

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**“RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO DE TRIGO HARINERO Y  
EXTRADURO (*Triticum sp*) EN DIFERENTES ESTADIOS DE  
DESARROLLO DEL CULTIVO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÓNOMO**

**JAKELLIN MILAGROS LOAYZA BRAVO**

**LIMA-PERÚ**

**2024**

# RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO DE TRIGO HARINERO Y EXTRADURO (*Triticum sp*) EN DIFERENTES ESTADIOS DE DESARROLLO DEL CULTIVO.

---

## INFORME DE ORIGINALIDAD

---

0%

INDICE DE SIMILITUD

0%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

---

## FUENTES PRIMARIAS

---

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

## FACULTAD DE AGRONOMÍA

### “RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO DE TRIGO HARINERO Y EXTRADURO (*Triticum sp*) EN DIFERENTES ESTADIOS DE DESARROLLO DEL CULTIVO”

#### TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO

**JAKELLIN MILAGROS LOAYZA BRAVO**

Sustentada y Aprobada ante el siguiente jurado:

.....  
**Dr. Hugo Soplín Villacorta**  
**PRESIDENTE**

.....  
**Dra. Luz Rayda Gómez Pando**  
**PATROCINADORA**

.....  
**Ing. Enrique Aguilar Castellanos**  
**MIEMBRO**

.....  
**Biol. Abelardo Calderón Rodríguez**  
**MIEMBRO**

**LIMA – PERÚ**

**2024**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, por su apoyo y esfuerzo en logro de mis metas, a mi querido esposo y a mis amigos por su estímulo y compañía.

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo es producto de la colaboración de muchas personas a quienes quiero expresar mi más profundo agradecimiento:

Al Programa de Cereales y Granos Nativos de la Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM y a la División de Mejoramiento Genético del Centro Internacional de la Papa - CIP, por el financiamiento parcial a través del Proyecto: “Mejora en los sistemas productivos de papa y trigo a través de variedades con tolerancia a la sequía y alta eficiencia en el uso de agua, como adaptación al cambio climático en el Perú”, con fondos de la Secretaría Técnica de Cooperación del CGIAR en el Perú.

A la Dra. Luz Gómez Pando, Biólogo Abelardo Calderón Rodríguez<sup>‡</sup> y al Ing. M.Sc. Raymundo Oscar Gutiérrez Rosales por el apoyo y asesoramiento de la tesis.

## ÍNDICE GENERAL

<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>3</b>
2.1. Importancia del cultivo de trigo.....	3
2.2. Características del cultivo de trigo .....	5
2.3. Estadios de crecimiento del trigo .....	6
2.3.1. Estadio de Germinación: .....	7
2.3.2. Estadio de Crecimiento de la plántula: .....	7
2.3.3. Estadio de Macollaje: .....	8
2.3.4. Estadio de crecimiento del tallo o encañado .....	8
2.3.5. Estadio de vaina engrosada o buche o bota .....	9
2.3.6. Estadio de Espigado .....	9
2.3.7. Estadio de Antesis .....	10
2.3.8. Estadio lechoso del grano o grano lechoso.....	10
2.3.9. Estadio de grano pastoso .....	11
2.3.10. Estadio de Madurez .....	11
2.4. Relaciones hídricas y características fisiológicas .....	11
2.4.1. Características de la sequía y mecanismos de protección en las plantas.....	11
2.4.2. Estado hídrico de la planta .....	12
2.4.3. Eficiencia de uso de agua (EUA) .....	13
2.4.4. Área foliar.....	14
2.4.5. Contenido de clorofila SPAD.....	14
2.4.6. Contenido relativo de agua (CRA) .....	15
2.4.7. Potencial osmótico y Ajuste Osmótico (Osmoregulación).....	16
2.4.8. Prolina libre .....	18
2.4.9. Nitrato reductasa.....	18
2.4.10. Índices de selección de genotipos tolerantes .....	19
2.5. Componentes de rendimiento .....	20
<b>III. METODOLOGÍA .....</b>	<b>22</b>
3.1. Condiciones generales del experimento .....	22
3.1.1. Lugar y ubicación .....	22

3.1.2. Clima .....	23
3.1.3. Suelo y agua de riego.....	23
3.2. Materiales y equipos .....	25
3.2.1. Material biológico .....	25
3.2.2. Equipos .....	26
3.2.3. Reactivos .....	26
3.2.4. Otros .....	27
3.3. Métodos y procedimientos .....	28
3.3.1. Instalación y conducción del ensayo .....	28
3.3.2. Evaluaciones morfológicas.....	33
3.3.3. Evaluaciones fisiológicas .....	35
3.3.4. Evaluaciones agronómicas .....	39
3.3.5. Diseño experimental.....	44
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>49</b>
4.1. Características morfológicas.....	49
4.1.1. Altura de la planta (cm).....	49
4.1.2. Longitud de la Espiga (cm) .....	51
4.1.3. Área de la hoja bandera (cm <sup>2</sup> ) .....	54
4.1.4. Biomasa seca (g).....	57
4.2. Características fisiológicas .....	60
4.2.1. Contenido Relativo de Agua (g g <sup>-1</sup> ).....	60
4.2.2. Potencial osmótico (MPa) .....	63
4.2.3. Ajuste osmótico .....	66
4.2.4. Contenido de clorofila (SPAD) .....	67
4.2.5. Evapotranspiración total del cultivo (mm) .....	72
4.2.6. Eficiencia de uso de agua (g kg <sup>-1</sup> ) .....	75
4.3. Características bioquímicas .....	81
4.3.1. Contenido de prolina libre (u-mol por g <sup>-1</sup> PF).....	81
4.3.2. Actividad de la enzima de nitrato reductasa.....	85
4.4. Componentes de rendimiento del cultivo .....	88
4.4.1. Número de granos por espiga .....	88
4.4.2. Peso de mil granos (g) .....	90
4.4.3. Número de espiguillas por espiga.....	93

4.4.4. Número de flores por espiguilla .....	96
4.4.5. Número de espigas por metro cuadrado .....	99
4.4.6. Índice de cosecha (%). .....	102
4.4.7. Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> ).....	105
4.5. Índices de tolerancia y correlaciones.....	109
4.5.1. Índice de susceptibilidad al estrés (%) .....	109
4.5.2. Índice de tolerancia al estrés (%). .....	110
4.5.3. Correlaciones entre variables.....	111
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>119</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>120</b>
<b>VII. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>121</b>
<b>VIII. ANEXOS.....</b>	<b>136</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Análisis de caracterización del suelo de las macetas empleado en el experimento de estrés hídrico de dos especies de trigo. La Molina.....	24
Tabla 2: Análisis de agua de riego empleado en las macetas del experimento de estrés hídrico de dos especies de trigo. La Molina .....	25
Tabla 3: Cronograma y labores realizadas en el estudio de estrés hídrico de dos especies de trigo. La Molina.....	31
Tabla 4: Tratamientos de riego en el estudio de estrés hídrico de dos especies de trigo. La Molina .....	45
Tabla 5: Altura de planta (cm), de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	50
Tabla 6: ANVA, Cuadrado Medio de altura de planta, de trigo extraduro ( <i>Triticum Turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo”. La Molina .....	50
Tabla 7: Longitud de la espiga (cm), trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo”. La Molina.....	52
Tabla 8: ANVA, Longitud de la espiga, trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo”. La Molina.....	52
Tabla 9: Longitud de la espiga (cm), trigo de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo”. La Molina ...	53
Tabla 10: ANVA, Longitud de la espiga, de trigo extraduro ( <i>Triticum Turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo”. La Molina ...	53
Tabla 11: Área de la hoja bandera (cm <sup>2</sup> ), de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo- Cosecha Final. La Molina .....	55
Tabla 12: Área de la hoja bandera (cm <sup>2</sup> ), de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	56
Tabla 13: Peso seco de la biomasa (g), trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	57
Tabla 14: ANVA, Peso seco de la biomasa, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	58

Tabla 15: Peso seco de la biomasa (g), trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	58
Tabla 16: ANVA, Peso seco de la biomasa, de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	59
Tabla 17: Contenido relativo de agua (g g <sup>-1</sup> ), trigo harinero de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	61
Tabla 18: Contenido relativo de agua (g g <sup>-1</sup> ), de trigo durum ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	62
Tabla 19: Potencial osmótico (MPa), de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	64
Tabla 20: Potencial osmótico (MPa), de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	65
Tabla 21: Contenido de clorofila (SPAD), de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés por estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	69
Tabla 22: Contenido de clorofila (SPAD), de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	71
Tabla 23: Evapotranspiración total del cultivo (mm), de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	73
Tabla 24: ANVA, Evapotranspiración total del cultivo, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	73
Tabla 25: Evapotranspiración total del cultivo (mm), de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés por sequía en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	74
Tabla 26: ANVA, Evapotranspiración total del cultivo, de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina 2010 .....	74
Tabla 27: Eficiencia de uso de agua (g kg <sup>-1</sup> ), biomasa de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	76

Tabla 28: ANVA, Eficiencia de uso de agua, biomasa de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	76
Tabla 29: Eficiencia de uso de agua ( $\text{g kg}^{-1}$ ), biomasa de trigo extraduro ( <i>Triticum Turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	77
Tabla 30: ANVA, Eficiencia de uso de agua, biomasa de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés por sequía en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	77
Tabla 31: Eficiencia de uso de agua ( $\text{g kg}^{-1}$ ), rendimiento de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	79
Tabla 32: ANVA, Eficiencia de uso de agua, rendimiento de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.). bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	79
Tabla 33: Eficiencia de uso de agua ( $\text{g kg}^{-1}$ ), rendimiento de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	80
Tabla 34: ANVA, Eficiencia de uso de agua, rendimiento de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	80
Tabla 35: Contenido de prolina libre en trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	82
Tabla 36: Contenido de prolina libre, de trigo durum ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	84
Tabla 37: Actividad de la enzima nitrato reductasa en trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	85
Tabla 38: Actividad de la enzima nitrato reductasa de trigo durum ( <i>Triticum Turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	87
Tabla 39: Número de granos por espiga, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	88

Tabla 40: ANVA, Número de granos por espiga, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	89
Tabla 41: Número de granos por espiga, de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	89
Tabla 42: ANVA, Número de granos por espiga, de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	90
Tabla 43: Peso de mil granos (g), de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	91
Tabla 44: ANVA, Peso de mil granos, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	91
Tabla 45: Peso de mil granos (g), de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	92
Tabla 46: ANVA, Peso de mil granos, de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	92
Tabla 47: Número de espiguillas por espiga, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	94
Tabla 48: ANVA, Número de espiguillas por espiga, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	94
Tabla 49: Número de espiguillas por espiga, trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	95
Tabla 50: ANVA, Número de espiguillas por espiga, trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	95
Tabla 51: Número de flores por espiguilla, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	97
Tabla 52: ANVA, Número de flores por espiguilla, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	97

Tabla 53: Número de flores por espiguilla, de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	98
Tabla 54: ANVA, Número de flores por espiguilla, de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	98
Tabla 55: Número de espigas por metro cuadrado, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	100
Tabla 56: ANVA, Número de espigas por metro cuadrado, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	100
Tabla 57: Número de espigas por metro cuadrado, de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	101
Tabla 58: ANVA, Número de espigas por metro cuadrado, de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	101
Tabla 59: Índice de cosecha (%) de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina 2010 .....	103
Tabla 60: ANVA, Índice de cosecha, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	103
Tabla 61: Índice de cosecha (%) de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	104
Tabla 62: ANVA, Índice de cosecha, de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	104
Tabla 63: Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> ), de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	105
Tabla 64: ANVA, Rendimiento, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	106
Tabla 65: Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> ), de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	106
Tabla 66: ANVA, Rendimiento, de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Serie histórica de la superficie cosechada (ha) de trigo en el Perú. Periodo 2000 – 2023.....	4
Figura 2. Serie histórica del Rendimiento promedio nacional de trigo en el Perú. Periodo 2000 – 2023.....	4
Figura 3. Serie histórica de la producción nacional (miles de t/ha) de trigo en el Perú. Periodo 2000 – 2023.....	5
Figura 4. Medida de Altura de plantas del testigo (Izquierda) y del tratamiento de riego deficitario (Derecha) de <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L., La Molina. ....	33
Figura 5. Determinando área foliar, de hojas de trigo usando el software “Compu Eye, leaf & Symptom Area” en el estudio de estrés hídrico de dos especies de trigo. La Molina. ....	34
Figura 6. Hidratación de hojas para determinar el peso turgente .....	36
Figura 7. Medición de potencial osmótico. ....	37
Figura 8. Partición de hojas y tallos en el estudio de estrés hídrico de dos especies de trigo. La Molina. ....	41
Figura 9. Esquema de distribución de tratamientos.....	48
Figura 10. Altura de planta (cm) de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo”. La Molina.....	50
Figura 11. Longitud de la espiga (cm), trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo- Cosecha Final. La Molina .....	54
Figura 12. Área de la hoja bandera (cm <sup>2</sup> ), de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	55
Figura 13. Área de la hoja bandera (cm <sup>2</sup> ), de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	56
Figura 14. Peso de la biomasa seca (g maceta <sup>-1</sup> ) de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo.....	60
Figura 15. Contenido relativo de agua, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	61

Figura 16. Contenido relativo de agua, de trigo durum ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina 2010..	63
Figura 17. Potencial osmótico (MPa), de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	64
Figura 18. Potencial osmótico (MPa), de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	66
Figura 19. Ajuste osmótico de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	67
Figura 20. Contenido de clorofila, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	70
Figura 21. Contenido de clorofila (unidades SPAD), de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	72
Figura 22. Evapotranspiración total del cultivo (mm) de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	75
Figura 23. Eficiencia de uso de agua, biomasa (g kg <sup>-1</sup> ) de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	78
Figura 24. Uso eficiente de agua, rendimiento (g kg <sup>-1</sup> ) de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	81
Figura 25. Contenido de prolina libre (umol por g <sup>-1</sup> PF) en trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	83
Figura 26. Contenido de prolina libre, (umol por g <sup>-1</sup> PF) de trigo extraduro ( <i>Triticum</i> <i>turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	84
Figura 27. Actividad de la enzima nitrato reductasa en trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	86

Figura 28. Actividad del nitrato reductasa de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	87
Figura 29. Número de granos por espiga de trigo extraduro ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	90
Figura 30. Peso de mil granos (g) de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	93
Figura 31. Número de espiguillas por espiga de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	96
Figura 32. Número de flores por espiguilla de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	99
Figura 33. Número de espigas por metro cuadrado de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	102
Figura 34. Índice de cosecha (%) de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	104
Figura 35. Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> ) de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	107
Figura 36. Reducción del rendimiento (%) de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	108
Figura 37. Índice de susceptibilidad al estrés de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	109
Figura 38. Índice de tolerancia al estrés de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum</i> s sp <i>aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum</i> s sp <i>durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina.....	110



