



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**RESPUESTA DE ALGUNAS VARIEDADES DE TRIGO AL ESTRÉS
ABIÓTICO**

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN BIOTECNOLOGÍA AGRÍCOLA

PRESENTA:

MAGDA ELENA GARCÍA MEDINA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN PORFIRIO LEGARIA SOLANO



Chapingo, Estado de México, mayo de 2026

RESPUESTA DE ALGUNAS VARIEDADES DE TRIGO AL ESTRÉS ABIÓTICO

Tesis realizada por la C. Magda Elena García Medina bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN BIOTECNOLOGÍA AGRÍCOLA

DIRECTOR:


DR. JUAN PORFIRIO LEGARIA SOLANO

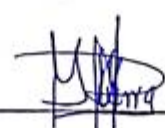
ASESOR:


DR. JAIME SAHAGÚN CASTELLANOS

ASESOR:


DR. LUIS ÁNGEL BARRERA GUZMÁN

ASESORA:


DRA. DIANA GUERRA RAMÍREZ

CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS	VII
INDICE DE CUADROS	VIII
DEDICATORIA.....	XII
AGRADECIMIENTOS	XIII
DATOS BIOGRÁFICOS.....	XIV
RESUMEN	XV
ABSTRACT	XVI
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general	3
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Hipótesis.....	4
1.4 Metas.....	4
2 REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 El Origen del trigo	5
2.2 Clasificación	8
2.2.1 Taxonomía	8
2.2.2 Morfología.....	9
2.3 Distribución y Producción.....	10
2.3.1 Mundial.....	10
2.3.2. Nacional	12
2.4 Contenido nutricional.....	13
2.5 Resistencia a factores abióticos.....	15
2.5.1 Estrés por salinidad	17
2.5.2 Estrés por sequía.....	19
2.6 Caracterización molecular.....	21
2.6.1 Marcadores ISSR.....	21
2.7 Caracterización morfológica.....	22
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26

3.1.	Localización del experimento.....	26
3.3.	Análisis morfológico en etapa de germinación.....	29
3.3.1.	Diseño experimental.....	30
3.3.2.	Tratamiento previo del material genético.....	30
3.3.3.	Tratamientos para estrés por salinidad.....	31
3.3.4.	Tratamientos para estrés hídrico.....	32
3.3.5.	Toma de datos.....	33
3.3.5.1.	Porcentaje de germinación	34
3.3.5.2.	Raíces	34
3.3.5.3.	Parte aérea	34
3.3.5.4.	Peso fresco	34
3.3.5.5.	Pigmentación antocianica.....	35
3.4.	Análisis molecular	35
3.4.1.	Extracción y purificación de ADN	36
3.4.2.	Cuantificación y calidad de ADN genómico	38
3.4.3.	Preparación de materiales para PCR	39
3.4.4.	Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR)	40
3.4.5.	PCR por genotipos	42
3.4.6.	PCR para variedades criollas	43
3.4.7.	PCR de segregación masal.....	43
3.4.8.	Electroforesis en geles de agarosa	45
3.4.9.	Análisis de los datos	46
3.5.	Análisis bioquímico	47
3.5.1.	Acondicionamiento de las muestras	47
3.5.2.	Contenido Relativo de Agua (CRA).....	48
3.5.3.	Contenido de Clorofila.....	49
3.5.4.	Contenido de Azúcares.....	50
3.5.5.	Análisis de datos	51
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
4.1.	Evaluación morfológica en etapa de germinación	52

4.1.1.	Respuesta a estrés por salinidad en etapa de germinación	52
4.1.1.1.	Porcentaje de germinación	53
4.1.1.2.	Raíces	60
4.1.1.2.1.	Longitud de raíz.....	60
4.1.1.2.2.	Número de Radículas	62
4.1.1.2.3.	Número de Raíces.....	63
4.1.1.3.	Parte aérea.....	64
4.1.1.3.1.	Longitud de la hoja	65
4.1.1.3.2.	Longitud del coleóptilo	66
4.1.1.3.3.	Longitud de la parte aérea	68
4.1.1.4.	Peso fresco	69
4.1.1.5.	Pigmentación antocianica.....	70
4.1.1.6.	Correlación de parámetros evaluados para raíces y parte aérea	72
4.1.2.	Respuesta de las variedades de trigo a estrés hídrico con PEG-8000 en etapa de germinación	72
4.1.2.1.	Porcentaje de germinación	73
4.1.2.2.	Raíces	78
4.1.2.2.1.	Longitud de raíz.....	78
4.1.2.2.2.	Número de Radículas	80
4.1.2.2.3.	Número de Raíces.....	81
4.1.2.3.	Parte aérea.....	83
4.1.2.3.1.	Longitud de la hoja	83
4.1.2.3.2.	Longitud del coleóptilo	85
4.1.2.3.3.	Longitud de la parte aérea	87
4.1.2.4.	Peso fresco	89
4.1.2.5.	Pigmentación antocianica.....	90
4.1.2.6.	Relación entre la longitud de raíz y la parte aérea	91
4.2.	Análisis molecular	92
4.2.1.	Análisis por individuo.....	92
4.2.1.1.	Construcción del dendrograma y determinación de relaciones genéticas entre las variedades	94

4.2.1.1.1.	Dendrograma de relaciones entre las variedades evaluadas para estrés salino.....	94
4.2.1.1.2.	Dendrograma de relaciones entre las variedades evaluadas para estrés hídrico	97
4.2.1.2.	Análisis de escalado multidimensional para determinar la formación de grupos entre las variedades de trigo.....	100
4.2.1.2.1.	Gráficos en 2D y 3D para variedades de trigo sometidas a estrés salino	100
4.2.1.2.2.	Gráficos en 2D y 3D para variedades de trigo sometidas a estrés hídrico	102
4.2.2.	Análisis de variedades criollas	104
4.2.3.	Análisis de segregación masal	107
4.3.	Análisis bioquímico	109
4.3.1.	Contenido relativo de agua (CRA).....	110
4.3.1.1.	Salinidad	110
4.3.1.2.	Estrés hídrico	112
4.3.2.	Contenido de clorofila	114
4.3.2.1.	Salinidad	114
4.3.2.2.	Estrés hídrico	118
4.3.3.	Contenido de azúcares	120
4.3.3.1.	Salinidad	121
4.3.3.2.	Estrés hídrico	122
5.	CONCLUSIONES	123
6.	LITERATURA CITADA.....	126

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de germinación de las semillas de <i>Triticum aestivum</i> y <i>T. durum</i> en el tratamiento testigo (0 mM de NaCl).....	55
Figura 2. Porcentaje de germinación de las semillas de <i>Triticum aestivum</i> y <i>T. durum</i> bajo estrés severo por salinidad.	56
Figura 3. Porcentaje de germinación de semillas de <i>T. aestivum</i> y <i>T. durum</i> sometidas a estrés salino (0 mM, 100 mM, 200 mM, 350 mM).	59
Figura 4. Porcentaje de germinación de semillas de <i>T. aestivum</i> y <i>t. durum</i> sometidas al tratamiento testigo (0 MPa).....	77
Figura 5. Porcentaje de germinación de semillas de <i>T. aestivum</i> y <i>t. durum</i> bajo tratamiento severo de estrés hídrico (-1 MPa).	77
Figura 6 . Dendrograma molecular ISSR de variedades de <i>Triticum aestivum</i> y <i>T. durum</i>	96
Figura 7 . Dendrograma molecular ISSR de variedades de <i>Triticum aestivum</i> y <i>T. durum</i> evaluadas para estrés hídrico.	99
Figura 8 . Análisis de escalado multidimensional en variedades de trigo sometidas a estrés salino, 11A) Gráfico 3D, 11B) Gráfico 2D.	101
Figura 9. Análisis de escalado multidimensional en variedades de trigo sometidas a estrés hídrico, la numeración de las variedades es referenciada en el Cuadro 35. 12A) Gráfico 3D, 12B) Gráfico 2D.	103
Figura 10. Dendrograma de relaciones entre las variedades criollas de trigo y las variedades de <i>Triticum aestivum</i> y <i>T. durum</i> , sometidas a estrés salino.....	105
Figura 11. Dendrograma de relaciones entre las variedades criollas de trigo y las variedades de <i>Triticum aestivum</i> y <i>T. durum</i> , sometidas a estrés hídrico.	106
Figura 12. Comparación de patrones de bandas entre mezclas de individuos de variedades tolerantes y susceptibles a estrés salino. TaT= <i>Triticum aestivum</i> Tolerante, TaS= <i>Triticum aestivum</i> susceptible. A) Iniciador A8, B) Iniciador DBDAC7	107
Figura 13. Comparación del patrón de bandas entre individuos de <i>Triticum durum</i> sin tolerancia o susceptibilidad reportada e individuos con susceptibilidad reportada, para el iniciador CT8RC.....	108
Figura 14. Comparación del patrón de bandas entre individuos <i>Triticum aestivum</i> tolerante y susceptible, para el iniciador A8. TaT= <i>Triticum aestivum</i> tolerante, TaS= <i>Triticum aestivum</i> susceptible.	108
Figura 15. Contenido relativo de agua (%) de variedades de trigo bajo estrés salino.	112
Figura 16. Contenido relativo de agua (CRA %), de variedades de trigo bajo estrés hídrico.	114
Figura 17. Clorofila total de variedades de trigo bajo diferentes condiciones de estrés salino.	117
Figura 18. Contenido de clorofila total de variedades de trigo bajo estrés hídrico.	120

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición morfológica de las plantas de trigo.	23
Cuadro 2. Escala de Zadoks para las etapas de desarrollo del trigo.	24
Cuadro 3. Variedades de trigo evaluadas en el presente trabajo, sometidas a estrés hídrico y salino.	27
Cuadro 4. Variedades criollas para caracterización molecular.	29
Cuadro 5. Tratamientos para estrés por salinidad (NaCl), en milimoles.	31
Cuadro 6. Tratamientos para estrés hídrico (PEG-8000), en Megapascals....	32
Cuadro 7. Características de los iniciadores utilizados en PCR para la obtención de los marcadores moleculares ISSR.	41
Cuadro 8. Secuencia de los Iniciadores utilizados en la PCR para la obtención de marcadores ISSR de variedades criollas.	43
Cuadro 9. Grupos evaluados en la prueba de segregación masal.	44
Cuadro 10. Secuencia de los Iniciadores utilizados en la prueba de segregación masal.	45
Cuadro 11. Porcentaje de germinación al día 14 para variedades sometidas a estrés salino.....	54
Cuadro 12. Porcentaje de germinación de las semillas bajo el tratamiento testigo (0 mM de NaCl).	57
Cuadro 13. Porcentaje de germinación de las semillas bajo estrés severo por salinidad (350 mM de NaCl).....	58

Cuadro 14. Porcentaje de germinación de las semillas bajo cuatro tratamientos de estrés salino (NaCl).	59
Cuadro 15. Reducción en la longitud de raíz en cm bajo tratamientos de estrés salino respecto al testigo (0 mM de NaCl).	61
Cuadro 16. Número promedio de radículas de plantas sometidas a diferentes condiciones de estrés salino.	62
Cuadro 17. Número promedio de raíces por variedad bajo los tratamientos de estrés salino.	64
Cuadro 18. Reducción de la longitud de las hojas (cm) a 100 mM de NaCl, en relación al testigo.	66
Cuadro 19. Reducción en la longitud del coleóptilo (cm) a altas concentraciones de salinidad.	67
Cuadro 20. Reducción de la parte aérea (cm) por estrés salino en relación al tratamiento testigo.	69
Cuadro 21. Reducción en peso fresco (g) de plantas por estrés salino, respecto al tratamiento testigo.	70
Cuadro 22. Agrupamiento de variedades según pigmentación antociánica presentada.	71
Cuadro 23. Valores de correlación entre las variables evaluadas durante la germinación bajo condiciones de estrés salino.	72
Cuadro 24. Porcentaje de germinación de semillas de variedades de trigo sometidas a tratamientos de estrés hídrico.	74

Cuadro 25. Porcentaje de germinación de las semillas bajo el tratamiento testigo.	76
Cuadro 26. Porcentaje de germinación de semillas de 17 variedades de trigo bajo el tratamiento severo de estrés hídrico.	76
Cuadro 27. Reducción de longitud de raíz (cm) bajo estrés hídrico respecto al testigo.	79
Cuadro 28. Número de radículas por planta bajo condiciones de estrés hídrico severo.	81
Cuadro 29. Número promedio de raíces por planta desarrolladas por las variedades de trigo bajo condiciones de estrés hídrico.	82
Cuadro 30. Reducción en la longitud de la hoja de variedades de trigo bajo estrés hídrico.	85
Cuadro 31. Respuesta en la longitud del coleóptilo de variedades de trigo bajo condiciones de estrés hídrico.....	87
Cuadro 32. Reducción de la parte aérea de variedades de trigo bajo condiciones de estrés hídrico.....	88
Cuadro 33. Reducción en el peso fresco de variedades de trigo bajo estrés hídrico.	90
Cuadro 34. Agrupamiento de variedades de trigo según pigmentación antociánica presentada.....	91
Cuadro 35. Correlación de parámetros evaluados en variedades de trigo bajo condiciones de estrés hídrico severo.....	92
Cuadro 36. Polimorfismo detectado por los iniciadores ISSR durante la caracterización molecular de variedades de <i>Triticum aestivum</i> y <i>Triticum durum</i>	93

Cuadro 37. Relación entre las variedades y la numeración asignada en dendrograma en estrés salino.....	94
Cuadro 38. Relación entre las variedades y la numeración asignada para dendrograma en estrés hídrico.	97
Cuadro 39. Reducción en el Contenido Relativo de Agua (%) de variedades de trigo bajo estrés salino.	111
Cuadro 40. Reducción en el Contenido Relativo de Agua (%) de variedades de trigo bajo estrés hídrico.....	113
Cuadro 41. Reducción en el contenido de clorofila en variedades de trigo bajo estrés salino.....	116
Cuadro 42. Reducción en el contenido de clorofila de variedades de trigo bajo estrés hídrico, respecto al tratamiento testigo (0 MPa)	119
Cuadro 43. Contenido de azúcares en variedades de trigo bajo estrés salino.	121
Cuadro 44. Incremento en la concentración de azúcares en plantas de trigo sometidas a estrés hídrico.	122

DEDICATORIA

A todas las personas que me acompañaron en el transcurso de esta investigación, por las palabras de aliento y consejos que me brindaron.

A Israel Rojas y nuestra pequeña Elisa, gracias por la paciencia, amor, apoyo y compañía.

A mi madre, hermanos y hermana, gracias por apoyarme siempre.

A mis compañeros de maestría, por los buenos y malos momentos compartidos.

AGRADECIMIENTOS

A la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)**, por otorgar el financiamiento que permitió llevar a cabo esta investigación.

A la **Universidad Autónoma Chapingo**, por abrirme las puertas y permitirme formar parte de su alumnado para continuar desarrollándome como profesional.

Al **Departamento de Fitotecnia** y personal de **Coordinación de Estudios de Posgrado**, gracias por brindarme el apoyo y orientación necesaria para cumplir con éxito los requerimientos académicos propios del programa.

Al **Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT)**, por proporcionar el material genético utilizado en la presente investigación.

Al **Dr. Juan Porfirio Legaria Solano**, por mostrarme lo fascinante que es la Biología Molecular a través de sus clases, por orientarme como Director de la presente investigación, gracias por la paciencia y el tiempo dedicados.

A mi Comité Asesor, **Dr. Jaime Sahagún Castellanos, Dr. Luis Ángel Barrera Guzmán y Dra. Diana Guerra Ramírez**, por brindarme su tiempo y consejos en la revisión de este trabajo.

Al **Dr. Juan Martínez Solís †**, por todos los consejos brindados a mis compañeros y a mí, por hacerse notar con su alegría y por los buenos ratos compartidos durante las clases.

A mi esposo y nuestra hija, por acompañarme y apoyarme en cada momento.



DATOS BIOGRÁFICOS

La autora de esta tesis nació en Cd. Obregón, Sonora, México, el 17 de febrero de 1993. Realizó sus estudios en Ingeniería en Biotecnología en el Instituto Tecnológico de Sonora, del cual se tituló con el trabajo de tesis llamado “Determinación de Metales Pesados en el suelo, agua y polvo del Valle del Yaqui”, egresando en enero de 2016. Ejerció como profesional de laboratorio químico en la industria privada de 2016 al 2022 en Ciudad de México. En 2023 viaja al extranjero para mejorar las habilidades en el idioma inglés, donde permanece durante un año.

En 2024 ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo para dar inicio a sus estudios con el fin de obtener el título de Maestro en Ciencias en Biotecnología Agrícola.

RESUMEN

RESPUESTA DE ALGUNAS VARIEDADES DE TRIGO AL ESTRÉS ABIÓTICO

El estrés abiótico es una de las principales afectaciones que sufren los cultivos, ya sea por salinidad o por sequía; provoca en la planta una serie de respuestas fisiológicas, químicas y bioquímicas, que terminan inhibiendo la productividad. Los objetivos de la presente investigación fueron evaluar la respuesta morfológica, bioquímica y molecular de 32 variedades de trigo clasificadas por el CIMMYT como tolerantes y susceptibles a estrés hídrico y salino y cinco variedades de trigo criollo no clasificadas; así como la caracterización molecular de las mismas. Las condiciones de estrés hídrico se generaron utilizando PEG-8000 y las de estrés por salinidad con NaCl. Los tratamientos del estrés hídrico fueron: 0, -0.4, -0.8 y -1.0 MPa y los de salinidad: 0, 100, 200 y 350 mM. La variedad BW20313 (*Triticum aestivum*) fue la única que germinó bajo condiciones de estrés severo por salinidad (350 mM de NaCl). También, se observó una correlación alta entre los datos obtenidos de raíces (longitud, y número) con la longitud de la hoja para plantas sometidas a estrés salino durante la etapa de germinación. Por otro lado, las variedades BW34025 y DW4477 presentaron un 100 % de germinación bajo condiciones de estrés hídrico severo (-1 MPa). Además, cuatro variedades de la especie *Triticum durum* sin reporte de tolerancia o susceptibilidad, incrementaron la longitud de sus raíces al ser sometidas a estrés hídrico con PEG-8000. Los análisis bioquímicos indicaron que tanto el estrés hídrico como el salino afectan fuertemente a las variables contenido relativo de agua (%CRA), clorofila A, clorofila B y clorofila total, y el contenido de azúcares. Finalmente, los análisis moleculares permitieron determinar relaciones genéticas entre las variedades de trigo evaluadas y la identificación de patrones de bandas que presentan diferencias entre variedades de trigo tolerantes y susceptibles.

Palabras clave: *Triticum aestivum*, *Triticum durum*, estrés hídrico, estrés salino, tolerancia, susceptibilidad, CRA, respuesta bioquímica, respuesta morfológica, ISSR.

Tesis de Maestría en Ciencias en Biotecnología Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Magda Elena García Medina

Director de Tesis: Juan Porfirio Legaria Solano

ABSTRACT

RESPONSE OF SOME WHEAT VARIETIES TO ABIOTIC STRESS

Abiotic stress is one of the main factors affecting crops, whether due to salinity or drought; it triggers a series of physiological, chemical, and biochemical responses in the plant, which ultimately inhibit productivity and yield. The objectives of this study were to evaluate the morphological, biochemical, and molecular response of 32 wheat varieties classified by CIMMYT as tolerant and susceptible to drought and salt stress and five unclassified landrace wheat varieties; as well as to perform the molecular characterization of these varieties. Drought conditions were induced using PEG-8000, and salinity stress conditions using NaCl. The drought treatments were: 0, -0.4, -0.8, and -1.0 MPa, and the salinity treatments: 0, 100, 200, and 350 mM. The BW20313 variety (*Triticum aestivum*) was the only one to germinate under severe salinity stress conditions (350 mM NaCl). Additionally, a high correlation was observed between the data obtained from roots (length and number) and leaf length for plants subjected to salinity stress during the germination stage. On the other hand, the varieties BW34025 and DW4477 showed 100% germination under conditions of severe water stress (-1 MPa). Furthermore, four varieties of the species *Triticum durum* with no reported tolerance or susceptibility increased the length of roots when subjected to water stress with PEG-8000. Biochemical analyses indicated that both, drought and salt stress strongly affect the variables relative water content (%RWC), chlorophyll A, chlorophyll B, and total chlorophyll, as well as sugar content. Finally, molecular analyses allowed the determination of genetic relationships among the evaluated wheat varieties and the identification of banding patterns that show differences between tolerant and susceptible wheat varieties.

Key words: *Triticum aestivum*, *Triticum durum*, drought, salinity, tolerant, susceptibility, RWC, biochemical response, morphological response, ISSR.

Thesis of Master in Science in Agriculture Biotechnology, Universidad Autonoma Chapingo
Author: Magda Elena García Medina
Advisor: Juan Porfirio Legaria Solano

1 INTRODUCCIÓN

El trigo, junto con el maíz y el arroz, se encuentra entre los tres cereales con mayor importancia y cultivo. A nivel mundial se cosechan más de 700 millones de toneladas por año (Fideicomisos en Relación a la Agricultura [FIRA], 2021), es un cereal ampliamente consumido por los seres humanos. De acuerdo con la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2017), se trata del segundo cereal más importante en la alimentación de los mexicanos, el consumo promedio es de 57.4 kg per cápita al año. La producción de este cereal se divide en trigo cristalino y trigo harinero, es utilizado para la elaboración de pastas y producción de panes, productos de repostería y harinas, respectivamente. El trigo se mantiene como la fuente más importante de proteínas vegetales y calorías para la alimentación a nivel mundial, debido al alto valor energético y a un mayor contenido de proteínas comparado con el maíz y el arroz. Se cosecha en todo el mundo, aunque se menciona que en el hemisferio norte hay mejores condiciones para su cultivo (FIRA, 2015).

En lo que respecta a México, las principales variedades cultivadas son las siguientes.

- Trigo cristalino (*Triticum durum*). Su principal uso es la fabricación de pastas, galletas, bebidas y combustible.
- Trigo harinero (*Triticum aestivum*). Su principal uso es la producción de pan.

El trigo es una especie con un amplio rango de adaptación, crece y se desarrolla en ambientes muy diversos, por lo tanto, puede sembrarse tanto en invierno como en verano, sin embargo, la productividad del trigo está gobernada por complejas interacciones entre el clima y los procesos ecofisiológicos que estos conllevan (Hernández et al., 2015). Con el aumento de los desastres climatológicos que pueden presentarse, es importante investigar y desarrollar técnicas que aseguren la supervivencia de los cultivos que indudablemente estarán sometidos a estrés abiótico durante alguna etapa de su producción. Según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2023), las temperaturas extremas se encuentran entre los principales factores que afectan directa e indirectamente a la producción agrícola.

El estrés abiótico se refiere a factores ambientales que alteran los procesos fisiológicos y metabólicos de las plantas; las plantas sometidas a estrés abiótico presentan reducción en el crecimiento, desarrollo y rendimiento, lo que implica modificaciones significativas en la productividad, que puede verse reflejado en la disminución de las espigas, la disminución de los granos por espiga y la reducción del peso de los granos. Por este motivo se tiene como objetivo evaluar la respuesta de variedades resistentes y susceptibles de *T. durum* y *T. aestivum* bajo condiciones de estrés por salinidad y estrés por sequía.

1.1 Objetivo general

Evaluar la respuesta morfológica, bioquímica y molecular de variedades resistentes y variedades susceptibles a sequía y salinidad, de *T. aestivum* y *T. durum*, así como cinco variedades primitivas de trigo, mediante la medición de caracteres morfológicos durante la etapa de reproducción, análisis moleculares mediante marcadores ISSR y análisis de los parámetros bioquímicos, con el fin de realizar la caracterización morfológica y molecular de las variedades, así como detectar polimorfismos.

1.2 Objetivos específicos

- Evaluar la respuesta fenotípica de 32 genotipos de trigo sometidos a estrés hídrico y a estrés por salinidad.
- Caracterizar mediante análisis bioquímicos las respuestas de los genotipos de trigo sometidos a estrés hídrico y salinidad.
- Detectar polimorfismos entre las variedades de trigo evaluadas, utilizando marcadores ISSR.

1.3 Hipótesis

Las variedades resistentes a estrés hídrico y estrés por salinidad mostrarán mejores respuestas morfológicas y bioquímicas, que las susceptibles, para la mayoría de los parámetros evaluados, bajo condiciones de estrés.

Las variedades resistentes presentarán mejores respuestas en las pruebas de germinación, contenido relativo de agua (CRA), crecimiento de raíz y parte aérea y demás parámetros evaluados, en comparación con las variedades susceptibles; a la vez que, el incremento del estrés abiótico influirá en las respuestas morfológicas durante la germinación.

1.4 Metas

Realizar un análisis de marcadores moleculares por poblaciones considerando 37 poblaciones y a su vez realizar la caracterización morfológica y respuesta bioquímica a estrés por salinidad y estrés por sequía de dichas poblaciones.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El Origen del trigo

Hace aproximadamente 10,000 años se descubrió la agricultura con la domesticación de plantas y animales, formándose diversos centros alrededor del mundo, los cuales son conocidos como centros de origen. Con ellos se establece que cada cultivo fue domesticado en centros de origen distintos, y la agricultura fue determinante para que el humano desarrollara un estilo de vida sedentario. Al establecerse en un lugar a largo plazo comenzó a modificar su entorno, en lo que a las plantas respecta; selección humana o artificial de las que le parecían más útiles, como mejor aspecto, mayor tamaño, menor cantidad de espinas, color intenso, entre otras, favorecer algunas plantas y eliminar otras. Con ello algunas se convirtieron en plantas de cultivo u ornato y otras en malezas, así como la disminución de la diversidad por enfocarse únicamente en ciertos cultivos.

En cuanto al trigo, fue y sigue siendo un cultivo de gran importancia que se originó en el Cercano Oriente de acuerdo con Vavilov (1926) y Harlan (1971). Siendo una de las primeras plantas en ser cultivada, el trigo ha sido uno de los primeros constituyentes de la dieta humana. Se han encontrado vestigios de trigo donde se establecieron asentamientos humanos hace más de 8,000 años (Roach, 2026). A lo largo del tiempo el ser humano ha perfeccionado los métodos para cultivar y aprovechar el trigo, no solo para alimentación humana; sino para producir etanol, alimentación de ganado, industria farmacéutica y cosmética (Fundación Iberoamericana de Nutrición [FINUT], 2020).

Las sociedades humanas han hecho uso de los cultivos de trigo durante miles de años, el trigo silvestre tetraploide Emmer (*T. dicoccum*) fue una de las primeras especies en ser domesticadas durante la transición neolítica, la agricultura permitió el cambio de actividades de recolección y cacería (Appels et al., 2024).

Durante la domesticación, el trigo perdió la capacidad de diseminar sus semillas naturalmente, por lo tanto, se volvió un cultivo que depende completamente del ser humano, el hombre, fomentó su producción al punto de que ahora es uno de los cultivos más importantes del mundo. Desde los inicios de su cultivo, con las formas silvestres diploide y tetraploide, el trigo se ha convertido en un alimento básico para la humanidad, su domesticación dio lugar a la formación de nuevas especies de trigo como el hexaploide, *T. aestivum*, distintas subespecies y variedades. En la segunda mitad del siglo XX se hizo evidente que no existen progenitores hexaploides silvestres, estos se formaron mediante hibridación entre el trigo tetraploide domesticado y una especie diploide silvestre de *Aegilops* (Feldman & Levy, 2023).

Los trigos Emmer, (*T. turgidum* / *T. dicoccoides*), contenían el genoma AA del Einkorn y el BB del zacate silvestre (*A. speltoides*), siendo su genoma AABB, el hombre fue afectando estos trigos mediante selecciones recurrentes, recolectando únicamente plantas con características deseables. Estos trigos que el hombre comenzó a sembrar se conocen como Trigo Emmer cultivado (*T. dicocum*), estos trigos aun poseían granos cubiertos por la gluma. Tras años de evolución aparecieron plantas cuyos granos se encontraban desnudos y las espiguillas eran articuladas, dando lugar a una nueva especie; *T. durum*, trigos

tetraploides que poseen el genoma AABB; se cree que esto ocurrió hace unos 8,000 años. De igual forma, se considera que, en el mismo período, los trigos Emmer, se cruzaron nuevamente con otra especie de zacate diploide silvestre (*A. tauschii* / *T. tauschii*), la cual poseía el genoma DD, obteniendo así una nueva especie de trigo hexaploide (*T. spelta* genoma AABBDD), hace unos 9,000 años, los cuales evolucionaron y dieron lugar a los primeros trigos harineros modernos (*T. aestivum*) (Ávila et al., 2014).

Por lo tanto, podemos decir que la aparición del trigo moderno ha sido resultado de tres procesos:

1. Domesticación del trigo Emmer silvestre, asociado con la pérdida de la fragilidad del raquis.
2. Evolución del cultivo, con la aparición del fenotipo de trilla libre y la adaptación a nuevos nichos ecológicos.
3. Aloploidización entre un tetraploide de trilla libre y una gramínea silvestre como *A. tauschii*, dando lugar a la aparición del trigo harinero.

Debido a su alto contenido de almidón, se considera una gran fuente de energía a pesar de que su contenido de proteína es relativamente bajo; entre el 8 – 15 %. El trigo muestra suficiente diversidad genética para permitir el desarrollo de más de 30,000 variedades de acuerdo con la FAO (2025).

El trigo es un cultivo que se ha automatizado a lo largo de los años. La automatización y la capacidad de almacenamiento efectivo antes de su consumo, lo vuelve un cultivo de importancia económica; aunado a esto; la adaptabilidad y los altos rendimientos han contribuido a su éxito.

2.2 Clasificación

2.2.1 Taxonomía

El trigo pertenece a la familia Poaceae = Gramineae, el nombre, Poa, proviene de la palabra griega (póa) que define a los pastos o plantas de forraje (Fierro, 2004).

Orden *Cyperales*, familia de las Gramíneas (*Poaceae*) sub familia *Poideae* y a la tribu *Triticeae*, en esta se reconocen 37 géneros, entre ellos el género *Triticum* al que pertenecen las tres especies cultivadas de trigo: *Triticum aestivum*; es una especie hexaploide (6X) con 42 cromosomas en sus células somáticas y con genoma AABBDD, a esta especie corresponden los trigos harineros al igual que la especie *T. aestivum* subesp *compactum* (*T. compactum*) que viene a ser la segunda más cultivada, y por último se encuentra la especie *T. turgidum* subesp *durum* (*T. durum*) conocidos como trigos duros, cristalinos o macarroneros y que se caracterizan por ser trigos tetraploides (4X) con 28 cromosomas en sus células somáticas, poseen el genoma AABB (Ávila et al., 2014).

El origen citogenético del trigo nos expone su evolución desde las formas primarias que se recolectaban; *T. monococcum* y *T. dicoccum*, especies

recogidas por los humanos hace más de 10,000 años, estas especies tenían espigas frágiles que no se sostenían al madurar, por lo tanto, caían al suelo y sus granos, que estaban cubiertos, se dispersaban. Siglos después se descubrió un tipo de espiga que al madurar se desprendía el grano de sus cubiertas, probablemente haya sido este el origen de los trigos desnudos que los humanos comenzaron a cultivar.

Las especies del género *Triticum* se dividen según su juego cromosómico en: diploides: $2n = 14$, tetraploides: $4n = 28$, o hexaploides $6n = 42$.

2.2.2 Morfología

La caracterización en plantas es considerada como la determinación del conjunto de características que las diferencia taxonómicamente.

Las plantas de la especie *Triticum* L. son anuales, generalmente autógamas y van de 30 a 100 cm de altura, sus hojas son planas con lígula membranosa o pilosa en la parte interna de unión de la lámina y la vaina, lámina alargada orientada parcialmente horizontal, la espiga es determinada o indeterminada lineal, de dos hileras comprimida lateralmente, de 8 a 20 cm de largo, puede o no estar aristada. Tiene de 18 a 22 espiguillas, cada una de ellas tiene aproximadamente 3-10 flósculos (de los cuales solo se forman entre tres y cinco), son hermafroditas, con uno o dos estériles. Las espiguillas y los flósculos se encuentran envueltos por dos brácteas. Las brácteas que envuelven a las espiguillas se conocen como gluma y las que envuelven a los órganos sexuales

en los flósculos como lema y palea. Las glumas son subiguales y ovadas, más cortas que la espiguilla. La lema es subventricularosa, con forma de barca, aquillada hacia el ápice, mientras que las paléas son membranosas, binervadas, biquilladas y ciliadas a lo largo de las quillas. Dentro del lema y la palea se encuentran los órganos sexuales, el masculino conformado por tres estambres libres y el femenino formado por un ovario unicarpelar con dos estigmas pilosos. En cuanto a la raíz, posee un sistema radicular fibroso, el cual se forma con la germinación de la semilla al salir de la radícula, para posteriormente formar hasta ocho raíces seminales, dando lugar al sistema radicular primario (Ávila et al., 2014; Feldman et al., 2023).

