una posible disminución del rendimiento. El estrés hídrico durante las diferentes etapas de desarrollo, como la floración y la polinización, puede provocar un retraso en la formación de estigmas, una reducción del alargamiento de la seda y una inhibición del desarrollo embrionario, lo que en última instancia afecta el rendimiento del grano. El estrés por sequía después de la polinización y fertilización puede provocar granos abortados o un llenado deficiente del grano, lo que provoca un peso específico bajo y un rendimiento reducido (Ciampitti, 2016; Nielsen, 2020; Thelen, 2007).

5.5.2 Mecanismos de tolerancia al estrés hídrico

El estrés hídrico afecta al crecimiento del maíz de diversas maneras, dependiendo del momento en que se produce. La disponibilidad hídrica es crucial para el desarrollo del maíz, y la falta de agua puede provocar reducciones significativas en el rendimiento (Florido Bacallao y Bao Fundadora, 2014).

Los mecanismos de tolerancia al estrés hídrico en las plantas incluyen una serie de respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares que les permiten sobrevivir en condiciones de déficit hídrico. Estas respuestas incluyen la acumulación de solutos compatibles, el cierre de estomas, la síntesis de proteínas protectoras y enzimas antioxidantes, y cambios en la expresión génica, entre otros (Lázar, 2003).

Carrasco Sánchez, (2017) en su estudio, destaca varios mecanismos adaptativos que las plantas emplean para hacer frente al déficit hídrico. Entre ellos se encuentran:

- **Reducción del área foliar:** El déficit hídrico provoca una disminución en la turgencia celular, resultando en una reducción tanto en la expansión foliar como en la elongación radicular. Esto conlleva una menor tasa de crecimiento. La disminución en el área foliar contribuye a una menor transpiración, permitiendo a la planta conservar más agua. La disminución en la tasa transpiratoria puede limitar la fotosíntesis al reducir la incorporación de CO₂.
- **Cierre estomático:** El cierre estomático es uno de los mecanismos más rápidos para evitar la pérdida de agua en condiciones de déficit hídrico. Puede ocurrir por mecanismos hidropasivos o hidroactivos, dependiendo de la humedad del aire y del estado de deshidratación de la planta.

- **Abscisión foliar:** En situaciones de déficit hídrico, se produce la senescencia y, en algunos casos, la abscisión de hojas. La reducción en el número de hojas conlleva una disminución en la superficie de transpiración, lo que representa un ahorro hídrico para la planta.
- **Disminución de la transpiración:** La transpiración es el proceso por el cual las plantas pierden agua a través de las hojas. Al reducir la transpiración, las plantas pueden conservar agua y reducir los efectos negativos del estrés hídrico.

5.6 Determinación del estrés hídrico basados en planta

Un indicador específico de escasez de agua puede ser considerado confiable si la variación en su valor coincide con la variación en el rendimiento de un cultivo afectado por distintos niveles de falta de agua (Parkash y Singh, 2020).

5.6.1 Potencial Hídrico (Ψ)

En el contexto de la determinación del estrés hídrico en las plantas, el Potencial Hídrico emerge como una herramienta fundamental. Diversas técnicas están disponibles para evaluar dicho estrés, y la selección de la metodología adecuada puede depender tanto de la fuente de información como de la disponibilidad tecnológica. Un método ampliamente utilizado es el parámetro del Potencial Hídrico (Lázar, 2003).

Según la definición de Arntzen, (2014) el Ψ se conceptualiza como la capacidad del agua para realizar trabajo en un sistema, y está vinculado a la variación de energía libre del agua. Este se calcula como la diferencia entre el potencial químico del agua en el sistema y el potencial químico del agua pura en condiciones estándar. En el contexto del sistema hidrodinámico suelo-planta-atmósfera, la planta actúa como un sistema intermedio posicionado entre las diferencias de agua presentes en el suelo y la atmósfera (Arntzen, 2014).

El estrés hídrico que experimentan los tejidos vegetales puede estar estrechamente relacionado con la tensión hídrica del suelo. Los requerimientos hídricos de los tallos, hojas, las inflorescencias en la parte reproductiva y los órganos derivados (frutos y semillas) hacen que la tensión se transmita a las raíces para extraer más agua del suelo. La utilización de un medidor de la tensión hídrica del suelo genera una medición continua que se asemeja a la fuerza análoga requerida para la extracción de agua desde el suelo (Shock y Wang, 2011).

5.6.1.1 Instrumentos y técnicas para estimar el Potencial Hídrico

- Método de Volumen constante
- Cámara de presión
- Osmómetro
- Sicrometros
- Sonda de presión

5.6.2 Conductancia estomática

Oliveros Díaz y Caicedo Vera, (2023), explican que la conductancia estomática es un parámetro crucial que determina el nivel de apertura de los estomas en las hojas de las plantas. Esta conductancia estomática desempeña un papel esencial en la regulación de la pérdida de agua por transpiración y en la entrada de dióxido de carbono (CO₂). En consecuencia, la conductancia estomática actúa como un mecanismo de control que ajusta o disminuye la transpiración con el fin de maximizar el proceso de fotosíntesis. Además, la apertura o cierre de los estomas es una respuesta a las variaciones en el entorno, así como a situaciones de estrés tanto de origen abiótico como biótico.

En Perú, Pino V. et al., (2019), encontraron que en el cultivo del olivo (*Olea europaea L.*) existe una relación entre la conductancia estomática y la temperatura, es decir, a medida que la temperatura foliar aumenta en las hojas de las plantas, los estomas en las hojas se abren más para liberar vapor de agua; en cambio,

encontraron que el contenido de humedad volumétrico en el suelo no influye en la apertura de los estomas.

5.7 Teledetección

5.7.1 Definición

Por teledetección entendemos, de modo genérico, cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella. En el ámbito de las ciencias de la Tierra, la Teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales (Sobrino et al., 2000).

Las técnicas de teledetección se clasifican según el origen de la señal empleada, y pueden agruparse en dos categorías (López, M. J., et al., 1991 citado por Fernández Castaño et al., 1996).

5.7.1.1 Teledetección Pasiva

Se fundamentan en la detección de las características radiactivas o reflectantes del sistema bajo observación. La fuente de energía puede ser tanto el Sol como la Tierra, y la tarea del sensor se limita exclusivamente a captar la señal que recibe. Se distinguen dos categorías de sensores con estas características: electroópticos y de microondas (López, M. J., et al., 1991 citado por Fernández Castaño et al., 1996).

Emplea sensores multiespectrales o hiperespectrales que miden la cantidad recibida con múltiples combinaciones de bandas. Estas se diferencian por el número de canales (dos longitudes de onda o más). Dichas bandas están en espectros dentro y fuera de la visión humana (visible, IR, NIR, TIR, microondas) (Kogut, 2021)

Tabla 1 Tipos de instrumentos de teledetección pasiva

Instrumento	Aplicación
Espectrofotómetro	Distingue y analiza las bandas espectrales.
Radiómetro	Determina la potencia de la radiación emitida por el objeto en determinados rangos de banda.
Espectrorradiómetro	Determina la potencia de la radiación en varios rangos de banda.
Radiómetro hiperspectral	Distingue cientos de bandas espectrales estrechas dentro de las regiones.
Radiómetro de imágenes	Escanea el objeto o superficie para reproducir la imagen.
Sonda	Detecta condiciones atmosféricas en sentido vertical.
Acelerómetro	Detecta los cambios de velocidad por unidad de tiempo.

5.7.1.2 Teledetección Activa

El sensor tiene una doble función: actúa produciendo una señal de características conocidas que será recogida después de interactuar con el sistema observado. La información se obtiene de la comparación entre la señal emitida y la reflejada. El más conocido es el radar (López, M. J., et al., 1991 citado por Fernández Castaño et al., 1996)

Estos sensores emiten activamente una onda electromagnética enfocada en el punto de observación cuyo reflejo detecta: conociendo las características de la onda enviada, de la onda recibida y del espacio entre el objeto y el sensor, pueden

inferirse características del objeto observado. Las longitudes de onda de las microondas que se usan en la teledetección tienen la propiedad de atravesar la atmósfera sin ser absorbidas prácticamente: la atmósfera es transparente a este tipo de sensores, incluso las nubes lo son (Rodríguez Pérez et al., 2015).

Tabla 2 Tipos de instrumentos de teledetección pasiva

Instrumento	Aplicación
Radar	Emite pulsos desde su antena, detecta obstáculos al medir la dispersión de la energía reflejada, permitiendo estimar la distancia al objetivo según la cantidad de dispersión y el tiempo de viaje de las ondas.
Lidar	Utiliza pulsos de luz para medir distancias en detección remota. Implica enviar impulsos luminosos, evaluar la cantidad recuperada y calcular la ubicación y distancia multiplicando el tiempo por la velocidad de la luz.
Altímetro	Mide la elevación como al Lidar.
Instrumentos de medición	Estiman el alcance con uno o dos dispositivos idénticos en plataformas diferentes que se envían señales entre sí.
Sonda	Estudia las condiciones meteorológicas emitiendo impulsos, en caso de que se encuentre en la categoría de activo.
Difusómetro	Detecta condiciones atmosféricas en sentido vertical.
Acelerómetro	Detecta los cambios de velocidad por unidad de tiempo.

5.7.2 Ventajas de la observación espacial

La observación espacial a través de la teledetección presenta una serie de beneficios significativos. En primer lugar, la cobertura global proporcionada por los satélites permite la obtención de datos desde cualquier ubicación en el planeta, incluso en regiones remotas o de difícil acceso. Esta capacidad elimina restricciones geográficas y facilita la monitorización a escala mundial. Además, la frecuencia de observación sistemática posibilita un seguimiento continuo de los cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo (Alados Arboledas et al., 1997; AXESS, 2022).

La multiespectralidad de los sensores remotos es otra ventaja crucial, ya que permite la captura de información en diversas bandas espectrales. Esto posibilita el análisis detallado de diferentes características, como la salud de la vegetación, la presencia de cuerpos de agua y la identificación de contaminantes. La rapidez de respuesta de la teledetección espacial es esencial en situaciones críticas, como desastres naturales, donde la capacidad de observar y reaccionar rápidamente es crucial (SEMAR, 2009).

5.7.3 Desarrollo actual

En el contexto del desarrollo actual de la teledetección, se han producido avances notables impulsados por el progreso tecnológico. Los satélites modernos ofrecen una mayor resolución espacial y espectral, posibilitando una observación más detallada de la Tierra y una discriminación más precisa de las características en la superficie. Este aumento en la calidad de los datos contribuye a una comprensión más profunda de los fenómenos observados (Vargas Suárez, 2022).

La accesibilidad a datos de teledetección de acceso abierto provenientes de diversas misiones satelitales ha democratizado el uso de esta tecnología, fomentando la investigación y la aplicación en una variedad de campos. Además, la miniaturización de satélites ha llevado al despliegue de constelaciones de pequeños

satélites, proporcionando mayor flexibilidad y capacidad de revisita, lo que mejora la eficiencia en la adquisición de datos a lo largo del tiempo (Sotomayor et al., 2021).

5.7.4 Resolución

5.7.4.1 Espacial

La resolución espacial se refiere al tamaño de un píxel y representa la capacidad de un sensor remoto para distinguir objetos o detalles en la superficie terrestre. Se trata de la habilidad para discernir dos objetos cercanos como entidades separadas. (Borotkanych, 2023).

5.7.4.2 Temporal

La resolución temporal se relaciona con la frecuencia con la que se recopilan datos a lo largo del tiempo. Mientras que la resolución espacial se centra en la calidad de la imagen, la resolución temporal se enfoca en la frecuencia con la que se obtienen esas imágenes (Gonzalez Roglich y Mendoza, 2019).