Figura 39: Matriz de correlación de variables morfológicas y agronómicas de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum s sp aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum s sp durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina...	111
Figura 40: Matriz de correlación de variables morfológicas y agronómicas, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum s sp aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	112
Figura 41: Matriz de correlación de variables morfológicas y agronómicas, de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum s sp durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	113
Figura 42: Matriz de correlación de variables morfo-agronómicas y fisiológicas, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum s sp aestivum</i> L.) y de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum s sp durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	114
Figura 43: Matriz de correlación de variables morfo-agronómicas y fisiológicas, de trigo harinero ( <i>Triticum aestivum s sp aestivum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	115
Figura 44: Matriz de correlación de variables morfo-agronómicas y fisiológicas, de trigo extraduro ( <i>Triticum turgidum s sp durum</i> L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina .....	116

## INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Temperaturas máximas y mínimas observadas en el interior de la casa de mallas en el periodo experimental del estudio de estrés de sequía de dos especies de trigo. La Molina. ....	136
Anexo 2: Análisis de suelos .....	137
Anexo 3: Análisis de agua .....	139

## RESUMEN

El trigo es un alimento básico de la población peruana y se cultiva principalmente bajo secano, con sequías recurrentes que ponen en riesgo su rendimiento y la seguridad alimentaria de poblaciones rurales de extrema pobreza. El grado de afectación de las sequías en el trigo está determinado por el período fenológico con el cuál coinciden, según cada genotipo. Por ello, en la presente investigación se planteó determinar el efecto del estrés hídrico sobre las características morfológicas, fisiológicas, bioquímicas y componentes de rendimiento; y en base a ello identificar el estado fenológico más susceptible en las especies de trigo harinero (*Tríticum aestivum s sp aestivum* L. Var. “Centenario”) y trigo extraduro (*Tríticum turgidum s sp durum* L. línea mutante “Taray 85”), medido en términos del rendimiento de grano (RG). Asimismo, se determinó los índices de tolerancia y las correlaciones entre las variables analizadas. El experimento se realizó en el Programa de Cereales de la Universidad Nacional Agraria La Molina y se aplicaron cinco tratamientos, uno con riego normal y cuatro con estrés hídrico controlado durante los periodos fenológicos de: macollamiento, elongación del tallo, floración - antesis y estado de grano acuoso y grano lechoso. A partir de los resultados se concluye que el estrés hídrico durante el estadio de elongación del tallo es el que más afectó el RG, para ambas especies y las características más afectadas fueron: altura de planta, área foliar, potencial osmótico, contenido de clorofila y contenido de prolina libre (CPL). Además, CPL fue mayor en la especie de trigo harinero y mostró correlación inversa con el potencial osmótico ( $r = -0.91$ ), RG ( $r = -0.88$ ) y la evapotranspiración del cultivo ( $r = -0.89$ ). En el trigo extraduro, CPL presentó correlación inversa con el contenido relativo de agua ( $r = -0.93$ ) y el área foliar ( $r = -0.88$ ).

Palabras clave: Trigo, estado fenológico, estrés hídrico, rendimiento, potencial osmótico y prolina.

## ABSTRACT

Wheat is a staple food of the Peruvian population and it's mainly cultivated under rainfed conditions, with recurrent droughts, which put its yield and the food security of extremely poor rural populations at risk. The degree of impact of droughts on wheat is determined by the phenological period with which they coincide, according to each genotype. Therefore, in this research we aimed to determine the effect of water deficit on morphological, physiological, biochemical characteristics and performance components; and based on this, identify the most susceptible phenological state in the species of bread wheat (*Triticum aestivum s sp aestivum* L. Var. "Centenario") and extra-hard wheat (*Triticum turgidum s sp durum* L. mutant line "Taray 85"), measured in terms of grain yield (GR). Likewise, the tolerance indices and correlations between the analyzed variables were determined. The experiment was carried out in the Cereal Program of the National Agrarian University La Molina and five treatments were applied, one with normal irrigation and four with controlled water stress during the phenological periods of: tillering, stem elongation, flowering - anthesis and state of watery grain and milky grain. From the results, it is concluded that water stress during the stem elongation stage is the one that most affected the GR, for both species and the most affected characteristics were: plant height, leaf area, osmotic potential, chlorophyll content and free proline content (CPL). Furthermore, CPL was higher in the bread wheat species and showed inverse correlation with the osmotic potential ( $r = -0.91$ ), RG ( $r = -0.88$ ) and crop evapotranspiration ( $r = -0.89$ ). In extra-hard wheat, CPL presented an inverse correlation with relative water content ( $r = -0.93$ ) and leaf area ( $r = -0.88$ ).

Keywords: Wheat, phenological state, water stress, yield, osmotic potential and proline.

## I. INTRODUCCIÓN

El trigo es uno de los cultivos de mayor importancia para la seguridad alimentaria en el mundo. Debido a su gran adaptación y uso, capacidad de rendimiento y calidad nutritiva; cubre al menos el 21% de las necesidades alimentarias mundiales (FAO, 2024). Tiene el segundo lugar entre los cultivos de cereales más producidos y el primer lugar en términos de superficie cultivada, ocupando 222 millones de hectáreas en todo el mundo y 50 millones en países en desarrollo; de esta superficie al menos el 50% es conducido bajo sistemas de secano, con lluvias erráticas, suelos infértiles y condiciones de calor o frío extremos, en donde la sequía es uno de los principales factores limitantes de la producción (CIMMYT, 2019). En las zonas más desfavorecidas, se obtienen cosechas con menos de 350 mm de precipitación anual y, a menudo el trigo representa el único medio de ingresos económicos para los productores (Khadka, Earl, Raizada, & Navabi, 2020).

Entre otros impactos negativos ocasionados por el cambio climático, la sequía y el aumento de la temperatura representan una amenaza, especialmente grave, para este cultivo porque afectan severamente la formación del grano y el rendimiento (CIMMYT, 2024a). Según la (FAO, 2018), se predijo que la producción mundial de trigo el 2018 disminuiría un 2,7%, basándose en predicciones de cambios climáticos. Asimismo, estudios de metaanálisis han demostrado que la sequía ha causado pérdidas en el rendimiento de al menos 27,5 % y 20,6% en promedio a nivel mundial (Daryanto, Wang, & Jacinthe, 2016; Zhang et al., 2018). En este escenario, es una prioridad la investigación del efecto del estrés hídrico en la productividad del trigo y conocer los mecanismos de adaptación del cultivo, contribuyendo al desarrollo de líneas tolerantes a estreses abióticos que mantengan un alto potencial de rendimiento y con las que se pueda mitigar el impacto del cambio climático en la producción de este cultivo.

Por lo tanto, esta investigación tuvo como objetivo general:

Contribuir al desarrollo de nuevas variedades mejoradas de trigo harinero y extraduro con tolerancia al estrés hídrico para la sostenibilidad de la agricultura peruana

Asimismo, los objetivos específicos son los siguientes:

1.- Determinar las características morfológicas, fisiológicas, bioquímicas y componentes de rendimiento que pudieran verse afectados por el déficit hídrico y en base a esta información identificar el estado fenológico en el cual el cultivo de trigo harinero y extraduro es más afectado por el estrés hídrico, medido en términos del rendimiento.

2.- Determinar los índices de tolerancia al déficit hídrico y las correlaciones entre las diferentes variables analizadas, por efecto del estrés hídrico controlado.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

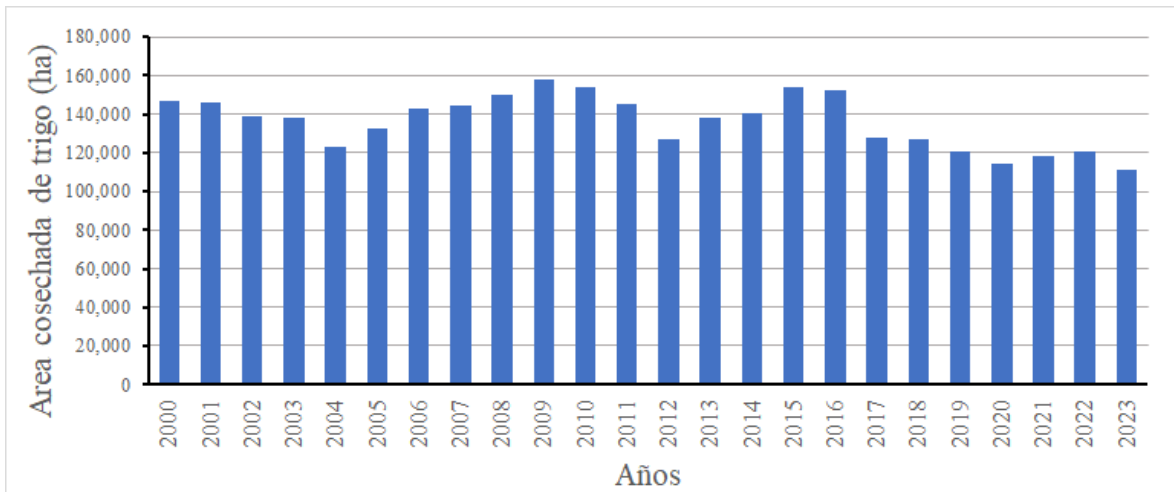
### 2.1. Importancia del cultivo de trigo

El trigo es un cultivo de gran importancia alimentaria mundial, actualmente se cultiva en una superficie de 222 millones de hectáreas y se estima una producción anual de 779 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de 3.5 toneladas por hectárea («FAOSTAT», 2024). Al menos la mitad de la producción mundial es destinada a la alimentación humana, cubriendo alrededor del 21% de las necesidades alimentarias mundiales, y el resto es destinado a la industria de procesamiento y la alimentación animal (FAO, 2024).

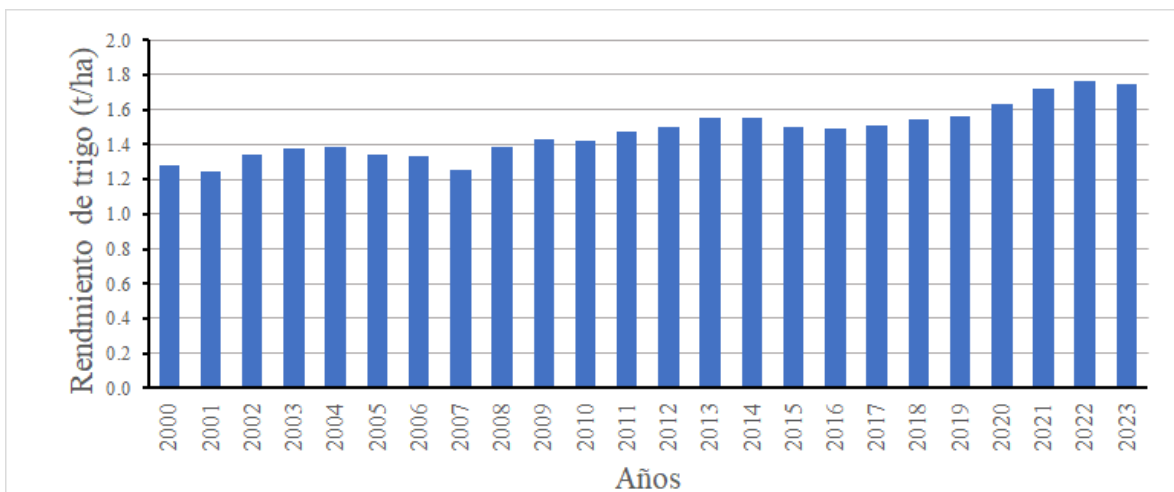
Siendo uno de los alimentos de mayor consumo en el mundo, se prevé que para el 2050 la demanda mundial de trigo aumentará en un 50%. Sin embargo, la producción se ve amenazada debido a las condiciones ambientales inestables por efecto del cambio climático, la escasez de tierras disponibles para su cultivo y la aparición de formas más agresivas de plagas y enfermedades. En relación a los efectos del cambio climático, las condiciones de mayor gravedad para el cultivo lo representan la variación de temperatura y el déficit hídrico (CIMMYT, 2024b). Desde hace varios años, la (FAO, 2011) señalaba que la sequía sería uno de los principales factores limitantes de la producción de trigo especialmente en los países en desarrollo, ya que la mitad de su superficie se caracteriza por lluvias erráticas, suelos infértiles, enfermedades virulentas y ocasionalmente calor o frío extremos (Khadka et al., 2020).

En el Perú la producción de trigo registró un aumento ligero en su volumen en los últimos cinco años (2019-2023), lo que significó pasar de 188 mil a 194 mil toneladas, asimismo, los productores han mejorado su productividad al pasar de un rendimiento de 1.56 a 1.75 t por hectárea (MIDAGRI, 2023a).

Según (Agraria.pe, 2023), el total del trigo importado anualmente en Perú asciende en el 2020 con 2 millones 271 mil toneladas, y en el 2021 debido al alza de los precios del trigo, se contrajeron las importaciones en 12,6% (a 1 millón, 984 mil toneladas), del total de harina de trigo producida e importada en Perú, el 60 % se destina a la producción de panes, el 25 % a fideos y el 15 % restante a galletas (MIDAGRI, 2023b). En las figuras 1, 2 y 3 se muestra la superficie cosechada, el rendimiento (t/ha) y la producción (miles de t) de trigo en el Perú entre los años 2000 y 2023.

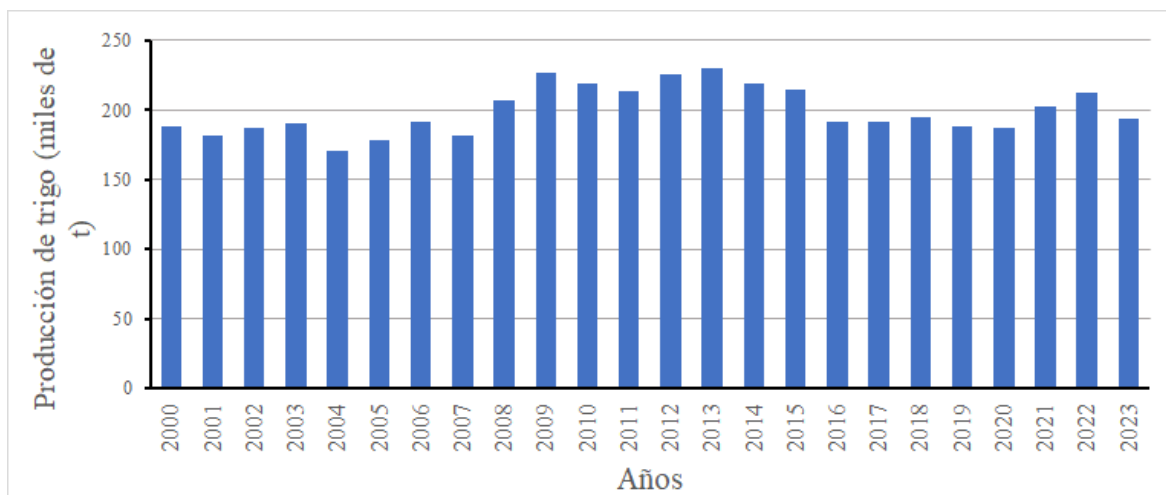


**Figura 1. Serie histórica de la superficie cosechada (ha) de trigo en el Perú. Periodo 2000 – 2023**



**Figura 2. Serie histórica del Rendimiento promedio nacional de trigo en el Perú. Periodo 2000 – 2023**





**Figura 3. Serie histórica de la producción nacional (miles de t/ha) de trigo en el Perú. Periodo 2000 – 2023**

Hoy en día, el cambio climático representa una amenaza para los rendimientos y la seguridad alimentaria en todo el mundo, y el trigo es una especie muy sensible al incremento de la temperatura. Según un estudio publicado por el (CIMMYT, 2023), se espera que para el 2050 el cambio climático reduzca la producción mundial de trigo en 1,9%, con caídas más severas de 15% en países africanos y 16% en países del sur de Asia. Asimismo, prevén que los productores pequeños y de baja tecnología de las regiones tropicales son los que sufrirán los mayores impactos negativos (Pequeno et al., 2021).