Las dos especies de trigo diploide son similares en la morfología de la espiga, se asemejan los trigos diploides en su morfología básica: altura, forma de hoja, espiga, grano, glumas, hábito vegetal y de crecimiento (Mac, 2005).

2.3 Distribución y Producción

2.3.1 Mundial

Los cereales son el alimento más consumido en los países en desarrollo, por lo tanto, representan una gran proporción de los gastos del hogar. El trigo es el cereal más utilizado en la alimentación humana, esto se debe a su alto valor energético y a un mayor contenido de proteínas comparado con el arroz y el maíz. Se cosecha en todo el mundo, siendo la superficie destinada a este cultivo la más grande entre los cultivos agrícolas y su comercio es mayor que el del resto de

productos agrícolas. El comercio internacional permite al sector industrial adquirir diferentes tipos de calidad ofrecidos por los mercados mundiales (FIRA, 2015).

La OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) y FAO prevén que la producción mundial de trigo mantenga tendencia creciente, a una tasa promedio anual de 0.9 por ciento. De acuerdo con FIRA (2021), los cinco principales productores de trigo participaron en conjunto con 64.8 % del total mundial. Los principales productores son China, Unión Europea, India, Rusia y Estados Unidos. México se ubicó en la posición 23, con una participación de 0.4 %. Para el ciclo 2021-2022, la producción de trigo en china incrementó 2 % la tasa anual, esto se debió a la presencia de condiciones ambientales favorables que incrementaron el rendimiento en algunas regiones. Por su parte, la Unión Europea presentó una reducción del 9.2 % a la tasa anual en 2020/21, debido a la presencia de condiciones climáticas poco favorables durante la siembra. Dicha tasa de reducción se puede evitar si las condiciones de siembra son buenas y ante la ausencia de daño por factores abióticos.

Por otra parte, en los ciclos 2019 al 2024, la producción mundial aumentó a una tasa promedio anual de 1.0 %, de acuerdo con la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). De tal forma que se ubicó un máximo histórico de 791.5 millones de toneladas en 2023/24, con un incremento anual de 0.1 %.

Para los últimos tres años (2022–2025), el trigo es el cultivo alimentario con mayor superficie sembrada en el mundo, el promedio es de 221.4 millones de hectárea, con un volumen de producción promedio de 787.5 millones de toneladas (FIRA, 2025). Se estima que para el ciclo comercial 2024-2025, se

presentará un incremento de 0.7 % en la producción mundial, esto debido a un aumento en los rendimientos promedio, pasando de 3.55 a 3.58 toneladas por hectárea.

De acuerdo con el Panorama Agroalimentario Trigo 2025 publicado por la FIRA, se proyecta que para la próxima década la producción mundial de trigo aumente de manera más moderada, la estimación para 2033 es que la producción ascienda a 871.0 millones de toneladas.

Para el año 2025, los cinco países principales productores de trigo participaron en conjunto con un 66.1 % del total mundial, estos países son China, Unión Europea, India, Rusia y Estados Unidos. Por su parte, México pasó de la posición 23 en 2021 a la posición 22 en 2025.

China y México son los países donde se obtienen mayores rendimientos con promedios de 6.21 y 5.78 toneladas por hectárea respectivamente en el ciclo 2023/24. Mientras que el promedio mundial se ubica en 3.55 toneladas por hectárea.

2.3.2. Nacional

El trigo grano está catalogado por la Ley del Desarrollo Rural Sustentable como un producto básico, representa el 11.54 % de la producción nacional de cereales y el 2.05 % del PIB agrícola nacional. En México el consumo promedio per cápita anual es de 57.4 kg, siendo el segundo cereal más importante en la dieta de los mexicanos (SAGARPA, 2017).

El trigo grano se divide en cristalino y harinero, utilizados para la elaboración de pastas y producción de panes y harinas, respectivamente. La producción del trigo cristalino representa el 59.70 % de la producción nacional de trigo, con esto se satisface la demanda nacional y se realiza exportación, mientras que la producción del trigo harinero es insuficiente para cubrir la demanda nacional, por este motivo México depende de su importación, equivalente al 74.93 % del consumo nacional (SAGARPA, 2017).

Para el año 2024, la superficie sembrada de trigo en México fue la más baja registrada desde 1980, con un total de 489 mil hectáreas (819 mil ha en 2015). Sonora, la principal entidad productora, registró una disminución del 7.4 % de superficie sembrada, debido principalmente a la poca disponibilidad de agua para riego agrícola. De acuerdo con información de SIAP-SADER (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera – Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural), las principales entidades productoras de trigo son: Sonora, Guanajuato, Sinaloa, Baja California y Michoacán.

2.4 Contenido nutricional

El trigo, junto con el maíz y el arroz, se encuentra entre los tres cereales con mayor importancia y por ende cultivo (Delayage et al., 2024). La nutrición humana está estrechamente relacionada con el consumo de granos, es por ello por lo que representa alrededor del 35 % de la ingesta calórica (Soto & Pérez, 2021). Se considera una de las principales fuentes de energía y una de las principales fuentes de proteína, siendo estas uno de los principales componentes del grano

de trigo, de acuerdo con Abbate (2017), aproximadamente un 12 % del grano corresponde a proteínas. El trigo tiene otros componentes útiles, como minerales (Cu, Mg, Zn, Fe, y P), vitaminas (riboflavina, tiamina, niacina y alfa-tocoferol) y es una importante fuente de carbohidratos (Garg et al., 2021).

En cuanto a la calidad de las proteínas que aporta el trigo, la calidad nutricional está determinada por las proporciones de aminoácidos esenciales, ya que estos no pueden ser sintetizados por los animales y, por lo tanto, deben proporcionarse en la dieta; se ha determinado que los granos de trigo son deficientes en contenido de lisina (Shewry & Halford, 2002; Shewry & Hey, 2015).

El grano de trigo está formado por una cubierta de salvado y el endospermo que rodea al embrión. El salvado contiene la mayor cantidad de fibra insoluble, vitaminas del complejo B, oligoelementos y una pequeña cantidad de proteínas. El endospermo, la capa intermedia del grano, contiene principalmente carbohidratos y proteínas necesarios para el desarrollo de la planta, así como para la producción de harina, y una pequeña cantidad de vitaminas del complejo B, hierro y fibra soluble. Aunque el embrión, constituye una porción menor del grano, contiene la radícula de la raíz y el ápice del brote. También es rico en oligoelementos, grasas insaturadas, vitaminas del complejo B, antioxidantes, fitoquímicos y una pequeña cantidad de proteínas (Ammar et al., 2023).

2.5 Resistencia a factores abióticos

Los cereales son cultivos ampliamente aprovechados en la agricultura mundial. Debido a su dispersión, han evolucionado y se han adaptado a una gran variedad de entornos, a menudo, estos cultivos están expuestos a factores de estrés abiótico como la sequía y la salinidad. Los diferentes tipos de estrés causan cerca del 50 % de la reducción en la producción de cultivos a nivel mundial (Cerillo et al., 2022).

Debido a que las plantas están expuestas a condiciones ambientales cambiantes, han desarrollado mecanismos adaptativos ajustando sus procesos metabólicos a nivel molecular, celular y sistémico; esto les ha dado la cualidad de incrementar la tolerancia al estrés.

La influencia medioambiental sobre una planta está determinada por la intensidad y la duración del correspondiente factor de estrés en interacción con los rasgos genéticos característicos de la planta (Varela, 2010). Puede decirse que: estrés es el conjunto de respuestas bioquímicas o fisiológicas que definen un estado particular del organismo diferente al observado bajo un rango de condiciones óptimas (Schulze et al., 2005). El estrés abiótico se refiere a los factores ambientales que alteran los procesos fisiológicos y metabólicos de las plantas (Méndez & Vallejo, 2019).

El estrés abiótico afecta negativamente diversas etapas del desarrollo de las plantas, desde diversos dinanismos de las plantas con el transcriptoma, procesos fisiológicos (floración, llenado del grano, maduración, y otros.), así

como los procesos celulares. Comprender la interacción molecular de las respuestas de las plantas a varios tipos de estrés es crucial para el desarrollo de cultivos tolerantes (Jeysari, 2021).

Algunos efectos que se presentan en la planta sometida a estrés por salinidad son:

- Desbalance y toxicidad iónica
- Inhibición en la toma de agua y de potasio
- Bajo contenido de pigmentos fotosintéticos
- Menor conductancia estomática
- Desbalance hormonal y nutricional

Mientras que en las plantas sometidas a estrés por sequía se presenta:

- Reducción de biomasa en raíces y hojas
- Inhibición de la fotosíntesis
- Cierre estomático
- Decremento en el potencial de agua en los tejidos
- Desbalance hormonal
- Disminución de la tasa de germinación

Esto puede llevar a la planta a la muerte celular, desbalance del metabolismo oxidativo, daño en el ADN y oxidación de proteínas y lípidos (Varela, 2010).

2.5.1 Estrés por salinidad

El estrés salino afecta gravemente el crecimiento y productividad de las plantas debido a la acumulación de iones sodio (Na^+) y cloruro (Cl^-), esta acumulación lleva a la creación de estrés iónico, osmótico y oxidativo. Por su parte, el ion sodio interviene en: traducción de proteínas y la transcripción y la actividad enzimática.

El trigo sometido a estrés salino experimenta alteraciones fisiológicas que limitan su crecimiento y rendimiento

Las plantas generalmente pueden tolerar el estrés salino principalmente por tres mecanismos: la exclusión iónica, la tolerancia osmótica y la tolerancia tisular. La tolerancia osmótica está regulada por ondas de señalización de larga distancia que reducen la expansión celular en las puntas de las raíces, las hojas y la conductancia estomática. La exclusión iónica implica principalmente el transporte de Na^+ y Cl^- a las raíces, lo que previene la reducción de la acumulación de Na^+ en los brotes. La tolerancia tisular implica la exposición de los tejidos al Na^+ y Cl^- acumulados a nivel celular e intracelular, la síntesis de solutos compatibles y la producción de la enzima que cataliza la desintoxicación de ROS (Rajendran et al., 2009; Roy et al, 2014; Reddy, et al., 2016).

El estrés por salinidad actúa en dos etapas: causa estrés osmótico reduciendo el potencial hídrico del suelo y lleva a la intoxicación por acumulación de Na^+ en los tejidos vegetales. Como resultado se ve una disminución en el número y área de las hojas, radio y biomasa de las raíces, principalmente. Aunque también hay una

disminución en el número de tallos, espiguillas, peso de los granos y una significativa reducción en la producción (El Sabagh et al., 2021).

Los niveles de tolerancia a la sal varían entre las diferentes especies de plantas, el trigo presenta una tolerancia moderada, la comprensión del mecanismo molecular de tolerancia en el trigo es limitada debido al tamaño de su genoma y su redundancia (Zhang et al., 2024).

El estrés salino provoca cambios fisiológicos y bioquímicos en el metabolismo de las plantas, así como su productividad y subsistencia (Lamz & González, 2013), el trigo es una planta que crece en condiciones por debajo de los 40 mM de NaCl en el suelo, y no está naturalmente adaptada a suelos con alta concentración de sal (Escalante et al., 2025). El trigo es considerado moderadamente tolerante a la salinidad del suelo. La reducción del crecimiento de los brotes con concentración cada vez mayor de sodio, en cultivo en arena o en solución, es aproximadamente lineal, con una concentración de 100 mM (aproximadamente 10 dS/m), reduciendo el crecimiento de los brotes en cerca del 45 % en el trigo blando y cerca del 50 % en el duro (FAO, 2012).

De acuerdo con el Centro Internacional de Referencia e Información de Suelos (ISRIC por sus siglas en inglés), se han generado cambios sin precedentes en el suelo, entre ellos se incluye la degradación de las tierras por salinidad (Zhanguobai, 2009).

2.5.2 Estrés por sequía

Una de las más importantes limitantes para la agricultura es el agua; la disminución de precipitaciones y el incremento de las temperaturas afecta significativamente el crecimiento de los cultivos. La disponibilidad del agua es el factor que más afecta el crecimiento y el rendimiento de las plantas, la respuesta de estas va a depender del período, intensidad, duración y frecuencia del estrés, así como las interacciones entre plantas, suelo y atmósfera; en el trigo afecta principalmente en la etapa de espigamiento o floración.

El estrés osmótico ya sea como producto de la escasez de agua, de la salinidad de los suelos o de bajas temperaturas representa uno de los estreses más severos (Boyer, 1982; Ashraf, 1994, como se citó en Legaria, 2000).

El estrés hídrico en el trigo suprime la división celular, el crecimiento de órganos y afecta la fotosíntesis neta, así como la síntesis de proteínas, alterando el balance hormonal de los tejidos (Gusta y Chen, 1987, como se citó en Ayed et al., 2017).

La tolerancia a la sequía consiste en la habilidad de un cultivo de crecer y producir en condiciones de deficiencia hídrica. La planta tiene mecanismos de respuesta a este tipo de estrés, como lo son la emisión de raíces profundas, área foliar reducida, floración temprana y mayor eficiencia de uso de agua, algunos síndromes observables incluyen marchitamiento de hojas, altura y menor número de hojas (Ayed et al., 2017).

El estrés hídrico es considerado el estrés abiótico de mayor incidencia en el crecimiento de las plantas, el riego restringido es una herramienta importante para evaluar la tolerancia y reducir el consumo de agua (Fereres & Soriano, 2007, como se citó en Buenrostro, 2023). La reducción en el contenido de clorofila se atribuye a este tipo de estrés.

La respuesta durante la germinación bajo condiciones de estrés hídrico puede considerarse un indicador de la tolerancia que tienen las plantas a sequía, sin embargo, se presenta un gradiente de tolerancia o susceptibilidad dentro de las especies y las variedades (Méndez et al, 2010; González-Núñez, 2002).

Las plantas pueden responder de forma diferente al estrés, en el caso del estrés hídrico se manifiesta principalmente en las raíces, también se ve reducida la capacidad fotosintética (Hernández et al., 2017).

La eficiencia de las semillas al germinar bajo condiciones de estrés hídrico se puede usar como un indicador de la tolerancia a la sequía (Méndez et al., 2010, como citó Rangel et al., 2019).

Debido a que diversos marcadores de estrés hídrico (bioquímicos, fisiológicos, fotosintéticos y metabólicos) se expresan con el estrés inducido por Polietilenglicol (PEG), el tratamiento con PEG en plantas se considera un modelo eficaz para investigar la respuesta al estrés hídrico (Rajeswar & Narasimhan, 2021).

2.6 Caracterización molecular

El tamaño del genoma es conocido mediante el análisis de la cantidad de ADN nuclear, las especies de *Triticeae* se caracterizan por un genoma relativamente grande. El ADN repetitivo es el componente más grande, alcanzando hasta un 90 %, esto contribuye a la estructura cromosómica y la evolución del genoma vegetal. Las secuencias repetitivas de ADN se presentan en conjuntos de secuencias repetidas en tándem (ADN satélite) o en repeticiones dispersas por todo el genoma. La unidad monomérica del ADN satélite puede tener desde unos pocos nucleótidos hasta 400 pares de bases.

Las repeticiones de secuencia simple (SSR) son un grupo de microsatélites que se encuentran universalmente en los genomas de las plantas como repeticiones en tándem de secuencia corta. Esto, junto con su estructura que promueve el deslizamiento por la ADN polimerasa, les permite acumular mutaciones que se han utilizado como marcadores genéticos altamente polimórficos en el mapeo, la identificación, la caracterización y la gestión de recursos genéticos silvestres y domesticados (Levy & Feldman, 2023).

2.6.1 Marcadores ISSR

Los marcadores Inter Simple Secuencia Repetida (ISSR), pertenecen a los marcadores multiloci, son marcadores genéticos dominantes, esto hace que no sea posible la distinción entre un homocigoto y un heterocigoto. No obstante, estos marcadores producen múltiples fragmentos de ADN y con ello permite la generación de un gran número de *loci* a lo largo del genoma de cualquier especie,

sin necesidad de conocer la secuencia del ADN ni de regiones específicas (Ng & Tan, 2015).

En los marcadores ISSR, los fragmentos se amplifican mediante la técnica de PCR, obteniendo marcadores dominantes con el uso de un único cebador (secuencias microsatélites ancladas) compuestos de 3 a 4 unidades repetitivas; a menudo de 18-20 pb). Con el uso de estos marcadores, el segmento genómico que se amplifica se localiza entre dos bloques de microsatélite, esto hace que no sea necesario conocer la secuencia que se va a amplificar (Moresco et al., 2013).

La técnica de repetición de secuencia simple (ISSR) es un método basado en PCR, que implica amplificación de un segmento de ADN presente a una distancia amplificable entre dos regiones de repetición de microsatélites idénticas orientada en posición opuesta. La técnica utiliza microsatélites, generalmente de 16 a 25 pb de longitud, como iniciadores en una reacción de PCR de cebador único dirigida a múltiples genes para amplificar inter-secuencias de diferentes tamaños (Reddy et al., 2002).

2.7 Caracterización morfológica

La planta de trigo está compuesta por un rizoma con varios tallos y hojas auxiliares, que llegan a crecer aproximadamente un metro de altura. El número de tallos depende del cultivar, densidad y profundidad de la siembra, además de las condiciones ambientales (Villaseñor, 1994).

El trigo es una planta anual con características de los zacates, se desarrolla en climas templados y tiene gran capacidad de ramificación, su sistema radicular es

fibroso y se forma inicialmente con la germinación de la semilla, a continuación, se describen las partes u subpartes de la planta del trigo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Composición morfológica de las plantas de trigo.

PARTE DE LA PLANTA	COMPOSICIÓN	DESCRIPCIÓN
RAÍZ	Radícula	Primera estructura que emerge del grano en el proceso germinativo
	Raíces seminales	Raíces secundarias que emergen en la base de la radícula, pueden formarse hasta ocho, generando el sistema radicular primario
	Coronarias / nodales	Pasados los primeros treinta días, emergen de los nudos basales del tallo y se encuentran bajo la superficie del suelo, formarán el sistema radicular
TALLO	Tallo principal	Se desarrolla a partir del crecimiento de la plántula en la germinación, tallo erecto, cilíndrico, liso, nudos sólidos, alcanza de 60 a 120 cm de altura.
	Hijuelos	Ramificaciones formadas a partir de los primeros nudos, localizados en la porción basal de la planta
HOJA	Vaina	Porción basal envolvente que rodea al tallo
	Lámina	Porción libre orientada parcialmente horizontal, alargada, delgada con bordes lisos y nerviación paralela
	Lígula	Estructura membranosa o porosa en la parte interna de unión de la lámina y la vaina
	Aurículas	Expansiones foliares que rodean al tallo en los bordes exteriores de la unión de la lámina y la vaina
	Hoja bandera	Última hoja, envuelve a la espiga antes de que emerja
FLOR E INFLORESCENCIA	Raquis y espiga	Terminación del tallo principal y los hijuelos maduros, inflorescencia compuesta (espiga de espigas)
	Raquilla	Talluelo que constituye a cada espiguilla
	Flósculo	Flor característica de las gramíneas, en cada espiguilla se pueden formar de 7 a 10 flósculos
	Gluma	Brácteas que envuelven a las espiguillas
	Lema y Palea	Brácteas que envuelven los órganos sexuales, el órgano sexual masculino está conformado por tres estambres y el órgano sexual femenino se encuentra formado por un ovario unicarpelar con dos estigmas pilosos
	Arista	Filamento en el ápice del lema
FRUTO	Cariópside	Fruto del cultivo de trigo formado por un pericarpio seco soldado a la semilla
	Sutura	Hendidura a todo lo largo del grano
	Brocha	Vellosidades en el ápice
	Endospermo	Tejido en el cual se encuentran las sustancias de reserva (almidón)
	Capa de aleurona	Capa celular que rodea al endospermo, proporciona un paquete proteico enzimático necesario para la germinación de la semilla
	Embrión	Constituido por un cotiledón grande conocido como escutelo, y por el coleóptilo, que es una estructura de protección

De acuerdo con la FAO, durante el ciclo del cultivo de trigo se producen tanto cambios en la morfología externa como en los tejidos, la descripción de los diferentes estados externos e internos puede ser realizada mediante el uso de diferentes escalas permitiendo una referencia precisa de las diferentes etapas de desarrollo. La escala de Zadoks es la más utilizada en el cultivo del trigo y solo describe estados morfológicos externos del cultivo, tiene 10 fases numeradas de 0 a 9 que describen el cultivo (Satorre et al., 2003), se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Escala de Zadoks para las etapas de desarrollo del trigo.

Etapa principal	Descripción	Sub-fase	Etapa principal	Descripción	Sub-Fase
0	Germinación	0.0 – 0.9	5	Espigado	5.0 – 5.9
1	Producción de hojas TP	1.0 – 1.9	6	Antesis	6.0 – 6.9
2	Producción de macollos	2.0 – 2.9	7	Estado lechoso del grano	7.0 – 7.9
3	Producción de nudos TP	3.0 – 3.9	8	Estado pastoso del grano	8.0 – 8.9
4	Vaina engrosada	4.0 – 4.9	9	Madurez	9.0 – 9.9
TP: Tallo principal		Según J.C. Zadoks, T.T. Chang y C.F. (1974)			

La escala de Zadoks permite, por medio de la observación morfológica exterior del cultivo, tener idea del estado de desarrollo en que se encuentra la planta.

Las características morfológicas de los cultivos pueden ser observadas y/o medidas de manera fácil, rápida, económica y con análisis no destructivos, todas estas características son altamente heredables y suelen demostrar una gran

variabilidad genética con baja interacción ambiental. Los rasgos medibles incluyen: longitud y ancho de la hoja bandera, longitud del pedúnculo y la arista, altura de la planta y solidez del tallo, pubescencia de las hojas y/o espigas, glaucosidad de las hojas y/o espigas, enrollamiento, ángulo, orientación y postura de las hojas (Pask et al., 2012).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del experimento

Las muestras de trigo fueron procesadas y analizadas en el Laboratorio de Biotecnología Agrícola del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma de Chapingo, Campus Texcoco, Estado de México, cuya localización es 19°29'13.4" latitud norte y 98°53'49.7" latitud oeste. El clima es templado subhúmedo, lluvias en verano y una precipitación media anual de 635 mm entre mayo y septiembre, con una temperatura media anual de 15 °C de acuerdo con García (1988). Dicho laboratorio cuenta con un invernadero donde se estableció el experimento y se cultivaron las muestras para ser sometidas a estrés por salinidad y estrés hídrico según la variedad correspondiente.

El sustrato utilizado fue turba ('Peat Moss') marca Berger, combinado con agrolita (50/50) para permitir la aireación y drenaje. Este sustrato posee una alta capacidad de retención de agua, tiene una estructura porosa que le confiere baja densidad. Su pH oscila de 3.5 a 4.5 (Berger, 2026).

3.2. Material genético

El material vegetal constó de quince variedades de *Triticum durum* L. diecisiete variedades de *T. aestivum* y cinco variedades criollas, donde cuatro corresponden a *T. monococcum* y una corresponde a *T. boeoticum*, todas las

accesiones genéticas fueron proporcionadas por el CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo), ubicado en El Batán, Texcoco, Estado de México. En el Cuadro 3 se especifica la variedad, susceptibilidad o tolerancia al estrés y el código para cada una de las variedades, así como su pedigrí.

Cuadro 3. Variedades de trigo evaluadas en el presente trabajo, sometidas a estrés hídrico y salino.

Variedades sometidas a estrés abiótico				
Especie	Tipo de estrés	Característica	Variedad	Pedigrí
<i>T. aestivum</i>	hídrico	T	BW49457	NACUZARI F 76/TH.ACUTUM//3*PAVON F 76/3/MIRLO/BUCKBUCK/4/2*PASTOR/5/KACHU
	hídrico	T	BW49308	WEEBILL1/FRET2//PASTOR*2/3/MURGA
	hídrico	T	BW36945	PASTOR//HXL7573/2*BAGULA
	hídrico	T	BW35697	CROC_1/AE.SQUARROSA (224)//OPATA M 85/3/PASTOR
	hídrico	T	BW33909	BABAX/AMADINA//BABAX
	hídrico	S	BW34025	THORNBIRD//MAYA 74/NACUZARI F 76/3/RABE/4/MILAN
	hídrico	S	BW4113	BLUEJAY/JUPATECO F 73
<i>T. durum</i>	hídrico	NR	DW5383	CLICO/BIDI 17//SENATORE CAPPELLI/3/QUILAFEN
	hídrico	NR	DW5377	GC LILA
	hídrico	NR	DW4963	KARAKILCIK:DR/KRUGER//B132
	hídrico	NR	DW4478	CELINNAJA
	hídrico	NR	DW4477	ASTURIE L2
	hídrico	NR	DW4437	DF-42-71
	hídrico	NR	DW4404	C-48
	hídrico	NR	DW4393	TVERDAJA 45515
	hídrico	NR	DW4386	1.1.2729

<i>T. aestivum</i>	hídrico	S	DW4827	GEDIZ 75/MEXICALI C75//TEZONTLE
	salino	T	CWI7998 5	BINNU
	salino	T	BW3897 9	WESTONIA
	salino	T	BW8763	PLATA AZUL/KHUSHAL 69
	salino	T	BW2031 3	SHOROWAKI
	salino	S	BW2272 4	AGATHA/3*YECORA F 70
	salino	S	CWI7998 2	SUNELG/2*BLADE
	salino	S	CWI7993 0	CHINO/KULIN//REEVES
<i>T. durum</i>	salino	T	DW1001 3	ALTAR 84//ALONDRA/3/GANSO/FLAMINGO:DR//CAN DO
	salino	T	DW9858	URRACA/ALTAR 84//STERNA-DW_2
	salino	T	DW7683	D65152/D6148
	salino	S	CWI2241 3	KYPERUNDA/MAHMOUDI 981
	salino	S	CWI2411 6	BARRIGÓN YAQUI ENANO*2/TEHUACÁN 60//STEWART 63/3/ZENATI x BOUTEILLE 13.953/WELLS/4/GRULLA
	salino	S	CWI2412 9	GDOVZ512
	salino	S	CWI7999	HINDI-12
	salino	S	DW1657 0	RÍO COLORADO/THKNEE_2/3/SORA/2*PLATA_12/ /SOMAT_3

T: Tolerante, S: Susceptible, NR: No reportado

En el Cuadro 4 se especifica las variedades criollas analizadas, dichas variedades no fueron sometidas a estrés abiótico por lo tanto no se obtuvieron datos morfológicos durante la germinación. Tampoco se realizaron los análisis bioquímicos, únicamente fueron analizadas para llevar a cabo la caracterización molecular.

Cuadro 4. Variedades criollas de trigo para caracterización molecular.

Variedades criollas	Código	Identificación
<i>T. monococcum aegilopoides</i>	CWI38327	BG 1937
	CWI96312	T.BOEOTICUM PI393496
<i>T. monococcum</i>	CWI97196	T.MONOCOCCUM CI2433
	CWI97201	T.MONOCOCCUM PI 190947
<i>T. boeoticum</i>	CWI96312	T.BOEOTICUM PI427627

3.3. Análisis morfológico en etapa de germinación

Con la finalidad de obtener resultados que permitieran identificar genotipos tolerantes y susceptibles, las semillas fueron sometidas a estrés hídrico y a estrés por salinidad durante la etapa de germinación, esto mediante la imbibición de semillas en soluciones con diferentes concentraciones de sal (NaCl) y, en el caso del estrés hídrico se realizó el ensayo a diferentes presiones osmóticas, para lo cual las semillas se imbibieron en PEG [polietilenglicol]-8000 a distintas concentraciones, en dicha etapa se evaluaron los siguientes parámetros: porcentaje de germinación, número de raíces, pelos de radícula, peso fresco, coloración antociánica, largo de raíz, largo del tallo, largo de la hoja y largo de la parte aérea. Las mediciones fueron realizadas con un calibrador vernier digital marca Steren, lo que permitió la toma de datos con exactitud milimétrica.

3.3.1. Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con cuatro tratamientos para cada experimento, evaluando diecisiete genotipos para estrés hídrico y quince genotipos para estrés por salinidad, ambos experimentos con dos repeticiones. La unidad experimental constó de una caja plástica desechable semi hermética que contenía 10 semillas, la germinación se llevó a cabo en noviembre de 2024 en un cuarto de incubación acondicionado a un período fotosintético de 12 horas luz, 12 horas oscuridad y una temperatura oscilante de 22 ± 3 °C.

Se realizó un riego diario a la unidad experimental con los tratamientos correspondientes.

3.3.2. Tratamiento previo del material genético

Para la desinfección de semillas se identificaron cajas estériles donde fueron colocadas las semillas de cada variedad en una solución de cloro al 5 % durante 10 minutos, posteriormente se colocaron en una caja con agua destilada estéril, realizando 3 lavados consecutivos para finalizar retirando el excedente de agua con gasas estériles.

Una vez que todas las semillas estuvieron desinfectadas se procedió a iniciar la prueba de germinación, las semillas fueron colocadas en cajas plásticas desechables semi herméticas previamente esterilizadas con una solución de

cloro al 5 % y etanol al 70 %, dichas cajas fueron adaptadas con seis orificios en la parte superior para permitir el intercambio gaseoso de las plántulas, en la base de la caja se colocó una gasa estéril de 10 cm x 10 cm con la que se cubrió la parte inferior interna a fin de colocar las semillas con una separación aproximada de 2 cm entre cada semilla.

Para el análisis de germinación se utilizaron 10 semillas de cada genotipo con una repetición y se colocaron en las cajas de germinación con una gasa previamente humedecida con los tratamientos a evaluar.

3.3.3. Tratamientos para estrés por salinidad

Debido a las condiciones de salinidad óptimas para el desarrollo del trigo y los efectos observados en condiciones de salinidad de 100 mM, se establecieron los tratamientos mostrados en el Cuadro 5, en los que se incluyeron una muestra testigo en la cual se utilizó agua destilada estéril, hasta el tratamiento más severo que consistió en una solución de NaCl 350 mM.

Cuadro 5. Tratamientos para estrés por salinidad (NaCl), en milimoles.

SALINIDAD	
Tratamiento	mM
1	0
2	100
3	200
4	350

Se prepararon las soluciones utilizando matraces Erlenmeyer con capacidad de 1 litro estériles, agua destilada estéril, NaCl grado reactivo pesado en una

balanza digital marca OHAUS. Se mantuvieron cerradas herméticamente con la finalidad de evitar contaminación antes y durante su uso.

3.3.4. Tratamientos para estrés hídrico

Los potenciales osmóticos se calcularon según la ecuación descrita por Michael (1983), considerando una temperatura ambiente de 25 °C. La ecuación que se utilizó es:

$$[\text{PEG}] = (4 - (5.16\Psi T - 560\Psi + 16)^{0.5}) / (2.58T - 280)$$

Donde:

PEG= es la concentración de polietilenglicol en gramos por gramo de agua.

T= es la temperatura en grados centígrados

Ψ = es el potencial hídrico de la solución, generalmente expresado en bars o en pascales.

Los coeficientes presentados en la ecuación derivan de los efectos combinados de concentración y temperatura, el descenso del potencial hídrico con el aumento del PEG y la concentración.

Los tratamientos para estrés hídrico se muestran en el Cuadro 6, donde el tratamiento 1 es la muestra testigo y únicamente se utilizó agua destilada estéril.

Cuadro 6. Tratamientos para estrés hídrico (PEG-8000), en Megapascuales.

ESTRÉS HÍDRICO		
Tratamiento	MPa	g PEG-8000/L
1	0	0

2	-0.4	45.13
3	-0.8	69.58
4	-1	79.54

Los tratamientos se prepararon utilizando agua destilada y matraces Erlenmeyer de 1 L estériles, adicionando PEG-8000 y se conservaron estériles hasta su uso.

3.3.5. Toma de datos

Las variables fueron monitoreadas durante 14 días, realizando observaciones y mediciones en el día 1, 3, 5, 7 y 14 de la germinación. Las variables vinculadas a la raíz (largo de raíz, número de raíces y pelos de radícula), únicamente fueron medidas al día 14 ya que presentaban enrollamiento creando una masa enredada, no fue sino hasta el día 14 que se separaron cuidadosamente las raíces de la gasa para ordenarlas y realizar las mediciones correspondientes.