5.7.4.3 Espectral

Se refiere a la capacidad de un sensor para distinguir diferentes longitudes de onda en el espectro electromagnético. Esto permite identificar diferentes características de la superficie de la Tierra basándose en cómo reflejan o emiten la radiación electromagnética en diferentes bandas espectrales (Gonzalez Roglich y Mendoza, 2019).

5.7.5 Bandas

Las bandas se refieren a rangos específicos de longitudes de onda en el espectro electromagnético que son utilizados para adquirir información sobre la superficie terrestre desde plataformas satelitales o aéreas (GISGeography, 2023).

5.7.5.1 Visibles

Se refiere a las longitudes de onda en el espectro electromagnético que son perceptibles por el ojo humano, generalmente en el rango de 0.4 a 0.7 micrómetros.

Estas bandas se utilizan para obtener información sobre la reflectancia de la luz visible por parte de la superficie terrestre (Butler et al., 1990).

5.7.5.2 Infrarrojas

Incluye longitudes de onda que están más allá del espectro visible, generalmente entre 0.7 y 3 micrómetros. La radiación infrarroja es útil para detectar características como la temperatura superficial y la vegetación (Butler et al., 1990).

5.7.5.3 Ultravioletas

Se refiere a longitudes de onda más cortas que las del espectro visible, generalmente por debajo de 0.4 micrómetros. La radiación ultravioleta puede proporcionar información sobre la calidad del agua y otros aspectos atmosféricos (Butler et al., 1990).

5.7.5.4 Microondas

Esta banda abarca longitudes de onda mayores, generalmente más allá de 1 milímetro. Se utiliza para penetrar a través de la atmósfera y las nubes, permitiendo la observación de la superficie terrestre incluso en condiciones atmosféricas adversas (Tarazona, 2019).

5.7.5.5 MSI (Moisture Stress Index)

Es un índice de vegetación que se fundamenta en medidas de reflectancia, particularmente sensibles a variaciones en el contenido hídrico foliar. A medida que dicho contenido incrementa en la dosis vegetal, se observa un aumento correspondiente en la absorción alrededor de los 1599 nm. La absorción a 819 nm permanece prácticamente inalterada frente a cambios en el contenido de agua, y se emplea como referencia. Sus aplicaciones abarcan el análisis del estrés del dosel, la predicción de la productividad y modelización, el análisis del riesgo de incendios, así como estudios de fisiología del ecosistema (Villatoro, 2020).

El MSI exhibe una relación inversa con otros índices de vegetación relacionados con el agua, donde valores más elevados indican un mayor estrés hídrico y, por ende, un menor contenido de agua. Este índice presenta una escala que varía de 0 a más de tres, siendo el rango típico para la vegetación verde de 0.4 a dos, (Hunt Jr. y Rock, 1989). Laurentino, (2014) presenta la siguiente fórmula:

$$MSI = \frac{SWIR}{NIR} \quad (1)$$

Donde: SWIR (Short-Wave Infrared) infrarrojo de onda corta y NIR (Near Infrared) infrarrojo cercano.

5.7.6 Satélite Sentinel-2

La tarea global de SENTINEL-2 implica la utilización de dos satélites idénticos en órbita polar, ubicados en la misma trayectoria, pero con una separación de fases de 180°. Esta misión tiene como objetivo observar las variaciones en las condiciones de la superficie terrestre. Gracias a su amplia cobertura y a su frecuencia de revisión elevada (10 días en el ecuador con un solo satélite, y cinco días con dos satélites en condiciones sin nubes, lo que resulta en dos-tres días en latitudes intermedias), la misión respalda la vigilancia de los cambios en la vegetación durante la temporada de crecimiento (ESA, 2015).

Sentinel 2 llevan una innovadora cámara multispectral de alta resolución, con 13 bandas espectrales que aportan una perspectiva de la superficie terrestre y la vegetación.

Tabla 3 Instrumentos del satélite Sentinel-2

Bandas	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
1 – Aerosol	0.43 - 0.45	60
2 - Blue	0.45 - 0.52	10
3 - Green	0.54 - 0.57	10
4 - Red	0.65 - 0.68	10
5 – Red edge 1	0.69 - 0.71	20
6 – Red edge 2	0.73 - 0.74	20
7 – Red edge	0.77 - 0.79	20
8 – Infrarrojo cercano (NIR) 1	0.78 - 0.90	10
8A - Infrarrojo cercano (NIR) 2	0.85 - 0.87	20
9 – Vapor de agua	0.93 - 0.95	60
11 – SWIR 1	1.56 - 1.65	20
12 SWIR 2	2.10 - 2.28	20

Fuente: Agencia Espacial Europea (ESA)

V. Materiales y métodos

6.1 Tipo de investigación

Se llevó a cabo un estudio experimental completamente al azar, utilizando el índice MSI como tratamiento como único factor, el cual constaba de dos niveles: máximo, correspondiente a los puntos donde las plantas mostraban mayor estrés; y, mínimo, correspondiente a los puntos donde las plantas presentaban menor estrés, con tres repeticiones de cada uno. Cada unidad experimental estuvo compuesta por 4 plantas representativas. Las variables respuesta evaluadas fueron

el contenido de humedad del suelo, el número de hojas, el grosor del tallo, la altura de la planta, clorofila (unidades SPAD), temperatura del suelo temperatura de la planta.

6.2 Ubicación y descripción del sitio de la investigación

El clima en la Comarca Lagunera es árido y semiárido, caracterizado por temperaturas elevadas durante gran parte del año. Las temperaturas máximas pueden superar los 40° C en verano, mientras que en invierno pueden descender considerablemente durante las noches (Concepción et al., 2007).

Su economía se basa principalmente en la agricultura y la ganadería. La región es conocida por ser una de las principales productoras de algodón, frutas, hortalizas y productos lácteos en México. Asimismo, es famosa por la tecnificación del riego lo que ha permitido el cultivo de una amplia variedad de productos agrícolas en un entorno naturalmente árido, a su vez ha contribuido al desarrollo de la agricultura intensiva lo que la ha convertido en una de las regiones más productivas del país (AGRICULTURA, 2016).

La Comarca Lagunera es una región geográfica ubicada en el norte de México, específicamente en los estados de Coahuila y Durango. Su nombre proviene de la gran cantidad de lagunas y humedales presentes en la zona. Las dos principales ciudades de esta comarca son Torreón, en Coahuila, y Gómez Palacio, en Durango. Se encuentra localizada entre los meridianos 101° y 104° al oeste de Greenwich.

La investigación se llevó a cabo en el estado de Coahuila de Zaragoza, específicamente en el municipio de Francisco I. Madero, en la localidad conocida como El Porvenir. El área de estudio se centra en una parcela ubicada dentro del perímetro de la P.P. Palestina con las coordenadas geográficas de 25.7800594° de latitud norte y -103.31483118° de longitud oeste.

La sobreexplotación de la agricultura y de los suelos, ha ocasionado problemas ambientales como la disminución de los niveles de agua en los acuíferos locales, así como la desertificación y erosión de los suelos.



Figura 1 Mapa de micro localización del predio P.P. Palestina, del municipio de Francisco I. Madero, Coahuila de Zaragoza, México.

6.3 Metodología

6.3.1 Obtención de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales fueron obtenidas del satélite Sentinel-2 con una resolución espacial de 10 metros y una resolución temporal de 5 días. Estas imágenes fueron descargadas en formato GeoTIFF desde la página oficial de Copernicus Open Access Hub de la Agencia Espacial Europea (<https://scihub.copernicus.eu/dhus>), en proyección UTM/WGS84.

Tabla 4 Fechas en las que tomaron las imágenes del satélite Sentinel-2.

Fechas de las imágenes
30/08/2023
08/09/2023
21/09/2023
29/09/2023
24/10/2023

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

6.3.2 Procesamiento de imágenes

Se utilizó el software libre QGIS versión 3.32.2 Lima para procesar las imágenes a lo largo del estudio, se empleó el complemento Semi Automatic Classification Plugin (SCP-Plugin) y la calculadora Ráster para aplicar la fórmula 2.

$$MSI = \frac{B8}{B11} \quad (2)$$

Donde B11 es el valor de reflectancia en la banda de infrarrojos de onda corta (SWIR). B8 es el valor de reflectancia en la banda cercana (NIR) (Silva Laurentino, 2014).

Posteriormente, se generó un mapa del área de interés y se georreferenciaron los puntos con valores máximos y mínimos de MSI. Los valores máximos indican un mayor nivel de estrés en la planta, mientras que los valores mínimos señalan un menor grado de estrés.



Figura 2. Imagen procesada con Qgis del Satélite Sentinel-2

6.3.3 Medición de variables fenológicas

Se utilizó un GPS Garmin modelo ETREX 32x para localizar los puntos de interés: MSI alto, indicativo de estrés; MSI bajo, zonas con poco estrés. Se delimitó un espacio de 1 m², se procedió a realizar el conteo de las plantas presentes tanto en la superficie delimitada como por metro lineal. Se seleccionaron cuatro plantas como unidad experimental, a las cuales se les midió la altura y el diámetro del tallo utilizando un estadal y un Vernier, respectivamente. Además, se llevó a cabo el registro del número de hojas y se realizó la evaluación de la fenología de las plantas seleccionadas. Asimismo, se midió la temperatura de las hojas y del suelo con un termómetro Digital Infrarrojo Fluke 62 (precisión en su clase de $\pm 1\%$ de lectura).



Figura 3. Medición de plantas

6.3.4 Medición de variables fisiológicas

Se empleó un clorofilómetro marca SPAD 502 Plus (Konica Minolta Sensing Inc., Kosmos, México) con una precisión de ± 1 unidad SPAD. Se tomaron tres hojas de cada unidad experimental para estimar un promedio de la clorofila de cada una.



Figura 4. Medición de clorofila con el SPAD 502 Plus (Konica Minolta Sensing Inc., Kosmos, México).

6.3.5 Obtención de la humedad de suelo

Se extrajeron dos muestras de suelo a diferentes profundidades (0-30 cm y 30-60 cm) de las unidades experimentales en los puntos con MSI alto y MSI bajo, para ello se utilizó una barrena tipo T de 61 cm de longitud, con un tubo de muestreo de 30 cm. El contenido de humedad de cada muestra fue analizado mediante el método gravimétrico AS-05, de acuerdo con la norma NOM-021-SEMARNAT-2000. Este método implica a pesar del suelo húmedo y someterlo a un proceso de secado en estufa a 105°C hasta alcanzar un peso constante, lo cual tomó dos días en este estudio. Después del secado, se pesaron las muestras para aplicar la fórmula 2.

$$\%H = \frac{(PSH - PSS)}{PSS} \cdot 100 \quad (3)$$

Donde: % H representa el porcentaje de humedad gravimétrica del suelo; PSH y PSS denotan el peso del suelo húmedo y seco, respectivamente. Dado que las muestras fueron pequeñas, se expresaron en gramos.



Figura 5. Muestreo de humedad con barrena tipo T de 61 cm de longitud, con un tubo de muestreo de 30 cm.

6.3.6 Análisis estadístico

Dado que se trató de un diseño experimental completamente al azar, las unidades experimentales se asignaron de manera aleatoria para cada fecha. El experimento comprendió dos tratamientos: MSI alto (Tratamiento 1) y MSI bajo (Tratamiento 2), cada uno con tres repeticiones. La unidad experimental estuvo conformada por 4 plantas representativas de la zona, en una superficie de un m².

No se indujo estrés hídrico al cultivo durante el estudio. Esta decisión se basó en la consideración de trabajar bajo condiciones reales. La colaboración con un agricultor cooperante implicó respetar las prácticas agrícolas existentes y no manipular el programa de riego.