Por su parte, (Khadka et al., 2020) señalan que una de las estrategias más efectivas a largo plazo para la adaptación frente al cambio climático es el mejoramiento genético orientado a desarrollar líneas tolerantes a estreses abióticos, con los cuales se pueda aprovechar periodos de temperatura y precipitaciones óptimas. Los caracteres o mecanismos adaptativos que presentan los genotipos de trigo podrían contribuir a mitigar el impacto del cambio climático, pero dependen del entorno del cultivo y las labores de manejo; por ello es necesario explorar estrategias de adaptación específicas de cada región donde se produce (Eser, Soyly, & Ozkan, 2024; Pequeno et al., 2021).

## **2.2. Características del cultivo de trigo**

El trigo pertenece a la familia Poaceae. Contiene de dos a seis flores por espiguilla ordenadas en forma alterna en el raquis, formando una verdadera espiga. De acuerdo con Sakamura

(1918), citado por (Jara, 1993), la clasificación de especies se hace según el número de cromosomas, agrupándolos en tres series:

Genoma AA: Diploide con 14 cromosomas ( $n=7$ )

Genoma AABB: Tetraploide con 28 cromosomas ( $n=14$ )

Genoma AABBDD: Hexaploide con 42 cromosomas ( $n=21$ )

El número básico de cromosomas de las especies del género *Triticum* es  $X=7$ . Los trigos tetraploides, entre los que destaca el “duro” (*Triticum turgidum ssp durum*), se cree que tuvieron como origen el cruce espontáneo entre un trigo diploide con una gramínea silvestre, también diploide, con un número básico de 7 cromosomas, que aportó el genoma BB. Esta gramínea silvestre es, para algunos autores, *Aegilops speltoides*; actualmente denominada *Triticum speltoides*. Igualmente, los trigos hexaploides, entre los que destaca por su importancia el trigo harinero (*Triticum aestivum s sp aestivum*), proceden del cruzamiento de un trigo tetraploide y una gramínea diploide que aportó el genoma DD. La especie gramínea silvestre es en este caso *Aegilops squarrosa*, denominada actualmente *Triticum tauchii*.

El *Triticum aestivum s sp aestivum* o “trigo harinero” es la especie más cultivada y de mayor importancia económica, a continuación, en orden de importancia destaca el *Triticum turgidum spp. durum* “trigo duro o semolero”, que se siembra principalmente en la cuenca mediterránea, Unión Soviética, India y Zonas de escasa pluviometría de América. El resto de las especies se usan en investigaciones genéticas y trabajos de mejora (CIMMYT, 2019).

### **2.3. Estadios de crecimiento del trigo**

Durante el desarrollo de la planta, los procesos fisiológicos que van ocurriendo son distintos en cada periodo fenológico. Por ello, diferenciar los estadios de crecimiento de una especie es esencial no sólo para la investigación científica sino también para la gestión agronómica del cultivo (Celestina et al., 2023). En relación con la sequía, los genotipos de una misma especie pueden diferir en sus requerimientos hídricos y, con ello, también en su vulnerabilidad frente al estrés. Esta vulnerabilidad también es variable, en función de la etapa fenológica en la que ocurre la sequía (Mukherjee, Wang, & Promchote, 2019). Por ejemplo,

en el trigo, se ha determinado que las etapas de desarrollo inicial son particularmente susceptibles al déficit hídrico, pudiendo causar reducciones de hasta un 92% en el rendimiento si ocurren en etapas cercanas al espigado (Sarto et al., 2017).

Para el presente estudio, se tomó en cuenta el código decimal de (Zadoks, 1974), que es la escala de desarrollo de cereales más utilizada en el mundo. La cual presenta diez estadios fenológicos que se describen a continuación:

### **2.3.1. Estadio de Germinación:**

La germinación ocurre cuando la semilla del trigo alcanza un 45% de humedad y se inicia el alargamiento de la coleorriza, la cual sirve de anclaje y proporciona el agua y los nutrientes necesarios. A continuación, el coleóptilo se hace visible y emerge del suelo; además aparecen las raíces seminales. Este periodo puede tomar de ocho a quince días (Tottman, Makepeace, & Broad, 1979). Se requiere suficiente humedad y una temperatura óptima para una germinación uniforme; si se incrementa el nivel de estrés hídrico durante la germinación y las fases tempranas de crecimiento, se afecta negativamente rasgos como la tasa de germinación, el vigor de las plántulas, la longitud del coleóptilo y del brote y/o la raíz (Mukherjee et al., 2019).

### **2.3.2. Estadio de Crecimiento de la plántula:**

Este estadio se distingue debido a que el segundo entrenudo de la planta crece debajo del suelo colocándose a unos dos centímetros aproximadamente de la superficie, y forma la corona. Cabe señalar que el primer entrenudo no crece. Luego de la formación de la corona, ocurre la aparición de las primeras hojas (Tottman et al., 1979).

Durante este estadio se da lugar la “diferenciación reproductiva”, en la que el ápice de crecimiento ubicada en el último nudo de la corona con arruga simple pasa a uno de doble arruga por formación de primordios foliares o estructuras de la espiguilla embrionaria. Este proceso se lleva a cabo bajo el suelo. Posteriormente, la espiga embrionaria va desarrollando sus estructuras a un ritmo lento (Simón, 2022).

### **2.3.3. Estadio de Macollaje:**

El macollamiento o macollaje empieza con la tercera hoja verdadera emergida o al inicio de la cuarta. Los macollos van formándose a partir de yemas axilares de las hojas, en los nudos basales de la corona. A su vez al tener su tercera hoja, los macollos primarios se independizan, teniendo su propio sistema radicular; y pueden dar lugar a la formación de macollos secundarios. Estos a su vez, pueden generar macollos terciarios. La cantidad de macollos que se pueden producir por planta dependerá de factores intrínsecos al genotipo, factores ambientales y también factores agronómicos o culturales. Sin embargo, un mayor número de macollos reduce el número de granos por espiga y el peso de mil granos, todos ellos componentes del rendimiento final (Saeidi, Ardalani, Jalali Honarmand, Ghobadi, & Abdoli, 2015; Simón, 2022), debido a que durante el macollaje se definen dos componentes de rendimiento: el número potencial de espigas por metro cuadrado, a partir del número de macollos, y el número potencial de espiguillas por espiga, a partir del número de espiguillas diferenciadas. Desde etapa de plántula hasta el macollamiento ocurre la iniciación de las espiguillas. Asimismo, entre el macollamiento y la elongación del tallo tiene lugar la iniciación de las flores (Khadka et al., 2020). El macollaje termina cuando el tallo empieza a alargarse, principalmente por la competencia de recursos; su duración es variable, según las condiciones agroclimáticas y del genotipo. El macollamiento permite a la planta responder ante factores limitantes bióticos y abióticos como: plagas, enfermedades, heladas, sequías, granizo y otros (Simón, 2022).

### **2.3.4. Estadio de crecimiento del tallo o encañado**

La encañazón o encañado es la etapa que inicia cuando todas las espiguillas, incluyendo la espiguilla terminal, están formadas en la espiga embrionaria. El tallo inicia su crecimiento sobre el meristema de cada nudo, generando el entrenudo correspondiente. En el tallo principal se han expandido entre 7 y 12 hojas y ya se ha iniciado la diferenciación de las flores o formación de flósculos en las espiguillas centrales (Simón, 2022).

Las raíces y las hojas continúan su crecimiento durante esta etapa, toda el área foliar se forma en el encañado, por lo que se requiere gran cantidad de agua y nutrientes; y ante una deficiencia moderada de agua y baja disponibilidad de nitrógeno, el tallo puede reducir su crecimiento, pero la raíz continúa creciendo. El encañado finaliza cuando las florecillas de las espiguillas desarrollan sus estigmas (Jara, 1993).

La sequía tiene un impacto negativo en el número de macollos efectivos y en el crecimiento del tallo (Sarto et al., 2017). El encañado y el macollaje son los estadios en los que se determina el número de espiguillas por espiga; por lo tanto, si una sequía severa coincide con esta etapa, el rendimiento de grano puede reducirse notablemente, hasta en un 72%, afectando aún más que cuando la sequía ocurre durante el periodo reproductivo (Ding et al., 2018). Asimismo, (Eser et al., 2024) encontró que luego de aplicar varios modelos de sequía en distintos genotipos de trigo, la deficiencia hídrica tuvo un efecto negativo sobre el rendimiento y las variables morfológicas en todos los casos; siendo las etapas previas al espigado las más afectadas. Sin embargo, la sequía tuvo un efecto positivo sobre los parámetros de calidad, siendo mayor en los estadios posteriores al espigado. Por lo tanto, la evaluación de genotipos tolerantes a sequía en las etapas de macollamiento y elongación del tallo es tan importante como en otras etapas de crecimiento del cultivo (Khadka et al., 2020).

### **2.3.5. Estadio de vaina engrosada o buche o bota**

En este estadio la espiga está totalmente diferenciada y se encuentra encerrada en la vaina de la hoja bandera (Simón, 2022). El factor de rendimiento “número de florecillas por espiguilla” se determina en los estadios de encañado y bota. Este periodo finaliza cuando las aristas comienzan a salir de la vaina de la hoja bandera (Rawson & Gómez, 2001).

### **2.3.6. Estadio de Espigado**

En este estadio se elonga el pedúnculo y emerge la espiga. El trigo se auto fecunda dentro de las mismas flores cerradas (Simón, 2022). En el estadio de espigado quedará definido los factores de rendimiento número final de espigas fértiles por metro cuadrado y número de granos por espiga; por ello es esencial para el rendimiento que en estas etapas el cultivo disponga de las mejores condiciones hídricas, nutricionales y de radiación y temperatura (Rawson & Gómez, 2001; Simón, 2022). Muchos estudios sugieren que la floración y anthesis son las etapas de crecimiento del trigo más susceptibles a la sequía debido a los impactos negativos que ocasiona; entre ellos, la disminución de granos por espiga y el peso del grano; debido a que ante la falta de agua se reduce la viabilidad del polen y se produce la esterilidad de las espiguillas (Khadka et al., 2020).

### **2.3.7. Estadio de Antesis**

Luego de que las anteras diseminan el polen en los estigmas de las flores cerradas, estas se abren y las anteras emergen al exterior, pierden su coloración brillante y se marchitan, este periodo se denomina antesis. Tiene lugar durante tres a cinco días y se inicia desde la parte central de la espiga y continúa hacia los extremos. Las flores de las espiguillas centrales reciben el polen de dos a seis días antes que las flores de las espiguillas distales y por ello normalmente desarrollan granos con mayor peso (Simmons, 1987). Durante la antesis se determina el componente de rendimiento” número de granos por espiga o número de granos por metro cuadrado”. La floración y antesis son las etapas de mayor evapotranspiración, lo que conlleva graves pérdidas en la producción si la sequía coincide con dichos estadios (Khadka et al., 2020)

### **2.3.8. Estadio lechoso del grano o grano lechoso**

Cabe señalar que el cuajado de los granos es sensible a las altas temperaturas y la deficiencia hídrica, y es favorecido por la alta luminosidad (Simón, 2022). El grano completa su formación luego de 16 a 18 días desde la fecundación y se inicia la fase lineal del llenado de grano; en esta etapa el agua se hace imprescindible para el transporte de nutrientes. En los granos se acumula el almidón o fotosintatos que aún se producen en las últimas hojas y las envolturas florales de la espiga; además, se translocan fotosintatos y proteínas desde el resto de la planta. En esta etapa se determina el peso potencial del grano. El grano durante este periodo tiene una apariencia lechosa al partirse, con más de 40% de humedad (Simón, 2022). Asimismo, (Rawson & Gómez, 2001), indican que la sequía en esta etapa disminuye el peso seco del grano y la acumulación de carbohidratos; lo mismo si ocurre un estrés térmico. Contrariamente a lo esperado, se ha demostrado que esta etapa de crecimiento no es la más susceptible a la sequía; se sugiere que aunque la disponibilidad de agua sea crítica para la translocación de fotosintatos al grano, las reservas de nutrientes previas a la antesis, como las del tallo, desempeñan un papel fundamental mitigando la pérdida de rendimiento (Khadka et al., 2020). En congruencia, los estudios de (Ding et al., 2018) señalan que si la sequía es leve, la reducción en el rendimiento de grano no es tan significativa. Estos hallazgos sugieren la activación de estrategias de mitigación o tolerancia frente a la sequía en los cultivares de trigo (Khadka et al., 2020).

### **2.3.9. Estadio de grano pastoso**

En esta etapa fenológica, el grano ha logrado su máximo tamaño y se ha completado la translocación de fotosintatos, por lo que al partirse muestra una apariencia pastosa. Asimismo, su coloración verde va tornándose crema o marrón y va perdiendo humedad hasta lograr una consistencia más dura, con una humedad de 30 a 40%. En esta etapa todas las estructuras del grano se han desarrollado y este alcanza su máximo peso (Simón, 2022)

### **2.3.10. Estadio de Madurez**

Durante este periodo, la humedad del grano disminuye desde el 30% hasta la madurez comercial o cerca de 14%. En esta etapa el sistema vascular de la espiga se bloquea y el pedúnculo toma un color más oscuro, el grano adquiere un color marrón dorado. Es importante destacar que durante los tres últimos periodos de desarrollo se determinan el componente de rendimiento de peso de mil granos (Abbate & Divito, 2017).

## **2.4. Relaciones hídricas y características fisiológicas**

Las relaciones hídricas agua-suelo-planta bajo diferentes condiciones ambientales puede dar lugar a estados de estrés por exceso o falta de agua. La falta de agua disponible para la planta se define como sequía. El cambio climático ha incrementado la frecuencia e intensidad de las sequías, con efectos devastadores en la productividad agrícola. Actualmente, el estrés abiótico por sequía representa el factor limitante más importante en el mundo y reduce la producción en diversos países (Eser et al., 2024).

### **2.4.1. Características de la sequía y mecanismos de protección en las plantas**

La respuesta de las plantas frente a la sequía es muy compleja y abarca la interacción de distintos procesos bioquímicos, moleculares y morfológicos. Según (Méndez-Espinoza, Vallejo Reyna, Méndez-Espinoza, & Vallejo Reyna, 2019) conocer estos mecanismos es importante para implementar estrategias de conservación y mejoramiento genético a fin de desarrollar o seleccionar genotipos tolerantes al estrés hídrico, con los cuales se pueda

aprovechar periodos de temperatura y precipitaciones óptimas. Estos mecanismos adaptativos podrían contribuir a mitigar el impacto del cambio climático en el cultivo de trigo; pero son dependientes del entorno del cultivo y las labores de manejo; por ello es necesario explorar estrategias de adaptación específicas de cada región (Pequeno et al., 2021). En el mejoramiento genético para la tolerancia a la deficiencia hídrica normalmente se ha considerado que el rendimiento de grano es la base para la selección; pero ese es un carácter complejo y con evaluación en etapa tardía del cultivo, y es afectado también por muchos otros factores. Por ello, la evaluación de los genotipos en base a su respuesta fisiológica frente al estrés hídrico en etapas anteriores de crecimiento y desarrollo puede ser más eficiente en el tiempo (Khadka et al., 2020).