Los parámetros morfológicos (raíces, parte aérea, peso fresco, pigmentación antociánica), se obtuvieron durante la etapa de germinación bajo condiciones controladas de estrés abiótico, por lo tanto, entre los resultados obtenidos para dichos parámetros, no se presentan datos que correspondan a la etapa reproductiva de la planta.

3.3.5.1. Porcentaje de germinación

Fueron consideradas semillas germinadas las que presentaron 2 mm aproximadamente de longitud de raíz, de acuerdo con la ISTA (International Seed Testing Association, 2016), una semilla se considera germinada al emerger la radícula.

3.3.5.2. Raíces

Se separaron las raíces de la gasa con ayuda de unas pinzas de laboratorio y se colocaron sobre una servilleta de papel a fin de acomodarlas de manera longitudinal, se midió la longitud de todas las raíces con ayuda de un Vernier digital y se realizó el conteo del número de raíces, con ayuda de una lupa se observó y registró la cantidad de pelos de radícula presentes en las plántulas.

El número de semillas germinadas se contó en el día 14 y se estimó el porcentaje de germinación y el número de semillas latentes.

3.3.5.3. Parte aérea

Se realizó la medición del largo de la hoja, largo del tallo y largo de la parte aérea durante 14 días, para esto se utilizó un vernier digital.

3.3.5.4. Peso fresco

Tras los 14 días de germinación se separaron las plántulas de la gasa, se retiró el excedente de los tratamientos con una servilleta de papel y se tomó el peso fresco de las plántulas en una balanza digital OHAUS.

3.3.5.5. Pigmentación antociánica

Las antocianinas son un grupo de pigmentos con coloración roja, hidrosolubles y ampliamente distribuidos en el reino vegetal (Damodaran et al., 2010). Pertenecen al grupo de los flavonoides y su estructura básica es un núcleo flavón, el cual consta de dos anillos aromáticos unidos por una unidad de tres carbonos.

La pigmentación antociánica se determinó utilizando el Manual Gráfico para la Descripción Varietal del SNICS (2015), por lo cual se utilizaron los siguientes niveles para calificar la coloración: 1 ausente o muy débil, 3 débil, 5 media, 7 fuerte, 9 muy fuerte. El parámetro se evaluó el día 14 de germinación.

3.4. Análisis molecular

La caracterización molecular hace referencia al uso de marcadores moleculares, como el ADN, el ARN y las proteínas, para determinar características genéticas de las células o los tejidos (National Institutes of Health [NIH], 2025). La caracterización molecular permite la detección de polimorfismos, esto significa los diferentes alelos que se pueden encontrar en el mismo gen en una planta o población de plantas. Los polimorfismos son detectados como marcadores moleculares; con ello se identifica el gen deseado y los rasgos conferidos por dicho gen. La caracterización molecular es una técnica sencilla y barata que ha sido desarrollada para visualizar secuencias polimórficas en el ADN.

3.4.1. Extracción y purificación de ADN

Para la obtención de ADN genómico se aplicó el método CTAB el cual es un detergente catiónico y sal de amonio cuaternario, conocido como bromuro de cetiltrimetilamonio, este método fue descrito por Doyle y Doyle (1991), con algunas modificaciones que se implementaron del protocolo descrito por Dellaporta (1983, versión II), previo a realizar los pasos de extracción se esterilizó el material a utilizar en una autoclave durante 15 minutos a 15 psi y con ello garantizar que se elimina la posible contaminación por microorganismos.

Las plantas utilizadas en el presente experimento fueron sembradas en charolas de germinación manteniendo el riego a capacidad de campo, se realizó el muestreo y análisis entre el día 45 y 60 dds, se tomó 0.3 g de hojas jóvenes y frescas de los 37 genotipos, se pulverizaron en un mortero frío con nitrógeno líquido (-196 °C) lo que permitió obtener un polvo fino que conservó las moléculas en condiciones óptimas para el análisis. El polvo obtenido fue incorporado a un microtubo Eppendorf de 1.5 mL que contenía 750 µL de solución extractora CTAB + 0.3 % 2-mercaptoetanol, solución que fue calentada previamente en un termoblock a 65 °C durante 15 minutos. Se agitó suavemente la mezcla y se incubó en un termoblock durante 30 minutos a 65 °C. Transcurridos los 30 minutos, se adicionó 300 µL de acetato de potasio 5 M (KOAC), se mezcló por inversión para ser incubados en hielo durante 15 minutos.

Los tubos se colocaron en una centrifuga marca Eppendorf modelo 5424 y fueron centrifugadas durante 5 minutos a 12, 000 rpm para transferir el sobrenadante a

un tubo Eppendorf de 1.5 mL nuevo y estéril. Se agregó al sobrenadante 500 µL de cloroformo:alcohol isoamílico (24:1), se mezcló suavemente por inversión y se centrifugó durante 5 minutos a 12,000 rpm. Se adicionó 500 µL de isopropanol frío a un tubo Eppendorf y se transfirió el sobrenadante resultante de la centrifugación al tubo, la reacción con el isopropanol frío provocó precipitación, la mezcla se incubó durante 30 minutos en hielo (-20 °C).

Se centrifugó durante 5 minutos a 12,000 rpm eliminando el sobrenadante para conservar únicamente el precipitado (la 'pastilla') que conservó los ácidos nucleicos. Se disolvió el precipitado en 200 µL de solución para diluir (Tris HCl 1 M, EDTA-Na₂ 0.5 M, pH 8.0). Una vez disuelto el precipitado se añadió 2 µL de ARNasa A y se incubó durante 60 minutos a 37 °C. Transcurrido el tiempo, se precipitó adicionando 20 µL de acetato de sodio (NaOAc 3 M) y 200 µL de isopropanol frío, se mezcló suavemente y se incubó durante 60 minutos a -20 °C. Se centrifugó durante 5 minutos a 12,000 rpm y se decantó el sobrenadante; el precipitado que contenía el ADN genómico extraído, fue lavado dos veces con 200 µL de etanol frío al 70 % y se dejó secar durante 30 minutos. Finalmente, se disolvió el precipitado en 100 µL de TE (Tris HCl 1 M, EDTA 0.5 M pH 8.0), y se guardó para futuros análisis.

3.4.2. Cuantificación y calidad de ADN genómico

Para conocer la concentración de ADN obtenido en cada muestra se realizó una dilución 1 en 100 agregando 10 μL de muestra de ADN en 990 μL de H_2O destilada estéril. Por medio de un NanoDrop marca Thermo Fisher (UV-Vis), ubicado en el Laboratorio de Marcadores Moleculares, se determinó la concentración y la calidad del ADN extraído.

La medición con espectrofotometría (UV-Vis), se basa en las propiedades de absorción intrínsecas del ADN. Al medir el espectro de absorción, los ácidos nucleicos absorben luz con un pico característico a 260 nm, la atenuación de la luz que llega al detector tras atravesar la muestra se mide en relación con la luz incidente y se expresa como valores de absorbancia de la muestra en la solución (Thermo Fisher, 2026).

El NanoDrop tiene la característica de brindar la concentración y pureza del ADN procesado de manera automática, esto a partir de los valores de absorbancia medidos a 260 nm y 280 nm para la evaluación de pureza utilizando la ecuación de Beer-Lambert.

La calidad del ADN se comprobó realizando electroforesis en gel de agarosa al 1 % (p/v), utilizando como amortiguador TAE 0.5X. Se mezcló 10 μL de la muestra que contenía el ADN genómico y una gota de amortiguador de carga, la mezcla se cargó en los pozos del gel de agarosa. Se aplicó una corriente de 80 – 100 V para permitir la adecuada migración de las muestras en el gel hasta que éstas

recorrieron tres cuartas partes del gel, como amortiguador de corrida se utilizó una solución a base de TAE 10X (40 mM Tris-acetato, pH 7.6, 1 mM Na₂-EDTA), diluida a 0.5X.

Se tiñó el gel con bromuro de etidio (0.5 mg mL⁻¹) por 15 minutos, posteriormente se enjuagó con agua corriente durante 5 minutos y se procedió a foto documentar en el transiluminador de luz ultravioleta PhotoDoc-It Imaging System UVP.

3.4.3. Preparación de materiales para PCR

Previo a realizar la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), se preparó el material a utilizar, se utilizó dNTP's Mix de 10 mM marca Thermo Scientific, para obtener la concentración requerida para el análisis (500 µM) se tomó una alícuota de 25 µL de dNTP's Mix de 10 mM, se colocaron en un tubo Eppendorf de 500 µL y se adicionaron 475 µL de agua grado molecular, dando un volumen final de 500 µL de dNTP's Mix a una concentración de 500 µM. Los tubos se mantuvieron en frío durante el procesamiento para garantizar su funcionalidad.

Se utilizaron iniciadores de alta calidad y eficiencia adquiridos en el Instituto de Biotecnología de la UNAM, cada iniciador presentó una concentración inicial (pmol/µL) distinta, por lo que fue necesario realizar dilución para llegar a la concentración de 10 pmol/µL, en el Cuadro 7 se muestra la concentración inicial de los iniciadores utilizados.

Se utilizó *Taq* ADN polimerasa recombinante ($5 \text{ U} \cdot \mu\text{L}^{-1}$) marca Thermo Scientific, el fabricante indica en la descripción general del producto que la ADN polimerasa Thermo Scientific *Taq* es una ADN polimerasa con elevada termoestabilidad de la bacteria termófila *Thermus Aquaticus*. La enzima cataliza la síntesis $5' \rightarrow 3'$ del ADN, no presenta acción exonucleasa $3' \rightarrow 5'$ (corrección) detectable y posee una baja actividad exonucleasa $5' \rightarrow 3'$.

El agua que se utilizó corresponde a agua libre de nucleasas (grado molecular) de la marca Norgen Biotek.

3.4.4. Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR)

La PCR se llevó a cabo en $25 \mu\text{L}$ de reacción compuesta de la siguiente manera:

- $2.2 \mu\text{L}$ de H_2O grado molecular
- $10 \mu\text{L}$ de dNTPs ($500 \mu\text{M}$)
- $2.5 \mu\text{L}$ de amortiguador 10X
- $2.0 \mu\text{L}$ de MgCl_2 (25 mM)
- $3.0 \mu\text{L}$ de iniciador (10 pmol)
- $0.3 \mu\text{L}$ de *Taq* ADN Polimerasa ($5 \text{ U} \mu\text{L}^{-1}$)
- $5.0 \mu\text{L}$ de ADN ($10 \text{ ng} \mu\text{L}^{-1}$)

Las mezclas se llevaron a cabo en tubos para PCR con capacidad de 0.5 mL previamente esterilizados en una autoclave durante 15 minutos a 15 psi. Todos los componentes excepto el ADN a analizar, se mantuvieron en el congelador a

una temperatura de -20 °C y se trabajó en frío durante el procesamiento de las muestras.

Con la finalidad de detectar polimorfismos entre las variedades de trigo se realizó la técnica de ISSR-PCR, para ello se probaron 20 iniciadores de los cuales se seleccionaron 10 de ellos; la selección se basó en los que presentaron amplificación y bandas de calidad.

En el Cuadro 7 se indican los iniciadores utilizados, su secuencia, y concentración original.

Las reacciones se llevaron a cabo utilizando un termociclador marca Techne TC-512, utilizando un programa configurado para ISSR, cuyas condiciones se describen a continuación:

Un ciclo de desnaturalización a 94 °C durante 3 minutos, luego 30 ciclos con un paso de desnaturalización a 94 °C por 1 minuto, seguido por alineación a 50 °C por 1 minuto y la amplificación a 72 °C por dos minutos, al final, un ciclo de extensión a 72 °C por 10 minutos.

Cuadro 7. Características de los iniciadores utilizados en PCR para la obtención de los marcadores moleculares ISSR.

Iniciador	Secuencia (5' -> 3')	Concentración (pmol/uL)
(AG)8YA	AGAGAGAGAGAGAGAGYA	317
DBD(AC)7	DBDACACACACACACAC	264

ISSR5	GAGAGAGAGAGAGAGAT	318
A6	CTC TCT CTC TCT CTC TTG	346
ISSR4	GAGAGAGAGAGAGAGAC	377
(AG)8YC	AGAGAGAGAGAGAGAGYC	335
U810	GAGAGAGAGAGAGAGAT	368
A8	AGA GAG AGA GAG AGA GT	378
(AG)8YG	AGAGAGAGAGAGAGAGYG	368
(CT)8RC	CTCTCTCTCTCTCTCTC	238

3.4.5. PCR por genotipos

Se realizó la prueba de ISSR-PCR para las muestras analizadas para estrés por salinidad y estrés hídrico (32 variedades de las cuales, 15 corresponden a pruebas de estrés por salinidad y 17 corresponden a estrés hídrico) las muestras de variedades criollas se analizaron por separado ya que su amplificación fue menor para los iniciadores utilizados.

Para detectar polimorfismos entre las variedades se realizaron mezclas de ADN extraído de diez individuos por genotipo, se midió la concentración de cada muestra y se adicionó el volumen necesario de ADN y de agua grado molecular para obtener la concentración de $10 \text{ ng } \mu\text{L}^{-1}$, se prepararon $200 \mu\text{L}$ y se conservaron en frío para realizar la técnica de PCR con los 10 iniciadores que se utilizaron en el presente trabajo de investigación.

3.4.6. PCR para variedades criollas

Para llevar a cabo la técnica de ISSR-PCR de las variedades criollas, se realizó la extracción de ADN genómico de 10 individuos, se determinó la concentración y pureza, para posteriormente realizar una mezcla del ADN obtenido de los 10 individuos y llevarla a una concentración de $10 \text{ ng } \mu\text{L}^{-1}$, se prepararon $100 \mu\text{L}$ y se conservaron en frío hasta su análisis, para realizar la técnica de PCR se utilizaron 4 iniciadores los cuales fueron seleccionados por su calidad de amplificación y de bandas. Los iniciadores utilizados se describen en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Secuencia de los Iniciadores utilizados en la PCR para la obtención de marcadores ISSR de variedades criollas.

Iniciador	Secuencia (5' -> 3')
(AG)8YA	AGAGAGAGAGAGAGAGYA
DBD(AC)7	DBDACACACACACACAC
U810	GAGAGAGAGAGAGAGAT
(CT)8RC	CACACACACACACACARC

3.4.7. PCR de segregación masal

La prueba de segregación masal es una técnica usada para identificar marcadores genéticos que están asociados a rasgos de interés en la planta, en el caso de la presente investigación se utilizó para determinar genes relacionados

con la tolerancia y susceptibilidad, a salinidad o estrés hídrico según corresponda, de los genotipos analizados. Para realizar la prueba se forman dos grupos o clases opuestos del carácter de interés (tolerancia/susceptibilidad), esto permite identificar de manera rápida marcadores en una particular región del genoma (Harshavardan, 2021). Se obtuvieron en total cuatro grupos para estrés por salinidad y cuatro grupos para estrés hídrico, conformados como se indica en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Grupos evaluados en la prueba de segregación masal.

Especie	Tipo de estrés	Característica	Código de la variedad
<i>T. aestivum</i>		Tolerante	BW 49457 BW 49308 BW 36945 BW35697 BW33909
		Susceptible	BW 34025 BW 4113
<i>T. durum</i>	Hídrico	No reportado	DW 5282 DW5377 DW4963 DW4478 DW4477 DW4437 DW4404 DW4393 DW4385
		Susceptible	DW 4827

<i>T. aestivum</i>	Salinidad	Tolerante	CWI79985 BW38979 BW8763 BW20313
		Susceptible	BW22724 CWI79982 CWI79930
<i>T. durum</i>	Salinidad	Tolerante	DW10013 DW9858 DW7683
		Susceptible	CWI22413 CWI24116 CWI24129 CWI7999 DW16570

Para el análisis de segregación masal se utilizaron cinco iniciadores que se describen en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Secuencia de los Iniciadores utilizados en la prueba de segregación masal.

Iniciador	Secuencia (5' -> 3')
(AG)8YA	AGAGAGAGAGAGAGAGYA
DBD(AC)7	DBDACACACACACACAC
ISSR 4	GAGAGAGAGAGAGAGAC
A8	AGA GAG AGA GAG AGA GT
(CT)8RC	CACACACACACACARC

3.4.8. Electroforesis en geles de agarosa

La electroforesis para la separación de productos de PCR se llevó a cabo en una cámara electroforética horizontal marca Thermo EC Primo Maxicell EC340 con sistema de gel sumergido que consta de material resistente a disolventes orgánicos cuyas dimensiones son de 20 cm de largo por 20 cm de ancho.

Los productos de la PCR se procesaron en gel de agarosa al 1.2 % (p/v) y se utilizó TAE 0.5X como amortiguador, en cada pocillo se colocaron 10 µL del producto de la PCR mezclado con 5 µL de amortiguador de carga (0.1 % azul de bromofenol, 0.1 % de xylencianol, 30 % de Ficol), se aplicó una carga de 120 V durante la corrida hasta que todas las muestras alcanzaron tres cuartas partes del gel. En el pocillo inicial y en el pocillo final (y en algunos casos, en pocillos intermedios), se colocó 5 µL de marcador de peso molecular de 10,000 pares de bases, finalmente, se tiñó el gel utilizando una solución de bromuro de etidio; se sumergió el gel durante 10 minutos y posteriormente se enjuago con agua potable sumergiendo el gel durante 5 minutos, una vez ejecutado el enjuague se observó el patrón de bandas obtenido para cada muestra analizada, las bandas de ADN se documentaron utilizando un transiluminador de luz ultravioleta adaptado con el fotodocumentador Photo Doc-It Imaging System UVP.

3.4.9. Análisis de los datos

Se analizaron las capturas realizadas en el fotodocumentador utilizando el programa GelAnalyzer 23.1.1., este programa permitió la edición de las capturas para modificar el tamaño, recortar y contrastar, de igual manera, permite determinar el peso molecular de cada banda obtenida al compararla con las

bandas del marcador molecular utilizado. Se utilizó CapCut IA para invertir el color en las imágenes de la prueba de segregación masal.

Se determinó el número de bandas que se generaron, mismas que corresponden a los polimorfismos detectados para cada genotipo, con el patrón de bandas se llevó a cabo una matriz binaria de presencia o ausencia para cada uno de los iniciadores usando Microsoft Office Excel. Se trasladó la matriz binaria al Software NTSYSpc 2.2, donde se utilizó el coeficiente de similitud de Jaccard para realizar un análisis de conglomerados por el método de medias aritméticas (UPGMA), finalmente, se obtuvo un diagrama de árbol (dendrograma), donde se consideró cada genotipo como una unidad taxonómica operacional (OTU).

3.5. Análisis bioquímico

3.5.1. Acondicionamiento de las muestras

Las muestras se sembraron en charolas de germinación y se mantuvieron en crecimiento hasta el día 45 días después de siembra (dds) con riego a capacidad de campo, transcurridos los 45 días se aplicó estrés por salinidad y estrés hídrico según los tratamientos descritos en los Cuadros 5 y 6; para ello se traspasó la planta con la raíz libre de impurezas, a un tubo de ensaye con el tratamiento correspondiente, todas las plantas estuvieron sometidas a estrés previo a realizar el análisis bioquímico, el tiempo fue de 3 horas, suficiente para que presentaran marchitez y decaimiento.

3.5.2. Contenido Relativo de Agua (CRA)

El contenido relativo de agua (CRA) es un indicador del estado hídrico de las plantas, mide la cantidad de agua en la planta en estado fresco, en relación con su máxima capacidad de absorción. A pesar de que es un método destructivo; hay que tomar tejido material fresco el cual se elimina una vez haya terminado el análisis, es una técnica muy utilizada que permite conocer la respuesta de las plantas a situaciones de estrés hídrico o estrés por salinidad.

La cantidad de agua en el material vegetal puede expresarse de varias maneras, todo se basa en la medición del peso fresco (Pf) en el momento en que se toma la muestra, peso seco (Ps, normalmente peso seco en horno a 80 °C) y peso túrgido (Pt). El peso túrgido se obtiene sumergiendo hojas en el agua hasta que estas alcanzan un peso constante (Beadle & Honeysett, 1985).

El contenido relativo de agua se obtuvo en el día 45 dds, para ello se tomó una muestra de hojas sanas y jóvenes registrando el peso fresco de las hojas completamente expandidas, el peso fue obtenido en una balanza analítica marca OHAUS, una vez que se registró el peso se sumergieron las hojas en tubos de ensaye y se adicionó agua destilada hasta quedar completamente cubiertas, el proceso de absorción tomó 24 horas, transcurrido el tiempo se retiraron las hojas del agua y se eliminó el excedente con una toalla secante, el peso fue registrado utilizando la misma balanza analítica. El peso seco se obtuvo luego de procesar las hojas debidamente identificadas en un horno de convección durante 3 días a 70 °C.

Finalmente, se calculó el contenido relativo de agua utilizando la ecuación de Siddique et al. (2000):

$$\text{CRA (\%)} = [(\text{Peso fresco} - \text{Peso seco}) / (\text{Peso túrgido} - \text{Peso seco})] \times 100$$

3.5.3. Contenido de Clorofila

La clorofila es un pigmento verde existente en las plantas que permite llevar a cabo el proceso de fotosíntesis (Mathews et al., 2013). Existen diferentes tipos, Clorofila a, que se encuentra presente en la mayoría de los vegetales y es la encargada de absorber la luz durante la fotosíntesis; y la Clorofila b que se encuentra presente en los cloroplastos, se encarga de absorber la luz de otra longitud y transfiere la energía a la clorofila A (Fernández, 2010).

El contenido de clorofila se cuantificó 45 dds utilizando el método de extracción por acetona y cuantificación espectrofotométrica, el análisis se llevó a cabo siguiendo el método propuesto por Hansmann (1973) con algunas modificaciones como lo es la concentración de acetona, para ello se pesó 0.5 g de hoja fresca y se adicionó 5 mL de acetona al 80 %, se maceró la muestra utilizando un mortero de cerámica estéril, se colectó el extracto en un tubo Eppendorf y se centrifugó a 2,000 rpm por 10 minutos, se trasvasó el sobrenadante a un contenedor de vidrio y se ajustó el volumen a 6 mL con acetona al 80 %, se diluyó la muestra, para ello se tomó 100 µL de muestra y se adicionó 900 µL de acetona al 80 % para obtener 1 mL de dilución. Se cuantificó la muestra en un espectrofotómetro

Jenway 6305, a las siguientes longitudes de onda: 645 y 663 nm para obtener el contenido de clorofila a y clorofila b, respectivamente, así como el contenido de clorofila total. Las longitudes de onda mencionadas corresponden a aquellas donde la clorofila a y b tienen los picos de absorción.

Para obtener la concentración se utilizaron las ecuaciones descritas a continuación las cuales fueron propuestas por Arnon (1949):

$$\text{clorofila a} = 12.7 \cdot \text{Abs}_{663\text{nm}} - 2.69 \cdot \text{Abs}_{645\text{nm}}$$

$$\text{clorofila b} = 22.9 \cdot \text{Abs}_{645\text{nm}} - 4.68 \cdot \text{Abs}_{663\text{nm}}$$

$$\text{clorofila total} = 20,2(A_{645}) + 8,02(A_{663})$$

(Arnon, 1949)

Para la clorofila a, el término 12.7 (Abs 663 nm), corresponde a la cantidad bruta de clorofila, mientras tanto, el término 2.69 (Abs 645), corresponde a la resta causada por la interferencia de la absorción de la clorofila b en esa longitud de onda.

Para la clorofila b, el término 22.9 (Abs 645), corresponde a la concentración bruta de clorofila b, mientras que, el término 4.68 (Abs 663), corresponde a la corrección por la absorción de la clorofila a en 645 nm.

3.5.4. Contenido de Azúcares

Se determinó el total de azúcares solubles en el día 45 dds, para ello se utilizó el método descrito por Dubois (1951) con algunas modificaciones, la descripción indica utilizar 0.1 g de tejido fresco (peso fresco), sin embargo, en el presente

estudio se utilizó 0.1 g de tejido seco, lo que implicó realizar algunos ajustes al momento de tomar la absorbancia en el UV-VIS y determinar la concentración.

Para realizar la prueba, se pesó 0.1 de hojas secas, se les añadió 5 mL de etanol al 80 % y se calentó en un matraz Erlenmeyer durante 1 hora a 80 °C, se tomó 250 µL del extracto y le adicionó 250 µL de fenol 18 % y 250 µL de agua destilada. La mezcla se dejó reposar durante 1 hora a temperatura ambiente. Posteriormente, se añadió 1.25 mL de ácido sulfúrico grado reactivo y se mezcló suavemente, de acuerdo con Dubois et al. (1951), los azúcares simples, oligosacáridos, polisacáridos y sus derivados, dan un color anaranjado-amarillo cuando se tratan con fenol y ácido sulfúrico concentrado.

La reacción es sensible y el color es estable. Una vez que la reacción tuvo lugar, se dejó reposar durante 15 minutos el producto obtenido, ya que al tratarse de una reacción exotérmica la solución presentaba una temperatura elevada para ser medida en el equipo. La solución fue colocada en la celda y se midió la absorbancia a 490 nm utilizando un espectrofotómetro Jenway 6305, como blanco se utilizó etanol al 80 %. Para calcular la concentración de azúcares en mg g⁻¹, se realizó una curva patrón y se sustituyeron los valores en la ecuación de la recta.

3.5.5. Análisis de datos

Los resultados fueron registrados en el programa Excel, para posteriormente trasladarlos al sistema estadístico SAS 9 para su posterior análisis.

Los datos obtenidos de las pruebas bioquímicas fueron analizados en el programa estadístico SAS 9, se aplicó un análisis de varianza ($\alpha \leq 0.05$) y una prueba de comparación de medias (Tukey $\alpha \leq 0.05$ y Duncan $\alpha \leq 0.05$), lo que permite el agrupamiento de medias que no presentan diferencia significativa.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación morfológica en etapa de germinación

La germinación da inicio cuando la semilla absorbe agua y finaliza cuando emerge la radícula. Las tres fases principales son; Absorción del agua, en esta etapa las semillas deben alcanzar un contenido de agua entre 35 % y 45 % respecto a su peso seco. Activación, el embrión produce hormonas que estimulan la síntesis de enzimas responsables de metabolizar el almidón y proteínas de reserva, y, por último, la germinación visible, es cuando emerge la radícula y las raíces primarias, también aparece el coleóptilo (Abadia, 2017).

4.1.1. Respuesta a estrés por salinidad en etapa de germinación

El crecimiento, desarrollo y rendimiento del trigo se ven afectados negativamente por el estrés salino porque altera el equilibrio osmótico, la toxicidad iónica y el desequilibrio nutricional, para obtener agua de las capas profundas del suelo, donde haya menor presencia de sal, las plantas suelen desarrollar raíces más grandes y profundas, un mayor número de raíces ayuda a reducir los impactos

de la salinidad, por otro lado, en ambientes salinos donde la ingesta de agua está restringida, las plantas de trigo pueden reducir el área foliar para disminuir la pérdida de agua por transpiración, existen cambios en el tamaño, forma y las características superficiales de las hojas (Traye et al., 2025).

4.1.1.1. Porcentaje de germinación

Tras someter las semillas de las quince variedades de trigo a altas concentraciones salinas (100, 200 y 350 mM), se encontró que en todos ellos se presentó una fuerte inhibición en el crecimiento de la raíz, número de raíces y número de radículas.

Bajo condiciones de no estrés (0 mM de NaCl) la mayoría de las variedades de trigo mostraron un buen porcentaje de germinación (entre 90 y 100 %) y solo tres de *T. durum* tuvieron bajos porcentajes (50 a 60 %): DW9858, DW7683 Y CWI22413 (Cuadro 11). A 100 mM de NaCl, todas las variedades presentaron algún porcentaje de germinación, variando en un rango de entre 20 y 100 %. A 200 mM la variedad CWI7999 de *T. durum* fue la que mostró el mayor porcentaje de germinación (60 %) y fue clasificada previamente como susceptible a salinidad por investigadores del CIMMYT. A 350 mM solo la variedad BW20313 de *T. aestivum* logró germinar, con un porcentaje de 15 %; esta variedad también fue clasificada previamente como tolerante a salinidad por investigadores del CIMMYT (Cuadro 11).

En cuanto a la parte aérea, solo dos variedades fueron capaces de desarrollar coleóptilo a 200 mM: BW20313 y CWI7999. La variedad BW20313 también logró germinar a 350 mM de NaCl, pero no desarrolló coleóptilo bajo estas condiciones.

Cuadro 11. Porcentaje de germinación al día 14 para variedades sometidas a estrés salino.

Especie	Característica	Variedad	% de germinación día 14			
			0 mM	100 mM	200 mM	350 mM
<i>T. aestivum</i>	T	CWI79985	90 ab	40 cd	20 c	0 ab
		BW38979	100 a	80 ab	40 b	0 ab
		BW8763	100 a	40 cd	10 d	0 ab
		BW20313	100 a	75 bc	30 bc	15 a
		BW22724	90 ab	75 bc	25 bc	0 ab
	S	CWI79982	90 ab	100 a	30 bc	0 ab
		CWI79930	90 ab	80 ab	25 bc	0 ab
		DW10013	90 ab	20 e	5 d	0 ab
	T	DW9858	50 cd	45 cd	5 d	0 ab
		DW7683	60 cd	60 c	10 d	0 ab
<i>T. durum</i>	S	CWI22413	60 cd	60 c	5 d	0 ab
		CWI24116	70 bc	35 d	10 d	0 ab
		CWI24129	100 a	50 cd	25 bc	0 ab
		CWI7999	100 a	80 ab	60 a	0 ab
		DW16570	100 a	90 ab	45 b	0 ab

T:Tolerante, S:Susceptible

Valores con la misma letra dentro de cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Duncan con un $\alpha \leq 0.05$.

El análisis de medias de los cuatro tratamientos por variedad indicó que las variedades CWI7999 y DW16570 presentaron los porcentajes más altos de germinación, 60 y 58.75 %, respectivamente; lo cual no coincide con la clasificación de estas variedades como susceptibles a salinidad establecida por CIMMYT.

Las variedades que en promedio tuvieron el porcentaje de germinación más bajo, fueron la DW9858 (25 %) y la CWI24116 (28.75 %). La primera, clasificada por CIMMYT como tolerante y la segunda como susceptible a la salinidad. Ambas pertenecientes a la especie *Triticum durum*.

En las Figuras 1 y 2 se muestra el comportamiento de germinación de las semillas durante los cinco días en que se realizó la medición. Se comparan los valores obtenidos en el tratamiento testigo (0 mM) y bajo estrés severo (350 mM), respectivamente. Se puede apreciar la inhibición de la germinación en condiciones elevadas de salinidad, donde únicamente la variedad BW20313 presentó germinación.

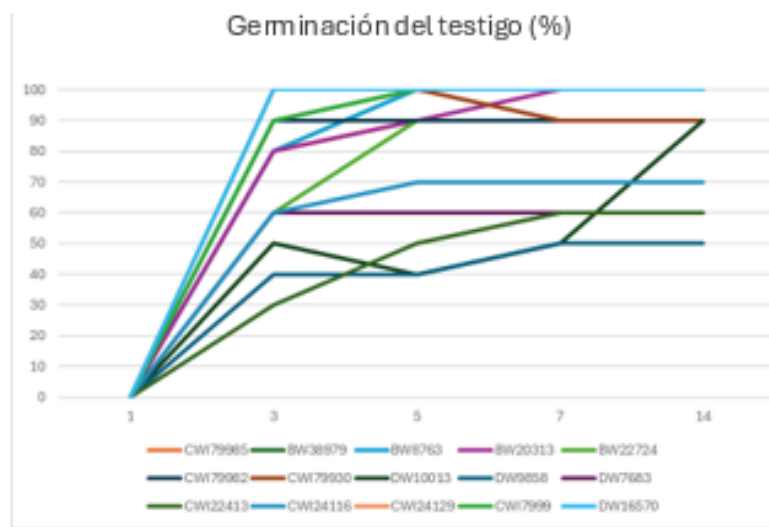


Figura 1. Porcentaje de germinación de las semillas de *Triticum aestivum* y *T. durum* en el tratamiento testigo (0 mM de NaCl).