En el proceso de análisis estadístico, se llevó a cabo la recopilación necesaria de información de la base de datos. Durante dicho análisis, se tomaron en cuenta diversos aspectos, entre los cuales se incluyeron los valores de MSI como tratamiento único, así como las variables respuesta, como el contenido de humedad del suelo, la altura y el grosor del tallo de la planta, la temperatura tanto de la planta como del suelo, la fenología y los niveles de clorofila.

6.3.6.1 Regresión lineal

Se aplicó un modelo de regresión lineal y se obtuvieron los coeficientes de determinación (R^2) de las medias muestrales de las variables respuesta. Este análisis se realizó en el software Excel 2016. La regresión lineal se utilizó para evaluar la relación lineal entre estas variables y los niveles de MSI alto (Tratamiento 1) y MSI bajo (Tratamiento 2). Además, se realizó un ajuste a una ecuación para determinar la calidad de los modelos como estimadores, con el objetivo de conocer la idoneidad de los modelos para predecir los niveles de humedad en el suelo con base en los valores de MSI.

Modelo Estadístico

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon \quad (4)$$

Dónde: Y es la variable dependiente; X es la variable independiente que representa el nivel de MSI (alto o bajo); β_0 es la intersección; β_1 es el coeficiente de regresión; y ϵ es el error.

6.3.6.2 Coeficientes de correlación

Se calcularon los coeficientes de correlación (r) de las medias muestrales de las variables respuesta mencionadas anteriormente en relación con MSI alto (Tratamiento 1) y MSI bajo (Tratamiento 2). Además, se exploró la relación entre las propias variables respuesta. Estos cálculos se realizaron en el software Excel 2016. Con el objetivo de obtener información sobre la fuerza y la dirección de la relación entre las variables y los tratamientos.

Modelo estadístico

$$r = \frac{\sum[(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{X})^2 * \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

Donde: r es el coeficiente de correlación; x es valor de la variable para un punto de datos; \bar{x} es la media de la variable x ; y es el valor de la variable para un punto de datos; \bar{y} es la media de la variable.

6.3.6.3 T de Student

La prueba T de Student es una herramienta estadística utilizada para comparar las medias de dos grupos diferentes y determinar si existen diferencias significativas entre ellos. Se basa en la distribución t de Student, que asume que las muestras provienen de poblaciones con distribución normal y tienen varianzas iguales. Antes de la aplicación de la prueba t de Student, se verificaron tres

supuestos fundamentales: normalidad, homogeneidad e independencia. Estas pruebas se llevaron a cabo utilizando el software SAS versión 9.0.

Normalidad: Se emplearon diversas pruebas para evaluar la normalidad de los datos. La hipótesis nula (H_0) considerada fue que los datos siguen una distribución normal, mientras que la hipótesis alternativa (H_a) planteaba que los datos no siguen una distribución normal.

Las pruebas de normalidad aplicadas incluyeron Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises, y Anderson-Darling. Si el valor de P resultante de estas pruebas fuera mayor a 0.05, se acepta la hipótesis nula (H_0), es decir, de que los datos seguían una distribución normal.

Homogeneidad de varianzas: ya que la cantidad de muestras es pequeña, se utilizó la prueba de Barlett para evaluar la homogeneidad de varianzas. La hipótesis nula (H_0) planteada fue que los grupos comparados tenían varianzas homogéneas, frente a la hipótesis alternativa (H_a) que indicaba la ausencia de homogeneidad. Si el valor de p obtenido fuera superior a 0.05, no se rechaza la hipótesis nula (H_0), es decir, los grupos tienen varianzas homogéneas.

Independencia: La independencia entre las muestras se aseguró mediante un proceso de aleatorización en la selección de los datos. Esta etapa de la metodología garantizó que las observaciones en las muestras fueran independientes entre sí, evitando posibles sesgos en los resultados.

T de Student: Se empleó la técnica de comparación de medias muestrales mediante la prueba de T de Student con el propósito de evaluar las diferencias estadísticamente significativas entre las medias de dos muestras independientes.

$$T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (6)$$

Dónde: \bar{X}_1 y \bar{X}_2 son las medias de los dos grupos; s_1^2 y s_2^2 son las varianzas muestrales; n_1 y n_2 son los tamaños de muestra.

VI.Resultados y Discusión

7.1 Contenido de humedad en el suelo

En situaciones de estrés hídrico, caracterizado por un MSI alto, se observa un coeficiente de determinación bajo, con un valor de 0.10. Sin embargo, al realizar un ajuste mediante una línea de tendencia polinómica de segundo orden, el R^2 aumenta a 0.63 (ecuación 7). Esto sugiere que el contenido de humedad en el suelo (H) puede ser estimado de manera efectiva mediante un modelo polinómico de segundo orden, aunque el margen de error sigue siendo alto para este caso (Figura 6, A y B).

En el caso de un MSI bajo, se observa una correlación lineal mayor, con un R^2 de 0.60. Sin embargo, al realizar un ajuste mediante una línea de tendencia polinómica de segundo orden (ecuación 8), el R^2 aumenta a 0.88. Esto sugiere que el contenido de humedad en el suelo (H) puede ser estimado de manera efectiva mediante un modelo polinómico de segundo orden a partir de los valores de MSI bajo, con un margen de error menor en comparación con el modelo lineal (Figura 5, C y D).

$$H = -7938.7MSI_{ALTO}^2 + 1526MSI_{ALTO} - 7295.5 \quad (7)$$

$$H = 1170.5MSI_{BAJO}^2 - 1309.8MSI_{ALTO} + 389.74 \quad (8)$$

Estos resultados coinciden con los hallazgos de otros estudios que han demostrado que existe una relación inversa entre el contenido de humedad en el suelo y el estrés hídrico de las plantas. A medida que el contenido de humedad disminuye, las plantas sufren un mayor estrés hídrico, lo que se refleja en un aumento del MSI (Beyá Marshall y Galleguitos T., 2020).

En los casos de MSI alto, se observó un coeficiente de correlación (r) negativo con respecto a la humedad, $r = -0.493$. En otras palabras, a medida que la humedad disminuyó, los valores del MSI tendieron a aumentar (Tabla 4). Por otro lado, en el caso del MSI bajo, se obtuvo un coeficiente de correlación (r) de 0.372 (Tabla 4), indicando una correlación baja y positiva. Estas asociaciones sugieren que, a medida que los valores de MSI disminuyen, es decir, hay menos estrés en el cultivo, hay un mayor contenido de humedad en el suelo.

Tabla 5 Coeficientes de correlación de las medias muestrales del contenido de humedad en el suelo en Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

Los resultados de la investigación también sugieren que la temperatura de la planta se ve influenciada por el contenido de humedad en el suelo . Lo que se observa es que la temperatura de la planta puede funcionar como un indicador del nivel de humedad, dado que se ha notado que a menor contenido de humedad en el suelo, la temperatura de la planta tiende a ser más elevada. Este fenómeno se

Variables respuesta	Tratamiento 1	Tratamiento 2
	Humedad	Humedad
No. De hojas	-0.178	-0.785
Grosor del tallo	0.482	0.061
Altura	0.057	-0.703
SPAD	0.405	-0.034
Temperatura Planta	0.319	0.346
Temperatura Suelo	0.629	0.64
MSI	-0.493	0.372

explica por el hecho de que las plantas tienden a transpirar más a temperaturas más elevadas, lo que conlleva a una mayor pérdida de agua desde el suelo (Sterling y Hernández R., 2005).

Además, se observa una relación baja entre el contenido de humedad en el suelo y la temperatura del mismo, para ambos casos, en comparación con las demás variables. Este hallazgo concuerda con los resultados de la investigación de Zhang et al., (2020) quienes demostraron una relación inversamente proporcional entre la humedad del suelo y la temperatura. En otras palabras, a medida que aumenta la humedad del suelo, se registra una disminución en su temperatura (Tabla 5).

Tabla 6 medias muestrales del número de hojas, la altura de la planta y el contenido de humedad en el suelo para el Tratamiento 1 (MSI alto) y el Tratamiento 2 (MSI bajo).

Fechas de muestreo	MSI alto (Tratamiento 1)			MSI bajo (Tratamiento 2)		
	Temperatura Planta	Temperatura Suelo	Humedad	Temperatura Planta	Temperatura Suelo	Humedad
30/08/2023			25.100			28.233
08/09/2023	29.317	37.617	29.833	28.775	35.800	31.533
21/09/2023	30.925	29.025	29.450	30.350	32.975	25.375
29/09/2023	28.200	29.350	24.800	19.039	19.633	25.433
24/10/2023	31.067	27.400	25.867	27.200	22.967	26.333

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

En el análisis de la prueba t de Student, se encontró que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los dos tratamientos a lo largo del ciclo, excepto en la primera fecha. En este punto temporal, el tratamiento 1 mostró un contenido de humedad en el suelo estadísticamente inferior al del tratamiento 2 (Figura 7). En los gráficos donde aparecen dos letras "A", los resultados de la prueba t de Student no indicaron diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los dos grupos, salvo en la primera fecha, marcada con la letra "B".

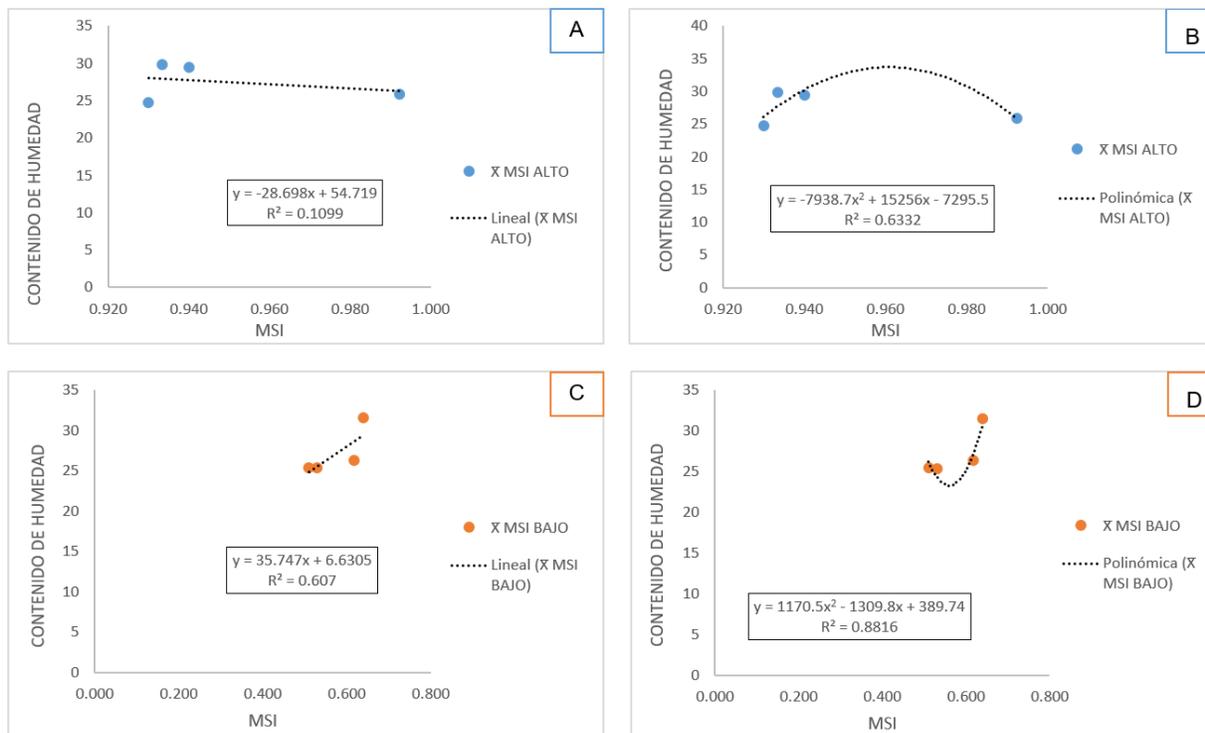


Figura 7(A) Grafica de dispersión de MSI alto con tendencia lineal. (B) Modelo ajustado de MSI alto con línea de tendencia polinómica de segundo grado. (C) Grafica de dispersión de MSI bajo con tendencia lineal. (D) Modelo ajustado de MSI bajo con línea de tendencia polinómica de segundo grado.