La planta tiene diversos mecanismos para hacer frente a la sequía: el escape, la evitación y la tolerancia. El tipo de mecanismo de escape es aquel donde las plantas completan su ciclo vital antes de la llegada del estrés hídrico y logran un buen rendimiento. La evitación ocurre cuando en la planta empiezan a formarse mecanismos morfológicos que evitan que las células se encuentren bajo estrés, por ejemplo: un sistema radicular profundo, estomas hundidas que retrasen la transpiración, menor tamaño de las hojas, mayor espesor de las hojas, incremento de la masa radicular o del follaje. La tolerancia está asociada al estado en que la planta es capaz de desarrollarse adecuadamente aún si sus condiciones externas e internas están sometidas al estrés, y esto se debe al desarrollo de mecanismos fisiológicos especiales, como: cambios en la actividad enzimática, cambio en la concentración de carbohidratos, niveles de nitrógeno, acumulación de ácido abscísico, betaína, prolina y otros (Ali et al., 2020; Nardino et al., 2022).

#### **2.4.2. Estado hídrico de la planta**

El agua es un compuesto clave en la fisiología de las plantas, pues es el medio en que se llevan a cabo las reacciones bioquímicas, así como es el medio de transporte de nutrientes y metabolitos, además de otros procesos vitales (Rodríguez-Larramendi et al., 2021).

Dentro de la planta, el agua se moviliza por una diferencia de potencial entre el suelo, la planta y el ambiente. El potencial hídrico es una medida que representa la capacidad de las moléculas de agua para moverse en cualquier sistema, y resulta de la suma de fuerzas de diverso origen que liga el agua al suelo o a los tejidos de la planta. Estas fuerzas son: presión



o turgencia ( $\Psi_t$ ), osmótica ( $\Psi_o$ ), mátrica ( $\Psi_m$ ) y gravitacional ( $\Psi_g$ ). Por lo tanto, en las plantas, el potencial hídrico ( $\Psi_H$ ) está representado por la suma algebraica de estas 4 componentes (Beyá-Marshall & Galleguillos, 2020).

$$\psi_{Hídrico} = \psi_{Turgencia} + \psi_{Osmótico} + \psi_{Mátrico} + \Psi_{Gravedad}$$

Cuando el potencial hídrico se vuelve muy negativo, por efecto de la falta de agua, se retarda la expansión celular y por lo tanto el crecimiento de la planta se ve afectado. En respuesta la planta expresa un menor crecimiento de tallos y raíces, y si el estrés hídrico aumentara aún más, se cierran los estomas y queda restringida también la captación de CO<sub>2</sub> (Salisbury & Ross, 2000). Según explican (Khadka et al., 2020) los genotipos de trigo con tolerancia a la sequía en la etapa de macollamiento mantienen una tasa más alta de fotosíntesis y otros parámetros fisiológicos, como el potencial hídrico de las hojas, y exhiben una rápida recuperación después de reabastecerse de humedad.

### **2.4.3. Eficiencia de uso de agua (EUA)**

La producción de biomasa de cualquier cultivo o comunidad vegetal en relación con la cantidad de agua utilizada es lo que se conoce como eficiencia de uso de agua o EUA. Puede expresarse como: asimilación de dióxido de carbono, biomasa total del cultivo o rendimiento en grano; asimismo, el agua consumida puede expresarse como: transpiración, evapotranspiración o el total de agua ingresado al sistema (Serraj & Sinclair, 2002).

La EUA es una característica que puede emplearse en la caracterización de germoplasma. Sin embargo, en la selección de genotipos eficientes, es más conveniente considerar la eficiencia de transpiración (TE), ya que esta no considera la evaporación del suelo (Soares et al., 2021). La producción de nuevas variedades de trigo que resultaron del mejoramiento genético en ambientes con limitaciones en el EUA, sobre todo las variedades semi enanas con un alto índice de cosecha (HI), consideraron en la evaluación del rendimiento a esta variable (H. Ullah, Santiago-Arenas, Ferdous, Attia, & Datta, 2019).

#### **2.4.4. Área foliar**

En el trigo, por ser una planta C3, el incremento de la eficiencia fotosintética está asociado con la incorporación de CO<sub>2</sub> y es determinante para la formación de biomasa; por lo cual, la superficie foliar es clave para la productividad del cultivo (Benedetto, 2016). El área foliar, también, tiene que ver con otros procesos fisiológicos de la planta, como la respiración, y se le considera un carácter de adaptación frente a la sequía, debido a los cambios morfo-fisiológicos que desempeña ante el estrés hídrico (Yana, 2018). Entre esos cambios está la reducción de la expansión foliar, y una consecuente disminución en la fotosíntesis y el desarrollo de otros órganos en la planta; así como disminución de la transpiración, todo ello contribuye a evitar el estrés hídrico en las células. Se puede afirmar que, el estado hídrico del cultivo es determinante en la formación del área foliar, interceptación de la radiación y el rendimiento; asimismo, en condiciones de déficit hídrico es de esperar que la planta responda disminuyendo la tasa de división celular, la expansión del tejido y el desarrollo de la hoja (Simón, 2022). Se ha evidenciado también que la disminución en la fotosíntesis de la hoja y en el índice de área foliar por causa de la sequía previa a la antesis se correlaciona con reducciones en el número de granos por espiga (Khadka et al., 2020)

Para cuantificar la tasa de expansión del área foliar se requiere la sumatoria del área foliar de todas las hojas individuales durante el periodo de evaluación, a partir de la cual se construye una curva en función del tiempo (Benedetto, 2016).

#### **2.4.5. Contenido de clorofila SPAD**

La clorofila cumple un rol importante en la fotosíntesis, por su intervención como molécula responsable de la absorción de radiación solar incidente. Frente a un estrés, la planta sufre una reducción en su contenido de clorofila y, consecuentemente, se perjudica el proceso fotosintético, lo que da lugar a un menor intercambio gaseoso o menor fijación de carbono en la planta (Mehrabi & Sepaskhah, 2022); y un menor rendimiento de grano; dado que existe una asociación genética entre ambas variables (Ghosh, Swain, Jha, Tewari, & Bohra, 2020).

(Khadka et al., 2020) indican que el análisis del contenido de clorofila en el trigo es una característica útil para conocer el estado fenológico de la planta, sus condiciones fisiológicas

y la productividad del cultivo; por lo cual permite diagnosticar la afectación de algún estrés en la planta y sirve como indicador de tolerancia a la sequía; evidenciándose una relación directa con el rendimiento y la eficiencia de transpiración. Al respecto, (Khayatnezhad & Gholamin, 2021) encontraron que los genotipos de trigo duro con un mayor contenido de clorofila durante la fase reproductiva presentaron mayores rendimientos y más tolerancia a la sequía de final de temporada. Asimismo, (González, 2009) encontró que el contenido de clorofila en la hoja bandera fue mayor en el estadio de llenado del grano y se correlacionó positivamente con el peso de mil granos ( $p < 0.01$ ), sugiriendo que este carácter fisiológico contribuyó a mejorar la calidad del grano, el peso de los granos y también el rendimiento del cultivo; durante esta etapa fenológica. Hallazgos similares fueron reportados por (Ahmed et al., 2019) al observar que los genotipos de trigo tolerantes a la sequía mantuvieron un mayor contenido de clorofila durante el estrés hídrico en comparación con las variedades susceptibles. Esta pérdida de clorofila se sustenta, según (Liu et al., 2018), en una disminución de la expresión de genes que codifican enzimas para la biosíntesis de clorofila. En relación con las etapas de crecimiento del trigo,

El contenido de clorofila puede ser determinado utilizando un método sencillo, económico y no destructivo, con el medidor SPAD 502, tomado de las siglas: Análisis y Desarrollo de Plantas del Suelo. Este instrumento es usado para medir la transmitancia de radiación en la longitud de onda del rojo e infrarrojo, proporcionando un valor numérico relativo al contenido de clorofila. Existe una buena correlación entre los valores medidos con el SPAD 502 y el contenido de clorofila extraído y determinado por métodos espectrofotométricos, que ha sido reportado para un amplio rango de especies, incluyendo el trigo (Abrão, Silva, Silva, Reis, & Barbosa, 2022). Por lo cual viene siendo ampliamente usado para el monitoreo y pronóstico de rendimientos en el cultivo de cereales (Calvo et al., 2020; Martínez et al., 2020).

#### **2.4.6. Contenido relativo de agua (CRA)**

El contenido relativo de agua (CRA) es una variable fisiológica de la planta, que mide de manera indirecta y destructiva el estado hídrico de la planta o estado de turgencia. El CRA en las hojas, determina el contenido de agua en el tejido de la hoja en un momento puntual en relación al contenido total de agua que éste puede almacenar en estado turgente (Javed

et al., 2022; Khayatnezhad & Gholamin, 2021; Wasaya et al., 2021), pues, esta variable es afectada por las condiciones agroclimáticas, es decir cuando disminuye la humedad relativa del ambiente la demanda evaporativa de la planta aumenta y también el gradiente de vapor de agua de las hojas hacia la atmósfera, por lo cual, puede ayudar a determinar indirectamente el grado de recuperación de las plantas después de un período de estrés por sequía.

Con frecuencia se considera el contenido relativo de agua como una característica fisiológica muy útil en la selección de genotipos con tolerancia a la sequía en el trigo (Arifuzzaman et al., 2020). Para Rampino et al. (2006), los datos registrados de contenido relativo de agua tomados de diferentes genotipos de trigo, pueden ser un buen indicador del comportamiento entre los genotipos evaluados, identificando aquellos que por deshidratación pueden ser considerados resistentes o susceptibles. En la tolerancia a sequía en cereales, se ha demostrado que el CRA es una característica importante para el estudio de la tolerancia (Arifuzzaman et al., 2020), dando una idea del nivel al que llega el déficit hídrico y que puede ser usado como información de respuesta frente a la sequía.

#### **2.4.7. Potencial osmótico y Ajuste Osmótico (Osmoregulación)**

El potencial osmótico es una medida que refleja la actividad de los solutos en solución, por lo cual también se le denomina potencial de solutos. Estos se acumulan principalmente en las vacuolas y evitan que el citoplasma esté expuesto a altas concentraciones de iones, que podrían afectar su actividad enzimática (Salisbury & Ross, 2000).

Para poder comparar el potencial de solutos de diferentes genotipos es necesario estandarizar el nivel hídrico del tejido, llevándolo a máxima turgencia o a turgencia cero. Para el caso del potencial de solutos de hojas hidratadas se puede usar agua destilada para sumergirlas previo a la medición o regar las plantas la noche anterior (Blum, 1989). De otro lado, (Salisbury & Ross, 2000) sugieren que otra forma más apropiada de determinar el potencial osmótico es el método de presión de vapor. En el caso de células vegetales, antes de aplicar este método es necesario reducir a cero la presión celular, lo cual se realiza aplicando un congelamiento y descongelamiento rápido de tejido, logrando la formación de cristales de hielo para romper la membrana de las células. La medición se aplica sobre la mezcla de líquidos provenientes del citoplasma, la savia de la vacuola y el agua proveniente de la pared de las células.

El ajuste osmótico (AO) es un proceso donde se acumulan los solutos en tejidos de la planta como un mecanismo de respuesta frente a la falta de agua disponible. En este caso, la planta autorregula su potencial osmótico para tolerar el estrés hídrico y lentamente logra encontrar un nuevo equilibrio en su potencial. Con este ajuste, la planta puede absorber agua a potenciales hídricos del suelo menores y mantener su presión de turgencia y sus procesos fisiológicos (Ledent, 2002).

(Morgan, 1983) y (Blum, 1998) encontraron que el trigo es una especie que responde ajustando osmóticamente y cuenta con variación genética para esta característica. Tras sus estudios bajo condiciones de sequía en líneas de trigo, Morgan (1983) sugirió que el ajuste osmótico, el contenido relativo de agua y el potencial de agua se encontrarían controlados por un solo gen; y que estas variables pueden ser usadas para la selección de genotipos tolerantes a la sequía evaluados en términos de rendimiento. Entre las características encontradas en líneas con alto ajuste osmótico, se identifica que pueden producir alta biomasa radicular y mayor transpiración (Morgan, 1984).

El ajuste osmótico se ha mostrado en especies como la cebada, canola y maíz; contribuyendo al ajuste estomatal y fotosintético, como un mecanismo de adaptación a nivel celular para reducir el daño inducido por la sequía. En estas condiciones, el ajuste osmótico permite a las plantas: 1. mantener la turgencia en las células de los tejidos, 2. mejorar la conductancia estomática para la captación de dióxido de carbono, 3. confiere a las raíces la posibilidad de captar más agua del suelo y 4. promueve la síntesis de compuestos como prolina y glicina betaina para proteger a las proteínas en las células (Bowne et al., 2012).

Por su parte, (Ayele, Blum, & Nguyen, 2001) señalan que los mecanismos de adaptación que el ajuste osmótico desencadena en la planta puede asegurar una mayor supervivencia del cultivo frente al estrés hídrico pero no necesariamente mayores rendimientos o el aumento de biomasa aérea. El único mecanismo claro beneficioso que se logra con el incremento del ajuste osmótico es mantener el crecimiento radicular de la planta para lograr alcanzar el agua a mayor profundidad en el suelo, para las reservas de la planta o para su supervivencia (Serraj & Sinclair, 2002). Sin embargo, la acumulación de solutos también juega un importante rol en la tolerancia a la deshidratación, el cual es un fenómeno expresado en cereales para el estadio de plántula y que puede ser útil en zonas con riesgo de sequía.

#### **2.4.8. Prolina libre**

La acumulación de osmolitos, como la prolina, en el interior del citoplasma de las células tiene como función mantener un bajo potencial hídrico celular y permitir a la planta continuar con sus procesos metabólicos en condiciones de estrés ambiental (Itam et al., 2020). Por ello, (Kaur & Asthir, 2020) señalan que contribuye a la respuesta adaptativa de los genotipos a la sequía. Otras investigaciones también reportan la acumulación de prolina en otras condiciones adversas como las bajas temperaturas, deficiencia nutricional o metales pesados (A. Ullah, Al-Busaidi, Al-Sadi, & Farooq, 2022). En estas condiciones, la concentración de este aminoácido puede incrementarse hasta cien veces su valor normal, pero luego de un riego estos valores pueden disminuir rápidamente.

La prolina es un aminoácido que podría desempeñar múltiples actividades, entre ellas: actuar como un osmoprotector, estabilizador de proteína, como fuente de carbono y nitrógeno y como regulador del potencial oxidoreductor de las células (Altaf, 2021).

#### **2.4.9. Nitrato reductasa**

La enzima nitrato reductasa (NR) es una molibdoenzima que es responsable de la primera etapa del metabolismo del nitrógeno en las plantas y, por tanto, es determinante en la formación de biomasa vegetal y la productividad de los cultivos. Su función, de catalizar la reducción del nitrato ( $\text{NO}^{-3}$ ) a nitrito ( $\text{NO}^{-2}$ ), que es la forma orgánica asimilable del nitrógeno en las plantas, permite la síntesis de proteínas (Mahmoud et al., 2020; Wencomo-Cárdenas, 2019). La disponibilidad de suficiente nitrógeno asimilable para la planta contribuye en la formación de clorofila, lo cual incrementa la actividad fotosintética y el desarrollo vegetal. Además, retrasa la lignificación de los tejidos, permite que las células retarden su senectud y se mantengan turgentes, permitiéndoles el normal funcionamiento de sus actividades bioquímicas y fisiológicas (Wencomo-Cárdenas, 2019).