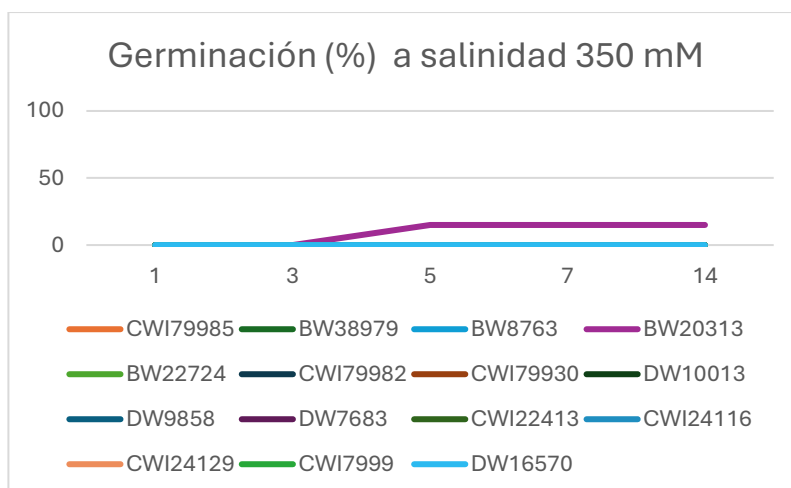


Figura 2. Porcentaje de germinación de las semillas de *Triticum aestivum* y *T. durum* bajo estrés severo por salinidad.

En los Cuadros 12 y 13 se muestra la tendencia de la germinación para los tratamientos testigo y 350 mM de NaCl, respectivamente, en función del tiempo, medido a los días 1, 3, 5, 7 y 14. Se detecta que las semillas presentan una germinación similar y uniforme para el tratamiento testigo (0 mM), mientras que la tendencia de germinación se ve afectada en condiciones de estrés severo, apreciándose una germinación casi nula bajo condiciones de salinidad severas (350 mM).

Cuadro 12. Porcentaje de germinación de las semillas de *Triticum aestivum* y *T. durum* bajo el tratamiento testigo (0 mM de NaCl).

TRATAMIENTO TESTIGO (0 mM de NaCl)					
Variedad	Día de germinación				
	1	3	5	7	14
CWI79985	0	80	90	90	90
BW38979	0	80	100	100	100
BW8763	0	80	100	100	100
BW20313	0	80	90	100	100
BW22724	0	60	90	90	90
CWI79982	0	90	90	90	90
CWI79930	0	100	100	90	90
DW10013	0	40	50	50	90
DW9858	0	40	40	50	50
DW7683	0	60	60	60	60
CWI22413	0	30	50	60	60
CWI24116	0	60	70	70	70
CWI24129	0	90	100	100	100
CWI7999	0	90	100	100	100
DW16570	0	100	100	100	100

Cuadro 13. Porcentaje de germinación de las semillas de *Triticum aestivum* y *T. durum* bajo estrés severo por salinidad (350 mM de NaCl).

TRATAMIENTO DE ESTRÉS POR SALINIDAD (350 mM NaCl)					
Variedad	DÍA				
	1	3	5	7	14
CWI79985	0	0	0	0	0
BW38979	0	0	0	0	0
BW8763	0	0	0	0	0
BW20313	0	0	15	15	15
BW22724	0	0	0	0	0
CWI79982	0	0	0	0	0
CWI79930	0	0	0	0	0
DW10013	0	0	0	0	0
DW9858	0	0	0	0	0
DW7683	0	0	0	0	0
CWI22413	0	0	0	0	0
CWI24116	0	0	0	0	0
CWI24129	0	0	0	0	0
CWI7999	0	0	0	0	0
DW16570	0	0	0	0	0

El análisis de medias por tratamiento utilizando la prueba de Duncan ($\alpha \leq 0.05$), mostró el efecto inhibitorio de los tratamientos testigo (0 mM), (100 mM), (200 mM) y (350 mM) sobre la germinación de las semillas, en donde se obtuvo 86 %, 62 %, 23 % y 1 % de germinación, respectivamente; observándose que a mayor concentración de sales mayor fue el efecto inhibitorio.

En el Cuadro 14 puede observarse el efecto de los tratamientos en las quince variedades evaluadas, de igual manera, la Figura 3 muestra la disminución en el porcentaje de germinación registrado conforme se incrementó el estrés salino en las plantas.

Cuadro 14. Porcentaje de germinación de las semillas de *Triticum aestivum* y *T. durum* bajo cuatro tratamientos de estrés salino (NaCl).

Variedad	0 mM	100 mM	200 mM	350 mM
CWI79985	90	40	20	0
BW38979	100	80	40	0
BW8763	100	40	10	0
BW20313	100	75	30	15
BW22724	90	75	25	0
CWI79982	90	90	30	0
CWI79930	90	80	25	0
DW10013	90	20	5	0
DW9858	50	45	5	0
DW7683	60	60	10	0
CWI22413	60	60	5	0
CWI24116	70	35	10	0
CWI24129	100	50	25	0
CWI7999	100	80	60	0
DW16570	100	90	45	0

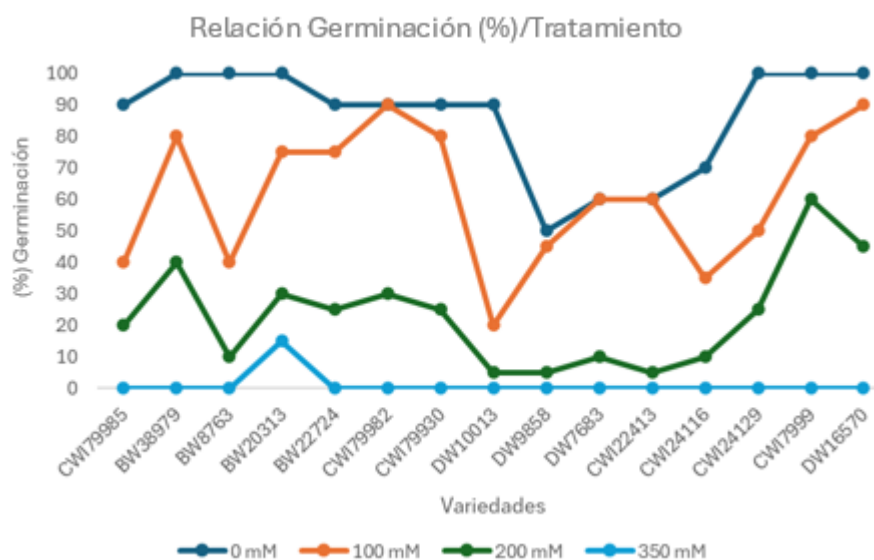


Figura 3. Porcentaje de germinación de semillas de *T. aestivum* y *T. durum* sometidas a estrés salino (0 mM, 100 mM, 200 mM, 350 mM).

4.1.1.2. Raíces

Los caracteres medidos para las raíces también se vieron severamente afectados al someter las plantas a estrés por salinidad. Solo en los tratamientos testigo (0 mM de NaCl) y a 100 mM de NaCl, se observó crecimiento de raíz y desarrollo de radículas; mientras que en los tratamientos de 200 y 350 mM de NaCl la inhibición de estos procesos fue cercana al 100 %. De acuerdo con Ying Ying y Wieldman (2023), las raíces disminuyen su conductividad hidráulica como respuesta al estrés salino y también disminuyen su crecimiento longitudinal y volumen.

4.1.1.2.1. Longitud de raíz

La longitud de la raíz se vio significativamente afectada por las condiciones de estrés. En el Cuadro 15 se muestra la reducción en centímetros para la longitud de raíz; los genotipos BW22724 y BW38979 mostraron una menor reducción con 2.64 cm y 5.17 cm a una concentración de 100 mM, respectivamente. Mientras que la variedad BW8763 mostró la mayor reducción siendo esta de 18.38 cm a 100 mM.

Al realizar la prueba de agrupamiento de medias para los tratamientos, se obtuvo una media de 17.3 cm de longitud para el tratamiento testigo, 4.9 cm para el tratamiento a 100 mM de NaCl, 0.76 cm para el tratamiento a 200 mM y 0.022 cm para el tratamiento a 350 mM de NaCl. Lo anterior es muestra de la severa afectación que presentan las plantas sometidas a altas concentraciones de salinidad, llegando a tener hasta un 100 % de reducción para una concentración de

350 mM de NaCl. En estudios realizados por Nxele et. al. (2017), raíces de sorgo presentaron una reducción del 17 % en la longitud al estar sometidas a estrés salino (100 mM) durante 17 días.

Los resultados obtenidos coinciden con los de Fu et al. (2023), en los cuales se determinó que el estrés por NaCl afectó considerablemente la longitud de las raíces, así como el área superficial de las raíces y el número de las mismas, en tres variedades de trigo analizadas.

Cuadro 15. Reducción en la longitud de raíz en cm bajo tratamientos de estrés salino respecto al testigo (0 mM de NaCl).

Reducción en la longitud de raíz (cm) a altas concentraciones de salinidad			
Variedad	100 mM	200 mM	350 mM
CWI79985	-10.89 ± 1.04 b	-12.90 ± 0.51 bc	-13.72 ± 0.5 c
BW38979	-5.17 ± 4.66 a	-11.11 ± 4.82 b	-12.55 ± 5.55 bc
BW8763	-18.38 ± 5.40 d	-21.16 ± 4.22 e	-22.00 ± 4.18 e
BW20313	-13.84 ± 3.03 c	-16.68 ± 2.95 d	-18.31 ± 3.39 d
BW22724	-2.64 ± 1.69 a	-7.28 ± 0.91 ab	-8.43 ± 2.06 b
CWI79982	-14.21 ± 0.19 c	-18.86 ± 2.55 d	-19.58 ± 2.67 e
CWI79930	-11.51 ± 1.99 bc	-16.30 ± 2.96 cd	-16.88 ± 3.20 d
DW10013	-13.48 ± 6.23 c	-14.70 ± 5.9 c	-15.07 ± 6.64 cd
DW9858	-13.71 ± 2.05 c	-17.21 ± 1.28 d	-17.32 ± 1.06 d
DW7683	-13.43 ± 0.03 c	-16.95 ± 1.21 d	-17.35 ± 0.41 d
CWI22413	-10.58 ± 0.89 b	-14.38 ± 1.18 c	-14.64 ± 0.65 c
CWI24116	-17.28 ± 0.42 d	-23.94 ± 0.19 e	-24.29 ± 0.50 f
CWI24129	-14.32 ± 3.46 c	-20.87 ± 1.80 e	-21.14 ± 1.89 e
CWI7999	-11.79 ± 0.17 bc	-13.43 ± 0.09 c	-14.97 ± 0.31 c
DW16570	-15.49 ± 2.28 cd	-23.48 ± 1.55 ef	-24.03 ± 1.70 ef

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha \leq 0.05$.

4.1.1.2.2. Número de Radículas

También el número de radículas presentó una severa disminución bajo condiciones de estrés salino. En el tratamiento testigo se tuvo un promedio de 10 radículas o pelos de raíz por planta, disminuyendo a 7.22 para el tratamiento a 100 mM, mientras que para los tratamientos a 200 mM y 350 mM de NaCl se observó 0 radículas por planta; esto se debió a la inhibición casi absoluta en el crecimiento de raíz y, por ende, en el desarrollo de radículas. Como se muestra en el Cuadro 16, la variedad con un mayor número de radículas es la CWI79930, con un promedio de 15.25 para 100 mM, esta misma variedad presentó 18 radículas para el tratamiento testigo.

La variedad con menor número de radículas fue CWI79985, con un promedio de 2.5 radículas por planta.

Cuadro 16. Número promedio de radículas de plantas sometidas a diferentes condiciones de estrés salino.

Radículas a altos potenciales salinos			
Variedad	100 mM	200 mM	350 mM
CWI79985	2.5 c	0	0
BW38979	3.5 c	0	0
BW8763	10.5 ab	0	0
BW20313	4 bc	0	0
BW22724	5 bc	0	0
CWI79982	4.5 bc	0	0
CWI79930	15.25 a	0	0
DW10013	11 ab	0	0
DW9858	10.5 ab	0	0
DW7683	9.25 bc	0	0
CWI22413	8.75 bc	0	0
CWI24116	9.75 bc	0	0
CWI24129	14.5 a	0	0
CWI7999	9.5 bc	0	0
DW16570	12 ab	0	0

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha \leq 0.05$.

4.1.1.2.3. Número de Raíces

El número de raíces también se redujo considerablemente en las plantas sometidas a altos potenciales salinos, mostrando un incremento en la reducción conforme se aumentaba la concentración salina en el tratamiento.

Los resultados para la prueba de agrupamiento de medias de Duncan mostraron que para el tratamiento testigo se obtuvieron en promedio 7.0 raíces por planta, disminuyendo a 5.4, 2.3, y 0.6, para los tratamientos 100 mM, 200 mM y 350 mM de NaCl, respectivamente.

Por otro lado, las variedades más sobresalientes fueron las siguientes; CWI7999 y DWI16570, con un promedio de 8.5 y 6.5 raíces por planta, a 100 mM, respectivamente. Sin embargo, la variedad BW20313, fue la única que germinó a 350 mM, desarrollando solo 1 raíz por planta.

En el Cuadro 17 se presenta el promedio de raíces que desarrolló cada variedad respecto a los tratamientos salinos que se aplicaron.

Cuadro 17. Número promedio de raíces por variedad bajo los tratamientos de estrés salino.

Raíces a altas concentraciones salinas			
Variedad	100 mM	200 mM	350 mM
CWI79985	5 bc	2 cd	0 d
BW38979	5 bc	1 cd	0 d
BW8763	5 bc	1.5 cd	0 d
BW20313	6 bc	4 c	1 cd
BW22724	5.5 bc	2 cd	0 d
CWI79982	5.5 bc	1.5 cd	0 d
CWI79930	5.5 bc	1 cd	0 d
DW10013	3 cd	1 cd	0 d
DW9858	5.5 bc	1 cd	0 d
DW7683	5.5 bc	0.5 d	0 d
CWI22413	6 bc	0.5 d	0 d
CWI24116	6 bc	1 cd	0 d
CWI24129	6 bc	1 cd	0 d
CWI7999	8.5 a	6.5 ab	0 d
DW16570	6.5 ab	1.5 cd	0 d

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha \leq 0.05$.

4.1.1.3. Parte aérea

De acuerdo con Lindberg y Premkumar (2024), bajo estrés por salinidad el trigo sufre significativamente y se desarrolla deficientemente, sin embargo, sus hojas presentan niveles más bajos de Na^+ y Cl^- comparado con la cebada y la canola.

Tras aplicar los tratamientos con altas concentraciones de salinidad, las plantas mostraron una inhibición drástica para el tratamiento a 100 mM de NaCl, y una inhibición total para los tratamientos a 200 y 350 mM de NaCl.

A altas concentraciones de salinidad, se redujo el desarrollo de la parte aérea, tanto del tallo como de las hojas, a pesar de no haber medido el grosor de las hojas y del

tallo, también se observó que las plantas presentaban hojas más delgadas y menos turgentes que las plantas sometidas al tratamiento testigo.

4.1.1.3.1. Longitud de la hoja

Las hojas de las plantas sometidas a estrés por salinidad presentaron una disminución en la longitud. A una concentración de 100 mM de NaCl, la variedad CWI79982 fue la que presentó una reducción menor (2.21 cm) y en contraste la variedad CWI22413 fue la que mostró la mayor disminución (16.32 cm).

En lo que respecta a los tratamientos 200 mM y 350 mM de NaCl, se observó una inhibición total en el desarrollo de las hojas.

Al realizar la prueba de rangos múltiples de Duncan para los tratamientos, se obtuvo una media de 14.21 cm para el tratamiento testigo, de 6.327 cm para el tratamiento 100 mM, y una media de 0 para los tratamientos 200 y 350 mM de NaCl.

En el Cuadro 18, se muestra la reducción en la longitud de las hojas y la desviación estándar para el tratamiento a 100 mM de NaCl, respecto al testigo.

Cuadro 18. Reducción de la longitud de las hojas (cm) a 100 mM de NaCl, en relación al testigo.

Reducción en la longitud de la hoja (cm) a altas concentraciones salinas	
Variedad	100 mM ($\bar{x} \pm DE$)
CWI79985	-5.32 $\pm$ 1.57 b
BW38979	-3.5 $\pm$ 0.52 a
BW8763	-9.56 $\pm$ 3.38 c
BW20313	-6.59 $\pm$ 0.75 b
BW22724	-8.11 $\pm$ 2.06 b
CWI79982	-2.21 $\pm$ 0.41 a
CWI79930	-3.78 $\pm$ 1.54 a
DW10013	-15.93 $\pm$ 4.27 cd
DW9858	-9.88 $\pm$ 6.47 c
DW7683	-12.74 $\pm$ 0.01 c
CWI22413	-16.32 $\pm$ 6.87 cd
CWI24116	-11.42 $\pm$ 2.75 c
CWI24129	-8.32 $\pm$ 2.29 b
CWI7999	-10.81 $\pm$ 0.59 c
DW16570	-6.36 $\pm$ 1.08 b

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha \leq 0.05$.

DE: Desviación estándar, $\bar{x}$: media

4.1.1.3.2. Longitud del coleóptilo

De acuerdo con Kesh et al. (2022), como lo menciona Zahid et al. (2025), se encontró que la longitud del tallo disminuye significativamente a concentraciones crecientes de NaCl (0-150 mM) en todos los genotipos de trigo. La longitud del tallo es un factor significativo en el estrés por salinidad ya que ahí se acumulan diferentes metabolitos bajo estrés salino.

En el Cuadro 19 se muestra la disminución en la longitud del coleóptilo de las variedades sometidas a estrés por salinidad, la cual muestra una disminución

creciente conforme aumentó la concentración de salinidad. La variedad CWI22413 fue la que presentó mayor disminución para el tratamiento 100 mM, con 3.56 cm.

Las variedades BW20313 y CWI7999, mostraron medias de 2.25 y 2.4 cm de crecimiento, respectivamente, siendo las variedades más sobresalientes para el tratamiento a 200 mM de NaCl.

Para el tratamiento de estrés más severo (350 mM), no se registró crecimiento del coleóptilo, por tanto, los valores mostrados representan la longitud del coleóptilo para las muestras testigo de la misma variedad.

Cuadro 19. Reducción en la longitud del coleóptilo (cm) a altas concentraciones de salinidad.

Reducción en la longitud del coleóptilo (cm) a altas concentraciones de salinidad			
Variedad	100 mM ($\bar{x} \pm DE$)	200 mM ($\bar{x} \pm DE$)	350 mM ($\bar{x} \pm DE$)
CWI79985	-0.27 $\pm$ 0.44 a	-2.50 $\pm$ 0.11 a	-2.50 $\pm$ 0.11 a
BW38979	-0.39 $\pm$ 0.21 a	-2.94 $\pm$ 0.11 a	-3.19 $\pm$ 0.38 ab
BW8763	-0.81 $\pm$ 0.27 a	-3.87 $\pm$ 0.37 b	-3.87 $\pm$ 0.37 b
BW20313	-2.17 $\pm$ 0.85 a	-3.29 $\pm$ 0.62 ab	-5.68 $\pm$ 0.65 b
BW22724	-0.24 $\pm$ 0.10 a	-3.13 $\pm$ 0.11 ab	-3.13 $\pm$ 0.11 ab
CWI79982	-0.23 $\pm$ 0.09 a	-1.94 $\pm$ 0.07 a	-2.22 $\pm$ 0.11 a
CWI79930	-0.80 $\pm$ 0.07 a	-3.02 $\pm$ 0.21 ab	-3.02 $\pm$ 0.21 ab
DW10013	-1.03 $\pm$ 0.08 a	-2.89 $\pm$ 1.22 a	-3.22 $\pm$ 0.57 ab
DW9858	-1.88 $\pm$ 0.21 a	-4.32 $\pm$ 0.25 b	-4.32 $\pm$ 0.25 b
DW7683	-1.02 $\pm$ 0.01 a	-2.98 $\pm$ 0.39 ab	-2.98 $\pm$ 0.39 a
CWI22413	-3.56 $\pm$ 1.24 ab	-4.33 $\pm$ 0.74 b	-4.44 $\pm$ 0.51 b
CWI24116	-1.23 $\pm$ 0.33 a	-3.95 $\pm$ 0.18 b	-3.95 $\pm$ 0.18 b
CWI24129	-2.26 $\pm$ 1.04 a	-4.03 $\pm$ 0.89 b	-4.31 $\pm$ 0.91 b
CWI7999	-1.74 $\pm$ 1.52 a	-2.73 $\pm$ 1.16 a	-5.03 $\pm$ 1.68 b
DW16570	-1.53 $\pm$ 0.54 a	-3.48 $\pm$ 0.62 ab	-3.81 $\pm$ 0.60 ab

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha \leq 0.05$.

DE: Desviación estándar, $\bar{x}$: media

4.1.1.3.3. Longitud de la parte aérea

La parte aérea presentó inhibición del 100 % para el tratamiento correspondiente a la concentración de 350 mM de NaCl.

En cuanto al tratamiento 100 mM de NaCl, la variedad CWI79982 fue la que redujo en menor medida la longitud de la parte aérea con 2.44 cm, mientras que la variedad CWI22413 fue la que presentó una mayor reducción con 19.88 cm.

En el Cuadro 20, se aprecia la reducción en cm de la parte aérea de las variedades sometidas a tratamientos de estrés por salinidad.

Al realizar el agrupamiento de medias para tratamientos, se obtuvieron los siguientes resultados para la longitud de la parte aérea; en el tratamiento testigo una media de 18.68 cm, en el tratamiento 100 mM una media de 8.36 cm, en el tratamiento 200 mM una media de 0.43 cm, mientras que para el tratamiento 350 mM de NaCl se obtuvo una media de 0 cm.

Debido a que la parte aérea presentó una inhibición del 100 % para el tratamiento más severo (350 mM), los datos presentados en el Cuadro 20 representan la disminución de crecimiento; en este caso nulo, respecto a lo obtenido para la misma variedad sometida al tratamiento testigo.

Cuadro 20. Reducción de la parte aérea (cm) por estrés salino en relación al tratamiento testigo.

Reducción en la longitud de la parte aérea (cm) a altas concentraciones salinas			
Variedad	100 mM ($\bar{x} \pm DE$)	200 Mm ($\bar{x} \pm DE$)	350 mM ($\bar{x} \pm DE$)
CWI79985	-5.59 $\pm$ 2.03 a	-13.31 $\pm$ 0.74 b	-13.31 $\pm$ 0.74 b
BW38979	-3.89 $\pm$ 0.82 a	-14.99 $\pm$ 0.62 b	-14.99 $\pm$ 0.62 b
BW8763	-10.37 $\pm$ 2.12 b	-18.14 $\pm$ 0.08 bc	-18.14 $\pm$ 0.08 bc
BW20313	-8.76 $\pm$ 2.42 a	-19.07 $\pm$ 0.75 bc	-21.13 $\pm$ 1.00 c
BW22724	-8.35 $\pm$ 1.98 a	-18.00 $\pm$ 0.72 bc	-18.00 $\pm$ 0.72 bc
CWI79982	-2.44 $\pm$ 0.68 a	-11.16 $\pm$ 0.19 b	-11.44 $\pm$ 0.24 b
CWI79930	-4.60 $\pm$ 1.87 a	-13.76 $\pm$ 2.86 b	-13.76 $\pm$ 2.86 b
DW10013	-16.96 $\pm$ 4.36 b	-18.82 $\pm$ 3.05 bc	-19.15 $\pm$ 3.7 bc
DW9858	-11.76 $\pm$ 6.98 b	-20.41 $\pm$ 1.13 bc	-20.41 $\pm$ 1.13 bc
DW7683	-13.70 $\pm$ 0.22 b	-18.29 $\pm$ 0.90 bc	-18.29 $\pm$ 0.90 bc
CWI22413	-19.88 $\pm$ 7.65 bc	-24.18 $\pm$ 0.93 d	-24.30 $\pm$ 0.71 d
CWI24116	-12.65 $\pm$ 1.73 b	-24.55 $\pm$ 0.88 d	-24.55 $\pm$ 0.88 d
CWI24129	-10.53 $\pm$ 3.06 b	-18.53 $\pm$ 3.39 bc	-18.81 $\pm$ 3.42 bc
CWI7999	-12.49 $\pm$ 0.94 b	-22.01 $\pm$ 0.03 c	-24.31 $\pm$ 0.55 d
DW16570	-7.89 $\pm$ 1.01 a	-17.50 $\pm$ 1.19 bc	-17.83 $\pm$ 1.20 bc

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha \leq 0.05$.

DE: Desviación estándar, $\bar{x}$: media

4.1.1.4. Peso fresco

El peso fresco de las plantas también se redujo conforme fue aumentando la concentración de NaCl en los tratamientos. Para el tratamiento a la concentración de 350 mM, la variedad que presentó la mayor reducción fue BW8673 (2.6 g), mientras que el genotipo CWI24116 fue el que menos redujo su peso en 1 g.

En el Cuadro 21 se presenta la reducción en gramos que tuvieron las variedades analizadas a los distintos tratamientos, los valores presentados corresponden al peso de las plantas al día 14 de germinación, para las variedades que no presentaron germinación se registró el peso de las semillas tras ser sometidas al

estrés correspondiente, el peso obtenido por variedad y tratamiento fue comparado con el valor obtenido para cada una de las variedades bajo el tratamiento testigo.

Cuadro 21. Reducción en peso fresco (g) de plantas por estrés salino, respecto al tratamiento testigo.

Reducción en el peso fresco (g) a altas concentraciones salinas			
Variedad	100 mM ($\bar{x} \pm DE$)	200 mM ($\bar{x} \pm DE$)	350 mM ($\bar{x} \pm DE$)
CWI79985	-1 ab	-2.2 bc	-2.3 bc
BW38979	-0.9 a	-1.8bc	-2.1 bc
BW8763	-1.3 ab	-2.5 c	-2.6 c
BW20313	-1.3 ab	-2 bc	-2 bc
BW22724	-1.2 ab	-2.0 bc	-2.1 bc
CWI79982	-0.7 a	-1.3 ab	-1.4 ab
CWI79930	-1 ab	-1.7 bc	-1.8 bc
DW10013	-1.1 ab	-1.9 bc	-2 bc
DW9858	-1.1 ab	-2 bc	-2 bc
DW7683	-0.7 a	-1.7 bc	-1.7 bc
CWI22413	-0.8 a	-1.8 bc	-1.8 bc
CWI24116	-0.4 a	-0.9 a	-1 ab
CWI24129	-0.8 a	-1.6 bc	-1.6 bc
CWI7999	-1 ab	-1.9 bc	-2.1 bc
DW16570	-0.7 a	-1.3 ab	-1.3 ab

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha=0.05$.

DE: Desviación estándar, $\bar{x}$: media

4.1.1.5. Pigmentación antociánica

En el Cuadro 22 se agrupan las variedades según el tipo de pigmentación presentada, la clasificación se asignó de acuerdo con el manual gráfico para la descripción varietal emitido por la SAGARPA en 2015.

Cuadro 22. Agrupamiento de variedades según pigmentación antociánica presentada.

Pigmentación antociánica de variedades sometidas a estrés salino					
	Ausente o muy débil	Débil	Media	Fuerte	Muy fuerte
	CWI79985	DW7683	-----	DW16570	-----
	BW38979	-----	-----	-----	-----
	BW8763	-----	-----	-----	-----
	BW20313	-----	-----	-----	-----
	BW22724	-----	-----	-----	-----
	CWI79982	-----	-----	-----	-----
	CWI79930	-----	-----	-----	-----
	DW10013	-----	-----	-----	-----
	DW9858	-----	-----	-----	-----
	CWI22413	-----	-----	-----	-----
	CWI24116	-----	-----	-----	-----
	CWI24129	-----	-----	-----	-----
Variedad	CWI7999	-----	-----	-----	-----

Valores ordinales según el Manual Gráfico para la Descripción Varietal, SAGARPA, 2015.

De acuerdo con Tereshchenko et al. (2012), como mencionaron Shoeva y Khlastkina (2015), el análisis comparativo de líneas casi isogénicas de trigo, que difieren únicamente en el contenido de antocianinas en el coleóptilo y el pericarpio, mostró una mayor tolerancia a las sequías en las plántulas de color intenso.

De las variedades sometidas a estrés salino, únicamente la variedad DW16570 mostró pigmentación antociánica fuerte, y la variedad DW7683 mostró pigmentación antociánica débil, el resto de variedades no presentaron pigmentación.

4.1.1.6. Correlación de parámetros evaluados para raíces y parte aérea

Bajo condiciones de estrés salino se encontraron correlaciones positivas, tal como se muestran en el Cuadro 23. Los caracteres longitud de raíz y longitud de la hoja, se correlacionaron con un valor de 0.9119, mientras que la longitud de raíz y longitud de parte aérea mostraron un valor de 0.9094.

Por su parte, el parámetro número de raíces se correlacionó con la longitud de parte aérea con un valor de 0.8348, mientras que el parámetro número de radículas se correlacionó con la longitud de la parte aérea con un valor de 0.7688.

Cuadro 23. Valores de r del análisis de correlación entre las variables evaluadas durante la germinación bajo condiciones de estrés salino.

	LR	NR	Nra	LH	LT	LPA
LR	1.0000					
NR	0.7098**	1.0000				
Nra	0.7416**	0.7627**	1.0000			
LH	0.9119**	0.8094**	0.7611**	1.0000		
LT	0.1010	0.1559	0.2398	0.1405	1.0000	
LPA	0.9093**	0.8348**	0.7688**	0.9956**	0.1545	1.0000

LR:Longitud de raíz, **NR:**Número de raíces, **Nra:**Número de radículas, **LH:**Longitud de la hoja, **LH:**Longitud del tallo, **LPA:**Longitud de la parte aérea

**Altamente significativo

4.1.2. Respuesta de las variedades de trigo a estrés hídrico con PEG-8000 en etapa de germinación

Estudios realizados con diversas especies como maíz, cebolla y albahaca (Rangel et al., 2019; Marín et al., 2007; Ojeda, 2013), muestran una disminución en el porcentaje de germinación conforme se reduce el potencial osmótico (a medida que se incrementa la concentración de polietilenglicol), no solo el porcentaje de

germinación se vio afectado, también la acumulación de masa, y, por lo tanto, el crecimiento y desarrollo de las plántulas.

El déficit hídrico induce numerosas respuestas fisiológicas, de acuerdo con Singh et al. (2025), la sequía afecta diversas etapas de crecimiento, entre las cuales se incluye la germinación, la cual se puede ver inhibida.

El estrés hídrico reduce la absorción del agua, lo que disminuye el vigor de las plántulas, esto termina siendo perjudicial durante la etapa de germinación, ya que afecta el equilibrio hídrico y con ello las reacciones metabólicas (Ahmed et al., 2022).

Los parámetros evaluados (raíces, parte aérea, peso fresco y pigmentación antocianica), fueron evaluados a los 14 días de germinación bajo condiciones controladas de estrés hídrico con PEG-8000, por tanto, no se presentan datos en la etapa reproductiva de la planta.

4.1.2.1. Porcentaje de germinación

Tras someter diecisiete variedades de trigo a los tratamientos 1, testigo, 2 (-0.4 MPa), 3 (-0.8 MPa) y 4 (-1.0 MPa), se observó una disminución gradual en el porcentaje de germinación conforme se aumentaba el estrés hídrico. A partir del tratamiento 2 (-0.4 MPa) el porcentaje de germinación se redujo considerablemente, cuyo porcentaje mínimo fue del 40 % de germinación para la variedad DW4478. En cuanto al tratamiento 4 (-1.0 MPa), las variedades BW36945 y DW5383, fueron las

que presentaron un porcentaje más bajo de germinación, alcanzando solo el 10 %. En el mismo tratamiento, las variedades que presentaron un 100 % de germinación pese a las condiciones severas de estrés hídrico, fueron la variedad BW34025 y la variedad DW4477.

En el Cuadro 24 se puede apreciar el comportamiento en germinación de las diecisiete variedades analizadas bajo los cuatro tratamientos.

Cuadro 24. Porcentaje de germinación de semillas de variedades de trigo sometidas a tratamientos de estrés hídrico.