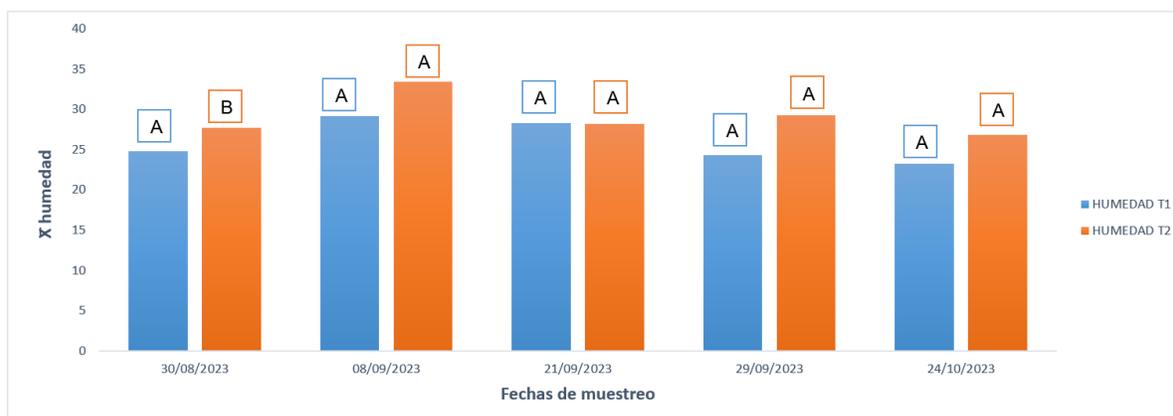


Figura 6 Gráfica de comparación de medias muestrales del contenido de humedad en el suelo mediante el método T de Student.

7.2 Número de hojas

Se identificó una relación lineal baja entre el número de hojas (NH) y los valores MSI alto, con un R^2 de 0.54. Por esta razón se descarta su utilidad como un modelo para estimar el número de hojas con los valores de MSI alto. Para abordar esta limitación, se llevó a cabo un ajuste de la línea de tendencia mediante un polinomio de tercer orden, resultando en un R^2 de 0.83 (Figura 7, A y B), con un margen de error menor para la estimación del número de hojas con los valores de MSI alto (ecuación 9).

En el caso del Tratamiento 2, se observó una relación lineal baja con el número de hojas (NH) y los valores de MSI bajo, generando un R^2 de 0.67. No obstante, al igual que en el caso del MSI alto, este modelo no fue considerado adecuado. Para mejorar la capacidad de estimación, se aplicó un ajuste mediante una línea de tendencia polinómica de tercer orden, obteniendo un R^2 de 0.81 (Figura 7, C y D), con este modelo se puede estimar el número de hojas con los valores de MSI bajo con un margen de error menor, en este caso (ecuación 10).

$$NH = -21853MSI_{ALTO}^3 + 68095MSI_{ALTO}^2 - 70308MSI_{ALTO} + 24082 \quad (9)$$

$$NH = 486.17MSI_{BAJO}^3 - 1041.7MSI_{BAJO}^2 + 696.17MSI_{BAJO} - 134.14 \quad (10)$$

Los hallazgos de la investigación señalan la existencia de un coeficiente de correlación inversa entre el número de hojas y los valores del MSI, tanto en el Tratamiento 1 como en el Tratamiento 2. Para ambos casos, el coeficiente de correlación entre el MSI y la cantidad de hojas fue negativo, lo que implica que a medida que aumentan los niveles de MSI, es decir, cuando el estrés hídrico se intensifica, disminuye el número de hojas (Tabla 7). En ambos tratamientos, el coeficiente de correlación se aproximó a -1 (Tratamiento 1: $r = -0.741$; Tratamiento 2: $r = -0.819$).

Paliwal et al., (2001) menciona que las sequías no letales durante el periodo vegetativo tienden a reducir el área foliar y afectar el desarrollo, acelerando la senescencia de la hoja las plantas de maíz. Esta asociación se observó en ambos tratamientos, indicando que se trata de un fenómeno general (Tabla 7).

Tabla 7 Coeficientes de correlación de las medias muestrales del número de hojas en Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).

Variables respuesta	Tratamiento 1 Numero de hojas	Tratamiento 2 Numero de hojas
Grosor del tallo	0.714	0.437
Altura	0.946	0.969
SPAD	-0.677	-0.098
Temperatura Planta	-0.259	-0.651
Temperatura Suelo	-0.710	-0.847
Humedad	-0.178	-0.785
MSI	-0.741	-0.819

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

A medida que disminuye la humedad del suelo, también lo hace la cantidad de hojas en la planta, tal como se evidencia en la investigación de (Castro-Rivera et al., 2022). La Tabla 8 muestra una clara disminución en la cantidad de hojas en condiciones de menor humedad del suelo. No obstante, esta tendencia no fue consistente a lo largo de todo el experimento.

Además, se observa una relación entre el número de hojas y la altura de la planta, dado que la cantidad de hojas depende del número de nudos del tallo, de los cuales emerge cada hoja (Blessing Ruiz y Hernández Morrison, 2009). Hay que considerar que conforme la planta va desarrollándose, pueden perderse entre tres y cinco hojas por la carencia de nutrientes, el engrosamiento del tallo, el alargamiento de los entrenudos y las enfermedades en las hojas. Al mismo tiempo,

a medida que más hojas quedan expuestas a la luz solar, la tasa de materia seca aumenta de manera gradual (Somarriba Rodríguez, 1998).

Tabla 8 Medias muestrales del número de hojas, la altura de la planta y el contenido de humedad del suelo del Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI

Fechas	Tratamiento 1		Tratamiento 2		
	No. De hojas	Humedad	No. De hojas	Altura	Humedad
30/08/2023	7	25.100	11	0.699	28.233
08/09/2023	11	29.833	12	1.333	31.533
21/09/2023	11	29.450	14	2.239	25.375
29/09/2023	15	24.800	15	2.366	25.433
24/10/2023	14	25.867	14	2.162	26.333

bajo)

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

7.3 Grosor del tallo

En situaciones de estrés hídrico, identificadas mediante un MSI alto, existe una alta correlación lineal con el grosor del tallo (GT) de la planta. El R^2 obtenido fue de 0.78. Además, se realizó un ajuste mediante una línea de tendencia polinómica de segundo orden, lo cual mejoró considerablemente el modelo, alcanzando un R^2 de 0.95. Este modelo polinómico de segundo orden demostró ser más efectivo para estimar el grosor del tallo con valores de MSI alto, para este caso.

En situaciones de MSI bajo también se encontró una alta relación lineal, con un R^2 de 0.76. Esto sugiere que el grosor del tallo (GT) puede ser estimado de manera efectiva por el MSI en situaciones de menor estrés hídrico, y se recomienda utilizar este modelo lineal en tales casos. No obstante, al ajustar la línea de tendencia con un modelo polinómico de segundo orden, se observó un aumento sustancial en el modelo de estimación, con un R^2 de 0.82. Esto indica que el grosor

del tallo puede ser estimado por los valores de MSI bajo con un margen de error menor, en este estudio específicamente.

$$GT = -30.764MSI_{ALTO}^2 + 62.531MSI_{ALTO} - 29.498 \quad (11)$$

$$GT = -1.2351MSI_{BAJO}^2 + 1.4658MSI_{BAJO} - 1.8067 \quad (12)$$

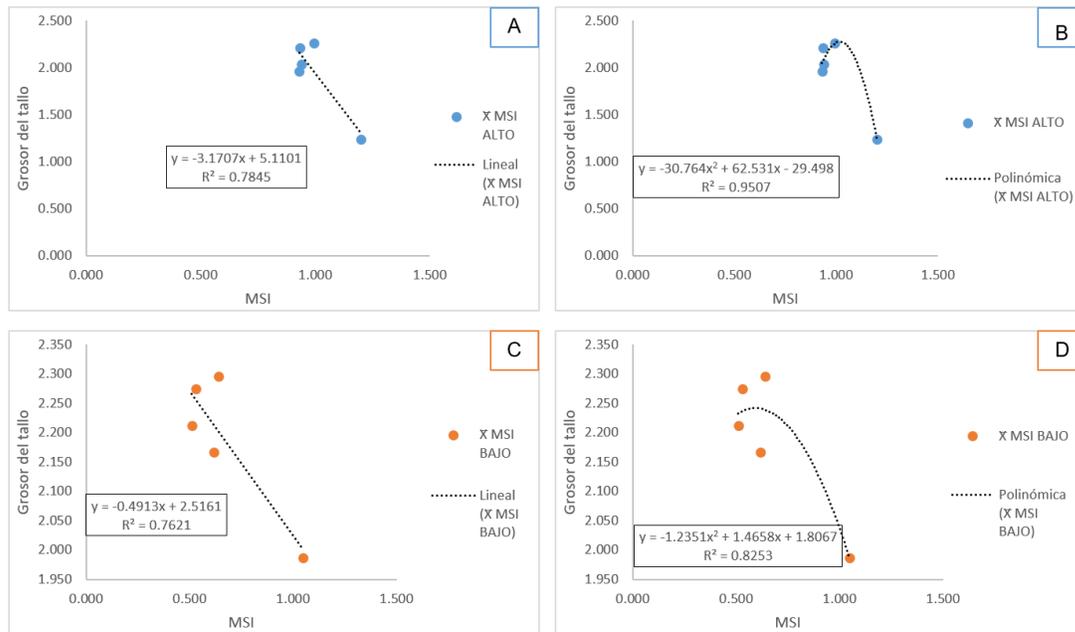


Figura 8 (A) Grafica de dispersión de MSI alto con tendencia lineal. (B) Modelo ajustado para alto MSI con línea de tendencia polinómica de segundo grado. (C) Grafica de dispersión de MSI bajo con tendencia lineal. (D) Modelo ajustado para alto MSI con línea de tendencia polinómica de segundo grado.

En relación con los coeficientes de correlación (r), se determinó que, para niveles elevados de Índice de Estrés (MSI) en comparación con el grosor del tallo, el coeficiente r fue de -0.886. Por otro lado, para niveles bajos de MSI, el coeficiente r fue de -0.873. Estos resultados señalan una correlación negativa entre el MSI y el grosor del tallo en ambos escenarios. En otras palabras, a medida que los valores

de MSI aumentaban (indicativo de un mayor estrés), se observaba una disminución en el grosor del tallo (Tabla 10).

En cuanto a la relación entre la temperatura del suelo y el grosor del tallo, en el Tratamiento 1 no se evidenció una correlación, con un coeficiente r de 0.221. En contraste, en el Tratamiento 2, se observó una correlación positiva, con un valor de r igual a 0.883. Esto sugiere una asociación positiva entre la temperatura del suelo y el grosor del tallo en dicho tratamiento (tabla 9).