Según describe (Borges et al., 2014) los mecanismos de respuesta más reportados en las plantas en ambientes con deficiencia hídrica son la alteración de su metabolismo y la síntesis de sustancias que ayudan a contrarrestar los efectos de la sequía. En el caso de la NR tiende a reducir su actividad, por ello se la utiliza frecuentemente como un indicador de estrés y

otras anomalías relacionadas a los factores moduladores de crecimiento (Taiz & Zeiger, 2013).

Diferentes estudios reportan que la actividad de la NR también se ve afectada por la fertilización nitrogenada, el fotoperiodo, la variabilidad genética y el desarrollo fenológico del cultivo (Borges et al., 2014). En el caso del trigo, se encontró que la menor actividad de la enzima ocurre a las 2 o 3 hojas verdaderas extendidas y la mayor actividad durante el estadio de buche; además la reducción más rápida de esta enzima coincide con el inicio de la formación de granos (Eser et al., 2024).

#### **2.4.10. Índices de selección de genotipos tolerantes**

Los programas de mejoramiento genético en las zonas áridas frecuentemente buscan seleccionar variedades de trigo que sean tolerantes a la sequía (Kirigwi et al., 2004). Los índices de selección proporcionan ayuda basados en la medición de la sequía en función a una reducción del rendimiento en grano, comparando condiciones de riego normal y el estrés hídrico (Anwaar et al., 2020).

Para poder identificar genotipos tolerantes al déficit hídrico, se han recomendado diversos índices que toman como base el rendimiento de grano del cultivo en condiciones normales de riego y en condiciones de estrés. El mejor índice de selección deberá de distinguir o identificar genotipos que expresen una superioridad en ambas condiciones (Ayed, Othmani, Bouhaouel, & Teixeira Da Silva, 2021). En un ensayo de evaluación de siete índices de selección usados para identificar la resistencia a la sequía bajo diferentes condiciones hídricas, aplicados a veinticuatro líneas y cultivares de trigo *durum*; se encontró que los índices de productividad media geométrica (GMP) y de tolerancia al estrés (STI) mostraron ser los más efectivos en para identificar cultivares tolerantes. Los demás índices evaluados fueron: índice de susceptibilidad al estrés o SSI, índice de tolerancia o TOL, índice de rendimiento o YI, índice de estabilidad de rendimiento o YSI y el índice de productividad media o MP (Bhogapurapu, Dey, Mandal, Bhattacharya, & Rao, 2021; Morsy, Elbasyoni, Abdallah, & Baenziger, 2022).

En condiciones de estrés leves según (Talebi, 2009), los índices STI, GMP y MP fueron capaces de identificar cultivares con rendimientos altos en ambas condiciones (sequía y riego

normal). Cuando el estrés era severo, los índices TOL, YSI y SSI resultaron ser los más útiles discriminando la resistencia de cultivares, aunque ninguno de estos indicadores pudo identificar cultivares con alto rendimiento en ambas condiciones (sequía y riego normal). Se considera que la efectividad de los índices de selección depende de la severidad del estrés, considerando que solo bajo condiciones de estrés moderado el rendimiento potencial tiene influencia sobre el rendimiento real.

El índice de susceptibilidad a la sequía, o SSI, es una medida de la estabilidad del rendimiento o una medida del rendimiento potencial del genotipo bajo condiciones de estrés hídrico. Sin embargo, el SSI no toma en cuenta las diferencias que existen en los rendimientos potenciales entre los genotipos (Ahmad, Iqbal, & Choi, 2020). El SSI proporciona una medida de estabilidad basada en la disminución del rendimiento bajo estrés comparada a las condiciones no estresadas más que los niveles de rendimiento bajo condiciones de sequía. Por consiguiente, (Morsy et al., 2022) señalan que para definir como tolerante al estrés a un genotipo, debido a su valor de SSI, no necesariamente se requiere que alcance un potencial de rendimiento alto. Según los resultados de sus estudios concluye que el estrés hídrico aplicado al estadio de anthesis del trigo genera un menor rendimiento de grano en todas las variedades evaluadas.

El índice tolerancia al estrés (STI) fue introducido por (Fernandez, 1992) con el objetivo de identificar genotipos que produzcan alto rendimiento de grano bajo condiciones de riego normal y de estrés, asimismo sugiere que para que la identificación de genotipos tolerantes y de alto rendimiento sea efectiva, la correlación entre el STI y el rendimiento debe ser alta y positiva. (Geravandi, Farshadfar, & Kahrizi, 2011), realizó la evaluación de 20 genotipos de trigo harinero para la tolerancia a la sequía y encontró que el STI proporcionó una adecuada identificación de hasta 5 genotipos tolerantes.

## **2.5. Componentes de rendimiento**

El rendimiento en el cultivo de trigo se ve influenciado por la herencia genética y todas las condiciones agroclimáticas que intervienen en el desarrollo de la planta; ambos factores quedan expresados por características morfológicas, entre ellas: el macollaje, el tamaño de la planta, la densidad de la espiga, el número de granos por espiguilla y el tamaño del grano (Mercado et al., 2024). De estas características morfológicas son tres las que se definen como



componentes del rendimiento: el número de espigas por unidad de superficie, el número de granos por espiga y el peso de mil granos; dado que existe una interacción entre ellas cualquier aumento en algún componente ocasiona una reducción en las otras (Poehlman & Borthakur, 1969).

Tal como señalan (Bogale Gonfa & Tesfaye, 2016) conocer la relación entre los aspectos fenológicos y genotípicos de la producción y sus componentes es crucial para el desarrollo de criterios de selección de genotipos tolerantes al estrés hídrico. A este respecto, (Shahryari & Mollasadeghi, 2011) se realizó un estudio de correlación entre el rendimiento y sus componentes, en condiciones de sequía para dos genotipos de trigo harinero. El rendimiento de grano por planta mostró correlación positiva y significativa con el área de la hoja bandera, número de macollos por planta, longitud de la espiga, número de granos por espiga y peso de mil granos, en ambos genotipos. La interrelación de estas variables mostró que están bajo el control de ciertos genes comunes, los que pueden ser explotados como un criterio de selección. Estudios realizados por (Martínez Cruz et al., 2020) también reportaron que el rendimiento de grano y sus componentes se vieron afectados en mayor medida cuando se suspendió el riego en la etapa de macollamiento y espigado. Asimismo, se encontró correlación entre las variables número de granos por espiga y número de espigas por metro cuadrado con el rendimiento de grano, tanto en condiciones de riego normal y de sequía. Resultados similares fueron hallados por (Bogale Gonfa & Tesfaye, 2016) tras evaluar 18 genotipos de trigo duro sometidos a sequía inducida, en donde el número de granos por espiga y la biomasa aérea estuvieron asociados con el rendimiento de grano, durante las etapas de llenado de grano hasta la madurez.

## III. METODOLOGÍA

### 3.1. Condiciones generales del experimento

Se instaló un experimento agronómico en macetas dentro de una casa de malla antiáfidos, con la finalidad de estudiar la respuesta al estrés hídrico en diferentes estadios fenológicos de desarrollo del cultivo de trigo harinero (*Triticum aestivum s sp aestivum* L.) y trigo duro (*Triticum Turgidum s sp durum* L.). Se plantearon 4 tratamientos de riego donde se aplicó un estrés hídrico controlado en determinada etapa de desarrollo de la planta y un riego control.

#### 3.1.1. Lugar y ubicación

El experimento se llevó a cabo en una casa malla del Programa de Cereales y Granos Nativos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, ubicado en:

Distrito	:	La Molina
Provincia	:	Lima
Departamento	:	Lima
Latitud	:	12° 04' 41.05" S
Longitud	:	76° 56' 36.45" O
Altitud	:	243 msnm.

### **3.1.2. Clima**

Según la estación agrometeorológica Alexander von Humbolt de la Molina (243.7 msnm) la zona tiene una precipitación anual promedio correspondiente a 11.9 mm, la temperatura anual promedio es de 20°C y la humedad relativa anual promedio alcanza 84%. La zona presenta un clima de clasificación tipo desértico árido sub-tropical costanero (dd-S).

Las condiciones climáticas durante el período experimental, al interior de la casa malla, fueron obtenidas mediante un sensor de temperatura y humedad relativa de la marca “HOBO” - modelo U23-001 (Onset Computer Corporation, 470 MacArthur Blvd., Bourne, MA, USA).

En promedio la temperatura máxima presentada durante todo el experimento fue de 25.2 °C, con temperatura máxima de 32.9 °C al inicio del experimento. En tanto que la temperatura mínima promedio fue de 17.3 °C, con temperatura mínima de 11.8 °C al final del periodo experimental. Las temperaturas máximas y mínimas observadas en el interior de la casa de mallas en el periodo experimental se presentan en el anexo 1.

### **3.1.3. Suelo y agua de riego**

El sustrato preparado para este experimento fue analizado en el laboratorio de análisis de suelos y plantas de la Universidad Nacional Agraria La Molina (ver Tabla 1). Según se indica en los resultados, su clase textural corresponde a franco arenoso, lo que confiere una buena capacidad de retención de humedad, permeabilidad y aireación. El sustrato tuvo un pH neutro, lo que mantuvo a los macro y micronutrientes mayormente disponibles para absorción de la planta. Asimismo, no contiene carbonato de calcio y el contenido de sales (CE) es de 3.37 dS/m), que indica que es un suelo ligeramente salino. El contenido de materia orgánica es alto, asegurando una buena estructura, permeabilidad y una capacidad de intercambio catiónico (CIC), correspondiente a 15.36. En relación con los nutrientes, el contenido de fosforo y potasio disponible son altos y la relación catiónica (K/Mg) indica que hay deficiencias de magnesio.

**Tabla 1: Análisis de caracterización del suelo de las macetas empleado en el experimento de estrés hídrico de dos especies de trigo. La Molina**

	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
pH	(1:1)	6.72
C.E.	(1:1) dS/m	3.37
CaCO <sub>3</sub>	%	0.00
M.O.	%	4.75
P	Ppm	33.0
K	Ppm	4.29
Arena	%	65
Limo	%	29
Arcilla	%	6
Clase textural		Fr A.
CIC		15.36
Ca <sup>+2</sup>	meq/100g	12.59
Mg <sup>+2</sup>	meq/100g	1.73
K <sup>+</sup>	meq/100g	0.74
Na <sup>+</sup>	meq/100g	0.33
Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup>	meq/100g	0.00
Suma de cationes		15.36
Suma de bases		15.36
% Sat. de bases	%	100

El agua para el riego de este experimento fue proveniente del río Rímac, que llega a la universidad cada quince días aproximadamente a través de canales y se almacena en un pequeño reservorio. La muestra se evaluó en el laboratorio de análisis de suelos y plantas de la UNALM (ver Tabla 2).

El agua usada corresponde a la clase C2-S1, según la conductividad eléctrica y relación de absorción de sodio. El peligro de salinidad es medio y el peligro de sodio es bajo, se podría usar en casi todo tipo de suelos sin afectar la estructura, pero con lixiviación moderada para evitar riesgos de acumulación de sales. Este tipo de agua estaría limitada para evaluaciones de estrés sólo en el caso de plantas sensibles. Asimismo, no representa ningún peligro tomando en cuenta los valores de carbonato de sodio residual; de otro lado, la presencia de calcio y magnesio cambiante también previenen la concentración de sodio en los lugares de cambio de la CIC.

**Tabla 2: Análisis de agua de riego empleado en las macetas del experimento de estrés hídrico de dos especies de trigo. La Molina**

	Unidades	Valor
pH	(1:1)	6.42
C.E.	(1:1) dS/m	0.48
Calcio	meq/100g	3.82
Magnesio	meq/100g	0.56
Potasio	meq/100g	0.18
Sodio	meq/100g	0.64
SUMA DE CATIONES		5.20
Nitratos	meq/100g	0.02
Carbonatos	meq/100g	0.00
Bicarbonatos	meq/100g	2.21
Sulfatos	meq/100g	1.36
Cloruros	meq/100g	1.50
SUMA DE ANIONES		5.09
Sodio	%	12.31
RAS		0.43
Boro	ppm	0.13
Clasificación		C2-S1

## 3.2. Materiales y equipos

### 3.2.1. Material biológico

El material vegetal empleado proviene del Banco de Germoplasma de Cereales y Granos nativos de la UNALM, y fueron:

- *Tríticum aestivum s sp aestivum* L.Var. “Centenario” : Es un “trigo harinero”, obtenido por el Programa de Cereales y Granos Nativos de la UNALM, recomendado para siembras de costa y sierra.
- *Tríticum turgidum s sp durum* L. mutante “Taray 85” : Este genotipo fue obtenido con la aplicación de irradiación gamma a la variedad Taray, puesta en producción comercial por el INIA para la sierra del Perú.

### 3.2.2. Equipos

Los equipos utilizados durante el experimento fueron:

- Balanza de precisión de hasta 0.0001 gramos mínimo, de la marca Mettler (+/- 0.0001 g).
- Balanza electrónica de capacidad de 15 kg máx. de la marca Jadever, modelo: JWG-15K (+/- 0.005 kg).
- Medidor portátil de clorofila en las hojas, de la marca Minolta, modelo: SPAD 502.
- Espectrofotómetro, Thermo Spectronic, modelo: Génesis 20 (Rochester, NY, Estados Unidos), para la determinación de prolina y nitrato reductasa.
- Escáner, de la marca OneTouch, modelo: 9200 Vissioner, para determinar el área foliar de las hojas bandera.
- Estufa, de capacidad de 40 litros, para las mediciones de biomasa seca.
- Micro voltímetro modelo HR-33T, y
- Cámara psicrométrica modelo: C-52 de la marca Wescor Instruments, para calcular el potencial osmótico en las hojas bandera.

### 3.2.3. Reactivos

Para la determinación del contenido de prolina libre y la enzima nitrato reductasa, se utilizó:

- Nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ), en solución 0.1 M
- di-Potasio hidrogenofosfato ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ), en solución 0.1 M
- Potasio dihidrogenofosfato ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), en solución 0.1 M
- Ninhidrina ácida
- Acido acético glacial

- Tolueno en fase líquida
- Ácido Ortofosforico al 85% en D<sub>2</sub>O
- n-Propanol al 1% v/v
- Etanol
- Sulfanilamida al 1%
- Ácido clorhídrico (HCl) en solución 1.5 M
- N-(1- Naftil) etilen diamino dihidroclorhidratado al 0.02%
- Acido Sulfosalicílico al 3 % en agua

#### **3.2.4. Otros**

Se utilizaron también otros materiales y productos necesarios para el desarrollo del cultivo y para los procedimientos realizados durante las evaluaciones, los cuales se indican a continuación.