Especie	Característica	Variedad	Germinación (%) día 14				
			0 MPa	(-0.4 MPa)	(-0.8 MPa)	(-1.0 MPa)	
<i>Triticum aestivum</i>	T	BW49457	100 a	80 bc	55 bc	55 ab	
		BW49308	100 a	90 ab	95 a	30 c	
		BW36945	100 a	100 a	20 cd	10 d	
		BW35697	100 a	100 a	95 a	70 ab	
		BW33909	80 ab	60 cd	30 c	30 c	
	S	BW34025	100 a	100 a	55 bc	100 a	
		BW4113	100 a	90 ab	50 bc	45 b	
	<i>Triticum durum</i>	NR	DW5383	90 ab	50 cd	15 d	10 d
			DW5377	100 a	40 d	30 c	15 cd
			DW4963	100 a	60 cd	60 b	35 c
DW4478			100 a	40 d	35 c	15 cd	
DW4477			100 a	80 bc	95 a	100 a	
DW4437			100 a	80 bc	70 b	40 bc	
DW4404			100 a	80 bc	60 b	20 cd	
DW4393			100 a	100 a	50 bc	50 b	
DW4386			60 c	100 a	25 cd	60 ab	
S			DW4827	100 a	70 bc	50 bc	50 b

T: Tolerante, S: Susceptible, NR: No Reportado, Valores con la misma letra dentro de cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Duncan con un $\alpha \leq 0.05$.

Tras realizar el análisis de medias de Duncan, se promedió el porcentaje de germinación obtenido para los cuatro tratamientos para cada una de las variedades, los resultados indican que la variedad DW4477 presenta el porcentaje de

germinación más elevado, alcanzando un 90 % de germinación, seguido por la variedad BW35697 con una germinación estimada de 86.25 %.

En contraste, las variedades DW5383 y DW 5377, presentaron los porcentajes de germinación más bajos, reportando un 42.5 % y 45 %, respectivamente; ambas variedades corresponden a la especie *Triticum durum* y no cuentan con reporte de tolerancia o susceptibilidad al estrés hídrico.

El análisis de medias por tratamiento utilizando la prueba de Duncan ($\alpha \leq 0.05$), mostró la formación de cuatro grupos, correspondiendo un grupo a cada tratamiento. Se estimó que en el tratamiento 1 (testigo) se presentó una media de 98.38 % de germinación, mientras que en el tratamiento 4 (-1.0 MPa) se presentó solo un 36.47 % de germinación, mostrando la tendencia que tienen las semillas de trigo a inhibir su germinación en ambientes de estrés hídrico.

En los Cuadros 25 y 26 y Figuras 4 y 5, se muestra el comportamiento de germinación de las diecisiete variedades de trigo sometidas a estrés hídrico, respecto al tiempo de germinación, las mediciones mostradas corresponden a los días 1, 3, 5, 7 y 14 de germinación. Se aprecian porcentajes cercanos al 100 % para el tratamiento testigo, y una drástica disminución para el tratamiento más severo.

Cuadro 25. Porcentaje de germinación de las semillas de *Triticum aestivum* y *T. durum* bajo el tratamiento testigo.

TRATAMIENTO TESTIGO (0 MPa)					
Variedad	Día de germinación				
	1	3	5	7	14
BW49457	0	90	100	100	100
BW49308	0	100	100	100	100
BW36945	0	100	100	100	100
BW35697	0	100	100	100	100
BW33909	0	60	80	80	80
BW34025	0	10	100	100	100
BW4113	0	80	100	100	100
DW5383	0	20	40	80	90
DW5377	0	60	90	90	100
DW4963	0	80	90	100	100
DW4478	0	60	90	90	100
DW4477	0	100	100	100	100
DW4437	0	80	90	100	100
DW4404	0	50	80	100	100
DW4393	0	70	90	100	100
DW4386	0	50	50	60	60
DW4827	0	100	100	100	100

Cuadro 26. Porcentaje de germinación de semillas de *T. aestivum* y *t. durum* bajo el tratamiento severo de estrés hídrico.

TRATAMIENTO 4 (-1MPa) ESTRÉS HÍDRICO					
Variedad	Día de germinación				
	1	3	5	7	14
BW49457	0	50	50	50	55
BW49308	0	20	20	20	30
BW36945	0	0	5	5	10
BW35697	0	35	55	55	70
BW33909	0	20	20	20	30
BW34025	0	80	90	90	100
BW4113	0	35	30	20	45
DW5383	0	10	10	5	10
DW5377	0	0	10	10	15
DW4963	0	20	25	25	35
DW4478	0	5	10	10	15
DW4477	0	40	40	40	100
DW4437	0	10	20	10	40
DW4404	0	5	5	5	20
DW4393	0	40	45	45	50
DW4386	0	30	40	50	60
DW4827	0	35	35	30	50

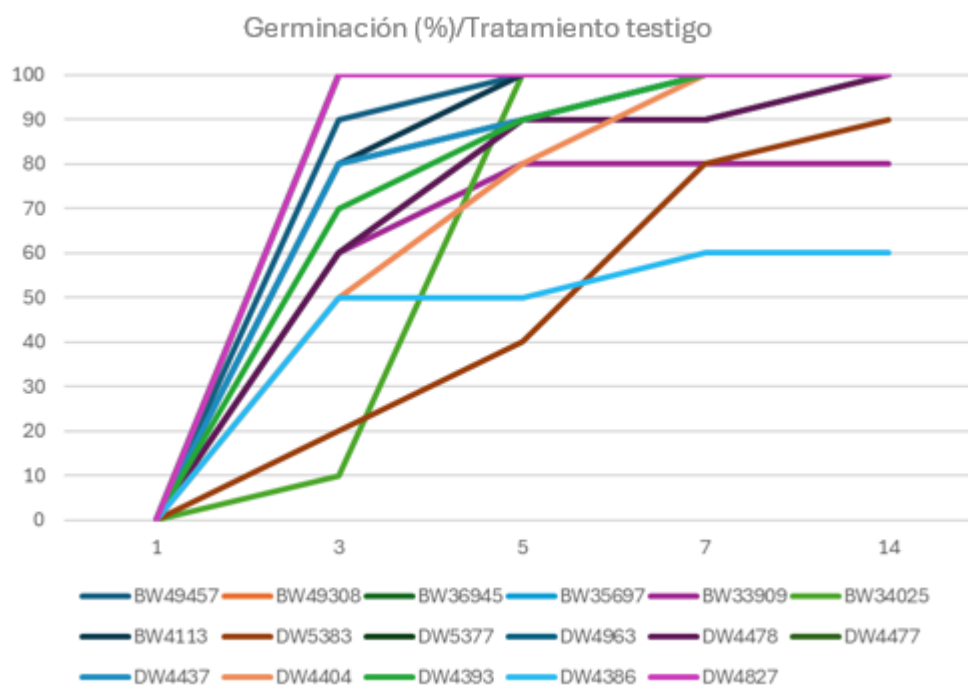


Figura 4. Porcentaje de germinación de semillas de *T. aestivum* y *T. durum* sometidas al tratamiento testigo (0 MPa).

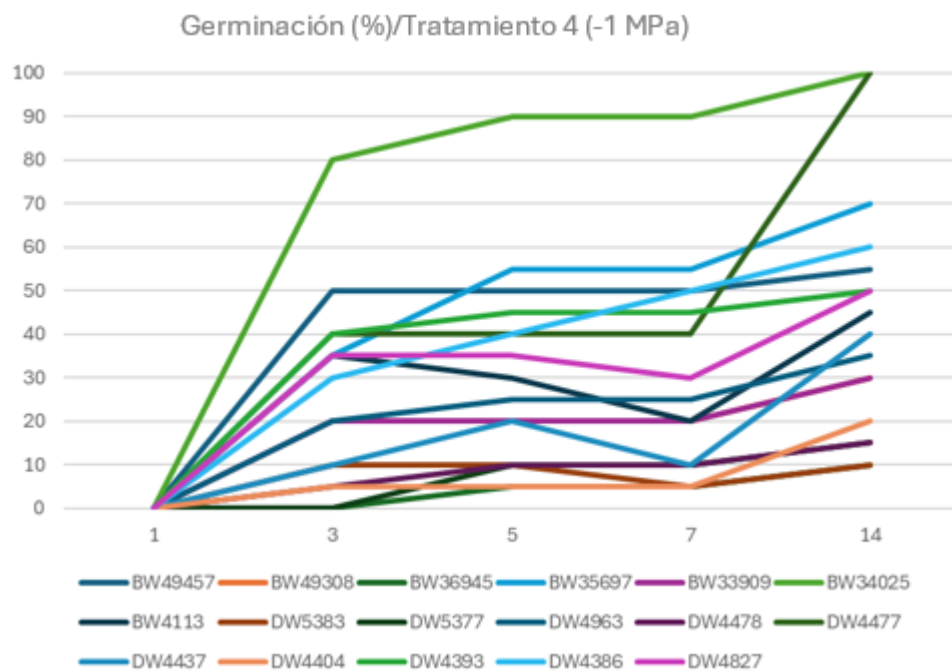


Figura 5. Porcentaje de germinación de semillas de *T. aestivum* y *T. durum* bajo tratamiento severo de estrés hídrico (-1 MPa).

4.1.2.2. Raíces

De acuerdo con Castañeda et al. (2021), la capacidad potencial de las raíces para absorber agua y nutrientes disminuye cuando las plantas son sometidas a estrés osmótico. Las raíces presentaron severa afectación tras ser sometidas a estrés hídrico bajo los diferentes potenciales hídricos generados con concentraciones de PEG-8000. Los tres parámetros evaluados (longitud de raíz, número de raíces y número de radículas), disminuyeron sus valores. Los resultados obtenidos muestran tendencia a disminuir conforme aumenta la concentración de PEG 8000 en la solución, esto coincide con los resultados obtenidos por Hellal et al., (2018), para cebada, en donde se aplicaron distintos tratamientos de PEG-6000, donde se comprobó que la longitud de la raíz disminuye conforme se aumenta el estrés hídrico, logrando inhibir hasta un 100 % la germinación para algunas variedades evaluadas.

4.1.2.2.1. Longitud de raíz

Por lo general, las raíces presentaron una reducción en la longitud (cm) conforme se aumentó el estrés hídrico. A una presión osmótica de -0.4 MPa la variedad que se vio más afectada fue DW4963 con 13.99 cm respecto al testigo, seguido por la variedad DW4827, con una reducción de 8.21 cm; mientras que las variedades menos afectadas fueron DW5383 y BW35697, con una reducción de 0.26 cm y 1.29 cm, respectivamente.

Algunas variedades no presentaron disminución en la longitud de raíz bajo ciertos tratamientos, y, por el contrario, mostraron un aumento en la longitud de raíz al ser

sometidas a estrés, tal es el caso de la variedad DW4478 que tuvo un incremento de 0.45 cm bajo una presión osmótica de -1 MPa, respecto al testigo. De igual manera, la variedad DW4477 presentó un aumento de 1.31 cm tras ser sometida a -0.4 MPa, y la variedad DW4386 mostró un aumento de 1.01 cm bajo una presión de -0.4 MPa y de 1.61 cm bajo una presión osmótica de -1 MPa. En el Cuadro 27 se presentan los valores en cm para la reducción en la longitud de raíz de las diecisiete variedades bajo los distintos tratamientos aplicados respecto al testigo. Se indican con un * los valores con tendencia a aumentar la longitud de raíz bajo condiciones de estrés hídrico severo, a pesar de realizar el experimento por duplicado, es conveniente prestar especial atención a los datos indicados en caso de tomarlos para comparar resultados para futuras investigaciones.

Cuadro 27. Reducción de longitud de raíz (cm) bajo estrés hídrico respecto al testigo.

Reducción en la longitud de raíz (cm) a bajos potenciales hídricos			
Variedad	-0.4 MPa ($\bar{x} \pm DE$)	-0.8 MPa ($\bar{x} \pm DE$)	-1.0 MPa ($\bar{x} \pm DE$)
BW49457	-1.33 $\pm$ 0.49 a	-0.70 $\pm$ 0.27 a	-0.67 $\pm$ 0.39 a
BW49308	-5.19 $\pm$ 1.63 b	-6.42 $\pm$ 1.07 b	-8.97 $\pm$ 1.11 c
BW36945	-6.00 $\pm$ 0.32 b	-8.91 $\pm$ 0.93 bc	-11.56 $\pm$ 0.87 cd
BW35697	-1.29 $\pm$ 0.08 a	-4.44 $\pm$ 0.22 a	-5.42 $\pm$ 0.41 b
BW33909	-6.22 $\pm$ 0.25 b	-7.62 $\pm$ 0.25 b	-7.77 $\pm$ 0.17 b
BW34025	-2.46 $\pm$ 0.02 a	-3.78 $\pm$ 0.38 a	-3.50 $\pm$ 0.33 a
BW4113	-4.71 $\pm$ 1.64 a	-4.65 $\pm$ 0.49 a	-4.60 $\pm$ 0.03 a
DW5383	-0.26 $\pm$ 0.08 a	-0.33 $\pm$ 0.03 a	-4.25 $\pm$ 1.03 a
DW5377	-4.56 $\pm$ 0.54 a	-4.61 $\pm$ 0.67 a	-5.71 $\pm$ 0.47 b
DW4963	-13.99 $\pm$ 0.41 cd	-9.07 $\pm$ 1.27 c	-9.89 $\pm$ 0.05 c
DW4478	-6.35 $\pm$ 0.78 b	-4.68 $\pm$ 0.42 a	0.45 $\pm$ 0.19 *
DW4477	1.31 $\pm$ 0.90 *	-2.39 $\pm$ 1.12 a	-3.11 $\pm$ 0.06 a
DW4437	-2.03 $\pm$ 0.11 a	-6.01 $\pm$ 0.08 b	-3.15 $\pm$ 1.16 a
DW4404	-4.43 $\pm$ 0.73 a	-7.79 $\pm$ 0.78 b	-8.66 $\pm$ 2.41 c
DW4393	-5.04 $\pm$ 0.08 b	-5.42 $\pm$ 0.29 b	-5.11 $\pm$ 0.23 b
DW4386	1.01 $\pm$ 0.09 *	-0.38 $\pm$ 0.23 a	1.61 $\pm$ 0.84 *
DW4827	-8.21 $\pm$ 2.43 b	-10.00 $\pm$ 2.71 c	-9.75 $\pm$ 2.72 c

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha \leq 0.05$.

*Valores no considerados en las agrupaciones, tendencias anormales.

DE:Desviación Estándar, $\bar{x}$:Media

4.1.2.2.2. Número de Radículas

El número de radículas por planta disminuyó conforme se aumentó la presión osmótica, llegando a inhibirse la formación de radículas hasta en un 100 %, tal es el caso de las variedades BW36945, DW4477 y DW4404, las cuales no desarrollaron radículas bajo una presión osmótica de -1 MPa.

Las variedades que presentaron menor afectación fueron la BW34025 y la BW4113, logrando desarrollar un promedio de 16.5 radículas bajo estrés severo (-1 MPa), estas mismas variedades fueron las que obtuvieron la media más sobresaliente tras realizar la prueba de agrupamiento de medias por variedades, con valores de 17.5 y 20.5, respectivamente. La variedad que presentó la media más baja fue la DW4386 con un valor de 3.12, ya que bajo todos los tratamientos evaluados mostró poco desarrollo de radículas.

El agrupamiento de medias de Duncan, mostró la formación de tres grupos para los tratamientos; el tratamiento 1 (testigo) ocupa el primer lugar con una media de 15.91 radículas por planta, el tratamiento 2 (-0.4 MPa), se encuentra en segundo lugar con una media de 8.26 radículas por planta; mientras tanto, al tercer lugar pertenecen el tratamiento 3 (-0.8 MPa) y el tratamiento 4 (-1 MPa), con medias de 5.94 y 5.71, respectivamente.

En el Cuadro 28 se muestra el número de radículas por planta para las diecisiete variedades evaluadas bajo diferentes condiciones de estrés hídrico.

Cuadro 28. Número de radículas por planta bajo condiciones de estrés hídrico severo.

Radículas a bajos potenciales hídricos			
Variedad	-0.4 MPa	-0.8 MPa	-1.0 MPa
BW49457	9 bc	7.5 bc	12.5 a
BW49308	11 bc	6 bc	1.5 c
BW36945	7.5 bc	7 bc	0 c
BW35697	5.5 bc	8 bc	7.5 bc
BW33909	5.5 bc	5 bc	8 bc
BW34025	16 a	10 bc	16.5 a
BW4113	13.5 a	10.5 bc	16.5 a
DW5383	11 bc	12.5 a	0.5 c
DW5377	3 c	13 a	3.5 c
DW4963	7 bc	6.5 bc	6.5 bc
DW4478	8.5 bc	6 bc	4 c
DW4477	6 bc	3.5 c	0 c
DW4437	6 bc	3 c	7.5 bc
DW4404	8 bc	1 c	0 c
DW4393	9.5 bc	6.5 bc	9.5 bc
DW4386	3.5 c	2 c	2 c
DW4827	10 bc	6 bc	5 bc

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha \leq 0.05$.

4.1.2.2.3. Número de Raíces

El número de raíces por planta presentó comportamientos distintos; en algunos casos disminuyó y en otros casos aumentó, respecto al testigo. Las variedades que disminuyeron drásticamente el número de raíces fueron BW36945, DW5383 y DW4477, con un desarrollo de 1, 2.5 y 2 raíces para el tratamiento a -1.0 MPa, respectivamente, mientras que en el tratamiento testigo estas variedades desarrollaron, 5.5, 7 y 7 raíces, respectivamente.

Por el contrario, las variedades BW49308, DW4404 y DW4827 mostraron un incremento en el número de raíces por planta al aumentar la presión osmótica, llegando al tratamiento más severo (-1.0 MPa). Desarrollaron 7, 7 y 8 raíces, respectivamente; mientras que bajo el tratamiento testigo desarrollaron 6.5, 5 y 6.5 raíces, respectivamente. La variedad BW34025 mantuvo estable el desarrollo de raíces en los cuatro tratamientos evaluados, presentando una media de 5.5 raíces por planta.

En el Cuadro 29 se muestra el número promedio de raíces por planta que desarrollaron las 17 variedades evaluadas bajo los distintos tratamientos de estrés hídrico.

Cuadro 29. Número promedio de raíces por planta desarrolladas por las variedades de trigo bajo condiciones de estrés hídrico.

Reducción en raíces a bajos potenciales hídricos			
Variedad	-0.4 MPa	-0.8 MPa	-1.0 MPa
BW49457	7 a	5 ab	5.5 ab
BW49308	6.5 a	6 ab	7 * a
BW36945	7 a	2 c	1 c
BW35697	8 a	5 ab	6 ab
BW33909	6.5 a	5 ab	7 a
BW34025	5.5 ab	5.5 ab	5.5 ab
BW4113	5 ab	7 a	6.5 a
DW5383	7 a	4.5 b	2.5 c
DW5377	5 ab	7 a	4.5 b
DW4963	6.5 a	5.5 ab	7.5 a
DW4478	6 ab	5 ab	5 ab
DW4477	9 a	4 b	2 c
DW4437	8 a	4.5 b	7 a
DW4404	4.5 b	6 ab	7 * a
DW4393	6.5 a	6.5 a	6 ab
DW4386	6 ab	5 ab	4.5 b
DW4827	8.5 a	8 a	8 * a

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha \leq 0.05$.

*Presentaron incremento en desarrollo de raíz respecto al tratamiento testigo.

El agrupamiento de medias de Duncan para los tratamientos, arrojó la formación de dos grupos, en el primer grupo se encuentran el tratamiento 1 (testigo) y el tratamiento 2 (-0.4 MPa), con las medias 6.8 y 6.67, respectivamente, mientras tanto, en el segundo grupo se encuentran el tratamiento 3 (-0.8 MPa) y el tratamiento 4 (-1 MPa), con las medias 5.31 y 4.97, respectivamente.

4.1.2.3. Parte aérea

Las condiciones de sequía son inicialmente reconocidas por la raíz, estas envían señales químicas al tallo (parte aérea) lo cual disminuye o inhibe el desarrollo de la planta. De acuerdo con Española et al. (2024), al aplicar presión osmótica con PEG a -1.09 MPa (20 %), disminuye significativamente el peso fresco de los brotes (y por ende el desarrollo de la plántula).

Los caracteres medidos para la parte aérea (longitud de la hoja, longitud del tallo, longitud de la parte aérea), en general mostraron tendencia a reducir su longitud (cm) conforme aumentó la presión osmótica. Algunas variedades mostraron tendencias a incrementar la longitud del hipocótilo bajo condiciones de estrés severo; y en algunos casos el tallo incrementó su longitud en los tres tratamientos.

4.1.2.3.1. Longitud de la hoja

A excepción de la variedad DW5383, las variedades evaluadas mostraron tendencia a disminuir la longitud de la hoja conforme se aumentó la presión osmótica, la variedad DW4827 mostró mayor afectación reduciendo la longitud en promedio 19.80 cm para el tratamiento 4 (-1.0 MPa), respecto al testigo; por el contrario, la

variedad BW35697 redujo la longitud de la hoja en promedio 1.91 cm para el mismo tratamiento, respecto al testigo, la tendencia de dicha variedad con los otros tratamientos evaluados muestra una disminución menor que el resto de variedades; con una reducción de 0.4 cm a -0.4 MPa y 0.41 cm a -0.8 MPa.

La variedad BW49457, fue la única que presentó una mayor reducción en la longitud para el tratamiento 2 (-0.4 MPa) en contraste con el resto de variedades que tuvieron su máxima reducción para el tratamiento 4 (-1.0 MPa), con una media de 4.82 cm para el tratamiento 2 y una media de 4.46 para el tratamiento 3 (-0.8 MPa).

El análisis de agrupamiento de Duncan para la longitud de la hoja mostró que en el tratamiento 1 la media fue de 13.07 cm; para el tratamiento 2 de 9.51 cm, el tratamiento 3 mostró una media de 6.78 cm y el tratamiento 4 obtuvo una media de 5.87 cm, formando 4 grupos, uno para cada tratamiento. Y mostrando también, una disminución de la longitud de la hoja, conforme al tratamiento aplicado.

En el Cuadro 30 se muestra la reducción en la longitud de la hoja (cm) de las diecisiete variedades analizadas bajo distintos tratamientos de estrés hídrico severo.

Cuadro 30. Reducción en la longitud de la hoja de variedades de trigo bajo estrés hídrico.

Reducción en la longitud de la hoja (cm) a bajos potenciales hídricos			
Variedad	-0.4 MPa ($\bar{x} \pm DE$)	-0.8 MPa ($\bar{x} \pm DE$)	-1.0 MPa ($\bar{x} \pm DE$)
BW49457	-4.82 $\pm$ 0.38 b	-4.46 $\pm$ 0.43 ab	-2.42 $\pm$ 0.48 a
BW49308	-0.81 $\pm$ 0.08 a	-1.25 $\pm$ 0.26 a	-4.88 $\pm$ 0.10 b
BW36945	-5.28 $\pm$ 0.30 b	-9.76 $\pm$ 1.10 cd	-13.76 $\pm$ 1.05 cd
BW35697	-0.40 $\pm$ 0.29 a	-0.41 $\pm$ 0.14 a	-1.91 $\pm$ 0.62 a
BW33909	-4.81 $\pm$ 0.11 b	-5.89 $\pm$ 0.33 b	-7.29 $\pm$ 1.26 bc
BW34025	-2.11 $\pm$ 0.47 a	-2.22 $\pm$ 1.55 a	-4.88 $\pm$ 0.93 b
BW41113	-4.54 $\pm$ 0.28 ab	-5.95 $\pm$ 0.31 b	-6.12 $\pm$ 0.93 bc
DW5383	0.43 $\pm$ 0.70*	-5.64 $\pm$ 1.60 b	-12.15 $\pm$ 2.03 cd
DW5377	-5.25 $\pm$ 0.34 b	-5.99 $\pm$ 1.10 b	-6.46 $\pm$ 0.66 bc
DW4963	-5.27 $\pm$ 0.18 b	-5.29 $\pm$ 0.66 b	-6.39 $\pm$ 0.46 bc
DW4478	-3.59 $\pm$ 2.05 ab	-5.26 $\pm$ 0.14 b	-6.74 $\pm$ 0.14 bc
DW4477	-2.79 $\pm$ 0.45 a	-11.03 $\pm$ 0.69 cd	-11.83 $\pm$ 0.79 cd
DW4437	-1.30 $\pm$ 0.41 a	-7.55 $\pm$ 0.17 bc	-10.22 $\pm$ 0.10 cd
DW4404	-4.26 $\pm$ 1.57 ab	-10.95 $\pm$ 1.19 cd	-12.69 $\pm$ 1.97 cd
DW4393	-2.78 $\pm$ 1.84 a	-3.06 $\pm$ 0.20 a	-4.72 $\pm$ 0.83 b
DW4386	-3.75 $\pm$ 1.13 ab	-5.16 $\pm$ 0.65 b	-6.70 $\pm$ 1.88 bc
DW4827	-10.08 $\pm$ 1.92 cd	-11.43 $\pm$ 0.96 cd	-19.80 $\pm$ 1.38 de

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha \leq 0.05$.

*Valores no considerados para la formación de grupos por tendencias anormales.

DE:Desviación Estándar, $\bar{x}$:Media

4.1.2.3.2. Longitud del coleóptilo

Tras someter las variedades a estrés hídrico, dos de las diecisiete variedades aumentaron la longitud del coleóptilo para los 3 tratamientos de estrés, respecto al testigo, se trata de las variedades BWI34025 y DW5383, para el tratamiento más severo (-1.0 MPa), incrementaron 0.21 y 0.12 cm, respectivamente. Algunas otras variedades también aumentaron la longitud del coleóptilo al ser sometidas al tratamiento 2 (-0.4 MPa), tal es el caso de las variedades BW49308, BW33909, DW5383, DW4963 y DW4478, con 1.04 cm, 0.15 cm, 0.64 cm, 0.17 cm y 0.44 cm, respectivamente.

El resto de variedades presentaron una reducción de en la longitud del coleóptilo conforme se aumentó el estrés hídrico, la variedad BW36945 mostró la mayor reducción con una media de 3.7 cm, respecto al testigo.

La prueba de agrupamiento de medias de Duncan para tratamientos, mostró la formación de tres grupos, en el grupo 1 se encuentra el tratamiento 2 con una media de 5.38 cm de longitud del coleóptilo, en el grupo 2 el tratamiento 1 con una media de 3.47 cm de longitud del coleóptilo, en el grupo 3 los tratamientos 3 y 4 con medias de 3.13 cm y 2.52 cm, respectivamente. El posicionamiento del tratamiento 2 (-0.4 MPa), sobre el tratamiento testigo, se debe a que siete de las diecisiete variedades evaluadas presentaron un aumento en la longitud, este resultado contrasta con lo esperado ya que, en los resultados de otros autores, como los obtenidos por Muñoz (2014), distintas variedades de trigo mostraron una tendencia a reducir la longitud del coleóptilo bajo condiciones de estrés hídrico inducido por PEG-6000.

En el Cuadro 31 se muestra la reducción o el aumento del coleóptilo, bajo distintos tratamientos de estrés hídrico severo.

Cuadro 31. Respuesta en la longitud del coleóptilo de variedades de trigo bajo condiciones de estrés hídrico.

Reducción en la longitud del coleóptilo (cm) a bajos potenciales hídricos			
Variedad	-0.4 MPa ($\bar{x} \pm DE$)	-0.8 MPa ($\bar{x} \pm DE$)	-1.0 MPa ($\bar{x} \pm DE$)
BW49308	1.04 $\pm$ 0.44 *	-0.17 $\pm$ 0.01 a	-0.94 $\pm$ 0.35 a
BW36945	-0.48 $\pm$ 0.21 a	-1.35 $\pm$ 0.35 a	-3.70 $\pm$ 0.04 b
BW35697	-1.13 $\pm$ 0.26 a	-1.56 $\pm$ 0.13 a	-1.32 $\pm$ 0.22 a
BW33909	0.15 $\pm$ 0.17 *	-0.69 $\pm$ 0.20 a	-0.78 $\pm$ 0.35 a
BW34025	1.33 $\pm$ 1.03 *	0.25 $\pm$ 0.19 *	0.21 $\pm$ 0.12 *
BW4113	1.94 $\pm$ 0.61 *	0.12 $\pm$ 0.04 *	0.12 $\pm$ 0.07 *
DW5383	0.64 $\pm$ 1.48 *	-0.27 $\pm$ 0.19 a	-3.60 $\pm$ 1.18 b
DW5377	-0.03 $\pm$ 0.04 a	-0.41 $\pm$ 0.42 a	-1.24 $\pm$ 0.17 a
DW4963	0.17 $\pm$ 0.1 *	-0.31 $\pm$ 0.07 a	-0.50 $\pm$ 0.07 a
DW4478	0.44 $\pm$ 2.18 *	-0.03 $\pm$ 0.01 a	-0.12 $\pm$ 0.02 a
DW4477	-0.71 $\pm$ 0.98 a	-1.16 $\pm$ 0.69 a	-1.97 $\pm$ 0.15 b
DW4437	-0.80 $\pm$ 0.53 a	-0.80 $\pm$ 0.06 a	-0.96 $\pm$ 0.15 a
DW4404	-0.30 $\pm$ 0.49 a	-0.33 $\pm$ 0.03 a	-0.77 $\pm$ 0.39 a
DW4393	-0.39 $\pm$ 0.36 a	-0.77 $\pm$ 0.19 a	-0.96 $\pm$ 0.06 a
DW4386	-0.17 $\pm$ 0.66 a	-1.19 $\pm$ 0.61 a	-1.86 $\pm$ 0.27 a
DW4827	-0.15 $\pm$ 0.33 a	-0.94 $\pm$ 0.37 a	-1.71 $\pm$ 0.01 a

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha \leq 0.05$.

*Valores no considerados en la formación de grupos por tendencias anormales.

DE:Desviación Estándar, $\bar{x}$:Media

4.1.2.3.3. Longitud de la parte aérea

En general, las variedades evaluadas mostraron tendencia a reducir la longitud de la parte aérea conforme aumentaba la presión osmótica, salvo ciertas excepciones, debidas al aumento en la longitud del coleóptilo.

La variedad que presentó la reducción máxima fue DW4827 con una media de 21.51 cm, respecto al tratamiento testigo. Mientras que la variedad con la menor reducción de la parte aérea fue BW35697 con una media de 2.69 cm, mostrando en general

una reducción pequeña en el resto de los tratamientos, con una media de 0.55 cm para el tratamiento 2 (-0.4 MPa) y una media de 1.10 para el tratamiento 3 (-0.8 MPa).

En el Cuadro 32 se presenta la reducción en la longitud de la parte aérea para las variedades evaluadas sometidas a distintos tratamientos de estrés hídrico severo. La variedad DW5383 presentó un aumento en la longitud de la parte aérea de 0.40 cm, esto debido a que el aumento en la longitud del tallo influye directamente en los resultados obtenidos para la parte aérea.

Cuadro 32. Reducción de la parte aérea de variedades de trigo bajo condiciones de estrés hídrico.

Variedad	-0.4 MPa ($\bar{x} \pm DE$)	-0.8 MPa ($\bar{x} \pm DE$)	-1.0 MPa ($\bar{x} \pm DE$)
BW49457	-3.78 $\pm$ 0.33 b	-4.99 $\pm$ 0.34 b	-3.36.03 a
BW49308	-1.29 $\pm$ 1.30 a	-2.6 $\pm$ 0.01 a	-8.58 $\pm$ 1.60 b
BW36945	- 6.41 $\pm$ 0.77 a	-11.32 $\pm$ 1.37 cd	-15.08 $\pm$ 0.39 d
BW35697	-0.55 $\pm$ 0.76 a	-1.10 $\pm$ 0.08 a	- 2.69 $\pm$ 0.96 a
BW33909	-3.48 $\pm$ 1.08 a	-5.64 $\pm$ 0.08 b	-7.08 $\pm$ 2.11 bc
BW34025	-0.17 $\pm$ 0.26 a	-2.10 $\pm$ 0.03 b	-4.76 $\pm$ 0.46 a
BW4113	-3.90 $\pm$ 0.27 b	-6.19 $\pm$ 0.84 b	-9.72 $\pm$ 0.18 b
DW5383	0.40 $\pm$ 0.85 *	-6.06 $\pm$ 0.85 b	-13.39 $\pm$ 1.46 cd
DW5377	-5.08 $\pm$ 0.73 b	-5.68 $\pm$ 0.37 b	-6.96 $\pm$ 1.7 b
DW4963	-4.83 $\pm$ 3.22 b	-5.32 $\pm$ 0.33 b	-6.51 $\pm$ 0.86 b
DW4478	-4.30 $\pm$ 0.26 a	-6.42 $\pm$ 0.14 b	-8.71 $\pm$ 0.64 b
DW4477	-3.59 $\pm$ 2.11 a	-7.88 $\pm$ 1.46 c	-10.99 $\pm$ 1.52 d
DW4437	-1.60 $\pm$ 3.29 a	-8.80 $\pm$ 0.06 bc	-7.52 $\pm$ 2.37 b
DW4404	-4.65 $\pm$ 2.37 b	-11.72 $\pm$ 0.88 cd	-13.65 $\pm$ 1.59 cd
DW4393	-2.95 $\pm$ 1-63 a	-4.25 $\pm$ 0.01 b	-6.58 $\pm$ 0.90 b
DW4386	-3.92 $\pm$ 2.37 a	-6.35 $\pm$ 0.52 bc	-8.56 $\pm$ 0.35 bc
DW4827	-10.23 $\pm$ 2.08 b	-12.37 $\pm$ 0.59 c	-21.51 $\pm$ 1.40 e

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha \leq 0.05$.