Variables respuesta	Tratamiento 1 Grosor del tallo	Tratamiento 2 Grosor del tallo
No. De hojas	0.713	0.437
Altura	0.889	0.606
SPAD	-0.199	-0.062
Temperatura Planta	0.508	0.473
Temperatura Suelo	0.271	0.883
Humedad	0.482	0.061
MSI	-0.885	-0.873

Tabla 9 Coeficientes de correlación de las medias muestrales del grosor de tallo en Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

Fechas	MSI alto (Tratamiento 1)		MSI bajo (Tratamiento 2)	
	Grosor del tallo	Numero de hojas	Grosor del tallo	Numero de hojas
30/08/2023	1.239	7	1.988	10
08/09/2023	2.213	10	2.296	11
21/09/2023	2.038	11	2.275	13
29/09/2023	1.959	14	2.212	15
24/10/2023	2.262	13	2.168	13

Tabla 10 Tabla de medias muestrales del grosor del tallo, y el número de hojas para el Tratamiento 1 (MSI alto) y el Tratamiento 2 (MSI bajo).

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

7.4 Altura de planta

Los resultados de la investigación revelan que, en contextos caracterizados por un estrés hídrico identificado a través de un Índice de Estrés Hídrico (MSI) elevado, no se evidencia una correlación lineal significativa con la altura de la planta (AP). El coeficiente de determinación obtenido fue de 0.65, indicando que solo el 65% de la variabilidad en la altura de la planta puede ser explicado por el MSI elevado. Para abordar esta baja correlación lineal, se llevó a cabo un ajuste mediante una línea de tendencia polinómica de tercer orden (ecuación 13), alcanzando un R^2 de 0.97. Por lo tanto, se concluye que este modelo polinómico de tercer orden es más eficaz para prever la altura de la planta utilizando datos de MSI elevado en este escenario específico.

En contraste, en situaciones de un MSI bajo, se identificó una alta correlación lineal ($R^2 = 0.82$). Esto sugiere que la altura de la planta puede estimarse de manera efectiva mediante el MSI en situaciones de bajo estrés hídrico, por lo que se recomienda el uso de este modelo lineal en tales circunstancias. Además, se realizó un ajuste de la línea de tendencia mediante un modelo polinómico exponencial (ecuación 14), con el cual se observó un aumento en la capacidad predictiva. El R^2 resultante fue de 0.92, indicando un menor margen de error para estimar la altura de la planta de maíz por los valores de MSI bajo, en este contexto específico. Es importante señalar que ambos modelos no han sido validados en condiciones de campo.

$$AP = -2556.7MSI_{ALTO}^3 + 7942.9MSI_{ALTO}^2 - 8175.9MSI + 2791.7 \quad (13)$$

$$AP = 0.7537MSI_{BAJO}^{-1.727} \quad (14)$$

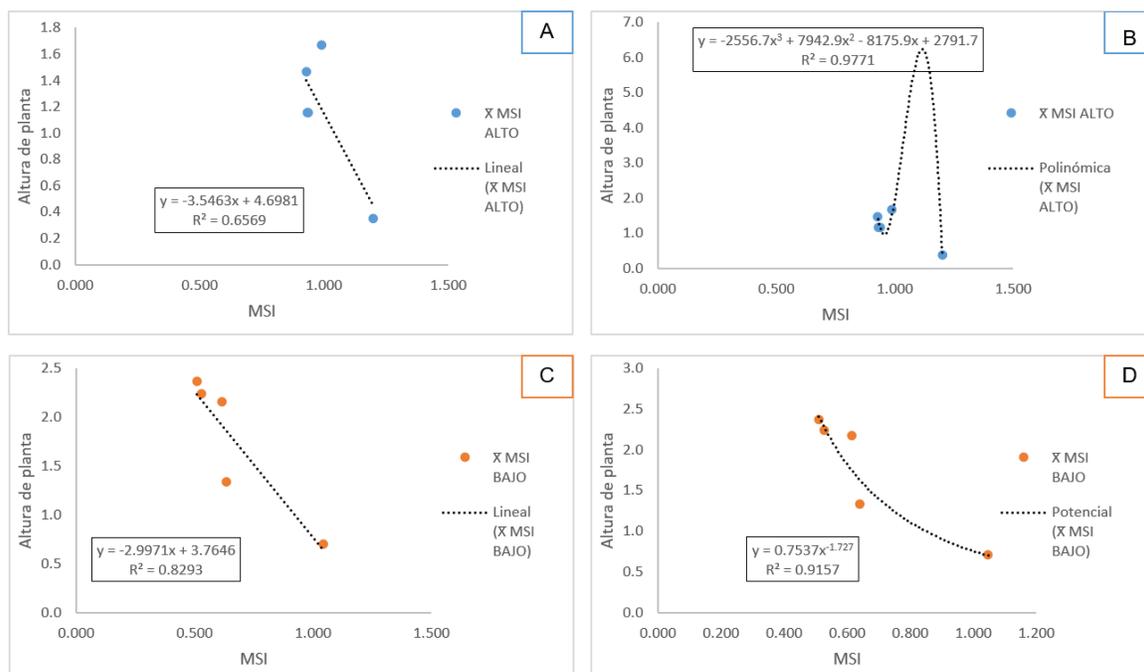


Figura 9 (A) Grafica de dispersión de MSI alto y altura de planta con línea de tendencia lineal. (B) Modelo ajustado de MSI alto con línea de tendencia polinómica de tercer grado. (C) Grafica de dispersión de MSI bajo y altura de planta con línea de tendencia lineal. (D) Modelo ajustado de MSI bajo con línea de tendencia polinómica de tercer grado.

Se registró un coeficiente de correlación de -0.811 entre el MSI alto y la altura de la planta, señalando una correlación negativa (Tabla 11). Esto implica que a medida que el MSI aumenta, la altura de la planta tiende a disminuir. Por otro lado, el coeficiente de correlación entre la altura de la planta y el contenido de humedad en el suelo fue de 0.057, indicando una correlación positiva; sin embargo, esto no sugiere una relación clara entre el contenido de humedad en el suelo y la altura de la planta.

En comparación con el Tratamiento 1, se observó un coeficiente de correlación de -0.911 entre el MSI bajo y la altura de la planta, sugiriendo una correlación negativa mayor (Tabla 11). Esto significa que, conforme aumenta el MSI, es decir, más estrés hídrico, la altura de la planta tiende a disminuir más pronunciadamente en este tratamiento. Además, el coeficiente de correlación entre la altura de la planta y el contenido de humedad en el suelo fue de -0.703, indicando una correlación negativa (Tabla 12). Así, se concluye que a medida que aumenta el contenido de humedad en el suelo, la altura de la planta tiende a incrementarse de manera notoria.

Fechas	Tratamiento 1			Tratamiento 2		
	Altura	MSI	H	Altura	MSI	H
30/08/2023	0.342	1.200	25.100	0.699	1.047	28.233
08/09/2023	1.153	0.933	29.833	1.333	0.640	31.533
21/09/2023	1.153	0.940	29.450	2.239	0.530	25.375
29/09/2023	1.464	0.930	24.800	2.366	0.510	25.433
24/10/2023	1.663	0.992	25.867	2.162	0.618	26.333

Tabla 11 Coeficientes de correlación de las medias muestrales de la altura de planta en Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

Tabla 12 Medias muestrales de la altura de la planta, el contenido de humedad en el suelo (H) para el Tratamiento 1 (MSI alto) y el Tratamiento 2 (MSI bajo).

	Tratamiento 1	Tratamiento 2
No. De hojas	0.946	0.969
Grosor del tallo	0.890	0.607
SPAD	-0.538	-0.190
Temperatura de Planta	0.081	-0.452
Temperatura de Suelo	-0.643	-0.721
Humedad	0.057	-0.703
MSI	-0.811	-0.911

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

7.7 Temperatura de la planta

Los resultados de la investigación señalan que, en condiciones de escasez de agua identificadas mediante un MSI alto, no se observó una relación de manera lineal con la temperatura de la planta. El coeficiente de determinación obtenido fue de 0.47, lo que indica que la temperatura de la planta no puede ser estimado por el MSI alto, ya que tiene un margen de error muy alto. Para abordar esta falta de correlación lineal, se realizó un ajuste a través de una línea de tendencia polinómica de tercer orden, logrando así una mejora en el modelo con un R^2 de 0.99 (ecuación 15). Este modelo polinómico de tercer orden demostró ser más efectivo para estimar la temperatura de la planta utilizando datos de MSI alto en este contexto.

Asimismo, en situaciones de bajo estrés hídrico, no se encontró una correlación lineal significativa, ya que el R^2 fue igualmente de 0.47. Esto sugiere que la temperatura de la planta no puede estimarse de manera eficaz mediante el MSI en condiciones de ausencia de estrés, descartando el uso de este modelo lineal en tales casos. Sin embargo, al aplicar un ajuste de la línea de tendencia mediante un modelo polinómico de tercer orden, se observó un aumento significativo en la capacidad predictiva. El R^2 resultante fue de 0.97 (ecuación 16), indicando un menor margen de error para estimar la temperatura de la planta mediante los valores de

MSI bajo en los casos analizados en este estudio, aunque es importante destacar que ambos modelos no han sido validados en condiciones de campo.

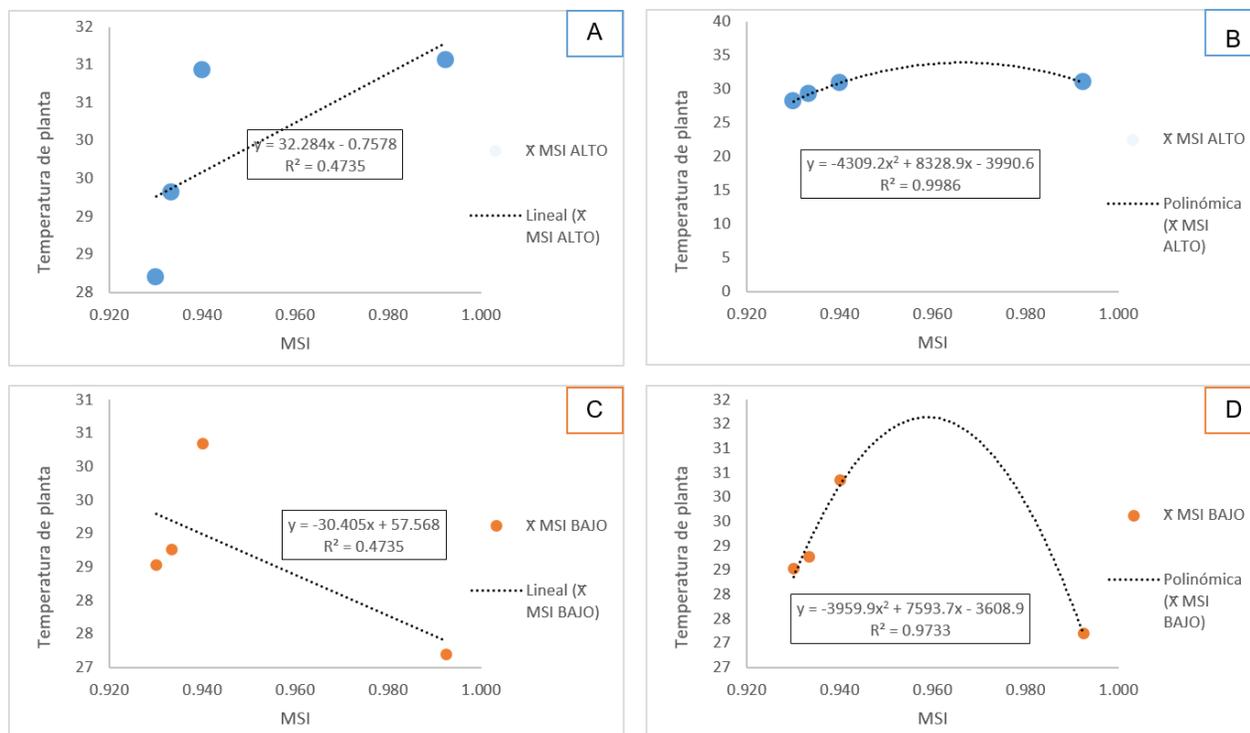


Figura 10 Grafica de dispersión de MSI alto con línea de tendencia lineal. (B) Modelo ajustado de MSI alto con línea de tendencia polinómica de tercer grado. (C) Grafica de dispersión de MSI bajo con línea de tendencia lineal. (D) Modelo ajustado de MSI bajo con línea de tendencia polinómica de tercer grado.