- Tinglado de Mallas antiáfidos
- Macetas de plástico de 10" diámetro (Kord Products Inc, Ontario, Canada)
- Mallas antiáfidos de 30 cm x 30 cm
- Mochila pulverizadora
- Fertilizantes: Urea, Nitrato de amonio y Fosfato di-amónico
- Insecticidas: Vertimec y Lorsban
- Balón de nitrógeno líquido y nitrógeno líquido
- Tubos porta muestras de polipropileno, de 50 ml - marca Corning Incorporated, modelo:430828

- Sacabocados, probetas de 25, 250 y 500 ml, baldes de 20 l, palas de mano, bolsas de papel Kraft, plástico envolvente, bandejas de plástico, tijeras, etc.

### **3.3. Métodos y procedimientos**

#### **3.3.1. Instalación y conducción del ensayo**

La instalación y conducción del experimento fue realizada según el siguiente plan:

##### **a. Preparación del sustrato**

El sustrato consistió en la mezcla de materiales de: suelo de chacra, tierra negra y musgo, en una proporción 2:1:0.5, la cual fue previamente esterilizada con vapor de agua durante dos horas a 100 °C.

##### **b. Preparación de las macetas**

Se procedió a colocar una malla cortada en dimensiones de 30x30 cm en el interior de las macetas y luego el sustrato esterilizado; la malla evitó la pérdida de sustrato por los orificios de drenaje de la maceta y permitió mantener la misma cantidad de sustrato durante todo el experimento. Las macetas empleadas fueron N°10 (10 pulgadas de diámetro). Se empleó 5.5 kg de sustrato en cada maceta, pesada en la balanza Jadever JWG-15K. Previamente el sustrato fue secado al ambiente y homogenizado antes de llenar cada maceta, con el fin de que todas puedan tener un mismo nivel de humedad.

Seguidamente se tomaron dos de las macetas para determinar la capacidad de campo, con el fin de estimar la capacidad de almacenamiento de agua de cada maceta (agua disponible), con la cantidad de sustrato pesado. Para ello se saturó la maceta con agua, se colocó un plástico negro en la parte superior de la maceta, y se fueron tomando muestras cada 24 horas, las cuales fueron pesadas (peso fresco) y luego fueron llevadas al horno a 105°C (peso seco). Asimismo, se tomó una muestra del sustrato para su análisis de caracterización en el laboratorio de suelos de la UNALM.



### **c. Siembra**

La siembra se llevó a cabo el día 5 de febrero para el trigo harinero y el día 17 de febrero para el trigo durum. Previamente a la siembra se realizó la prueba de germinación de las semillas en placas Petri, para determinar la viabilidad de la semilla de cada especie. Luego se desinfectó la semilla en lejía al 5% y se procedió a sembrar 20 semillas bien distribuidas en toda el área de la maceta. La profundidad de siembra fue de 3 cm.

### **d. Riegos**

El primer riego se llevó a cabo luego de la siembra, aplicándose 0.8 litros de agua por maceta para alcanzar la capacidad de campo, según los cálculos realizados anteriormente.

Los riegos fueron inter diarios durante todo el período de prueba, según el requerimiento de agua de cada tratamiento.

Los riegos para el tratamiento de sequía se realizaron bajo la técnica de la sequía gradual o controlada, que consiste en disminuir gradualmente la cantidad de agua requerida por cada maceta hasta alcanzar el nivel de humedad mínimo, correspondiente al 20% de la evapotranspiración normalizada (con referencia a las plantas de riego normal). Los períodos en los que se aplicó la sequía controlada fueron los de macollamiento, elongación del tallo, floración y anthesis, grano acuoso y lechoso. El objetivo de utilizar esta técnica de la sequía controlada es que la planta no sufra una reducción del agua en la maceta, de tal modo que el proceso de la sequía sea gradual tal como ocurre en el suelo en condiciones de campo, y por consecuencia poder observar algunos mecanismos adaptativos en la planta.

### **e. Fertilización**

La fertilización fue hecha en dos ocasiones, se aplicó una primera dosis recomendada de 80-40-0 de N-P-K al momento de la siembra y más adelante, durante el macollamiento a los 25 días después de la siembra, se fertilizó con otra dosis de 40-40-40. Las fuentes de nutrientes fueron los fertilizantes: fosfato di-amónico 18-46-0, nitrato de amonio 33N y urea 46N.

### **f. Labores culturales**

A los 15 días después de la siembra se realizó el raleo, dejando en cada maceta 5 plantas de similar estado de desarrollo.

**g. Protección sanitaria**

Se realizó una aplicación preventiva de Lorsban 4 CE (Clorpirifos) contra el gusano de tierra *Agrotis sp.* y *Trips spp.* Asimismo, se realizaron tres aplicaciones de Vertimec (Abamectina) para el control de Arañita roja (*Tetranychus cinnabarinus*) a los 30 días después de la siembra, la dosis aplicada fue según la recomendación comercial.

**h. Cosecha y precosecha**

La cosecha final se realizó a los 90 días después de la siembra en el Trigo Harinero (*Triticum aestivum s sp aestivum* L.) y a los 140 días después de la siembra en el trigo Durum (*Triticum Turgidum s sp durum* L.).

En cada tratamiento de riego se separó 5 macetas para la precosecha, y en el tratamiento de riego control se separó 20 macetas. Estas cosechas se llevaban a cabo al finalizar cada periodo de sequía. Luego de extraer las muestras de hoja para las evaluaciones fisiológicas, se procedía a cortar las plantas desde el cuello y trozarlas para determinar el peso de la biomasa fresca y seca. En total se hicieron 4 precosechas, en cada ocasión se tomaron 5 macetas del tratamiento de riego y 5 macetas del riego control.

**i. Duración de la fase experimental**

La duración de la fase experimental fue aproximadamente de 6 meses, desde enero a junio. Posteriormente, se trabajó con las muestras que fueron congeladas para las evaluaciones en laboratorio.

**j. Cronograma de ensayo**

Las principales labores realizadas en la conducción del experimento se encuentran en la siguiente Tabla (ver Tabla 3).

**Tabla 3: Cronograma y labores realizadas en el estudio de estrés hídrico de dos especies de trigo. La Molina**

<b>Fecha (dd/mm)</b>	<b>DDS</b>	<b>Especie</b>	<b>Labor realizada</b>
11/01		Harinero/ Durum	Selección de semillas y prueba de germinación
18-23/01			Preparación de sustrato
25-29/01			Llenado y pesado de macetas
29/01			Determinación de capacidad de campo
04/04		Harinero/ Durum	Primera fertilización con urea y nitrato de amonio. Dosis de 80-40-0
<b>05/02</b>	-	<b>Harinero</b>	<b>Siembra y primer riego</b>
07/02...	2 dds	Harinero	Riegos interdiarios en base a la evaporación calculada gravimétricamente por diferencia de pesos
<b>17/02</b>	-	<b>Durum</b>	<b>Siembra y primer riego</b>
19/02...	2 dds	Durum	Riegos interdiarios en base a la evapotranspiración calculada gravimétricamente por diferencia de pesos
22/02	17 dds	Harinero	Desahije, con una densidad final de 5 plantas por maceta.
01/03	12 dds	Durum	Desahije, con una densidad final de 5 plantas por maceta.
02/03	25 dds	Harinero/ Durum	Segunda fertilización con fosfato di amónico, a una dosis de 40-40-40
06/03	29 dds	Harinero	Saturación de macetas e inicio del estrés hídrico controlada en el primer tratamiento, estadio de macollamiento (Riego 2).
		Harinero	Saturación de macetas e inicio del estrés hídrico controlado en el segundo tratamiento, estadio de encañado o elongación del tallo (Riego 2).
04/03		Harinero/ Durum	Primer control fitosanitario
15/03	38 dds	Harinero	<b>Fin del estado de macollamiento</b> , primera precosecha (25 plantas del tratamiento 1 y 25 plantas del testigo)
15/03	38 dds	Harinero	Toma de muestras para potencial osmótico y contenido de prolina, nitrato reductasa y biomasa (en cada precosecha).
15/03	38 dds	Harinero	Riego de recuperación al primer tratamiento (Riego 2).
27/03	50 dds	Harinero	<b>Fin del estado de encañado</b> , segunda precosecha (25 plantas del tratamiento 2 y 25 plantas del testigo).
	50 dds	Harinero	Toma de muestras para potencial osmótico y contenido de prolina y nitrato reductasa
	50 dds	Harinero	Riego de recuperación al segundo tratamiento (Riego 3)
			Saturación de macetas e inicio del estrés hídrico controlado en el tercer tratamiento (Riego 4).
			Inicio de estado de antesis, estrés hídrico controlado en el tercer tratamiento (Riego 4)
05/04	59 dds	Harinero	<b>Fin del estado de antesis</b> , tercera precosecha (25 plantas del tratamiento 3 y 25 del testigo)
			Toma de muestras para potencial osmótico y contenido de prolina y nitrato reductasa
	59 dds	Harinero	Riego de recuperación al tercer tratamiento (Riego 4)

<b>Fecha (dd/mm)</b>	<b>DDS</b>	<b>Especie</b>	<b>Labor realizada</b>
	59 dds	Harinero	Inicio del estado de Grano acuoso y lechoso, estrés hídrico en el cuarto tratamiento.
06/04	48 dds	Durum	<b>Fin del estado de macollamiento</b> , primera precosecha (25 plantas del tratamiento 1 y 25 plantas del testigo) Toma de muestras para potencial osmótico y contenido de prolina y nitrato reductasa Riego de recuperación al segundo tratamiento (Riego 3)
16/04	70 dds	Harinero	<b>Fin del estado de grano acuoso y lechoso</b> , cuarta precosecha (25 plantas del tratamiento 4 y 25 del testigo). Toma de muestras para potencial osmótico y contenido de prolina y nitrato reductasa Riego de recuperación al segundo tratamiento (Riego 3)
23/04	65 dds	Durum	<b>Fin del estado de encañado</b> , segunda precosecha (25 plantas del tratamiento 2 y 25 plantas del testigo). Toma de muestras para potencial osmótico y contenido de prolina y nitrato reductasa Riego de recuperación al cuarto tratamiento (Riego 5)
20/05	92 dds	Durum	<b>Fin del estado de antesis</b> , tercera precosecha (25 plantas del tratamiento 3 y 25 del testigo) Toma de muestras para potencial osmótico y contenido de prolina y nitrato reductasa Riego de recuperación al cuarto tratamiento (Riego 5)
14/06	119 dds	Durum	<b>Fin del estado de grano acuoso y lechoso</b> , cuarta precosecha (25 plantas del tratamiento 4 y 25 del testigo) Toma de muestras para potencial osmótico y contenido de prolina y nitrato reductasa Riego de recuperación al cuarto tratamiento (Riego 5)
02-30/08		Harinero/ Durum	Evaluación de componentes de rendimiento
06-25/09		-	Cotización y compra de reactivos
20/09- 25/10		Harinero/ Durum	Determinación del potencial osmótico y contenido de prolina y nitrato reductasa en laboratorio.
22-30/11		Harinero/ Durum	Determinación del contenido de Prolina
01-07/12		Harinero/ Durum	Determinación del contenido de Nitrato reductasa
			Fin del experimento.

### 3.3.2. Evaluaciones morfológicas

Estas evaluaciones se realizaron en dos ocasiones: en la precosecha, para el caso del área de la hoja bandera, y cuando la planta estaba en plena floración (59 dds en harinero y 90 dds en durum) para el caso de la altura de la planta y tamaño de la espiga.

#### a. Altura de la planta (cm)

Para determinar esta variable, se realizó la medición desde la superficie del sustrato de la maceta hasta el ápice de la espiga, sin considerar las aristas. Se determinó la altura de todas las plantas a los 59 dds en harinero y a los 90 dds en trigo durum, cuando ya habían alcanzado la madurez fisiológica (Ver Figura 4).



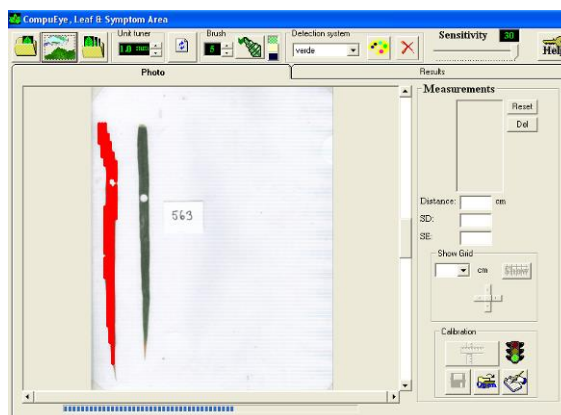
**Figura 4. Medida de Altura de plantas del testigo (Izquierda) y del tratamiento de riego deficitario (Derecha) de *Triticum aestivum* s sp *aestivum* L., La Molina.**

## b. Longitud de la Espiga (cm)

Se midió la longitud desde la base de la espiga, hasta el ápice, sin considerar las aristas. Esta medida se realizó durante la floración y espigado, a los 59 días después de la siembra en el trigo harinero y 90 en el trigo duro respectivamente.

## c. Área de la Hoja Bandera (cm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>)

Para poder medir el área foliar se tomó dos hojas bandera de cada maceta durante la precosecha, se les codificó con el número de la maceta y se las colocó en una mica de plástico transparente para luego escanearlas a 200 DPI de resolución (puntos por pulgada, por sus siglas en inglés). Posteriormente se calculó el área de la hoja bandera utilizando un software “Compu Eye, Leaf & Symptom Area” que determina el área de las hojas, según el verdor de las imágenes previamente escaneadas (Figura 5). El software necesita previamente de una calibración hecha con una unidad de medida conocida (regla) que haya sido escaneada también bajo las mismas condiciones que las hojas bandera.



**Figura 5. Determinando área foliar, de hojas de trigo usando el software “Compu Eye, leaf & Symptom Area” en el estudio de estrés hídrico de dos especies de trigo. La Molina.**

### 3.3.3. Evaluaciones fisiológicas

#### a. Contenido Relativo de Agua ( $gg^{-1}$ )

Se cortaron dos hojas banderas de cada maceta durante la precosecha, se las colocó en una lámina de plástico envolvente para evitar la deshidratación desde el invernadero (toma de muestra) hasta el laboratorio (peso de muestra), y se tomó registro del peso fresco –  $Pf$  (g) usando una balanza analítica con cámara de pesaje. Posteriormente, se situaron las hojas en una bandeja y se las mantuvo en remojo con agua destilada por 24 horas a una temperatura de 6 °C (ver Figura 6). A continuación, se volvió a pesar para obtener el peso hidratado o turgente -  $Pt$  (g) y se las colocó en una estufa a 85 °C de temperatura, por un periodo de 48 horas, tras lo cual se determinó el peso seco -  $Ps$  (g).

Con todos los pesos obtenidos se calculó el contenido relativo de agua, usando la ecuación de la diferencia de pesos fresco y seco dividido entre la diferencia de pesos turgente y seco, según se describe a continuación:

$$CRA = \frac{(Pf - Ps)}{(Pt - Ps)}$$

Dónde:

$Pf$  : Peso fresco (g)

$Pt$  : Peso turgente (g)

$Ps$  : Peso seco (g)



**Figura 6. Hidratación de hojas para determinar el peso turgente**

#### **b. Potencial osmótico (MPa)**

Para las mediciones del potencial osmótico se tomó previamente las muestras de las hojas bandera que se mantuvieron guardadas en congelación. Estas fueron colocadas en las cámaras psicrométrica C-52 (Wescor) y se realizó el cálculo con el micro voltímetro HR-33T (Wescor). Se usó el método del punto de rocío, sugerido por (Machado & Paulsen, 2001), el cual indica que se debe iniciar colocando la muestra en la cámara psicrométrica y esperar 30 minutos para su equilibrio. A continuación, se conecta la cámara psicrométrica con el micro voltímetro y se corrige la temperatura de la cámara sobre un valor del micro voltímetro. Las mediciones del potencial osmótico se obtuvieron en las unidades bar o MPa.