*Valores no considerados para la formación de grupos por tendencias anormales.

DE:Desviación estándar, **$\bar{x}$:**Media

La prueba de agrupamiento de medias de Duncan, mostró la formación de tres grupos, en el grupo 1 se encuentran el tratamiento 1 y el tratamiento 2 con medias de 16.12 cm y 15.65 cm, respectivamente, en el grupo 2 se encuentra el tratamiento 3 con una media de 9.32 cm, y en el grupo 3 el tratamiento 4 con una media de 8.11 cm.

4.1.2.4. Peso fresco

La variedad que presentó la mayor reducción en el peso fresco fue BW36945 (2.1 g), seguido de la variedad BW93808 con una reducción de 2.0 g; por otra parte, la variedad DW4477 mostró la menor reducción con una media de 0.2 g, seguido de la variedad DW4386 con 0.3 g, tal como se muestra en el Cuadro 33.

El agrupamiento de medias de Duncan, dio como resultado la formación de tres grupos, en el grupo 1 se encuentra el tratamiento 1 con una media de 2.04 g de peso fresco, en el grupo 2 los tratamientos 2 y 3, con una media de 1.16 g y 1.13 g, respectivamente, y en el grupo 3 se encuentra el tratamiento 4 con una media de 1.00 g de peso fresco.

Cuadro 33. Reducción en el peso fresco de variedades de trigo bajo estrés hídrico.

Reducción del peso fresco a bajos potenciales hídricos			
Variedad	-0.4 MPa	-0.8 MPa	-1.0 MPa
BW49457	-0.7 a	-1.1 ab	-1.3 ab
BW49308	-1.4 ab	-1.2 ab	-2 b
BW36945	-1.6 ab	-1.8 ab	-2.1 b
BW35697	-0.6 a	-0.8 a	-1.3 ab
BW33909	-1.1 ab	-1.3 ab	-1.4 ab
BW34025	-0.4 a	-0.8 a	-0.8 a
BW4113	-0.2 a	-1.1 ab	-1.1 ab
DW5383	-1 ab	-1.1 ab	-1.5 ab
DW5377	-1.1 a	-1.1 ab	-1.1 ab
DW4963	-0.6 a	-0.6 a	-0.8 a
DW4478	-0.5 a	-0.8 a	-0.8 a
DW4477	-0.2 a	-0.2 a	-0.2 a
DW4437	-0.9 a	-0.9 a	-1.1 ab
DW4404	-0.8 a	-1.2 ab	-1.3 ab
DW4393	-0.6 a	-0.7 a	-0.7 a
DW4386	-0.1 a	-0.1 a	-0.3 a
DW4827	-0.8 a	-1.1 ab	-1.2 ab

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha=0.05$.

4.1.2.5. Pigmentación antociánica

De las 17 variedades evaluadas para estrés hídrico, solo la DW4963 presentó pigmentación antociánica muy fuerte, dos presentaron pigmentación antociánica media (DW5383 y DW5377), seis la mostraron débil (BW49308, BW35697, DW4478, DW4437, DW4404 y DW4386), y el resto tuvieron ausencia de pigmentación.

En el Cuadro 34 se muestran los agrupamientos de acuerdo con la pigmentación antociánica del coleóptilo de acuerdo con el manual gráfico de descripción varietal de la SAGARPA (2015).

Cuadro 34. Agrupamiento de variedades de trigo según pigmentación antociánica presentada.

Pigmentación antociánica bajo estrés hídrico					
	Ausente o muy débil	Débil	Media	Fuerte	Muy fuerte
Variedad	BW49457	BW49308	DW5383	DW4963	
	BW36945	BW35697	DW5377		
	BW33909	DW4478			
	BW34025	DW4437			
	BW4113	DW4404			
	DW4477	DW4386			
	DW4393				
	DW4827				

Valores ordinales según el Manual gráfico para la descripción varietal (2015), SAGARPA.

4.1.2.6. Relación entre la longitud de raíz y la parte aérea

Bajo condiciones de estrés hídrico severo se encontraron correlaciones positivas para los parámetros evaluados, en el Cuadro 35 se indican los parámetros que se correlacionan y los valores obtenidos. El parámetro longitud de raíz obtuvo correlaciones altamente significativas con los parámetros número de radículas, longitud de hoja y longitud de la parte aérea, con valores de 0.5940, 0.7292 y 0.5920, respectivamente. El número de raíces también se correlacionó significativamente con la longitud de hoja, con un valor de 0.5198.

También, la longitud de parte aérea se correlaciono significativamente con longitud de hoja y longitud del tallo, con valores de 0.9041 y 0.7247 respectivamente, esto debido a que ambas variables conforman en conjunto la longitud de la parte aérea de las plantas.

Cuadro 35. Correlación de parámetros evaluados en variedades de trigo bajo condiciones de estrés hídrico severo.

	LR	NR	Nra	LH	LT	LPA
LR	1					
NR	0.1814	1				
Nra	0.5940**	0.2024	1			
LH	0.7292**	0.2801	0.5198**	1		
LT	0.1815	0.2354	0.1836	0.4271	1	
LPA	0.5920**	0.3144	0.4620	0.9041**	0.7247**	1

LR:Longitud de raíz, **NR:**Número de raíces, **Nra:**Número de radículas, **LH:**Longitud de hoja, **LT:**Longitud del tallo, **LPA:**Longitud de Parte Aérea

**Altamente significativo

4.2. Análisis molecular

4.2.1. Análisis por individuo

Al usar marcadores moleculares del tipo Inter Secuencias Simples Repetidas (ISSR) se detectó polimorfismos entre los 32 genotipos de trigo evaluados (15 de ellos para estrés salino y diecisiete para estrés hídrico), mediante la obtención de bandas definidas, que, tras ser detectadas y analizadas con el programa GelAnalyzer, se construyó la matriz binaria y posteriormente, el dendrograma molecular.

Se probaron 20 iniciadores ISSR, de los cuales se seleccionaron 10 que mostraron amplificación y buena resolución de bandas. Se determinó el número total de bandas generadas, bandas monomórficas, bandas polimórficas y con ello el porcentaje de polimorfismo que se presentó.

Tal como se muestra en el Cuadro 36, en total se obtuvo 81 bandas, con un promedio de 8,1 bandas por iniciador. El iniciador (AG)8YA mostró el mayor número de bandas (16), de las cuales 3 fueron monomórficas y 13 polimórficas. En tanto el

marcador CT8RC mostró el menor número de bandas, presentando únicamente 3 bandas, todas polimórficas.

El polimorfismo detectado entre los iniciadores presentó variaciones, siendo el más bajo (75 %) para el iniciador (AG)8YC, y el más alto (100 %) para (AG)8YA, DBD(AC)7, A6, ISSR4, A8 y CT8RC. El porcentaje promedio de polimorfismo detectado fue de 91.62 %.

Cuadro 36. Polimorfismo detectado por los iniciadores ISSR durante la caracterización molecular de variedades de *Triticum aestivum* y *Triticum durum*.

Iniciador	Secuencia 5' - 3'	Bandas	Bandas monomórficas	Nº Bandas polimórficas	Polimorfismo (%)
(AG)8YA	AGAGAGAGAGAGAGAGYA	14	0	14	100
DBD(AC)7	DBDACACACACACACAC	11	0	11	100
ISSR5	GAGAGAGAGAGAGAGAT	5	1	4	80
A6	CTC TCT CTC TCT CTC TTG	6	0	6	100
ISSR4	GAGAGAGAGAGAGAGAC	8	0	8	100
(AG)8YC	AGAGAGAGAGAGAGAGYC	4	1	3	75
U810	GAGAGAGAGAGAGAGAT	5	1	4	80
A8	AGA GAG AGA GAG AGA GT	9	0	9	100
(AG)8YG	AGAGAGAGAGAGAGAGYG	16	3	13	81.25
CT8RC	CTCTCTCTCTCTCTRC	3	0	3	100
Total		81			
Promedio		8.1			

4.2.1.1. Construcción del dendrograma y determinación de relaciones genéticas entre las variedades

Tras realizar el análisis de conglomerados usando UPGMA, se obtuvo el dendrograma para las variedades evaluadas bajo estrés salino y el dendrograma para las variedades evaluadas bajo estrés hídrico, donde se observó la formación de grupos.

4.2.1.1.1. Dendrograma de relaciones entre las variedades evaluadas para estrés salino

Las quince variedades evaluadas bajo estrés salino se numeraron del 1 al 15, en el Cuadro 37 se relaciona la numeración con la variedad, especie y característica que posee.

Cuadro 37. Relación entre las variedades y la numeración asignada en dendrograma en estrés salino.

Numeración	Variedad	Especie	Característica
1	CWI79985	<i>Triticum aestivum</i>	Tolerante
2	BW38979		
3	BW8763		
4	BW20313		Susceptible
5	BW22724		
6	CWI79982		
7	CWI79930	<i>Triticum durum</i>	Tolerante
8	DW10013		
9	DW9858		
10	DW7683		
11	CWI22413		
12	CWI24116	Susceptible	
13	CWI24129		
14	CWI7999		
15	DW16570		

Con la obtención del dendrograma se observó la formación de cuatro grupos tras el establecimiento de una línea de corte a un coeficiente de similitud de Jaccard de

0.80, tal como se muestra en la Figura 6. Los grupos se conformaron de la siguiente manera:

Grupo I: formado con las variedades CWI79985, BW38979, BW8763, BW20313, BW22724y CWI79982. Todas pertenecientes a la especie *T. aestivum*, donde las cinco primeras se clasificaron por los investigadores de CIMMYT como tolerantes y la última como susceptible.

Grupo II: variedades CWI79930, DW10013, DW9858, DW7683, CWI22413, CWI24129 y CWI7999; donde la primera pertenece a la especie *T. aestivum* y fue clasificada como susceptibles por el CIMMYT. Las siguientes seis pertenecen a la especie *T. durum*, de estas; las primeras tres están clasificadas como tolerantes y las últimas tres como susceptibles.

Grupo III: variedad CWI24116, perteneciente a la especie *T. durum*, clasificada por CIMMYT como tolerante.

Grupo IV: variedad DW16570, perteneciente a la especie *T. durum*, clasificada como susceptible.

Los genotipos que presentaron una mayor similitud genética fueron las variedades DW7683 y CWI22413, se trata de dos variedades de *Triticum durum*, cuyo coeficiente de similitud es de 0.90. En cuanto a la variedad que presentó un mejor coeficiente de similitud con el resto de variedades evaluadas, se encontró que la variedad DW16570 tuvo un coeficiente de 0.70.

Los grupos genéticamente más relacionados fueron el II y III y el menos relacionado fue el IV.

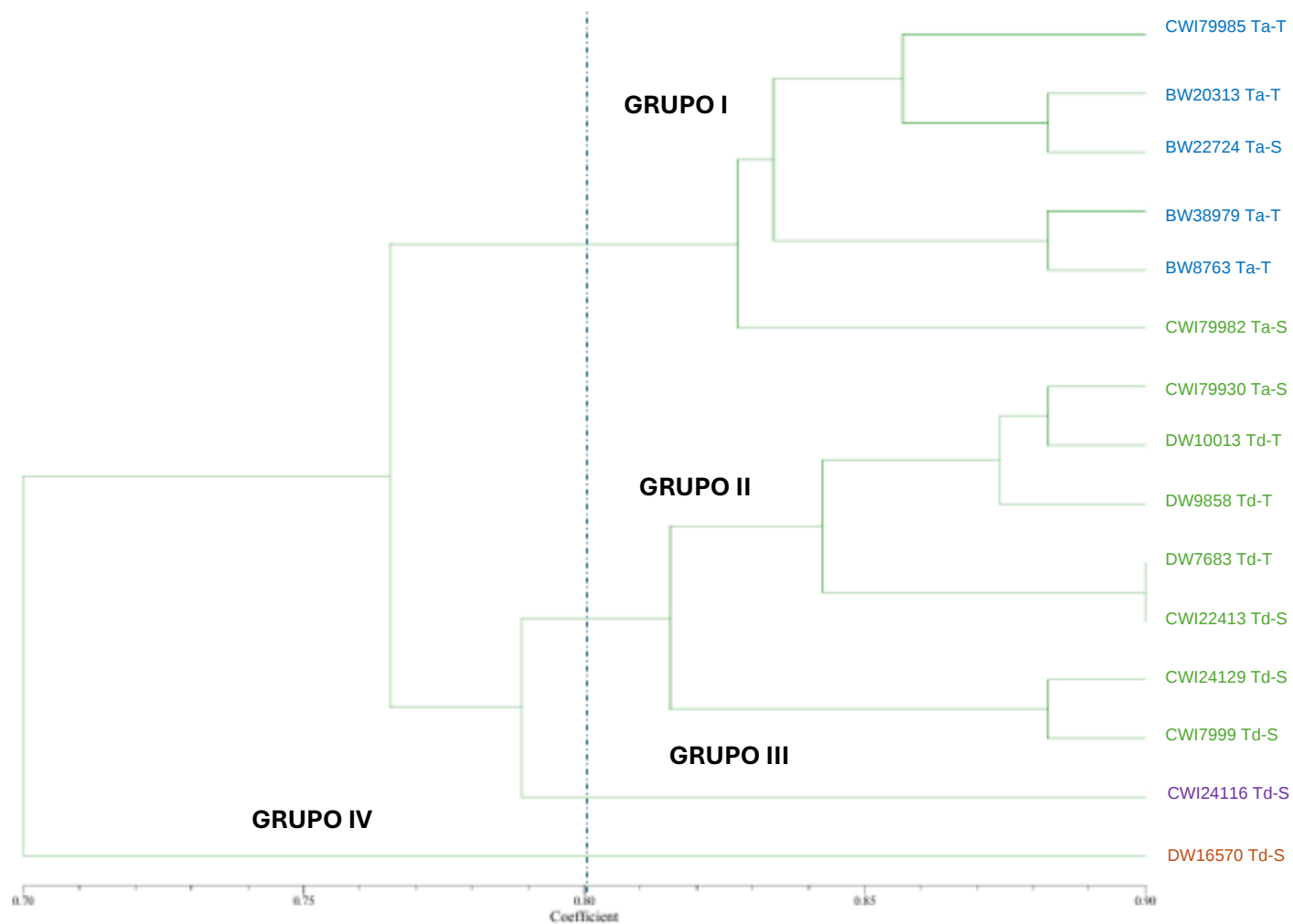


Figura 6 . Dendrograma molecular ISSR de variedades de *Triticum aestivum* y *T. durum* evaluadas para estrés salino.

4.2.1.1.2. Dendrograma de relaciones entre las variedades evaluadas para estrés hídrico

Las diecisiete variedades evaluadas bajo estrés salino se numeraron del 1 al 17, en el Cuadro 38 se relaciona la numeración con la variedad, especie y característica que posee.

Cuadro 38. Relación entre las variedades y la numeración asignada para dendrograma en estrés hídrico.

Numeración	Variedad	Especie	Característica
1	BW49457	<i>Triticum aestivum</i>	Tolerante
2	BW49308		
3	BW36945		
4	BW35697		Susceptible
5	BW33909		
6	BW34025		
7	BW4113		
8	DW5383	<i>Triticum durum</i>	No reportado
9	DW5377		
10	DW4963		
11	DW4478		
12	DW4477		
13	DW4437		
14	DW4404		
15	DW4393		
16	DW4386		
17	DW4827		Susceptible

Con la obtención del dendrograma se observó la formación de seis grupos tras el establecimiento de una línea de corte a un coeficiente de similitud de Jaccard de 0.83, tal como se muestra en la Figura 7. Los grupos se conformaron de la siguiente manera:

Grupo I: variedades BW49457, BW49308, BW36945, BW4113, DW5383, DW4478, DW4404, DW4386, DW4477, BW33909, BW34025 y BW35697. Grupo integrado por siete variedades de *T. aestivum*, donde cinco se clasificaron como tolerantes y 2 como susceptibles al estrés hídrico. Cinco variedades pertenecen a la especie *T. durum* y no se reporta su comportamiento ante las condiciones de estrés.

Grupo II: variedad DW4393, perteneciente a la especie *T. durum*, sin reporte de su comportamiento ante las condiciones de estrés hídrico.

Grupo III: variedad DW4437, perteneciente a la especie *T. durum*, sin reporte de su comportamiento ante las condiciones de estrés hídrico.

Grupo IV: variedad DW4827, perteneciente a la especie *T. durum*, susceptible.

Grupo V: variedad DW4963, perteneciente a la especie *T. durum*, sin reporte de su comportamiento ante las condiciones de estrés hídrico.

Grupo VI: variedad DW5377, perteneciente a la especie *T. durum*, sin reporte en su comportamiento ante las condiciones de estrés hídrico.

Las variedades BW36945 y BW4113, presentaron una alta similitud genética con un coeficiente de Jaccard de 0.98, mientras que la variedad con la menor similitud genética al resto de las variedades fue DW5377 con un coeficiente de similitud de 0.67.

Los grupos genéticamente más relacionados fueron el I con el II y el más alejado fue el VI (Figura 7).

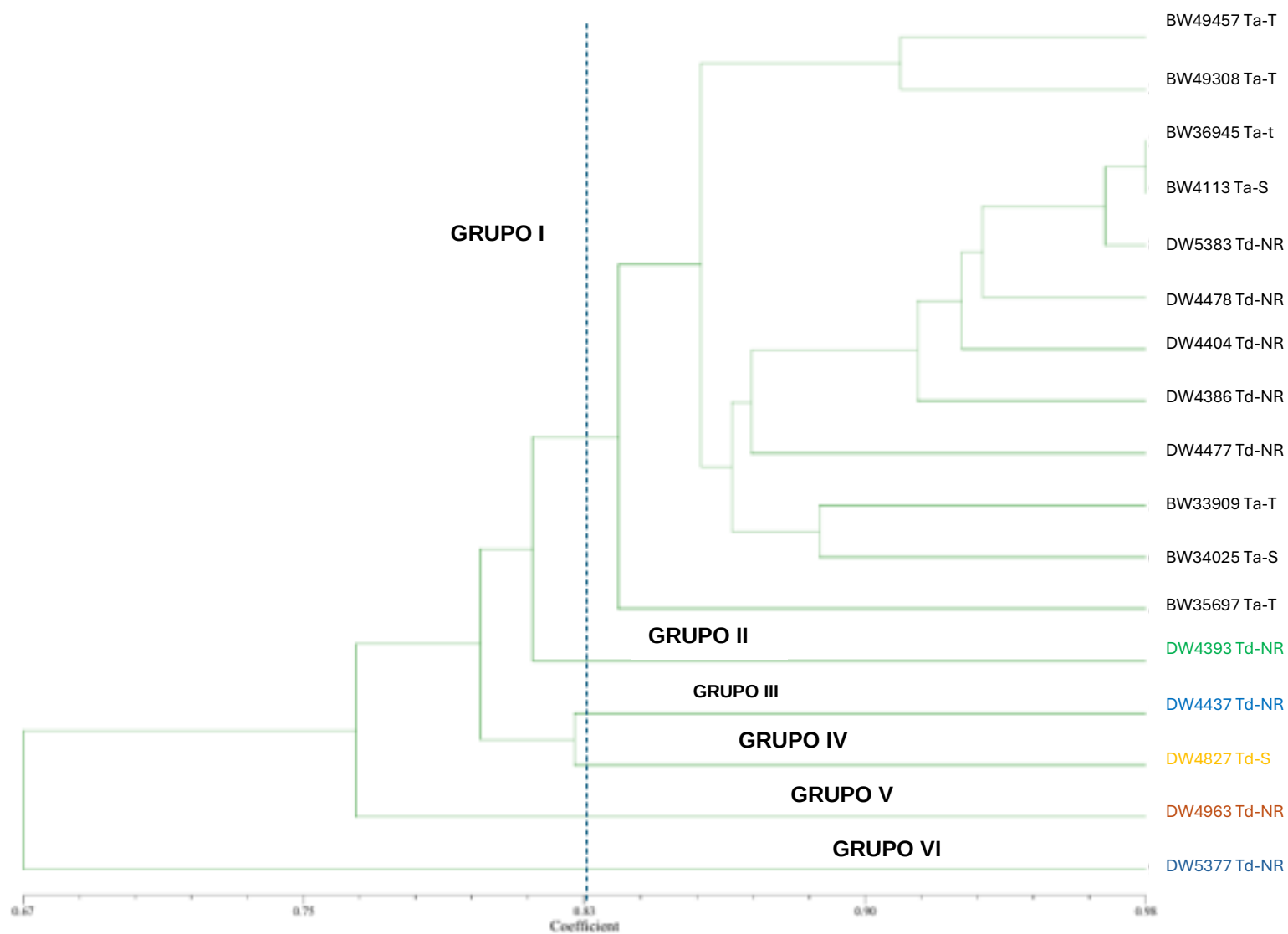


Figura 7 . Dendrograma molecular ISSR de variedades de *Triticum aestivum* y *T. durum* evaluadas para estrés hídrico.

4.2.1.2. Análisis de escalado multidimensional para determinar la formación de grupos entre las variedades de trigo

La matriz binaria realizada con los iniciadores ISSR se utilizó para llevar a cabo el análisis de escalado multidimensional, esto permitió la observación de la distribución y agrupamiento de las variedades analizadas. Los gráficos se realizaron en dos y tres dimensiones.

4.2.1.2.1. Gráficos en 2D y 3D para variedades de trigo sometidas a estrés salino

La obtención de gráficos se realizó mediante el Software NTSYS, como se aprecia en la Figura 8, se observó la formación de siete grupos, conformados de la siguiente manera:

Grupo I: Variedades CWI79985, BW38979, BW8763, CWI79982, donde las cinco pertenecen a la especie *T. aestivum*, y, las primeras tres cuentan con reporte de tolerancia a salinidad por CIMMYT, mientras que la variedad CWI79982 reporta susceptibilidad.

Grupo II: Variedad BW20313, perteneciente a la especie *T. aestivum* con reporte de tolerancia por CIMMYT.

Grupo III: Variedad CWI79930, perteneciente a la especie *T. aestivum* con reporte de susceptibilidad por CIMMYT.

Grupo IV: Variedad BW22724, perteneciente a la especie *T. aestivum* con reporte de susceptibilidad por CIMMYT.

Grupo V: Variedades DW7683, CWI22413, pertenecientes a la especie. *T. durum*, la primera cuenta con reporte de tolerancia a salinidad, mientras que la CWI22413 cuenta con reporte de susceptibilidad.

Grupo VI: Variedad CWI24116, perteneciente a *T. durum*, con reporte de susceptibilidad por CIMMYT.

Grupo VII: Variedades DW10013, DW9858, CWI24129, CWI7999 y DW16570, todas pertenecientes a la especie *T. durum*, donde las primeras dos reportan tolerancia y el resto susceptibilidad.

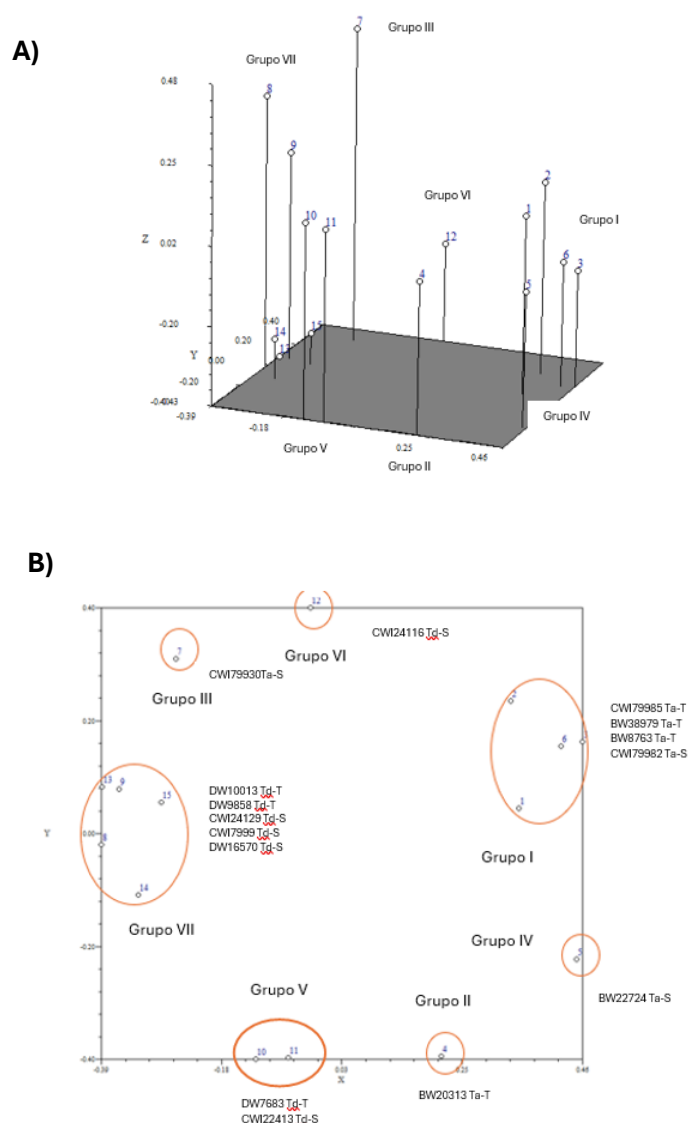


Figura 8 . Análisis de escalado multidimensional en variedades de trigo sometidas a estrés salino, 11A) Gráfico 3D, 11B) Gráfico 2D.

4.2.1.2.2. Gráficos en 2D y 3D para variedades de trigo sometidas a estrés hídrico

La obtención de gráficos se realizó mediante el Software NTSYS, como se aprecia en la Figura 9, se observó la formación de ocho grupos, conformados de la siguiente manera:

Grupo I: Variedades BW49457, BW49308 y BW35697, todas pertenecen a la especie *T. aestivum* con reporte de tolerante a estrés hídrico por el CIMMYT.

Grupo II: Variedad BW33909, perteneciente a la especie *T. aestivum* con reporte de tolerancia a estrés hídrico por el CIMMYT.

Grupo III: Variedades BW36945, BW4113 y DW4478, las primeras dos pertenecen a la especie *T. aestivum* donde la primera tiene reporte de tolerante y la segunda tiene reporte de susceptible a estrés hídrico por el CIMMYT, la variedad DW4478 pertenece a la especie *T. durum* y no cuenta con reporte de tolerancia o susceptibilidad a estrés hídrico.

Grupo IV: Variedades BW34025 y DW4477, la primera pertenece a la especie *T. aestivum* con reporte de susceptibilidad a estrés hídrico, mientras que la segunda pertenece a la especie *T. durum* y no cuenta con reporte de tolerancia o susceptibilidad a estrés hídrico.

Grupo V: Variedades DW5383 y DW4963, pertenecientes a la especie *T. durum*, no cuentan con reporte de tolerancia o susceptibilidad.

Grupo VI: Variedades DW5377, DW4404 y DW4386, todas las variedades de este grupo pertenecen a la especie *T. durum* y no cuentan con reporte de tolerancia o susceptibilidad.

Grupo VII: Variedad DW4393, perteneciente a la especie *T. durum*, sin reporte en su comportamiento ante condiciones de estrés hídrico.

Grupo VIII: Variedad DW4827, perteneciente a la especie *T. durum*, reportado como susceptible ante condiciones de estrés hídrico.

La numeración de las variedades en los gráficos sigue el orden indicado en el Cuadro 38.

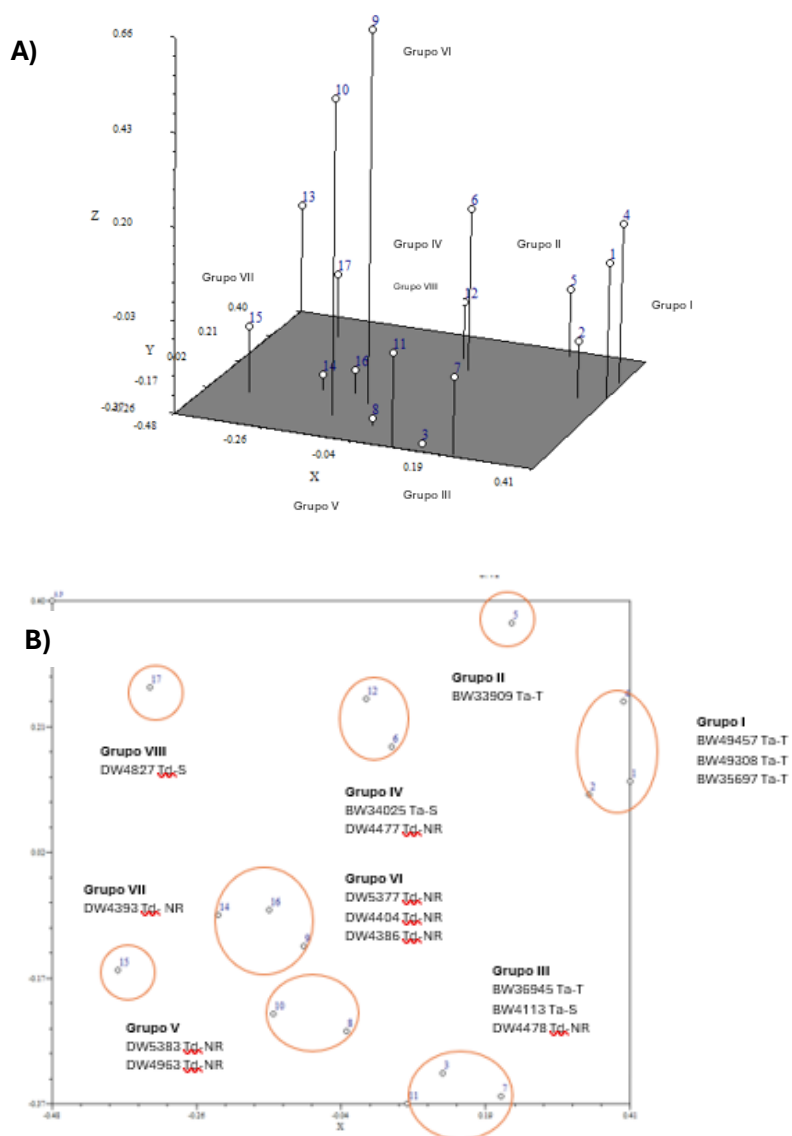


Figura 9. Análisis de escalado multidimensional en variedades de trigo sometidas a estrés hídrico, la numeración de las variedades es referenciada en el Cuadro 35. 12A) Gráfico 3D, 12B) Gráfico 2D.

4.2.2. Análisis de variedades criollas

Las cinco variedades criollas se evaluaron con cuatro iniciadores ISSR que mostraron buena definición de bandas, con las bandas obtenidas se realizó la matriz binaria y se sometió a análisis de conglomerados usando UPGMA, se asignó numeración del 16 al 20 a las variedades criollas al analizarlas con las quince variedades sometidas a estrés salino, y numeración del 18 al 22 a las variedades criollas al analizarlas con las diecisiete variedades sometidas a estrés hídrico.

Las Figuras 10 y 11 muestran los dendrogramas obtenidos para las variedades criollas. Se observa que en ambos casos (análisis de conglomerados con muestras de estrés salino y con muestras de estrés hídrico), las variedades criollas presentan baja relación, formando en ambos casos un grupo aparte, que contiene las cinco variedades criollas. De acuerdo con el análisis UPGMA, el grupo que contiene las variedades criollas presenta un coeficiente de similitud de Jaccard de 0.64 con las quince variedades evaluadas para estrés salino. Mientras que, para las variedades evaluadas para estrés hídrico, presenta un coeficiente de similitud de Jaccard de 0.62.