Se obtuvo un coeficiente de correlación positivo entre la temperatura de la planta y el MSI alto ($r = 0.688$, Tabla 13). Este valor sugiere una relación lineal positiva entre ambas variables. Es importante destacar que a medida que la temperatura de la planta aumentaba, se observó un incremento correspondiente en los niveles de MSI alto (Tabla 13).

Tabla 13 Coeficientes de correlación de las medias muestrales de la altura de planta en Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).

	Tratamiento 1	Tratamiento 2
No. de hojas	-0.259	-0.651
Grosor del tallo	0.509	0.474
Altura	0.081	-0.452
SPAD	-0.276	-0.395
Temperatura de suelo	-0.386	0.816
Humedad	0.319	0.346
MSI	0.688	0.505

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

Asimismo, se encontró una correlación positiva entre la temperatura de la planta y el MSI bajo. Este resultado indica que, en el caso de MSI bajo, existe una relación lineal positiva, en comparación con el caso anterior. En otras palabras, a medida que la temperatura de la planta disminuye, se evidencia una disminución en los niveles de MSI bajo (Tabla 14).

Tabla 14 Medias muestrales de la temperatura de la planta, la temperatura del suelo y el contenido de humedad en el suelo para el Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).

Fechas	Tratamiento 1			Tratamiento 2		
	Temperatura de la Planta	Temperatura del Suelo	Humedad	Temperatura de la Planta	Temperatura del Suelo	Humedad
30/08/2023			25.100			28.233
08/09/2023	29.317	37.617	29.833	28.775	35.800	31.533
21/09/2023	30.925	29.025	29.450	30.350	32.975	25.375
29/09/2023	28.200	29.350	24.800	19.039	19.633	25.433
24/10/2023	31.067	27.400	25.867	27.200	22.967	26.333

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

7.5 SPAD (Clorofila)

En este caso se encontró una correlación lineal no significativa entre los índices de estrés (MSI) alto y bajo con la estimación de clorofila (C), con coeficientes de determinación de 0.058 y 0.015, respectivamente. Estos hallazgos indican que ambos modelos no son predictores adecuados para la estimación de clorofila en el cultivo, tanto para los valores de MSI alto como para los de MSI bajo.

Se procedió a realizar ajustes a las curvas utilizando líneas de tendencia polinómicas. Para el caso de MSI alto, se aplicó un ajuste de segundo orden, revelando una correlación de 0.25, lo que llevó a descartar este modelo como predictor por el gran margen de error que existe (ecuación 17).

Sin embargo, al analizar el MSI bajo, se encontró que una línea de tendencia polinómica de tercer orden proporcionó un mejor ajuste, mostrando una correlación significativamente mejor con un R^2 de 0.80 (ecuación 18). Estos resultados sugieren que, en condiciones de MSI bajo, el modelo polinómico de tercer orden puede ser útil para estimar la concentración de clorofila en el cultivo (C).

$$C = 616.88MSI_{ALTO}^2 - 1301.4MSI_{ALTO} + 715.4 \quad (17)$$

$$C = -2259.3MSI_{BAJO}^3 + 5032.5MSI_{BAJO}^2 - 3568.2MSI_{BAJO} + 862.34 \quad (18)$$

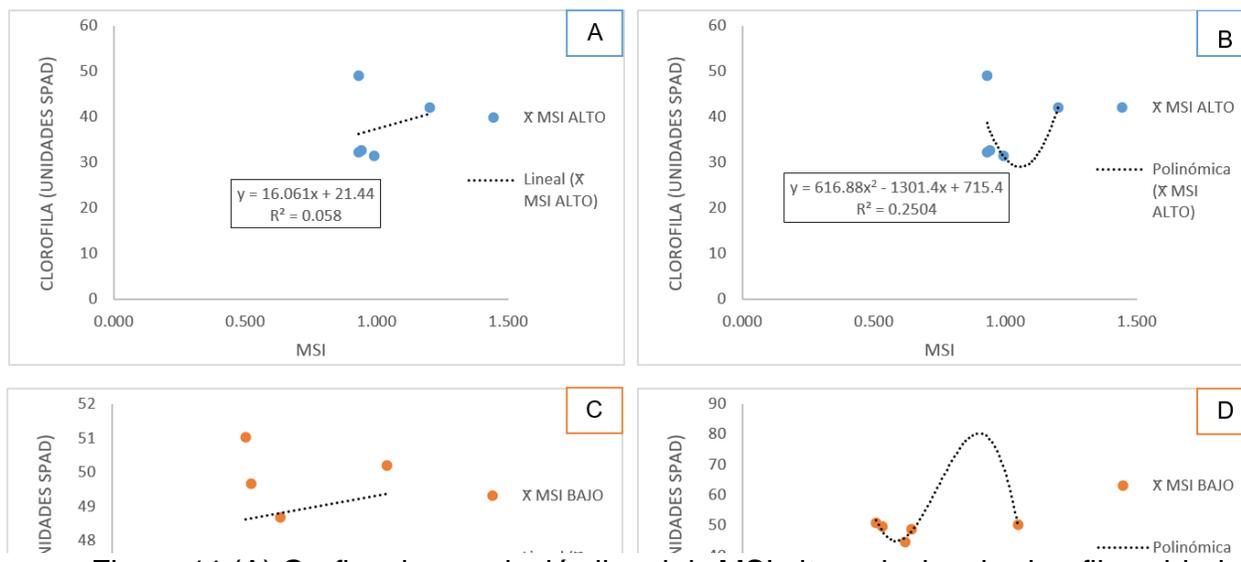


Figura 11 (A) Grafica de correlación lineal de MSI alto y niveles de clorofila unidades de SPAD 502 Plus (Konica Minolta Sensing Inc., Kosmos, México). (B) Modelo ajustado de MSI alto con línea de tendencia polinómica de tercer grado. (C) Grafica de correlación lineal de MSI bajo y niveles de clorofila unidades de SPAD 502 Plus (Konica Minolta Sensing Inc., Kosmos, México). (D) Modelo ajustado de MSI bajo con línea de tendencia polinómica de tercer grado.

Fotovat et al. (2005) descubrieron que el contenido de clorofila en las hojas disminuía de manera significativa en respuesta al estrés hídrico severo en comparación con plantas que tenían una mayor disponibilidad de agua, en siete cultivares de trigo. Esta disminución en el contenido de clorofila se ha atribuido al estrés hídrico (Valverde et al., 2021).

Rozas y Echeverría (1998), mencionan que incluso pequeñas fluctuaciones en la temperatura promedio durante el inicio de la temporada de crecimiento pueden

influir en la concentración de clorofila en las hojas, lo que a su vez afecta el valor de lectura del índice SPAD, sin importar la disponibilidad de nitrógeno

La tabla 15 muestra que a medida que aumenta la temperatura del suelo en el Tratamiento 1, se reduce el nivel de clorofila (medido en unidades SPAD 502 Plus Minolta) en comparación con el Tratamiento 2. Se observa que, a temperaturas más bajas en el suelo, hay una mayor cantidad de clorofila. Sin embargo, al calcular los coeficientes de correlación (Tabla 15), se encuentra una correlación positiva entre el MSI alto y la concentración de clorofila (medida en unidades SPAD 502 Plus Minolta), en comparación con un MSI bajo. A pesar de ser positiva, la correlación en el Tratamiento 1 es menor que en el Tratamiento 2 (Tabla 16).

Tabla 15 Medias muestrales del contenido relativo de clorofila en unidades SPAD, la temperatura del suelo y MSI para Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

Tabla 16 Coeficientes de correlación de las medias muestrales de la clorofila (unidades SPAD) de Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).

	Tratamiento 1	Tratamiento 2
	SPAD	SPAD
No. De hojas	-0.677	-0.098
Grosor del tallo	-0.200	-0.063
Altura	-0.538	-0.190
Temperatura de planta	-0.276	-0.395
Temperatura del suelo	0.989	0.093
Humedad	0.405	-0.034
MSI	0.241	0.124

Fechas	Tratamiento 1			Tratamiento 2		
	SPAD	Temperatura del suelo	MSI	SPAD	Temperatura del suelo	MSI
30/08/2023	42.033		1.200	50.200		1.047
08/09/2023	48.883	37.617	0.933	48.700	35.800	0.640
21/09/2023	32.725	29.025	0.940	49.675	32.975	0.530
29/09/2023	32.192	29.350	0.930	51.008	19.633	0.510
24/10/2023	31.600	27.400	0.992	44.617	22.967	0.618

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

En la primera y tercera fecha, se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la clorofila entre los dos tratamientos. Esto significa que las plantas bajo el tratamiento 1 (MSI alto) tenían niveles de clorofila significativamente diferentes a las del tratamiento 2 (MSI bajo) en esas fechas. En las demás fechas, no se encontraron diferencias significativas, lo que indica que la clorofila no fue significativamente diferente entre los dos tratamientos. En las representaciones visuales donde se destacan las letras "A", los resultados del análisis de la prueba T de Student indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los dos grupos, a excepción de la primera y tercera fecha, donde se observa una variación notable.

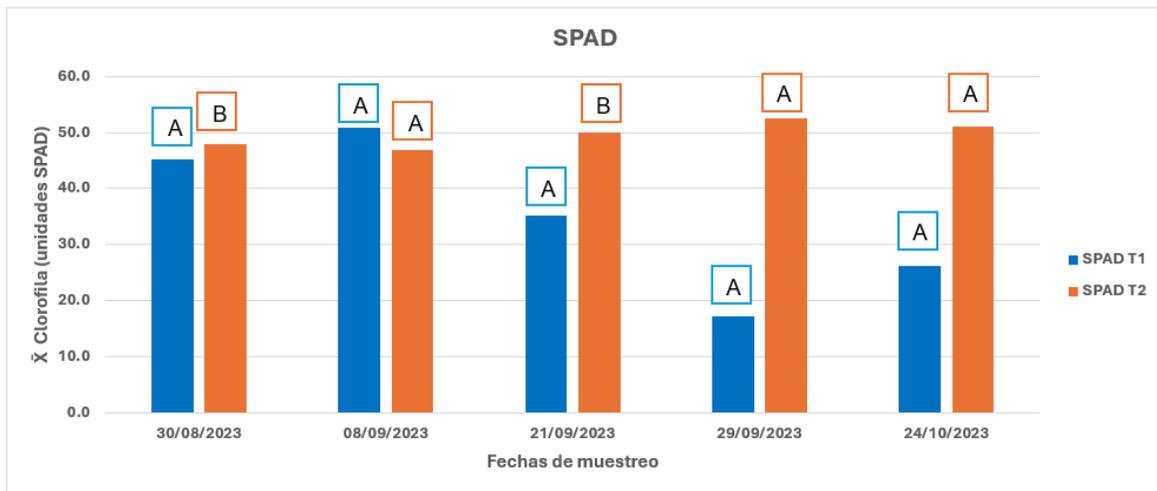


Figura 12 Gráfica de comparación de las medias muestrales del contenido de clorofila en unidades SPAD de las plantas de maíz utilizando el método de la prueba T de Student. Donde: T1 corresponde al Tratamiento 1, con un índice de MSI alto; mientras que T2 se refiere al Tratamiento 2, con un índice de MSI bajo.