Las muestras se tomaron previamente de las hojas bandera de los tratamientos que se iba cosechando, preferentemente entre las 10:00 am y 1:00 pm del día. Se tomaron usando un sacabocado de diámetro de 7 mm, debido a que este disco de hoja obtenido es apropiado para introducirse en el porta muestras de la cámara del psicrómetro (C-52). Los discos de la muestra vegetal, inmediatamente después de extraídas fueron colocados en viales de 1 ml y guardados inmediatamente en nitrógeno líquido contenido en recipientes de Tecnopor, con el cual fueron transportados a un congelador de  $-80^{\circ}\text{C}$  donde se almacenaron hasta su medición. Posteriormente, antes de la medición, se volvieron a colocar en nitrógeno líquido para romper la membrana celular cuando se descongelen a temperatura ambiente. Antes de terminar la descongelación fueron colocadas en la porta muestras de la cámara psicrométrica,



cogiéndolos con una pinza (ver Figura 7). El tiempo de equilibrio en la cámara fue de 30 minutos, después de lo cual se realizó la lectura con el micro voltímetro y se cambió la muestra para una siguiente lectura.

En el presente ensayo se utilizaron dos cámaras psicrométricas, una para cada repetición. Los momentos para la toma de muestras para las mediciones del potencial osmótico fueron desde el momento en que la evapotranspiración normalizada de cada maceta fue menor de 30%.



**Figura 7. Medición de potencial osmótico.**

### **c. Ajuste osmótico**

El ajuste osmótico fue determinado a partir de la metodología sugerida por (Morgan, 1983, 1995), donde se grafican los valores del potencial osmótico y el contenido relativo de agua, para cada muestra medida. Posteriormente se calcula la pendiente de la recta que se forma de dicha relación. Las pendientes altas representan baja capacidad de ajuste osmótico, y las pendientes bajas representan una alta capacidad de ajuste osmótico.

### **d. Contenido de prolina libre**

Para determinar esta variable se usaron las instalaciones y el equipamiento del laboratorio de Fisiología Vegetal de la Facultad de Ciencias de la UNALM. El tejido que se usó fue muestras de 100 miligramos de 2 hojas bandera tomadas en cada una de las cuatro precosechas realizadas durante el ensayo. Inmediatamente después del corte de las plantas, las hojas se envolvieron en papel aluminio, se colocaron en unos viales plásticos de 50 ml. y fueron transportadas sumergidas en nitrógeno líquido dentro de un contenedor de Tecnopor hasta las instalaciones del Centro Internacional de la Papa CIP, donde se las guardó en un

congelador de  $-80^{\circ}\text{C}$  de temperatura, para inactivar toda actividad metabólica en las hojas. Esta metodología fue tomada de (Bates, Waldren, & Teare, 1973) y (Khedr, Abbas, Wahid, Quick, & Abogadallah, 2003).

El procedimiento se inició pesando 100 miligramos de las hojas bandera congeladas, excluyendo las nervaduras, y se molió en un mortero. Luego se agregó 10 ml de ácido sulfosalicílico al 3%, se pasó por un papel filtro y se tomaron 2 ml del líquido para colocarlo dentro de un tubo de ensayo. A continuación se añadieron cantidades iguales de ácido acético glacial y ninhidrina ácida, es decir 2 ml de cada uno. Se taparon y se sometió a baño maría a  $100^{\circ}\text{C}$  por sesenta minutos; posteriormente, se procedió a enfriar los tubos de ensayo en agua helada. Una vez se haya bajado la temperatura, se agregó tolueno a razón de 4 ml en cada tubo y se colocó en un agitador tipo vórtex. A continuación, se logró diferenciar una separación de la mezcla en dos fases y se recogió el tolueno de la parte superior empleando una pipeta. Este fue colocado en el espectrofotómetro para la medición de la absorbancia de luz, a 520 nm. Para la calibración del blanco de referencia se empleó tolueno puro y con los datos obtenidos se obtuvieron los valores de prolina empleando una curva estándar que se elaboró con antelación.

La ninhidrina se obtuvo disolviendo 1.25 gr de ninhidrina ácida en 30 ml de ácido acético glacial y 20 ml de ácido orto fosfórico 6 M; mezclando hasta disolver y posteriormente se mantiene en refrigeración. Su utilidad se limitó a 24 horas, luego de lo cual ya no permanece estable.

#### **e. Actividad de la enzima nitrato reductasa**

La determinación de la enzima nitrato reductasa se llevó a cabo de acuerdo con la metodología de (Harper & Hageman, 1972), en el laboratorio de Fisiología Vegetal de la Facultad de Ciencias de la UNAML. Las muestras fueron tomadas de la misma forma que en la determinación de prolina libre y se utilizaron 100 mg de muestra de hoja sin nervaduras que se sometieron a molienda en un mortero. Posteriormente el tejido molido fue colocado en un vial que contenía 5 ml de solución incubadora. Estos viales fueron llevados a incubación a  $35^{\circ}\text{C}$  durante una hora en una cámara oscura, luego de lo cual se tomó una alícuota de 100  $\mu\text{l}$  y se colocó en un tubo de ensayo. Por último, se agregó 2 ml del reactivo de nitritos en cada tubo de ensayo y se completó con agua destilada hasta alcanzar un volumen de 5 ml. Posteriormente, se midió la absorbancia a 540 nm en un espectrofotómetro.

La solución incubadora fue preparada con  $\text{KNO}_3$  a 0.1 M,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  a 0.1M,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  a 0.1M, Etanol 1% y Neutronix 600 a 0.05%.

El reactivo de nitritos fue preparado con Sulfanilamida al 1% en HCl a 1.5M, N-(1-Naphtyl)- etilen diamino dihidrocloruro. Se mezclaron ambas soluciones inmediatamente antes de ser utilizadas. La cantidad de nitritos producida se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{N}^\circ \text{ de micromoles de NO}_2/\text{hora/peso fresco} = \text{D.O. (540)} \times 1/\text{alícuota} \times 1/\text{peso} \times 1/\text{tiempo} \times \text{Vol.}$$

#### **f. Contenido de Clorofila**

La clorofila en las hojas se midió usando el equipo clorofilómetro SPAD 502, Minolta. Las lecturas se tomaron en dos hojas bandera por cada unidad experimental o maceta, al finalizar el período de sequía de cada tratamiento, es decir durante cada precosecha. En cada hoja bandera se tomaron siete lecturas en diferentes zonas a lo largo de toda la hoja, buscando que las mediciones fueran lo más representativas posible de toda el área de la hoja. El SPAD 502, Minolta tomaba los promedios de las lecturas y mostraba un valor resultante. El clorofilómetro expresa las lecturas en unidades llamadas “SPAD”, que se refieren a la absorbancia de la hoja tras el paso de un haz de luz emitido por el equipo en longitudes de onda de mayor actividad de la clorofila.

Durante todo el experimento las lecturas se tomaron a los 38, 50, 59 y 70 días después de la siembra en el trigo harinero y a los 48, 65, 92 y 119 días después de la siembra en el trigo extraduro.

### **3.3.4. Evaluaciones agronómicas**

#### **a. Número de granos por espiga**

Para esta evaluación, se trillaron las espigas de las macetas separadas para la cosecha final y se hizo el conteo del número total de granos en cada espiga. En las plantas que habían desarrollado varios macollos se realizó también el conteo para el primero de sus macollos únicamente, para evitar generar variación en los resultados.

### **b. Peso de mil granos (g)**

Luego de obtener el número de granos de todas las espigas (14% de humedad) y se pesaron en una balanza de precisión (Mettler, +/- 0.0001 g) y luego se calculó el peso de 1,000 granos a partir de esos datos.

### **c. Número de espiguillas por espiga**

Se hizo el conteo del número de espiguillas totales desde la base de la espiga hasta el ápice al finalizar la floración, cuando todas las plantas habían emitido sus espigas. Una vez obtenidos todos los datos se promediaron los valores para cada maceta.

### **d. Número de flores por espiguilla**

Se realizó el conteo en todas las espigas de cada maceta cuando la planta estaba en plena floración, se contó en la parte central de la espiga y luego se promedió los valores para cada maceta.

### **e. Número de espigas por metro cuadrado**

Para la determinación de esta variable del rendimiento, se contó el número de espigas existentes dentro de cada maceta y se hizo el cálculo del área de la maceta, con los dos datos anteriores obtenidos se pudo proyectar el número de espigas que hay dentro de un metro cuadrado.

### **f. Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>)**

El rendimiento fue calculado a partir de los pesos de grano seco por maceta, con este peso total por cada maceta, y con el área de influencia de la maceta (0.03243 m<sup>2</sup>), la misma que por una relación proporcional hasta una hectárea (10,000 m<sup>2</sup>), fue determinado el rendimiento en kilogramos por hectárea (kg ha<sup>-1</sup>). En tal sentido, este cálculo representa solo una estimación preliminar del rendimiento en campo.

### **g. Biomasa seca (g)**

Durante las cosechas y precosechas se tomaron las plantas y se realizó la partición en tallos, hojas y espigas y se colocaron separadas en bolsas de papel Kraft (ver Figura 8). Estas fueron llevadas a una estufa 85°C durante 48 horas, tras lo cual se registró el peso seco. Al sumar los valores de las particiones se tiene el valor de la biomasa seca de la parte aérea producida, medida en gramos por maceta ( $\text{g maceta}^{-1}$ ).



**Figura 8. Partición de hojas y tallos en el estudio de estrés hídrico de dos especies de trigo. La Molina.**

### **h. Índice de cosecha (HI).**

Se calculó el índice de cosecha a partir de los pesos de cada una de las partes de las plantas, para establecer el valor de la biomasa total. Se calcula este índice, dividiendo el rendimiento de granos con respecto a la biomasa total, tal como muestra la siguiente ecuación:

$$HI = \frac{(Pg)}{(Pt)} \times 100$$

Dónde:

$Pg$  : Peso de grano seco.

$P_t$  : Peso total de biomasa.

### **i. Índice de susceptibilidad al estrés hídrico (SSI)**

Este variable define la susceptibilidad a la sequía en función de la disminución del valor promedio del factor evaluado, en este caso el rendimiento de grano para el tratamiento de riego suspendido con respecto al rendimiento del riego normal.

El SSI se calcula restando a la unidad, el valor obtenido de la división entre el rendimiento del tratamiento bajo sequía y el rendimiento en el riego óptimo, control o testigo. Asimismo, el valor obtenido anteriormente se divide entre: la unidad menos la división del promedio de los rendimientos en tratamiento de sequía y el promedio del tratamiento control (Fischer & Maurer, 1978). La ecuación siguiente representa dicho índice.

$$SSI = \frac{1 - \frac{Y_s}{\bar{Y}_p}}{1 - \frac{\bar{Y}_s}{\bar{Y}_p}}$$

Dónde:

SSI = Índice de susceptibilidad al estrés hídrico

$Y_s$  = Rendimiento en condiciones de estrés hídrico para un genotipo.

$Y_p$  = Rendimiento en condiciones de riego normal para un genotipo.

$\bar{Y}_p$  = Rendimiento promedio de todos los genotipos bajo estrés hídrico

$\bar{Y}_s$  = Rendimiento promedio de todos los genotipos bajo riego normal.

#### **j. Índice de tolerancia al estrés hídrico (STI)**

Para determinar este índice se evaluó el rendimiento del cultivo en el tratamiento de riego óptimo y bajo sequía. El valor del rendimiento bajo sequía se multiplica por el rendimiento del riego óptimo y el resultado se divide entre el cuadrado del rendimiento en condiciones de riego óptimo o normal, según se indica la siguiente ecuación.

$$STI = \frac{(Y_s)(Y_p)}{(Y_p)^2}$$

Dónde:

$STI$  = Índice de tolerancia a la sequía

$Y_s$  = Rendimiento del cultivo bajo condiciones del estrés hídrico.

$Y_p$  = Rendimiento del cultivo bajo condiciones de riego normal.

$Y_p^2$  = Cuadrado del promedio de rendimiento en condiciones de riego normal.

#### **k. Evapotranspiración total (mm)**

La evapotranspiración total fue calculada a partir de los pesos realizados periódicamente de las macetas, así como del agua adicional que se aplicó en cada uno de los tratamientos. Estos pesos fueron registrados en las hojas de cálculo (MS Excel 2010), donde posteriormente fueron sumados. Además, según el área de influencia de la maceta fue calculada la lámina evapotranspirada durante todo el período experimental en unidades de mm.

#### **l. Eficiencia de uso de agua (g kg<sup>-1</sup>)**

Tomando en cuenta que la eficiencia de uso de agua ( $EUA$ ) se define en función a la cantidad de biomasa vegetal producida (g) por cada kilogramo de agua evapotranspirada, es decir: g de biomasa kg<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O evapotranspirada. En este ensayo, la biomasa se determinó tomando como referencia el aumento de la biomasa seca desde el inicio del experimento hasta la

cosecha final, expresada en gramos por planta, es decir: g pta<sup>-1</sup>. Asimismo, La evapotranspiración acumulada se determinó sumando la transpiración diaria de cada maceta, para los tratamientos de riego establecidos.

La evapotranspiración diaria ( $ET_{dia}$ ) se calculó tomando en cuenta la siguiente relación de pesos de las macetas:

$$ET_{dia_{d-1}} = (Peso\_maceta\_día\_d - 1) - (Peso\_maceta\_día\_d)$$

La evapotranspiración acumulada ( $ET_{total}$ ) fue calculada a partir de la suma de las transpiraciones diarias hasta el día final N:

$$ET_{total} = ET_{dia_1} + ET_{dia_2} + ET_{dia_3} + \dots + ET_{dia_N}$$

La medición de la variable eficiencia de uso de agua se hizo en base a la biomasa total registrada en la cosecha final y la evapotranspiración total, según la siguiente ecuación:

$$EUA = \frac{BT}{ET_{total}}$$

Dónde:

$BT$  : Biomasa total del cultivo (g)

$ET_{total}$  : Evapotranspiración total del cultivo (kg de H<sub>2</sub>O)

### 3.3.5. Diseño experimental

#### a. Diseño experimental

El experimento se realizó en una casa malla, sembrándose dos variedades de trigo y cinco tratamientos de riego, las macetas fueron regadas según el esquema de la Figura 9, donde se indica en que estadios fenológicos fue iniciado el estrés hídrico. Los tratamientos de riego se llevaron a cabo de la siguiente manera:

- Riego 1, considerado testigo o control o el tratamiento sin estrés hídrico. Los riegos fueron interdiarios, de acuerdo con la evapotranspiración calculada



gravimétricamente por medio de la diferencia de pesos en las macetas, llevándolas a alcanzar la capacidad de campo en cada riego.