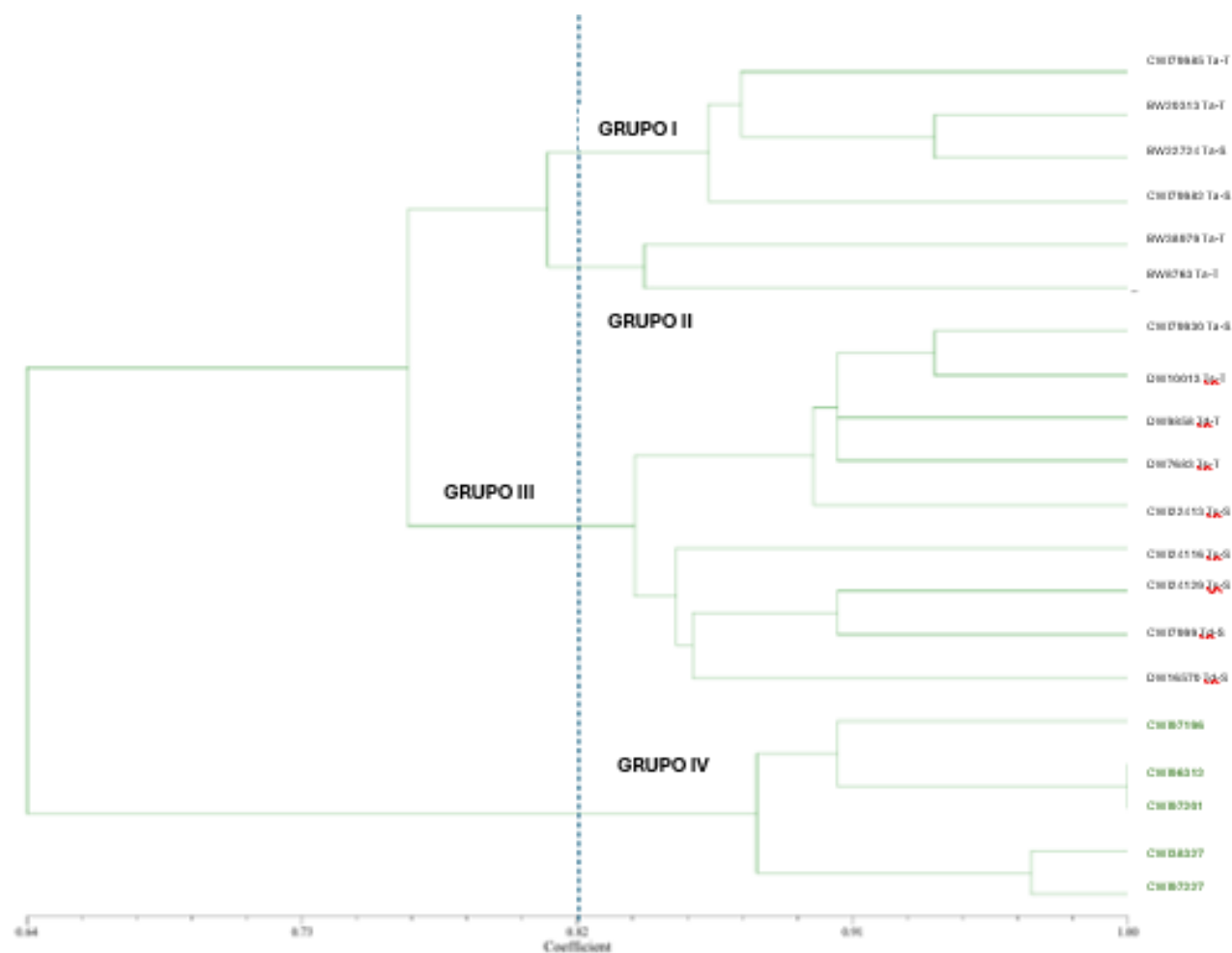


Figura 10. Dendrograma de relaciones entre las variedades criollas de trigo y las variedades de *Triticum aestivum* y *T. durum*, sometidas a estrés salino.

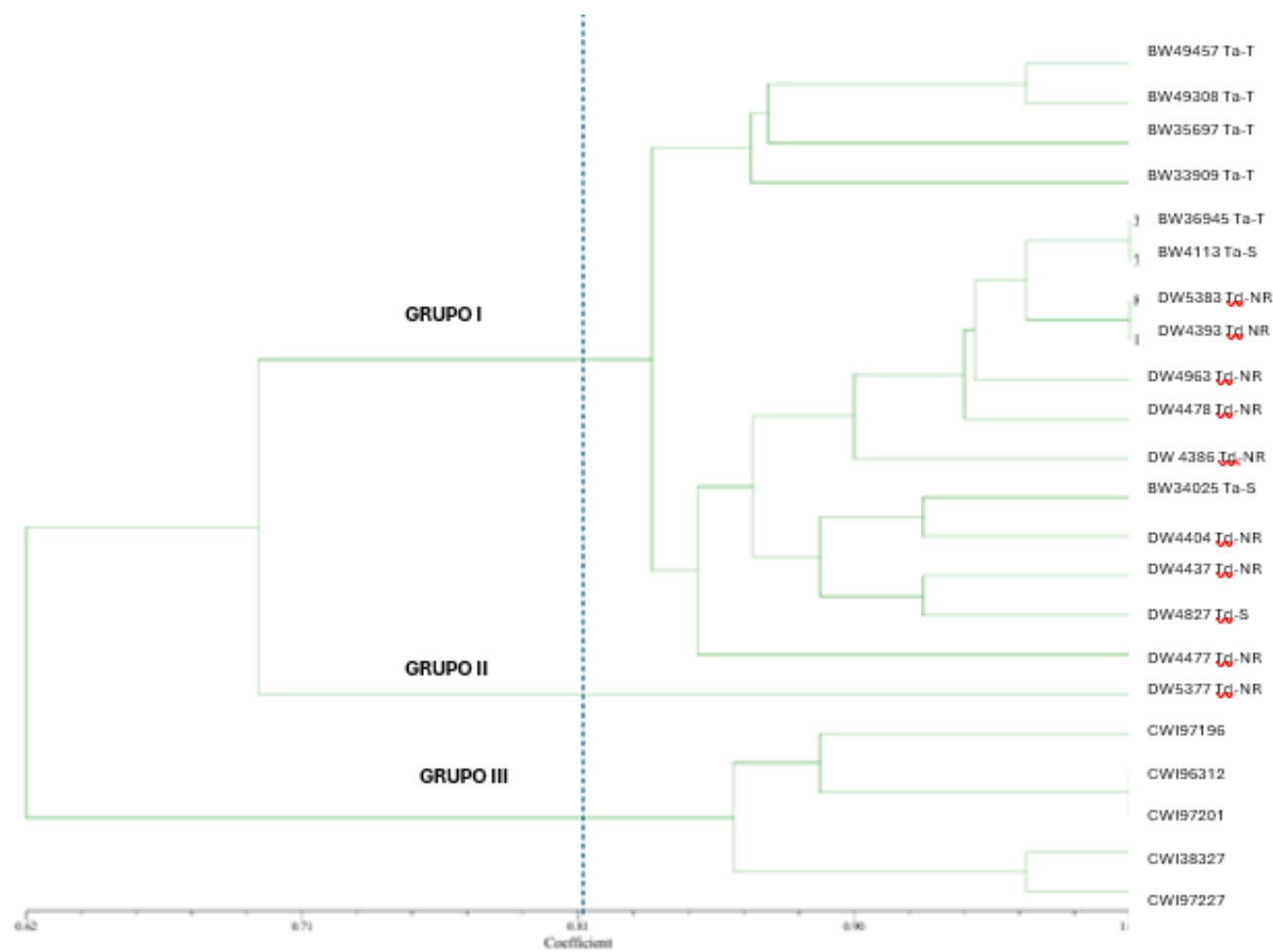


Figura 11. Dendrograma de relaciones entre las variedades criollas de trigo y las variedades de *Triticum aestivum* y *T. durum*, sometidas a estrés hídrico.

4.2.3. Análisis de segregación masal

El análisis de segregación masal se realizó con la finalidad de encontrar marcadores que posiblemente estén asociados con características de tolerancia al estrés hídrico o al estrés salino, para ello se hizo la mezcla de ADN genómico de diez individuos de cada variedad analizada y se llevó a cabo la comparación molecular.

Como se muestra en la Figura 12, dos de los cinco marcadores analizados presentaron diferente patrón de bandas para la mezcla de variedades *Triticum aestivum* tolerante y susceptible a salinidad.

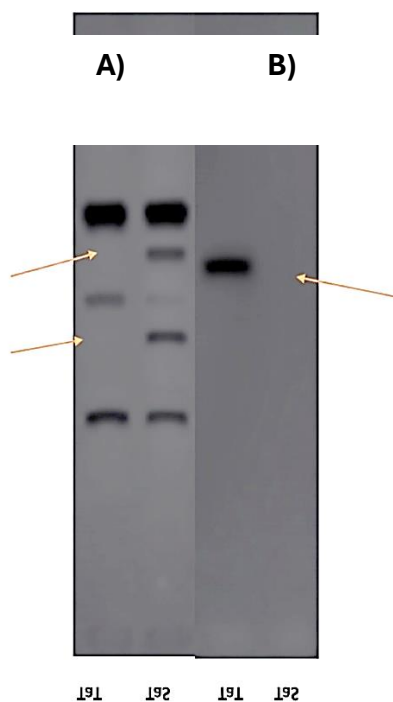


Figura 12. Comparación de patrones de bandas entre mezclas de individuos de variedades tolerantes y susceptibles a estrés salino. TaT=*Triticum aestivum* Tolerante, TaS= *Triticum aestivum* susceptible. A) Iniciador A8, B) Iniciador DBDAC7

El iniciador CT8RC mostró diferente patrón de bandas para muestras de estrés salino entre mezclas de individuos de *T. durum* con tolerancia o susceptibilidad No Reportada y susceptibilidad reportada, el patrón de bandas se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Comparación del patrón de bandas entre individuos de *Triticum durum* sin tolerancia o susceptibilidad reportada e individuos con susceptibilidad reportada, para el iniciador CT8RC.

Para el análisis de segregación masal de las variedades evaluadas para estrés hídrico, se localizó diferencia en el patrón de bandas para la mezcla de individuos de *T. aestivum* tolerante y *T. aestivum* susceptible, con el iniciador A8. En la Figura 14 se muestra la comparación del patrón de bandas.

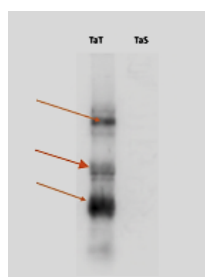


Figura 14. Comparación del patrón de bandas entre individuos *Triticum aestivum* tolerante y susceptible, para el iniciador A8. TaT=*Triticum aestivum* tolerante, TaS=*Triticum aestivum* susceptible.

Para determinar si los marcadores identificados están o no relacionados con las características que confieren susceptibilidad o resistencia al estrés salino o hídrico, es necesario realizar secuenciación genómica de las bandas que difieren entre sí y hacer la comparación de la secuencia en bases de datos genómicos. En caso de confirmarlo, será posible utilizar estos marcadores en mejoramiento vegetal.

4.3. Análisis bioquímico

Las plantas sometidas a estrés abiótico desarrollan adaptaciones para hacer frente al estrés, algunas de estas adaptaciones son cambios morfológicos, ajuste osmótico; ya sea por cierre de estomas o acortamiento de raíces, cambios en el proceso de la fotosíntesis, liberación de hormonas para enfrentar el estrés, entre otras. De acuerdo con Munns, como mencionó Acosta et al. (2016), descubrió que la acumulación de sal en las hojas viejas acelera la muerte, con lo que disminuye el suministro de carbohidratos y/o hormonas de crecimiento a las regiones meristemáticas, inhibiendo el crecimiento, y con ello se reduce la tasa de fotosíntesis.

También se ha reportado que la sequía en las plantas, produce diversos efectos como la disminución de fotosíntesis, cambios permanentes en el contenido de clorofila, acumulación de azúcares, entre otros efectos bioquímicos (Ojasvini et al., 2021).

4.3.1. Contenido relativo de agua (CRA)

El déficit hídrico en el ambiente se caracteriza por la disminución del potencial hídrico del medio, con ello la pérdida de agua por la planta es más probable, de acuerdo con Osmolovskaya et al. (2018), el estrés hídrico severo resulta en la pérdida permanente de la turgencia.

Para estrés hídrico provocado con PEG, puede ser un problema la absorción y acumulación de PEG en las raíces de la planta (con un peso molecular de 4000-8000 Da) lo que provoca daños en las mismas, por ende, resulta en deshidratación del tejido vegetal.

4.3.1.1. Salinidad

En el Cuadro 39 se muestran los resultados de la comparación de medias de Tukey para contenido relativo de agua (CRA) bajo distintas condiciones de estrés salino, se observa que no existen diferencias significativas para el tratamiento 2 (100 mM), mientras que, para el tratamiento 3 y 4 (200 y 350 mM, respectivamente), si existe diferencias significativas en las variedades analizadas tras ser sometidas a estrés.

En promedio el contenido relativo de agua se redujo en 13.88 % en las muestras sometidas a estrés severo, respecto al testigo. Cinco variedades evaluadas no presentaron disminución en el CRA bajo ninguno de los tratamientos, respecto al testigo, se trata de las variedades DW10013, DW9858, CWI22413, CWI24116 y DW16570, mismas que en todos los tratamientos obtuvieron un contenido relativo

de agua de 75 %, lo que puede significar que presentan el mecanismo de ajuste osmótico, mismo que podría explotarse para realizar mejoramiento genético.

Cuadro 39. Reducción en el contenido relativo de agua (%) de variedades de trigo bajo estrés salino.

Reducción en contenido relativo de agua (%) bajo estrés salino			
Variedad	100 mM	200 mM	350 mM
CWI79985	0 a	0 ab	-33.33 a
BW38979	0 a	-25 a	-33.33 a
BW8763	0 a	-25 a	-33.33 a
BW20313	-8.33 a	-8.33 ab	-8.33 ab
BW22724	0 a	0 ab	-8.33 ab
CWI79982	0 a	-25 a	-33.33 a
CWI79930	0 a	-33.33 a	-33.33 a
DW10013	0 a	0 ab	0 ab
DW9858	0 a	0 ab	0 ab
DW7683	-8.33 a	-8.33 ab	-8.33 ab
CWI22413	0 a	0 ab	0 ab
CWI24116	0 a	0 ab	0 ab
CWI24129	-8.33 a	-8.33 ab	-8.33 ab
CWI7999	0 a	0 ab	-8.33 ab
DW16570	0 a	0 ab	0 ab

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha \leq 0.05$.

La Figura 15 muestra la disminución en el contenido relativo de agua para las quince variedades evaluadas, bajo los distintos tratamientos de estrés salino aplicados a las plantas. Presenta una disminución en el % conforme aumenta la concentración de sal en el medio.

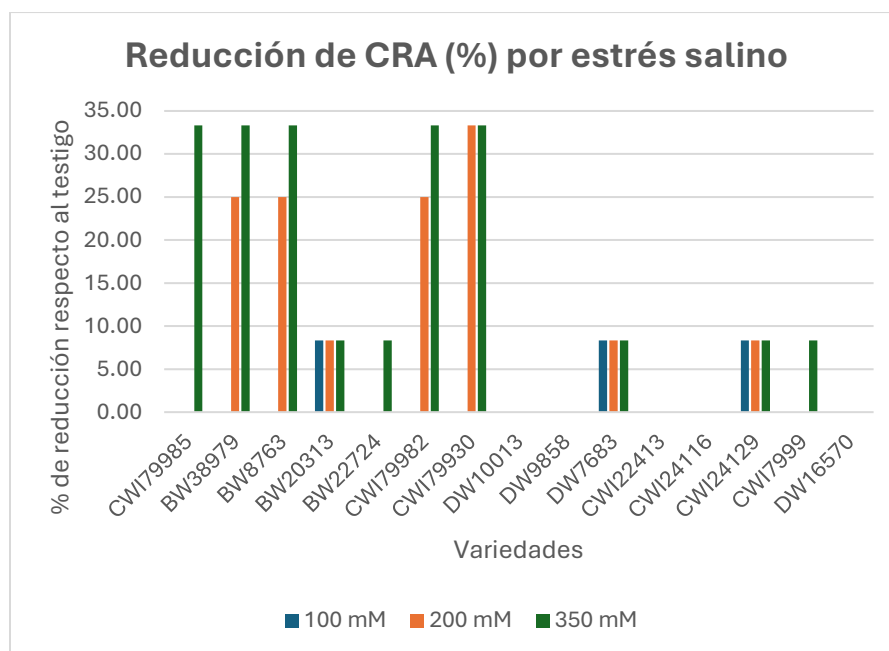


Figura 15. Contenido relativo de agua (%) de variedades de trigo bajo estrés salino.

4.3.1.2. Estrés hídrico

En el Cuadro 40 se muestra el Contenido Relativo de Agua (%) para las diecisiete variedades evaluadas bajo estrés hídrico, las plantas presentaron un promedio de 97 % de CRA para el tratamiento testigo, conforme se aumentó el estrés las plantas disminuyeron el contenido relativo de agua, obteniendo un promedio de 79 % para el tratamiento más severo, lo que significa que el porcentaje de CRA disminuyó en un 18 %, respecto al tratamiento testigo.

Se observa que cinco de las variedades evaluadas no presentaron afectación para ninguno de los tratamientos evaluados, se trata de las variedades BW49457, BW36945, DW5377, DW4963 y DW4437; lo que puede significar que presentan el

mecanismo de ajuste osmótico, mismo que podría explotarse para realizar mejoramiento genético.

La variedad DW4478 presentó un incremento en el Contenido Relativo de Agua respecto al testigo.

Cuadro 40. Reducción en el Contenido Relativo de Agua (%) de variedades de trigo bajo estrés hídrico.

Reducción en contenido relativo de agua (%(bajo estrés hídrico			
Variedad	-0.4 MPa	-0.8 MPa	-1.0 MPa
BW49457	0 ab	0 ab	0 ab
BW49308	0 ab	0 ab	-33.33 a
BW36945	0 ab	0 ab	0 ab
BW35697	0 ab	-33.33 a	-33.33 a
BW33909	-33.33 a	-33.33 a	-33.33 a
BW34025	0 ab	0 ab	-33.33 a
BW4113	0 ab	-33.33 a	-33.33 a
DW5383	0 ab	0 ab	-33.33 a
DW5377	0 ab	0 ab	0 ab
DW4963	0 ab	0 ab	0 ab
DW4478	25 b	25 b	25 b
DW4477	-25 a	-25 a	-25 a
DW4437	0 ab	0 ab	0 ab
DW4404	0 ab	-33.33 a	-33.33 a
DW4393	0 ab	-8.33 ab	-8.33 ab
DW4386	-33.33 a	-33.33 a	-33.33 a
DW4827	0 ab	-33.33 a	-33.33 a

Para valores con la misma letra no existe diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey con un $\alpha=0.05$.

En la Figura 16 se presenta el CRA (%), de las variedades evaluadas bajo estrés hídrico.

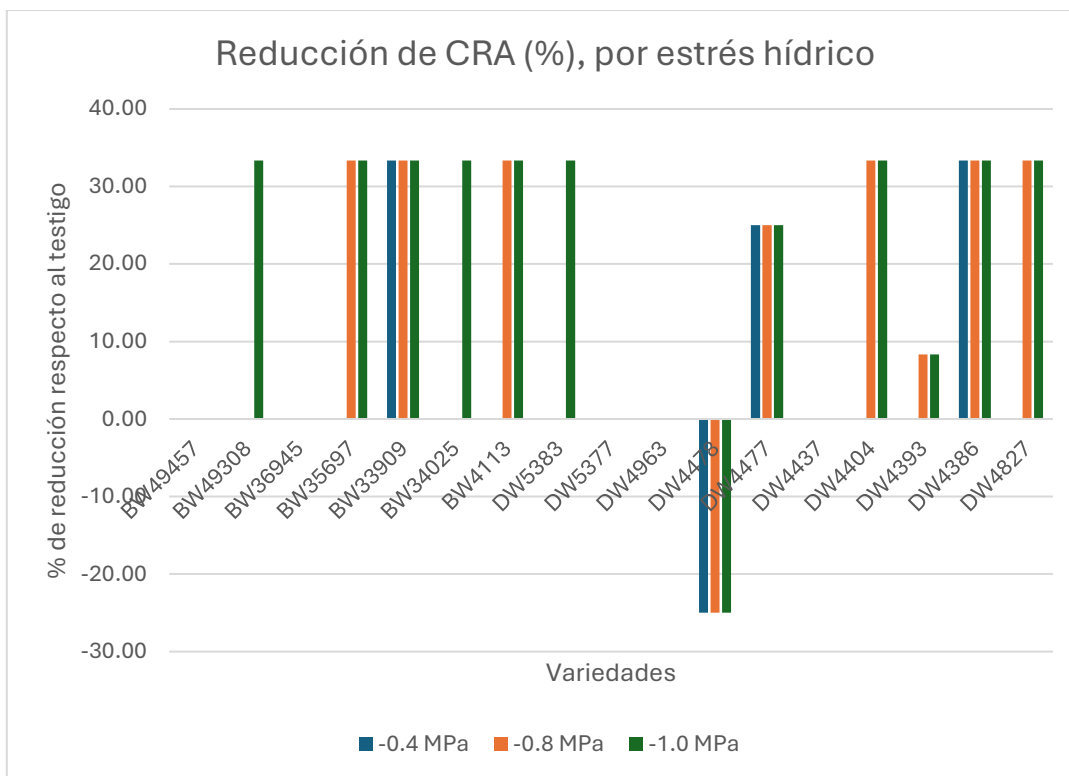


Figura 16. Contenido relativo de agua (CRA %), de variedades de trigo bajo estrés hídrico.

4.3.2. Contenido de clorofila

El contenido de clorofila tiende a reducirse conforme se aumenta el estrés. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Keil (2020) en donde muestra que el contenido de clorofila a y clorofila b, disminuyen al aumentar el tiempo de exposición a estrés hídrico (riego limitado).

4.3.2.1. Salinidad

El contenido de clorofila a, clorofila b y clorofila total ($\mu\text{g mL}^{-1}$), se redujo conforme aumentó la concentración de salinidad en el medio. Dos variedades presentaron un ligero incremento en el contenido de clorofila para el tratamiento 2 (100 mM), la variedad CWI79930 y la CWI22413 aumentaron 0.18 y 1.94 $\mu\text{g. mL}^{-1}$,

respectivamente. Las variedades que mostraron una mayor reducción en el contenido de clorofila total bajo estrés severo (350 mM) fueron BW20313 y BW22724, reduciendo hasta 24.49 y 24.39 $\mu\text{g mL}^{-1}$, respecto al testigo, respectivamente.

La variedad que redujo en menor medida la concentración de clorofila fue DW16570 con 12.53 $\mu\text{g mL}^{-1}$, respecto al testigo.

En el Cuadro 41 se muestra la reducción en el contenido de clorofila a, clorofila b y clorofila total, para las muestras sometidas a estrés por salinidad, respecto a la concentración obtenida en el tratamiento 1, correspondiente al testigo (0 mM).

Cuadro 41. Reducción en el contenido de clorofila en variedades de trigo bajo estrés salino.

Variedad	Reducción en contenido de clorofila ($\mu\text{g mL}^{-1}$) para estrés salino								
	100 mM			200 mM			350 mM		
	CloA	CloB	CloT	CloA	CloB	CloT	CloA	CloB	CloT
CWI79985	-3.23 a	-3.41 a	-6.64 ab	-6.77 ab	-5.02 ab	-11.79 cd	-10.68 ab	-8.05 ab	-18.72 b
BW38979	-1.03 a	-1.57 a	-2.60 a	-0.71 a	-2.74 a	-3.45 a	-10.47 ab	-7.60 A	-18.06 b
BW8763	-3.81 a	-4.77 ab	-8.58 bc	-8.86 bc	-7.32 bc	-16.17 d	-11.49 b	-8.52 ab	-20.00 b
BW20313	-2.06 a	-2.92 a	-4.98 a	-6.21 ab	-5.64 ab	-11.85 cd	-13.33 b	-11.17 B	-24.49 bc
BW22724	-2.14 a	-2.08 a	-4.22 a	-11.97 cd	-8.84 bc	-20.81 d	-13.44 b	-10.95 B	-24.39 bc
CWI79982	-3.85 a	-3.29 a	-7.14 ab	-4.75 ab	-6.01 ab	-10.75 cd	-8.78 a	-7.83 A	-16.60 b
CWI79930	0.18 a	-2.37 a	-2.19 a	-5.54 ab	-5.06 ab	-10.59 cd	-10.36 ab	-9.59 ab	-19.94 b
DW10013	-3.71 a	-2.95 a	-6.66 ab	-5.74 ab	-4.61 ab	-10.35 cd	-9.30 ab	-7.40 ab	-16.69 ab
DW9858	-1.87 a	-1.81 a	-3.67 a	-5.41 ab	-3.77 a	-9.18 cd	-9.15 ab	-6.51 A	-15.65 ab
DW7683	-3.34 a	-3.33 a	-6.66 ab	-8.66 bc	-7.15 ab	-15.81 d	-9.42 ab	-8.27 ab	-17.68 b
CWI22413	1.94 a	-2.80 a	-0.85 a	-7.78 b	-6.55 ab	-14.33 cd	-10.23 ab	-9.62 ab	-19.84 b
CWI24116	-1.30 a	-4.17 ab	-5.46 ab	-3.61 a	-5.35 ab	-8.96 bc	-9.38 ab	-9.32 ab	-18.69 b
CWI24129	-3.14 a	-3.68 a	-6.82 ab	-4.48 ab	-4.88 ab	-9.36 c	-8.51 a	-7.62 A	-16.13 ab
CWI7999	-2.69 a	-3.92 a	-6.60 ab	-3.05 a	-4.31 ab	-7.36 b	-7.04 a	-7.51 A	-14.54 a
DW16570	-4.94 ab	-1.82 a	-6.75 ab	-7.68 b	-3.83 a	-11.51 cd	-7.87 a	-4.66 A	-12.53 a

Valores con la misma letra dentro de cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

La Figura 17 presenta el contenido de clorofila para las quince variedades evaluadas bajo estrés salino, muestra la tendencia del contenido de clorofila total a disminuir conforme se aumenta la concentración salina (de 0 mM hasta 350 mM), para el tratamiento testigo se obtuvieron valores de hasta 30.12 $\mu\text{g mL}^{-1}$ (para la variedad BW22724), mientras en el tratamiento más severo se obtuvieron valores mínimos de 2.45 $\mu\text{g mL}^{-1}$ (para la variedad DW7683).

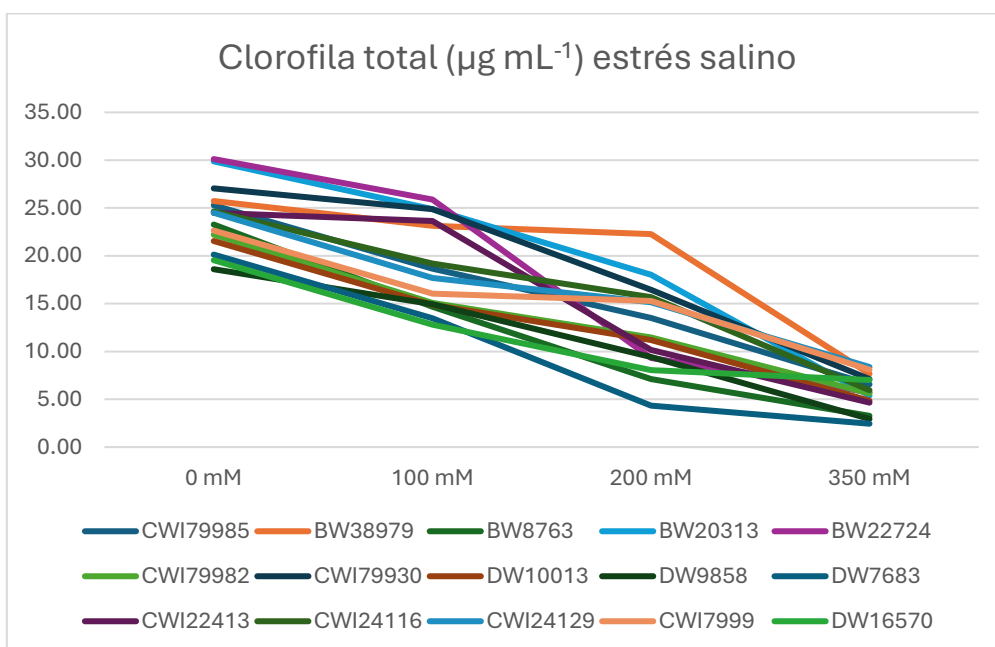


Figura 17. Clorofila total de variedades de trigo bajo diferentes condiciones de estrés salino.

El contenido de clorofila a, presentó mayor afectación con una reducción media de 9.32 $\mu\text{g mL}^{-1}$, mientras que la clorofila B tuvo una reducción media de 6.19 $\mu\text{g mL}^{-1}$, para el tratamiento salino más severo, respecto al testigo. Los resultados coinciden con los obtenidos por Lara (2018), quien reportó una mayor disminución para el contenido de clorofila a.

4.3.2.2. Estrés hídrico

En el Cuadro 42 se muestra la reducción en el contenido de clorofila en $\mu\text{g mL}^{-1}$ en comparación con el tratamiento testigo (0 MPa), para las diecisiete variedades de trigo evaluada para estrés hídrico. El contenido de clorofila se redujo fuertemente en el tratamiento más severo (-1.0 MPa,) con un promedio $15.42 \mu\text{g mL}^{-1}$, respecto al testigo. La variedad que redujo en mayor medida la concentración de clorofila fue DW4393 con una reducción para clorofila total de $21.58 \mu\text{g mL}^{-1}$, mientras tanto, la variedad BW36945 mostró menor afectación reduciendo $12.52 \mu\text{g mL}^{-1}$, respecto al tratamiento testigo.

Cuadro 42. Reducción en el contenido de clorofila de variedades de trigo bajo estrés hídrico, respecto al tratamiento testigo (0 MPa).

Reducción en contenido de clorofila (µg mL-1) para estrés hídrico																		
Variedad	-0.4 MPa			-0.8 MPa			-1.0 MPa											
	CloA		CloB	CloT	CloA	CloB	CloT	CloA	CloB	CloT								
BW49457	-3.61	a	-3.03	a	-6.64	b	-7.25	b	-4.10	ab	-11.34	cd	-9.44	A	-5.77	a	-15.10	ab
BW49308	-4.35	ab	-1.18	a	-5.53	b	-8.25	bc	-3.71	a	-11.96	cd	-10.75	ab	-5.24	a	-15.94	ab
BW36945	-3.07	a	-0.95	a	-4.02	ab	-6.92	b	-4.53	ab	-11.44	cd	-7.65	A	-5.07	a	-12.52	a
BW35697	-0.96	a	-2.71	a	-3.67	ab	-6.05	b	-5.18	ab	-11.22	cd	-8.50	A	-6.62	a	-14.94	a
BW33909	-1.87	a	-4.13	ab	-6.00	b	-9.06	c	-5.54	b	-14.59	d	-9.22	A	-8.75	ab	-17.89	ab
BW34025	-2.30	a	-2.55	a	-4.85	ab	-4.98	ab	-4.08	ab	-9.05	c	-6.26	A	-4.54	a	-10.70	a
BW4113	-0.71	a	-1.65	a	-2.35	a	-8.85	bc	-6.07	b	-14.92	d	-9.86	A	-7.35	a	-17.11	ab
DW5383	-1.48	a	-1.56	a	-3.04	a	-8.36	bc	-3.84	a	-12.20	cd	-9.41	A	-5.15	a	-14.46	a
DW5377	-1.14	a	-1.35	a	-2.49	a	-6.18	b	-2.69	a	-8.88	bc	-8.74	A	-5.04	a	-13.69	a
DW4963	-1.55	a	-2.91	a	-4.46	ab	-9.77	c	-4.24	ab	-14.01	d	-12.54	B	-7.87	ab	-20.36	bc
DW4478	-0.63	a	-2.62	a	-3.24	a	-5.15	ab	-5.40	b	-10.54	cd	-7.17	A	-6.16	a	-13.24	a
DW4477	-1.45	a	-0.72	a	-2.16	a	-6.39	b	-3.32	a	-9.71	c	-6.86	A	-4.13	a	-10.90	a
DW4437	-3.87	a	-1.16	a	-5.03	ab	-4.31	ab	-2.53	a	-6.84	b	-9.10	A	-5.44	a	-14.48	a
DW4404	-3.26	a	-3.71	a	-6.96	b	-4.39	ab	-8.13	bc	-12.52	cd	-11.54	B	-7.70	ab	-19.18	bc
DW4393	-1.18	a	-2.48	a	-3.66	a	-1.21	a	-5.25	ab	-6.46	b	-11.07	B	-10.55	b	-21.58	bc
DW4386	-1.77	a	-0.62	a	-2.39	a	-2.68	a	-1.36	a	-4.04	ab	-10.71	ab	-5.49	a	-16.14	ab
DW4827	-3.30	a	-0.49	a	-3.79	a	-6.32	b	-4.46	ab	-10.78	cd	-9.64	A	-4.33	a	-13.93	a

Valores con la misma letra dentro de cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

En la Figura 18 se muestra la tendencia a disminuir del contenido de clorofila total conforme aumenta el estrés hídrico. Para el tratamiento testigo las plantas presentaron un promedio de $20.64 \mu\text{g mL}^{-1}$, mientras que en el tratamiento más severo las plantas indicaron un promedio de $5.22 \mu\text{g mL}^{-1}$.