7.6 Temperatura del suelo

En el caso del MSI alto, se observó un coeficiente de determinación (R^2) de 0.27, indicando una relación lineal baja con la temperatura del suelo (TS). Por lo que, se descartó el MSI alto como un modelo adecuado debido a su bajo valor del R^2 . Similarmente, para el MSI bajo, el R^2 fue de 0.0005, confirmando la baja correlación lineal y descartando este modelo como predictor confiable.

En un intento de encontrar un ajuste más adecuado, se exploraron líneas de tendencia potenciales. Para el MSI alto, se aplicó una línea de tendencia potencial con un R^2 de 0.29 (ecuación 19), indicando una relación ligeramente mayor, pero aún insuficiente para considerar los valores de MSI alto como un indicador preciso para determinar la temperatura del suelo. En cuanto al MSI bajo, se intentó un ajuste con una línea de tendencia polinómica de segundo orden, sin embargo, el R^2 resultante fue de 0.27 (ecuación 20), sugiriendo nuevamente una relación baja y descartando la utilidad de ambos modelos como indicadores confiables (Figura 16).

De modo que, la temperatura del suelo (TS) presenta una baja correlación con ambos tratamientos, por lo tanto, se descartan los valores de MSI, alto y bajo, como indicadores confiables de la temperatura del suelo en este contexto específico.

$$TS = 26.775MSI_{ALTO}^{-2.536} \quad (19)$$

$$TS = 2184.8MSI_{BAJO}^2 - 2513.6MSI_{BAJO} + 746.5 \quad (20)$$

El coeficiente de correlación (r) entre el MSI alto y la temperatura del suelo es de -0.523. Esta correlación negativa indica que existe una relación inversa entre estas dos variables. En otras palabras, a medida que aumenta la temperatura del suelo, el MSI alto tiende a disminuir. El coeficiente de correlación (r) entre el MSI bajo y la temperatura del suelo es de 0.408. Esta correlación positiva indica que existe una relación directa entre estas dos variables. En otras palabras, a medida que aumenta la temperatura del suelo, el MSI bajo tiende a aumentar (Tabla 17).

Tabla 17 Coeficientes de correlación de las medias muestrales de la temperatura del suelo de Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo).

	Tratamiento 1	Tratamiento 2
Numero De hojas	-0.710	-0.847
Grosor del tallo	0.271	0.883
Altura	-0.643	-0.721
SPAD	0.989	0.093
Temperatura Planta	-0.386	0.816
Humedad	0.629	0.640
MSI	-0.523	0.408

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

En la tabla 18 se muestra que conforme la humedad del suelo disminuye, la temperatura del suelo aumenta, lo que resulta en niveles más altos de estrés hídrico, particularmente en el Tratamiento 1 (MSI alto). Esto concuerda con lo señalado por Ibáñez, (2008), quien sostiene que la temperatura del suelo desempeña un papel fundamental en el desarrollo de las plantas, afectando aspectos como la germinación de las semillas, el crecimiento de las plantas y la descomposición de la materia orgánica en el suelo. Estos factores, a su vez, impactan en la cantidad de dióxido de carbono liberado del suelo a la atmósfera a través de la interfaz planta-aire.

La variación en la temperatura del suelo, como señalan Zhang et al., (2020b) está determinada por su capacidad para retener o liberar calor, la cual está influenciada principalmente por la presencia de aire y humedad en el suelo, ya que la cantidad de sólidos tiende a permanecer relativamente constante.

Tabla 18 Medias muestrales de la temperatura del suelo (TS), el contenido de humedad en el suelo y MSI, en Tratamiento 1 (MSI alto) y Tratamiento 2 (MSI bajo)

Fechas	Tratamiento 1			Tratamiento 2		
	TS	Humedad	MSI	TS	Humedad	MSI
30/08/2023		25.100	1.200		28.233	1.047
08/09/2023	37.617	29.833	0.933	35.800	31.533	0.640
21/09/2023	29.025	29.450	0.940	32.975	25.375	0.530
29/09/2023	29.350	24.800	0.930	19.633	25.433	0.510
24/10/2023	27.400	25.867	0.992	22.967	26.333	0.618

Fuente: Elaboración propia con datos de la investigación.

En el análisis de la prueba T de Student, se ha observado una diferencia estadísticamente significativa en la temperatura del suelo entre los dos tratamientos en la tercera y quinta fecha de análisis, a pesar de no encontrar diferencias

significativas en la mayoría de las fechas. Esto sugiere que, en momentos específicos, como estos, el estrés hídrico puede tener un impacto significativo en la temperatura del suelo. Sin embargo, a lo largo del período de estudio, estas diferencias no son consistentes de manera general. En la Figura 17, representada por las letras "A", los resultados de la prueba indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los dos grupos, excepto en las fechas uno y tres, donde se observa una variación notable señalado por la letra "B".

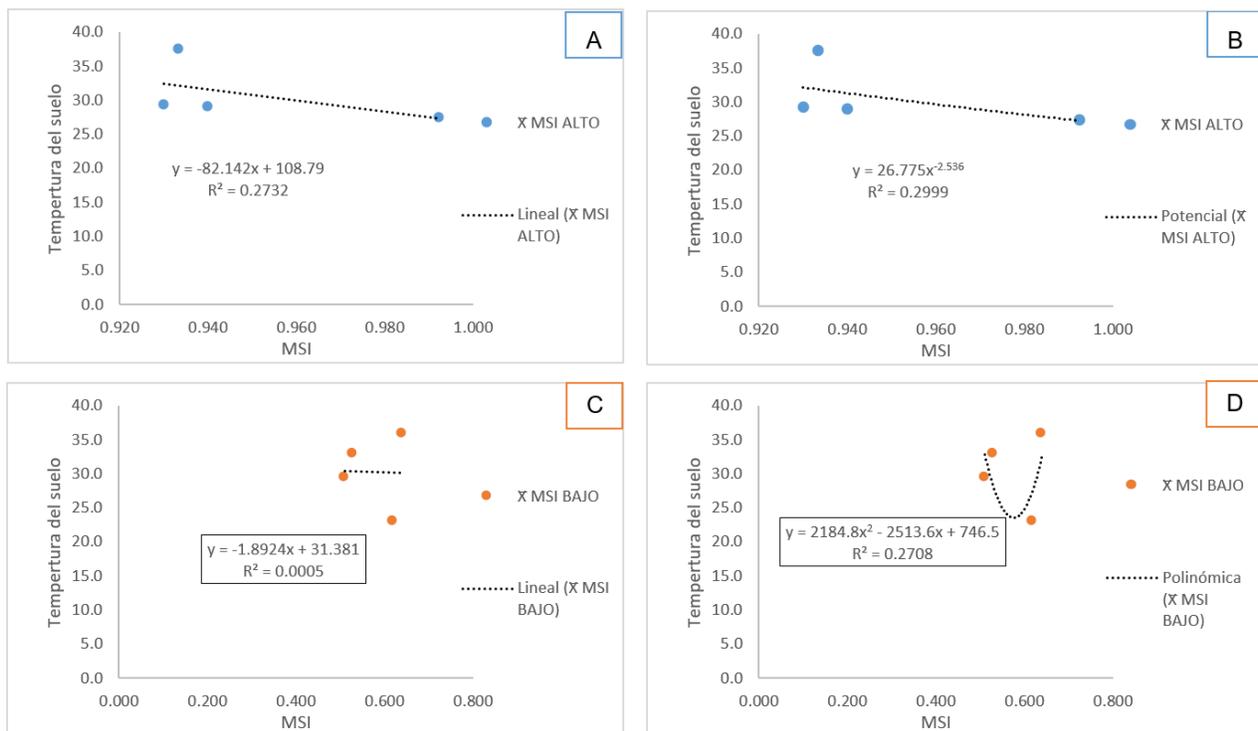


Figura 13 (A) Grafica de correlación lineal de MSI alto y la temperatura del suelo. (B) Modelo ajustado de MSI alto con línea de tendencia potencial. (C) Grafica de correlación lineal de MSI bajo y la temperatura del suelo. (D) Modelo ajustado de MSI bajo con línea de tendencia polinómica de tercer grado.

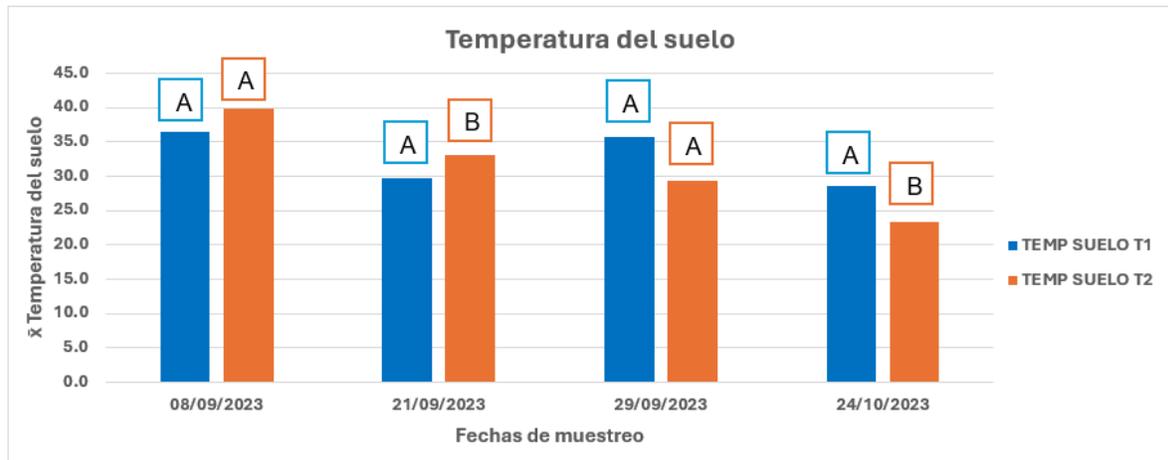


Figura 14 La gráfica compara las medias muestrales de la temperatura del suelo utilizando la prueba T de Student. T1 se asocia al Tratamiento 1, con un índice de MSI elevado, mientras que T2 se relaciona con el Tratamiento 2, que tiene un índice de MSI más bajo.

VII. Conclusiones

- ✓ Existe una alta relación entre el Índice de Estrés Hídrico (MSI alto y bajo) y el contenido de humedad del suelo en el cultivo de maíz.
- ✓ En situaciones de estrés hídrico (MSI alto), el modelo polinómico de segundo orden permitió una estimación más precisa de la humedad del suelo, mientras que en condiciones de MSI bajo, un modelo lineal fue suficiente.
- ✓ se observó que la temperatura de la planta fue un indicador del contenido de humedad del suelo, y mostró una relación inversamente proporcional.
- ✓ Es importante considerar tanto el MSI y la temperatura de la planta para optimizar el riego en el cultivo de maíz.
- ✓ Existe una alta relación entre el Índice de Estrés Hídrico (MSI) y el número de hojas, el grosor del tallo y la altura de la planta.
- ✓ En situaciones de estrés hídrico identificadas por un MSI alto, se observó una disminución en el número de hojas y la altura de la planta, así como un incremento en la temperatura de la planta y en condiciones de MSI bajo, se registraron efectos opuestos.

VIII. Bibliografía

- Abdul Jaleel, C., & Manivannam, P. (2009). *Estrés por sequía en plantas: una revisión sobre las características morfológicas y la composición de los pigmentos*. Revista Internacional de Agricultura y Biología. https://www.researchgate.net/publication/253008137_Drought_Stress_in_Plants_A_Review_on_Morphological_Characteristics_and_Pigments_Composition
- AGRICULTURA. (2016). *La Laguna reporta 4.7 millones de toneladas de producción agrícola en lo que va del año: SAGARPA*.
- Alados Arboledas, L., Pozo Vázquez, D., López Martí, J., & Olmo Reyes, F. J. (1997). Aplicación de los Satélites Meteorológicos Polares al Seguimiento de Procesos Medio Ambientales. *Dialnet*, 471–487.
- Arntzen, D. (2014). *Guía de Estudio: Agua*.
- ASERCA. (2018a). *¿Conoces el origen del maíz?* Gobierno de México.
- ASERCA. (2018b, August 23). *Maíz grano cultivo representativo de México*. Gobierno de México.
- Axayacatl, O. (2023, December 14). Estadísticas de producción de maíz forrajero en México. *Blog Agricultura*.
- AXESS. (2022, April 25). *Los satélites de comunicaciones*. .
- Beyá Marshall, V., & Galleguitos T., M. (2020). *Optimización del riego en paltos y cítricos*. (Universidad de Chile).
- Blessing Ruiz, D. M., & Hernández Morrison, G. T. (2009). *Comportamiento de variables de crecimiento y rendimiento en maíz (Zea mays L.) VAR. NB-6 bajo prácticas de fertilización orgánica y convencional en la finca El Plantel*.
- Borotkanych, N. (2023, March 13). *¿Qué Es La Resolución Espacial En Una Imagen Satelital?* EOS Data Analytics.
- Bribiesca Aguilar, R. (2021, September 27). *Teledetección para elevar la productividad en la agricultura*. AgroFacto.
- Butler, M. J. A., Mouchot, M.-C., Barale, V., & LeBlanc, C. (1990). *Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas: manual introductorio* (295th ed.). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

- Çakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.005>
- Carrasco Sánchez, J. (2017). Respuesta al estrés hídrico en plantas mediterráneas Perspectiva frente al cambio climático. In *Facultad de Farmacia. Universidad Complutense*.
- Castro-Rivera, R., Aguilar-Benítez, G., Peña-Valdivia, C. B., Cruz-Crespo, E., Solís-Oba, M., Lara-Ávila, J. P., Politécnico, I., Ciba, N., Ex, T., San, H., & Molino, J. (2022). Reacciones fisiológicas y crecimiento inicial de maíz tuxpeño con vermicompost y suspensión de riego. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25, 2022.
- Ciampitti, I. (2016). Estrés por sequía en el maíz. *Agronomy EUpdate*, 579.
- Concepción, M., Angélica, C. R., & Franco González, M. (2007). *Diagnóstico ambiental de la Comarca Lagunera*.
- Engelbrecht, B. M. J., & Kursar, T. A. (2003). Comparative drought-resistance of seedlings of 28 species of co-occurring tropical woody plants. *Oecologia*, 136(3), 383–393. <https://doi.org/10.1007/S00442-003-1290-8>
- ESA. (2015, June 17). *Sentinel-2*. The European Agency.
- FAO. (1993). *El maíz en la nutrición humana* (Vol. 25).
- Fernández Castaño, S., Ruiz Gallardo, J. R., & Vela Mayorga, A. (1996). Teledetección. Sus Bases. *Sección de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica*, 183–194.
- Florido Bacallao, M., & Bao Fundadora, L. (2014). Tolerancia a Estrés por Déficit Hídrico en Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) . *Cultivos Tropicales*, 35(3), 70–88.
- Fotovát, R., Valizadeh, M., & Toorchi, M. (2005). *Asociación entre los componentes de eficiencia en el uso del agua y el contenido total de clorofila (SPAD) en trigo (Triticum aestivum L.) en condiciones de buen riego y estrés por sequía*. <https://www.researchgate.net/publication/267248174>
- Giménez, L. (2012). Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo. *Agrociencia Uruguay*, 16(2), 92–102.

- GISGeography. (2023, November 4). *Fichas de firmas espectrales en teledetección*. GISGeography.
- Gonzalez Alquinzones, U. (1995). *El Maíz y su conservación*. Trillas.
- Gonzalez Roglich, M., & Mendoza, E. (2019, February 7). *Introducción a la teldetección*. NASA.
- Hunt Jr., R., & Rock, B. N. (1989). Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances☆. *Remote Sensing of Environment*, 30(1), 43–54. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90046-1)
- Ibáñez, J. J. (2008, January 21). Temperatura del Suelo y Microclimatología. *Bilología y Ecología Del Suelo*.
- Kogut, P. (2021, November 9). *Teledetección Satelital: Tipos, Usos Y Aplicaciones*.
- Lauer, J. (2018). What Happens Within The Corn Plant When Drought Occurs? *UW-Madison*, 2.
- Laurentino, S. (2014). *Aplicación de la teledetección en el análisis de daños en masas de coníferas en la provincia de Burgos-España* [Máster en Investigación en Ingeniería para la Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales]. Universidad de Valladolid.
- Lázar, Tomás. (2003). Taiz, L. and Zeiger, E. Plant physiology. 3rd edn. *Annals of Botany*, 91(6), 750–751. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg079>
- Luna-Flores, W., Estrada-Medina, H., Morales-Maldonado, E., & Álvarez-Rivera, O. (2015). Estrés por déficit hídrico en plantas. *Anim. Sci., Ex Agro-Ciencia*, 30(3), 61–69.
- Medrano, H., Na Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., & Gulías, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas Cas, Nº*, 43, 63–84.
- Moreno, L. Patricia. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 27(2), 179–191.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.ARPLANT.59.032607.092911>
- Nielsen, B. (2020, June). Estrés por sequía temprana en el maíz. *King Corn*.

- OCDE. (2003). *Consensus Document on the Biology of Zea mays subsp. mays (Maize)*.
- Oliveros Díaz, M., & Caicedo Vera, J. (2023). La conductancia estomática (gs), importancia, función y factores de influencia. Medición de la conductancia estomática (gs) a través del porómetro de difusión estable en diferentes cultivos. *Cosmoagro*.
- Paliwal, R. L., Granados, G., Lafitte, H. R., & Violic, A. D. (2001). *El maíz en los Trópicos: Mejoramiento y producción* (Vol. 28). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Parkash, V., & Singh, S. (2020). A Review on Potential Plant-Based Water Stress Indicators for Vegetable Crops. *Sustainability*, 12(10), 3945. <https://doi.org/10.3390/su12103945>
- Pérez Leal, F. (2017). *Fisiología vegetal*.
- Pino V., E., Montalván D., I., Vera M., A., & Ramos F, L. (2019). La conductancia estomática y su relación con la temperatura foliar y humedad del suelo en el cultivo del olivo (*Olea europaea* L.), en periodo de maduración de frutos, en zonas áridas. La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia (Arica)*, 37(4), 55–64. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000400055>
- Potters, G., Pasternak, T. P., Guisez, Y., Palme, K. J., & Jansen, M. A. K. (2007). Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends in Plant Science*, 12(3), 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2007.01.004>
- Rodríguez Pérez, D., Sánchez Carnero, N., Domínguez Gómez, J. A., & Marta Pastrana, C. S. (2015). *Cuestiones de Teledetección* (Editorial UNED).
- Sellés, G., & Ferreyra, R. (2008). El agua, ¿por qué es tan importante para las plantas? *Tierra Adentro*, 18–21.
- SEMAR. (2009, April 3). *Percepción Remota*.
- Shao, H.-B., Chu, L.-Y., Jaleel, C. A., & Zhao, C.-X. (2008). Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *Comptes Rendus Biologies*, 331(3), 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2008.01.002>

- Shock, C. C., & Wang, F.-X. (2011). Soil Water Tension, a Powerful Measurement for Productivity and Stewardship. *HortScience*, 46(2), 178–185. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.2.178>
- SIAP. (2023). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*.
- Silva Laurentino, M. L. (2014). *Aplicación de la teledetección en el análisis de daños en masas de coníferas en la provincia de Burgos-España*. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/6649>
- Simón, M. R., & Golik, S. I. (2018). *Cereales de verano* (1st ed.). Editorial de la Universidad de La Plata.
- Singh, B., & Singh, G. (2006). Effects of controlled irrigation on water potential, nitrogen uptake and biomass production in *Dalbergia sissoo* seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 55(1–2), 209–219. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2004.11.001>
- Sobrino, JA., Raissouni, N., Kerr, Y., Oliosio, A., López García, MJ., Belaid, A., El Kharraz, MH., Cuenca, J., & Dempere, L. (2000). *Teledetección* (J. A. Sobrino, Ed.). Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia.
- Somarriba Rodríguez, C. (1998). *Granos básicos*.
- Sotomayor, O., Ramírez, E., & Martínez, H. (2021). *Digitalización y cambio tecnológico en las mipymes agrícolas y agroindustriales en América Latina*. Naciones Unidas.
- Sterling, T. M., & Hernández R., I. (2005). *La Transpiración-Movimiento del Agua a Través de las Plantas La Transpiración-Descripción y Objetivos*. <https://passel-old.unl.edu/pages/printinformationmodule.php?idinformationmodule=1123617035>
- Tarazona, Y. (2019, September 17). *Teledetección por microondas*. APROGIS.
- Thelen, K. (2007, June 28). *Evaluación de los efectos del estrés por sequía en el rendimiento del maíz*. Extensión de La Universidad Estatal de Michigan.
- Tribó, F. (2018). Manejo del maíz en condiciones de estrés hídrico. *Crop Focus*.
- Valverde, J. C., Arias-Aguilar, D., Montero-Zeledón, E., & Gutierrez-Fallas, D. (2021). Fluorescencia, reflectancia y respuesta fisiológica al estrés hídrico en

- plántulas de *Gmelina arborea* Roxb. *Uniciencia*, 35(1), 320–334. <https://doi.org/10.15359/ru.35-1.20>
- Vargas Suárez, J. L. (2022). *Estado del arte :aplicación de la teledetección en áreas cultivadas de pastos y forrajes con fines de pastoreo*. www.ucundinamarca.edu.co
- Villalobos González, A., López Castañeda, C., Miranda Colín, S., Aguilar Rincón, V. H., & López Hernández Mónica Beatriz. (2016). Relaciones hídricas en maíces de Valles Altos de la Mesa Central de México en condiciones de sequía y fertilización nitrogenada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), 1651–1665.
- Villalobos Gonzalez, A., López Castañeda, M. C., Aguilar Rincón, S., Heber, V., & López Hernández, M. B. (2016). Relaciones hídricas en maíces de Valles Altos de la Mesa Central de México en condiciones de sequía y fertilización nitrogenada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), 1651–1665.
- Villatoro, B. (2020). Uso de índices de vegetación ndwi y msi obtenidos de imágenes satelitales sentinel-2 y landsat 8 para monitoreo de humedad, como indicador de momento óptimo de cosecha en caña de azúcar. *CENGICAÑA*, 225–243.
- Wang, B., Liu, C., Zhang, D., He, C., Zhang, J., & Li, Z. (2019). Effects of maize organ-specific drought stress response on yields from transcriptome analysis. *BMC Plant Biology*, 19(1), 335. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1941-5>
- Zhang, Z., Pan, Z., Pan, F., Zhang, J., Han, G., Huang, N., Wang, J., Pan, Y., Wang, Z., & Peng, R. (2020a). The change characteristics and interactions of soil moisture and temperature in the farmland in Wuchuan County, Inner Mongolia, China. *Atmosphere*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/ATMOS11050503>
- Zhang, Z., Pan, Z., Pan, F., Zhang, J., Han, G., Huang, N., Wang, J., Pan, Y., Wang, Z., & Peng, R. (2020b). The Change Characteristics and Interactions of Soil Moisture and Temperature in the Farmland in Wuchuan County, Inner Mongolia, China. *Atmosphere*, 11(5), 503. <https://doi.org/10.3390/atmos11050503>