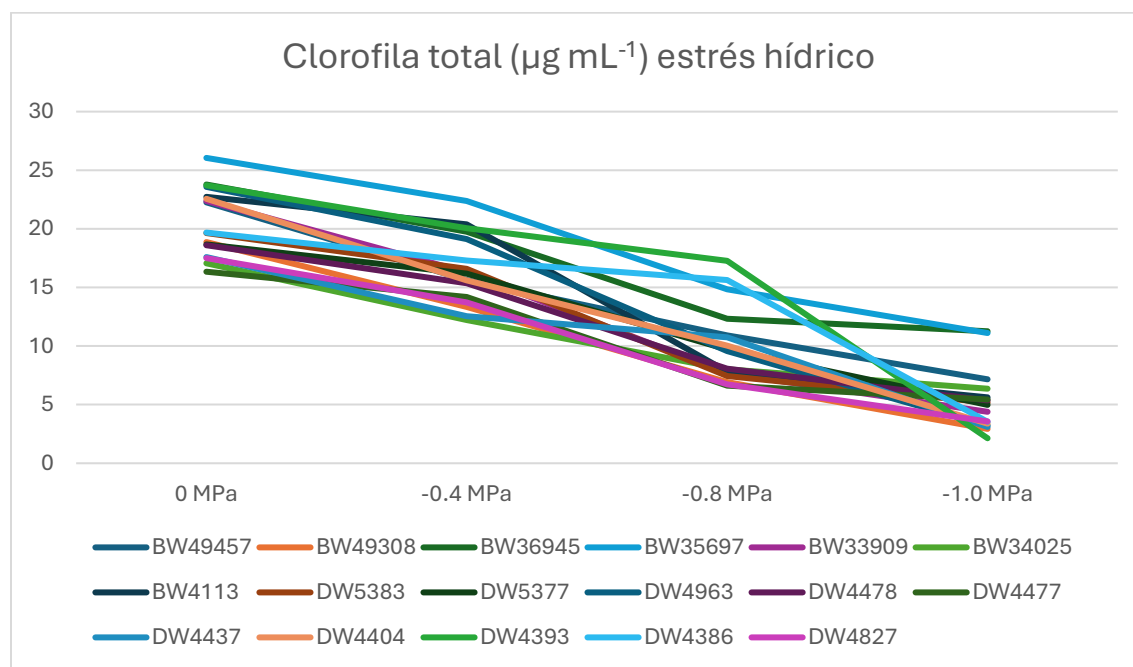


Figura 18. Contenido de clorofila total de variedades de trigo bajo estrés hídrico.

4.3.3. Contenido de azúcares

De acuerdo con Ozturk (2021), como mencionó Nyaupane et al. (2023), en condiciones de estrés se produce acumulación de metabolitos como glicina, betaína, prolina, manitol y azúcares solubles que ayudan a proteger la planta contra la sequía. El aumento en el contenido de azúcares solubles mejora la tolerancia contribuyendo al ajuste osmótico.

4.3.3.1. Salinidad

Para la evaluación del contenido de azúcares de las muestras sometidas a estrés salino, se formaron cuatro grupos, para ello se consideró la especie y la característica; ya sea tolerancia o susceptibilidad reportada a salinidad. En el Cuadro 43, se aprecia el incremento en el contenido de azúcares para las plantas tratadas a distintas concentraciones salinas, respecto al testigo. Se observa que, bajo el tratamiento más severo, las plantas incrementaron el contenido de azúcares hasta 31.72 mg g⁻¹, respecto al testigo. Las plantas de *Triticum aestivum* mostraron un incremento menor (21.90 mg g⁻¹) que las plantas de *Triticum durum*, que incrementaron en promedio 28.61 mg g⁻¹, respecto al testigo.

El grupo *T. durum* susceptible, mostró una disminución en el contenido de azúcares para el tratamiento 2 (100 mM), respecto al testigo, sin embargo, al incrementar el estrés salino, el contenido de azúcares incrementó drásticamente.

Cuadro 43. Contenido de azúcares en variedades de trigo bajo estrés salino.

	Incremento de azúcares (mg g ⁻¹) bajo estrés salino		
	100 mM	200 mM	350 mM
<i>Triticum aestivum</i> tolerante	8.24	21.34	23.71
<i>T. aestivum</i> susceptible	2.47	6.50	20.08
<i>T. durum</i> tolerante	2.72	23.28	31.72
<i>T. durum</i> susceptible	-1.45	12.08	25.51

4.3.3.2. Estrés hídrico

Para la evaluación del contenido de azúcares se formaron cuatro grupos; como puede apreciarse en el Cuadro 44. La agrupación se hizo según la especie y la característica que posee, ya sea tolerante o susceptible a estrés hídrico. En el caso de *Triticum durum*, se contó con un grupo que no reporta tolerancia o susceptibilidad. El contenido de azúcares mostró un incremento de hasta 23.93 mg g⁻¹, para las plantas sometidas al tratamiento 4 (-1.0 MPa), el incremento en el contenido de azúcares coincide con los resultados obtenidos por Pastelín y Odón (2020), donde presenta que el contenido de sacarosa aumentó de manera significativa tras someter las plantas de dalias a soluciones al 10 % de PEG 6000 (-1.09 MPa).

Cuadro 44. Incremento en la concentración de azúcares en plantas de trigo sometidas a estrés hídrico.

	Incremento de azúcares (mg g ⁻¹)		
	-0.4 MPa	-0.8 MPa	-1.0 MPa
<i>Triticum aestivum</i> tolerante	8.58	19.38	23.49
<i>T. aestivum</i> susceptible	7.18	21.65	22.47
<i>T. durum</i> No reportado	5.51	16.73	23.19
<i>T. durum</i> susceptible	2.81	16.53	18.61

La especie *Triticum aestivum*, presentó un mayor incremento bajo condiciones de estrés severo (-1 MPa), en el contenido de azúcares respecto al testigo, con una media de 23.22 mg g⁻¹, mientras que la especie *Triticum durum* tuvo un incremento medio de 20.90 mg g⁻¹.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con los análisis morfológicos realizados a 32 variedades de trigo durante la etapa de germinación, fue posible identificar genotipos de *Triticum aestivum* o *Triticum durum* que presentaron tolerancia o mayor susceptibilidad al estrés salino y al estrés hídrico.

Las pruebas de germinación para variedades sometidas a estrés salino, mostraron que la variedad BW20313 fue la única que logró germinar bajo estrés severo de 350 mM, presentando el coleóptilo un crecimiento sobresaliente de 2.25 cm bajo el tratamiento 3 (200 mM), se trata de una variedad de *Triticum aestivum* con reporte de tolerancia al estrés salino, a pesar de que se evaluaron en total cuatro variedades con reporte de tolerancia, esta variedad fue la única que presentó germinación al aplicar estrés con NaCl por duplicado.

La variedad CW79982 fue la menos afectada por la salinidad en el tratamiento 2 (100 mM), con uno de los índices más bajos de reducción de parte aérea (2.44 cm), lo cual coincide con la reducción de su peso fresco, ya que presentó una de las reducciones más bajas, de 0.7 g respecto al testigo.

Se observó una correlación alta entre los datos obtenidos de las raíces (largo de raíz, número de raíces y número de radículas) con la longitud de la hoja.

En cuanto a los resultados de las pruebas de germinación bajo condiciones de estrés hídrico, las variedades BW34025 y DW4477 presentaron un 100 % de germinación bajo estrés severo (-1.0 MPa). De igual forma, la variedad DW4477 mostró el promedio de

germinación más alto para todos los tratamientos, siendo este de 90 %, a pesar de tratarse de una variedad que no reporta tolerancia o susceptibilidad.

En el análisis de longitud de raíz, las variedades menos afectadas fueron DW5383 (tolerancia no reportada) y BW35697 (tolerante a estrés hídrico), las cuales disminuyeron 0.26 y 1.29 cm, respectivamente.

Dentro del grupo de *Triticum durum* sin reporte de tolerancia o susceptibilidad, se encontró que cuatro variedades aumentaron la longitud de raíz bajo tratamientos de estrés, respecto al testigo. Se trata de las variedades DW4478 que incrementó 0.45 cm al ser sometida a -1.0 MPa, la variedad DW4477 que aumentó 1.31 cm al ser sometida a -0.4 MPa, y la variedad DW4836 que aumentó 1.01 cm al ser sometida a -0.4 MPa y aumentó 1.61 cm al ser sometida al tratamiento -1.0 MPa.

La variedad BW34025, a pesar de reportarse como una variedad susceptible, desarrolló el promedio de radículas más alto, con un promedio de 16.5 radículas por planta a -1.0 MPa, lo cual coincide con su porcentaje de germinación de 100 % para el mismo tratamiento. Dicha variedad también tuvo un incremento en la longitud del coleóptilo tras ser sometida a -1.0 MPa, aumentando 0.21 cm, respecto al tratamiento testigo.

Ciertas variedades, además de la ya mencionada, aumentaron la longitud del coleóptilo bajo diferentes niveles de estrés hídrico, tal es el caso de la variedad DW5383 que aumentó 0.12 cm de longitud bajo -1.0 MPa (variedad *T. durum*, sin reporte de tolerancia o susceptibilidad); algunas variedades presentaron incremento en la longitud del coleóptilo al ser sometidas a -0.4 MPa, se trata de las variedades BW49308, BW33909

(*T. aestivum* con tolerancia reportada), DW4963 y DW4478 (*T. durum* sin resistencia o susceptibilidad reportada).

La variedad DW4478 redujo su peso fresco en menor proporción comparado con el resto de variedades, siendo este de 0.2 g respecto al tratamiento testigo.

Los análisis bioquímicos permitieron identificar claramente la afectación de las variedades evaluadas al ser sometidas a ambos tipos de estrés abiótico: salino e hídrico, reduciendo drásticamente el contenido de clorofila A, clorofila B y clorofila total, y, aumentando el contenido de azúcares.

La respuesta al análisis molecular permitió el agrupamiento de variedades de acuerdo a sus características moleculares, la prueba de segregación masal permitió la identificación de cuatro patrones de banda que presentan diferencia entre variedades tolerantes y susceptibles, lo que abre la posibilidad de realizar aislamiento de bandas, secuenciación genómica e identificación de marcadores asociados a la tolerancia o susceptibilidad de las variables evaluadas en la presente investigación.

La prueba de conglomerados para variedades criollas, permitió identificar la formación de un grupo aislado donde se localizan las cinco variedades criollas evaluadas y se determinó que el coeficiente de Jaccard se encuentra cercano a 0.6 tanto en variedades sometidas a estrés salino comparadas con criollas, como variedades sometidas a estrés hídrico comparadas con criollas.

6. LITERATURA CITADA

- Abadía, B., Abbate, P. E., & Divito, G. A. (2017). *Wheat Cultivation Handbook: How Wheat Cultivation Grows and Develops* (1.^a ed. compendiada, pp. 22–32). International Plant Nutrition Institute.
- Abbate, P. E., Cardós, M. J., & Campaña, L. E. (2017). *Wheat Cultivation Handbook: Wheat, Its Diffusion, Importance as Food and Consumption* (1.^a ed. compendiada, pp. 7–21). International Plant Nutrition Institute.
- Acosta, J. R., Ortuño, M. F., Bernal, A., Díaz, P., Sánchez, M. J., & Hernández, J. A. (2017). Plant responses to salt stress: Adaptive mechanisms. *Agronomy*, 7(1), 18.
<https://doi.org/10.3390/agronomy7010018>
- Ahmed, H. G. M.-D., Zeng, Y., Shah, A. N., Yar, M. M., Ullah, A., & Ali, M. (2022). Conferring of drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes using seedling indices. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 961049. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.961049>
- Ammar, M. K., Hanafi, R. S., Choucry, M. A., & Handoussa, H. (2023). Structural, functional, nutritional composition and analytical profiling of *Triticum aestivum* L. *Applied Biological Chemistry*, 66(1), Article 48, 1–16. <https://doi.org/10.1186/s13765-023-00804-3>
- Appels, R., Eversole, K., Feuillet, C., & Gallagher, D. (2024). *The wheat genome*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-38294-9>
- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24, 1–15.
- Attwal, K. P. S., & Dhiman, A. S. (2024). A study of wheat morphology for yield prediction. *International Journal of Research in Agronomy*, 7(5), 346–349.

- Ávila-Miramontes, J. A., Ávila-Salazar, J. M., Rivas-Santoyo, F. J., & Martínez-Heredia, D. (2014). *El cultivo de trigo: Sistemas de producción en el noroeste de México*. Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora.
- <https://agricultura.unison.mx/memorias%20de%20maestros/EL%20CULTIVO%20DEL%20TRIGO.pdf>
- Ayed, S., Rezgui, M., Othmani, A., Rezgui, M., Trad, H. S., Jaime, A. T., Ben Younes, M., Ben Salah, H., & Kharrat, M. (2017). Respuesta al estrés hídrico de trigos duros (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) y harineros (*Triticum aestivum* L.) de Túnez. *Agrociencia*, 51(1), 13–26. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000100013&lng=es&tlng=es
- Beadle, C. L., & Honeysett, J. L. (1985). Water relations. En *Techniques in bioproductivity and photosynthesis* (2nd ed., pp. 50–61). Elsevier Science & Technology.
- <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-031999-5.50015-7>
- Berger. (2026). *Entendiendo la relación y beneficios del 'peat moss' y la composta en las mezclas de sustrato*. Recuperado el día 20 de febrero de 2026, de <https://www.berger.ca/es/recursos-para-los-productores/tips-y-consejos-practicos/entendiendo-la-relacion-y-beneficios-del-peat-moss-y-la-composta-en-las-mezclas-de-sustrato/>
- Buenrostro-Rodríguez, J. F., Covarrubias-Prieto, J., Solís-Moya, E., Ledesma-Ramírez, L., González-Figueroa, S. S., Mandujano-Bueno, A., Cisneros-López, H. C., & Gámez-Vázquez, A. J. (2023). Efecto del estrés hídrico sobre el rendimiento, clorofila y biomasa en trigo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(3), 245–253.

- Castañeda-Castro, O., Gómez-Merino, F., Trejo-Téllez, L., & Pastelín-Solano, M. (2015). El estrés osmótico por polietilenglicol altera las concentraciones de macronutrientes en plantas de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) in vitro. *Agrociencia*, 49(8), 859–873.
- Cerillo, G. V., Hernández, S., & Morales, J. F. (2022). Estudio del estrés abiótico en plantas. En *Algunas aplicaciones biotecnológicas en plantas y microalgas* (pp. 286–312). Universidad Autónoma de Aguascalientes. <https://doi.org/10.33064/UAA/978-607-8834-70-9>
- Damodaran, S., Parkin, K. L., & Fennema, O. R. (Eds.). (2010). *Fennema: Química de los alimentos* (3.^a ed.). Editorial Acriba.
- Dellaporta, S., Wood, J., & Hicks, J. (1983). A plant DNA miniprep: Version II. *Plant Molecular Biology Reporter*, 1, 19–21.
- Deyalage, S. T., Duncan, C.-J., Thandapilly, S. J., & Malalgoda, M. (2024). Nutritional characteristics and physicochemical properties of ancient wheat species for food applications. *Food Bioscience*, 62, 105397. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105397>
- Doyle, J. J., & Doyle, J. L. (1991). A rapid total DNA preparation procedure for fresh plant tissue. *Focus*, 12, 13–15.
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28, 350–356.
- El Sabagh, A., Islam, M. S., Skalicky, M., Raza, M. A., Singh, K., Anwar Hossain, M., Hossain, A., Mahboob, W., Iqbal, M. A., Ratnasekera, D., Singhal, R. K., Ahmed, S., Kumari, A., Wasaya, A., Sytar, O., Brestic, M., Çığ, F., Erman, M., Habib Ur Rahman, M., Ullah, N., & Arshad, A. (2021). Salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) in the changing climate: Adaptation and management strategies. *Frontiers in Agronomy*, 3, 661932. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.661932>

- Escalante Magaña, C. A., Otero Rodríguez, D., Medina Lara, M. de F., Echevarría Machado, I. de la C., & Martínez Estévez, M. (2025). *Aliadas y enemigas de la salinidad: Cómo las plantas enfrentan el estrés salino. Desde el Herbario CICY*, 17, 168–173. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
- https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2025/2025-07-17-CEscalante-Aliadas-y-enemigas-de-la-salinidad-como-las-plantas-enfrentan-el-estres-salino.pdf
- Española, V., Duvnjak, J., Hefer, D., & D'Auria, J. (2024). Cambios en los metabolitos producidos en plantas de trigo frente al estrés por déficit hídrico. *Plants*, 14(1), 10.
- <https://doi.org/10.3390/plants14010010>
- Feldman, M., & Levy, A. (2023). *Wheat evolution and domestication*. Springer.
- <https://doi.org/10.1007/978-3-031-30175-9>
- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58, 147–159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Fernández, T. (2010). *Propiedades y beneficios de la clorofila*. Vix.
- <https://www.vix.com/es/imj/salud/2010/04/19/propiedades-y-beneficios-de-la-clorofila>
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. (2015). *Panorama agroalimentario 2015*. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial.
- https://www.fira.gob.mx/Nd/NEstEcon.jsp?e=panorama_agroali
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. (2021). *Panorama agroalimentario 2021*. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial.
- <https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=63879>

Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. (2025). *Panorama agroalimentario 2025*.

Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial.

<https://www.fira.gob.mx/SalaPrensaXml/Pdf?pdfNum=92>

Freire-Fierro, A. (2004). *Botánica sistemática ecuatoriana* (pp. 79–91). Missouri Botanical Garden; FUNDACYT; QCNE; RLB; FUNBOTÁNICA.

Fu, Y., Li, P., Hamani, A. K. M., Wan, S., Gao, Y., & Wang, X. (2023). Effects of single and combined drought and salinity stress on the root morphological characteristics and root hydraulic conductivity of different winter wheat varieties. *Plants*, 12(14), Article 2694. <https://doi.org/10.3390/plants12142694>

Fundación Iberoamericana de Nutrición (FINUT). (2020). *Papel de los cereales de grano entero en la salud* (Informe científico-técnico FINUT 02, pp. 24–26). FINUT. https://www.finut.org/wp-content/uploads/2021/01/Informe-Papel-de-los-CGE-en-la-salud_compressed.pdf

García, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana* (3.^a ed.). Offset Larios.

Garg, M., Sharma, A., Vats, S., Tiwari, V., Kumari, A., Mishra, V., & Krishania, M. (2021). Vitamins in cereals: A critical review of content, health effects, processing losses, bioaccessibility, fortification, and biofortification strategies for their improvement. *Frontiers in Nutrition*, 8, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.586815>

González Núñez, L. M. (2002). Reflexiones sobre los mecanismos generales de adaptación de las plantas a la salinidad y a otros tipos de estrés. *Alimentaria*, 339, 89–98.

- Gusta, L. V., & Chen, T. H. H. (1987). The physiology of water and temperature stress. En E. G. Heyne (Ed.), *Wheat and wheat improvement* (2.^a ed., pp. 115–150). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, & Soil Science Society of America.
- Hansmann, E. (1973). Pigment analysis. En J. R. Stein (Ed.), *Handbook of phycological methods: Culture methods and growth measurements* (p. 359). Cambridge University Press.
- Harlan, J. R. (1971). Agricultural origins: Centers and noncenters. *Science*, 174(4008), 468–474.
<https://doi.org/10.1126/science.174.4008.468>
- Harshavardan, J. H. (2021). *Advanced strategies in bulked segregant analysis and its applications* (H-327, pp. 1–3). <https://doi.org/10.18805/BKAP327>
- Hellal, F. A., El-Shabrawi, H. M., El-Hady, M. A., Khatab, I. A., El-Sayed, S. A. A., & Chedly, A. (2018). Influence of PEG-induced drought stress on molecular and biochemical constituents and seedling growth of Egyptian barley cultivars. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 16(1), 203–212. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2017.10.009>
- Hernández-Córdova, N., Carreño-Soto, F., & Llerena-Plana, R. (2015). Comportamiento del crecimiento y rendimiento del cultivo del trigo (*Triticum aestivum* L.) en tres fechas de siembra. *Cultivos Tropicales*, 36, 86–92.
- Hernández-Santiago, L., López-Castañeda, C., Aguilar-Rincón, V. H., & Barrios-Gómez, E. J. (2019). Resistencia a sequía y tolerancia a calor en cebada y trigo. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(2), 1–16.
- International Seed Testing Association (ISTA). (2016). *Reglas internacionales para el análisis de las semillas*. ISTA.
- Jeyasri, R., Muthuramalingam, P., Satish, L., Pandian, S. K., Chen, J.-T., Ahmar, S., Wang, X., Mora-Poblete, F., & Ramesh, M. (2021). An overview of abiotic stress in cereal crops:

Negative impacts, regulation, biotechnology and integrated omics. *Plants*, 10, 1472.

<https://doi.org/10.3390/plants10071472>

Keil, A. (2020). *Evaluación en diferentes condiciones de germinación y crecimiento inicial de trigo sarraceno (Fagopyrum esculentum Moench)*. Universidad Nacional de Río Negro.

Lamz-Piedra, A., & González-Cepero, M. C. (2013). La salinidad como problema en la agricultura: La mejora vegetal, una solución inmediata. *Cultivos Tropicales*, 34(4), 31–42.

Lara-Ibarra, A. (2018). *Respuesta al estrés salino y caracterización morfológica-molecular de genotipos de jitomate (Solanum lycopersicum L.)* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio Institucional Chapingo.

<https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/20.500.12098/851>

Legaria-Solano, J., Ponce-Romero, G., & Muñoz-Orozco, A. (2000). Efecto del estrés osmótico sobre la germinación de las semillas y el crecimiento de plántulas de trigo (*Triticum aestivum* L.) y amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 23(1), 153–166. <https://doi.org/10.35196/rfm.2000.1.153>

Lindberg, S., & Premjumar, A. (2024). Cambios iónicos y señalización bajo estrés salino en trigo y otros cultivos importantes. *Plants*, 13(1), 46. <https://doi.org/10.3390/plants13010046>

Mac-Key, J. (1981). Comments on the basic principles of crop taxonomy. *Die Kulturpflanze*, 29, 199–207.

Marín, J., Mejía, J. A., Hernández, A., Carballo, A., & Peña, L. (2007). Acondicionamiento osmótico de semillas de cebolla (*Allium cepa* L.). *Agricultura Técnica en México*, 33(1), 63–71.

Mathews, K. C., Van Holde, K. E., Appling, D. R., & Spencer, J. A. (2013). *Bioquímica* (pp. 678–679). Pearson Educación.

- Méndez-Espinoza, C., & Vallejo Reyna, M. Á. (2019). Mecanismos de respuesta al estrés abiótico: Hacia una perspectiva de las especies forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(56), 33–64. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.567>
- Méndez, N. J., Ybarra, P. F., & Merazo, P. J. (2010). Germinación y desarrollo de plántulas de tres híbridos de maíz bajo soluciones osmóticas. V. Polietilenglicol. *Revista Tecnológica Ciencias Naturales y Medio Ambiente*, 23(1), 49–54.
- Michel, B. E. (1983). Evaluation of the water potentials of solutions of polyethylene glycol 8000 both in the absence and presence of other solutes. *Plant Physiology*, 72, 66–70.
- Moresco, R. M., Maniglia, T. C., De Oliveira, C., & Margarido, V. P. (2013). The pioneering use of ISSR (Inter Simple Sequence Repeat) in neotropical anurans: Preliminary assessment of genetic diversity in populations of *Physalaemus cuvieri* (Amphibia, Leiuperidae). *Biological Research*, 46(1), 53–57. <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-97602013000100008>
- Muñoz-Pérez, A. (2014). *Respuestas morfológicas-bioquímicas y caracterización molecular de genotipos de trigo (Triticum durum L.) con tolerancia o susceptibilidad al estrés hídrico* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio Institucional Chapingo. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/20.500.12098/851>
- Ng, W. L., & Tan, S. G. (2015). Inter-simple sequence repeat (ISSR) markers: Are we doing it right? *ASM Science Journal*, 9(1), 30–39.
- Nxele, X., Klein, A., & Ndimba, B. (2017) Drought and salinity stress alters ROS accumulation, water retention, and osmolyte content in sorghum plants. *South African Journal of Botany*, 107, 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.11.003>

- Nyaupane, S., Poudel, M., Panthi, B., Dhakal, A., Paudel, H., & Bhandari, R. (2023). Efecto del estrés hídrico, tolerancia y manejo en el trigo: Una revisión. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 1–15. <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2296094>
- Ojasvini, A., Poonam, C., & Ranjana, B. (2021). Drought stress effect, tolerance, and management in wheat – a review. *Resources, Environment and Sustainability*, 5, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032>
- Ojeda-Silvera, C. M., Murillo-Amador, B., Reynaldo-Escobar, I. M., Troyo-Diéguez, E., Ruíz-Espinoza, H. F., & Nieto-Garibay, A. (2013). Estrés hídrico en la germinación y crecimiento de plántulas de genotipos de albahaca (*Ocimum basilicum* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(2), 229–241.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua* (Estudio FAO Riego y Drenaje No. 66). FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *Repercusiones de los desastres en la agricultura y la seguridad alimentaria: Evitar y reducir las pérdidas mediante la inversión en la resiliencia*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc7900es>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2025). *The third report of the state of the world's plant genetic resources for food and agriculture*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd4711en>
- Osmolovskaya, N., Shumilina, J., Kim, A., Didio, A., Grishina, T., Bilova, T., Keltsieva, O. A., Zhukov, V., Tikhonovich, I., Tarakhovskaya, E., Frolov, A., & Wessjohann, L. A. (2018). Methodology of drought stress research: Experimental setup and physiological characterization. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(12), 4089. <https://doi.org/10.3390/ijms19124089>

- Pask, A. J. D., Pietragalla, J., Mullan, D. M., & Reynolds, M. P. (2012). *Physiological breeding II: A field guide to wheat phenotyping* (pp. 106–112). CIMMYT.
- Rajendran, K., Tester, M., & Roy, S. J. (2009). Quantifying the three main components of salinity tolerance in cereals. *Plant, Cell & Environment*, 32, 237–249. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2008.01916.x>
- Rajeswar, S., & Narasimhan, S. (2021). PEG-induced drought stress in plants: A review. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 14(11), 6173–6178. <https://doi.org/10.52711/0974-360X.2021.01069>
- Rangel-Fajardo, M. A., Gómez-Montiel, N., Tucuch-Haas, J. I., Basto-Barbudo, D. C., Villalobos-González, A., & Burgos-Díaz, J. A. (2019). Polietilenglicol 8000 para identificar maíz tolerante al estrés hídrico durante la germinación. *Agronomía Mesoamericana*, 30(1), 255–266. <https://doi.org/10.15517/am.v30i1.34198>
- Reddy-Marri, P., & Neelamraju, S. (2002). Inter simple sequence repeat (ISSR) polymorphism and its application in plant breeding. *Euphytica*, 128(1), 9–17.
- Reddy, I. N. B. L., Kim, B. K., Yoon, I. S., Kim, K. H., & Kwon, T. R. (2017). Salt tolerance in rice: Focus on mechanisms and approaches. *Rice Science*, 24, 123–144. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2016.09.004>
- Roach, M. (2026, febrero 24). *History of wheat culture_AB1-A_Introduction + First Agricultural Revolution_2024*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21280.24322>
- Roy, S. J., Negrão, S., & Tester, M. (2014). Salt resistant crop plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 26, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.12.004>
- SAGARPA. (2017). *Planeación agrícola nacional 2017–2030: Trigo grano cristalino y harinero mexicano* (1.ª ed.). SAGARPA.

- Satorre, E. H., Benech-Arnold, R. L., Slafer, G. A., de la Fuente, E. B., Miralles, D. J., Otegui, M. E., & Savin, R. (2003). *Producción de granos* (1.^a ed. p. 783). Universidad de Buenos Aires.
- Shamsur, R., Jinwei, Y., Jing, Z., Lijun, Z., Xiaohua, H., Rui, S., Shisheng, C., Guiping, W., & Lei, H. (2025). Salt stress in wheat: A physiological and genetic perspective. *Plant Stress*, 16, 100832. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100832>
- Shewry, P. R., & Halford, N. G. (2002). Seed storage proteins of cereals: Structure, properties and role in grain utilization. *Journal of Experimental Botany*, 53(370), 947–958. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.947>
- Schulze, E.-D., Beck, E., & Müller-Hohenstein, K. (2005). *Plant ecology*. Springer.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Anuario estadístico de la producción agrícola 2023*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Shewry, P. R., & Hey, S. R. (2015). The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security*, 4(3), 178–202. <https://doi.org/10.1002/fes3.64>
- Shoeva, O. Y., & Khlestkina, E. K. (2015). Características específicas de la regulación de la biosíntesis de antocianinas en el trigo. En Y. Ogihara, S. Takumi, & H. Handa (Eds.), *Advances in wheat genetics: From genome to field* (pp. 147–157). Springer. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55675-6_16
- Siddique, M., Hamid, A., & Islam, M. (2000). Drought stress effects on water relations of wheat. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 41, 35–39.
- Singh, C., Yadav, S., Khare, V., Gupta, V., Patial, M., Kumar, S., Mishra, C. N., Tyagi, B. S., Gupta, A., Sharma, A. K., Ahlawat, O. P., Singh, G., & Tiwari, R. (2025). Wheat drought tolerance: Unveiling a synergistic future with conventional and molecular breeding strategies. *Plants*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/plants14071053>

- SNICS-SAGARPA. (2015). *Manual gráfico para la descripción varietal de trigo* (1.^a ed.).
- Soto-Gómez, P., & Pérez-Rodríguez, P. (2021). Sustainable agriculture through perennial grains: Wheat, rice, maize, and other species. A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 325. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107747>
- Traye, I. D., Oli, N. M., Weng, X., Li, K., Suliman, M. S. E., Guo, X., Zhou, G., Zhu, G., & Xu, Y. (2025). Salinity Tolerance in Wheat: Mechanisms and Breeding Approaches. *Plants*, 14(11), 1–18. <https://doi.org/10.3390/plants14111641>
- United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. (2025). *Wheat production*. U.S. Department of Agriculture. <https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0410000>
- Varela, S. A. (2010). *Aspectos básicos de la fisiología en respuesta a estrés y el clima como condicionante del mismo en las plantas*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Vavilov, N. I. (1926). Centres of origin of cultivated plants. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*, 16, 1–248.
- Villaseñor-Mir, H. E., & Espitia-Rangel, E. (1994). La producción de trigo y la investigación en México. En *El agua y la energía de la cadena alimentaria: Granos básicos* (1.^a ed., p. 431). Instituto de Investigaciones Económicas, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Yingying, L., & Wieland, F. (2023). Salt Stress—Regulation of Root Water Uptake in a Whole-Plant and Diurnal Context. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(9), 1–25. <https://doi.org/10.3390/ijms24098070>
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14, 415–421.

- Zahid, M., Shakeel, A., Aslam, D., Abbas, Q., Ali, B., Niaz, Y., Iqbal, J., Çiğ, F., Erman, M., Akdeniz, H., Islam, M. S., Iqbal, M. A., Ratnasekera, D., Konuşkan, Ö., & El Sabagh, A. (2025). Physio-chemical and molecular characterization of salinity stress in wheat: Mitigation approaches and future perspectives. *OBM Genetics*, 9(4), 316. <https://doi.org/10.21926/obm.genet.2504316>
- Zhanguo, B. (2009). *Evaluación global de la degradación y mejora de las tierras: Proyecto GLADA*. ISRIC. Recuperado el 12 de enero de 2026 de <https://isric.org/projects/global-assessment-land-degradation-and-improvement-glada/>
- Zhang, Z., Xia, Z., Zhou, C., Wang, G., Meng, X., & Yin, P. (2024). Insights into Salinity Tolerance in Wheat. *Genes*, 15(5), 573. <https://doi.org/10.3390/genes15050573>