- Riego 2, se inició el estrés hídrico en el estadio fenológico de macollamiento o Z2.0 según la escala de Zadoks. La cantidad de agua de riego en este tratamiento fue reducida gradualmente, calculando que en 15 días se agotaba el agua disponible en una maceta, por lo cual se permitía una reducción de agua de hasta en 100 g por maceta por día.
- Riego 3, en este tratamiento el estrés hídrico se inició en el estadio fonológico de crecimiento y elongación del tallo, correspondiente a la etapa Z3.0 en la escala de Zadoks. La reducción gradual de agua en el riego inicialmente fue de hasta 100 g por maceta por día al igual que en el tratamiento de Riego 2.
- Riego 4, el estrés hídrico se inició en el estadio fonológico de floración y antesis, los cuales corresponden a las etapas Z5.0 y Z6.0 en la escala de Zadoks respectivamente. La disminución gradual del agua de riego en las macetas fue realizada siguiendo el mismo procedimiento que en los dos tratamientos anteriores, disminuyendo hasta 100 g de agua por maceta por día.
- Riego 5, en este tratamiento el estrés hídrico se inició en el estadio de desarrollo de estado acuoso y lechoso del grano, correspondiente a la etapa Z7.0 de la escala de Zadoks. La reducción de agua en el riego se hizo según la metodología de los tres tratamientos anteriores, permitiendo del mismo modo una pérdida de humedad gravimétrica de hasta 100 g por maceta por día.

**Tabla 4: Tratamientos de riego en el estudio de estrés hídrico de dos especies de trigo. La Molina**

Id	Descripción del tratamiento	Estado fenológico
Riego 1	Testigo	
Riego 2	Sequía controlada en macollamiento	3°
Riego 3	Sequía controlada en elongación del tallo	4°
Riego 4	Sequía controlada en floración y antesis	5° y 6°
Riego 5	Sequía controlada en grano acuoso y grano lechoso	7°

Se realizaron cosechas a final de cada tratamiento de riego, en 5 macetas por tratamiento sembradas para este propósito, de acuerdo con su evapotranspiración. El momento para cada precosecha fue determinada por la evapotranspiración normalizada, cuando esta llegaba al 20% con respecto al riego testigo o control. En cada cosecha se comparó variables fisiológicas del riego control y un tratamiento en cada estado fenológico correspondiente al estrés hídrico.

Para la cosecha realizada al final del período vegetativo se tuvo 10 macetas por cada tratamiento.

### **c. Análisis estadístico**

Se usó el diseño estadístico Completo al azar. La unidad experimental del experimento fue una maceta (unidades muestrales) con cinco plantas. Para las cosechas realizadas al final de cada tratamiento (C1, C2, C3 y C4), el análisis estadístico realizado fue la comparación de medias de los tratamientos (prueba de t-student), entre el tratamiento control y cada uno de los tratamientos cosechados en su momento. Para la comparación de medias en la cosecha final se realizó la prueba de comparación múltiple de Waller-Duncan.

El análisis para las variables evaluadas en la cosecha final se hizo previo cumplimiento de la normalidad y homogeneidad de varianza, antes de análisis de varianza según el siguiente modelo aditivo lineal:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

$Y_{ij}$  : Variable respuesta u observación

$\mu$  : Efecto de la media general

$\alpha_i$  : Efecto del  $i$ -ésimo nivel de tratamiento de riego

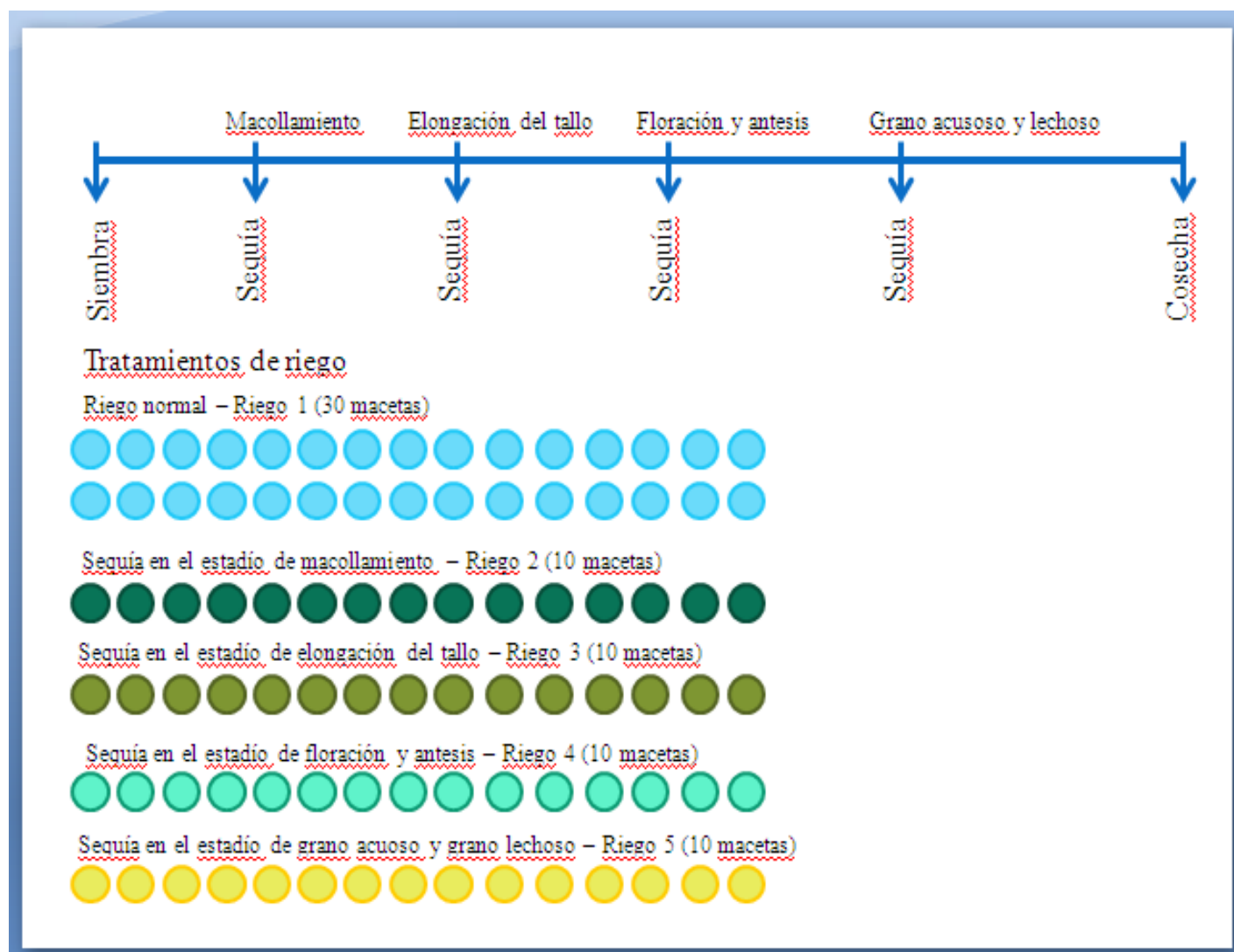
$\varepsilon_{ij}$  : Efecto del error en el  $i$ -ésimo tratamiento de riego clon y la  $j$ -ésima repetición

Además, se hizo un análisis de correlación lineal de las variables de la cosecha final, la misma que fue hecha con todas las observaciones obtenidas para saber qué tipo de relación

existe entre ellas. También se realizó un análisis de correlación lineal entre los promedios de todas las variables de las cosechas intermedias y la cosecha final, para apreciar el grado de asociación existente entre las mismas y el tipo de relación (directa o inversa).

Los programas utilizados para estos análisis fueron SAS 9.2 y GraphPad Prism 5.04 (GraphPad Software Inc., 2010).

**d. Plano de Distribución: T. harinero y T. extraduro en el estudio de estrés hídrico. La Molina**



**Figura 9. Esquema de distribución de tratamientos.**

**e. Colaborador(es) y cooperador(es)**

La presente investigación fue desarrollada por Programa de Cereales y Granos Nativos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, con la colaboración del Centro Internacional de la Papa. Este trabajo de investigación fue financiado por la Secretaría técnica de Cooperación del CGIAR (por sus siglas en inglés de la Grupo Consultivo de Cooperación) en el Perú. Además, se contó con la colaboración del Laboratorio de fisiología Vegetal de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**OBJETIVO 1.- Determinación de las características morfológicas, fisiológicas, bioquímicas y componentes de rendimiento que pudieran verse afectados por el déficit hídrico y en base a esta información identificar el estado fenológico en el cual el cultivo de trigo harinero y extraduro es más afectado por el estrés hídrico, medido en términos del rendimiento.**

### **4.1. Características morfológicas**

#### **4.1.1. Altura de la planta (cm)**

El análisis de varianza muestra diferencias significativas (Tabla 6) para la altura de la planta en trigo harinero por efecto de los tratamientos de riego y en la prueba de comparación de medias, Waller-Duncan, la variable altura de la planta en el trigo harinero fue mayor en el riego 1 (riego control) con respecto a los tratamientos de riego 2 y riego 3, mostrando diferencias estadísticas altamente significativas (ver Tabla 5). Con respecto a los tratamientos de riego 4 y riego 5 no hubo diferencias.

Los resultados evidencian una reducción en la altura de planta por efecto de los tratamientos de riego 2 (estrés hídrico en el estado de macollamiento) y riego 3 (estrés hídrico en el estado de elongación de tallo o encañado), tratamientos que todavía se encontraban en crecimiento durante el periodo de estrés hídrico.

**Tabla 5: Altura de planta (cm), de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

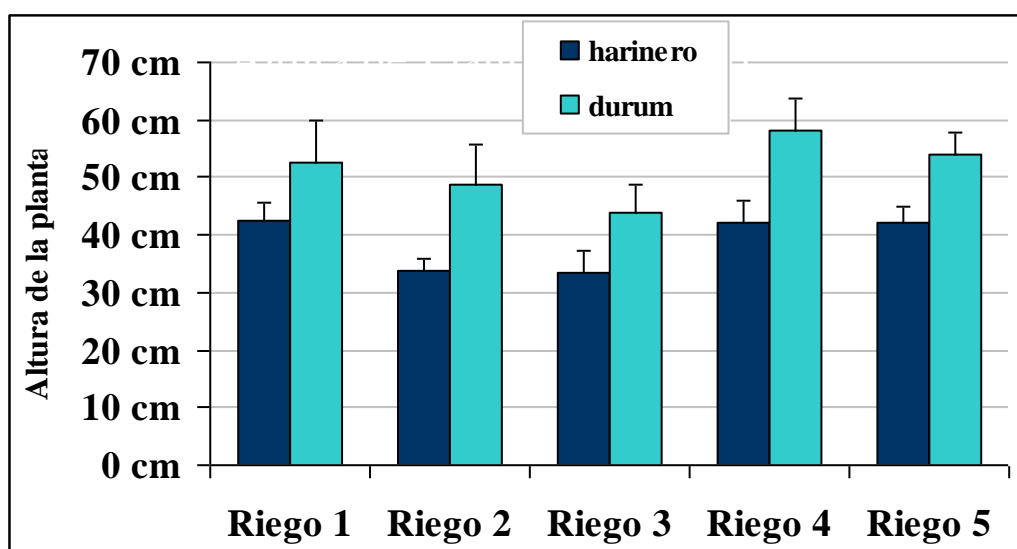
Tratamiento	Altura de planta (cm)	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	42.3 ± 3.1	7%	a
Riego 2	33.7 ± 2.3	7%	b
Riego 3	33.3 ± 4.0	12%	b
Riego 4	42.2 ± 3.7	9%	a
Riego 5	42.0 ± 2.8	7%	a

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 6: ANVA, Cuadrado Medio de altura de planta, de trigo extraduro (*Triticum Turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo”. La Molina**

	Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat. Riego		4	294.2314	<.0001
Error		45	33.5981	
Total		49		

Nota: CV: 20.19%



**Figura 10. Altura de planta (cm) de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo”. La Molina**

Resultados similares fueron hallados por (Morsy et al., 2022), quien señala un nivel de competencia por el crecimiento entre el tallo y la espiga bajo condiciones limitantes. La planta tiende a reaccionar con un acortamiento de los entrenudos superiores para disponer de más compuestos orgánicos y utilizarlos en la diferenciación de flores o el llenado de granos.

En general, la altura de la planta se ve afectada por la falta de agua, que retarda el crecimiento por la expansión celular, este hallazgo es consistente con lo que expresan (Gao et al., 2020).

#### **4.1.2. Longitud de la Espiga (cm)**

En el caso de la variable longitud de espiga, el análisis de variancia mostró diferencias estadísticas significativas por efecto de los tratamientos de riego, en el trigo harinero (Tabla 8). Asimismo, la prueba de comparación de medias (Waller-Duncan) para esta variable (

Tabla 7), mostró que existen diferencias estadísticamente significativas entre el riego control (riego 1) y los tratamientos de riego 2, riego 3 y riego 4 (estrés hídrico durante el macollamiento, encañado y floración y antesis respectivamente). En tal sentido, se aprecia que el estrés hídrico afecta a la longitud de la espiga en los estadios iniciales e intermedios del desarrollo fenológico como: el macollamiento (riego 2), el encañado (riego 3) y la floración y antesis (riego 4). Esta reducción del tamaño de la espiga puede estar explicada porque en el estado de macollamiento se inicia el desarrollo de la espiga con la iniciación floral del ápice vegetativo (cambio al estado de doble arruga) y posteriormente esta se va desarrollando durante la elongación del tallo sobre el último nudo (Arifuzzaman et al., 2020; Itam et al., 2020).

**Tabla 7: Longitud de la espiga (cm), trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo”. La Molina**

Tratamiento	Longitud de la espiga (cm)	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	8.7 ± 0.5	5%	a
Riego 2	7.6 ± 0.9	12%	c
Riego 3	7.7 ± 0.6	8%	c
Riego 4	8.1 ± 0.6	8%	b c
Riego 5	8.6 ± 0.4	5%	a b

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 8: ANVA, Longitud de la espiga, trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo”. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.			
Riego	4	2.4546	0.0004
Error	45	0.3908	
Total	49		

Nota: CV: 7.66%

La longitud de la espiga también presenta diferencias altamente significativas como consecuencia de los tratamientos de riego en la especie de trigo durum (Tabla 10). En la prueba de comparación de medias (Waller-Duncan) se muestran diferencias estadísticas entre el tratamiento de riego 1 con respecto a los tratamientos de riego 3 y riego 2 (Tabla 9). A diferencia del trigo harinero en esta especie no se ve ningún efecto cuando la sequía ocurre durante la floración y antesis, quizá porque los períodos fenológicos son más prolongados y al entrar en la floración ya la espiga alcanzó todo su desarrollo. Los datos indican una reducción significativa durante el macollamiento (riego 2) pero esa diferencia es mayor



cuando el estrés hídrico afecta el estado de elongación del tallo (riego 3), período donde ocurre casi todo el crecimiento y desarrollo de la espiga.

**Tabla 9: Longitud de la espiga (cm), trigo de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo”.**

**La Molina**

Tratamiento	Longitud de la espiga (cm)	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	7.3 ± 0.9	12%	a
Riego 2	6.4 ± 0.9	14%	b c
Riego 3	5.9 ± 0.8	14%	c
Riego 4	7.6 ± 0.9	12%	a
Riego 5	7.1 ± 0.8	11%	a b

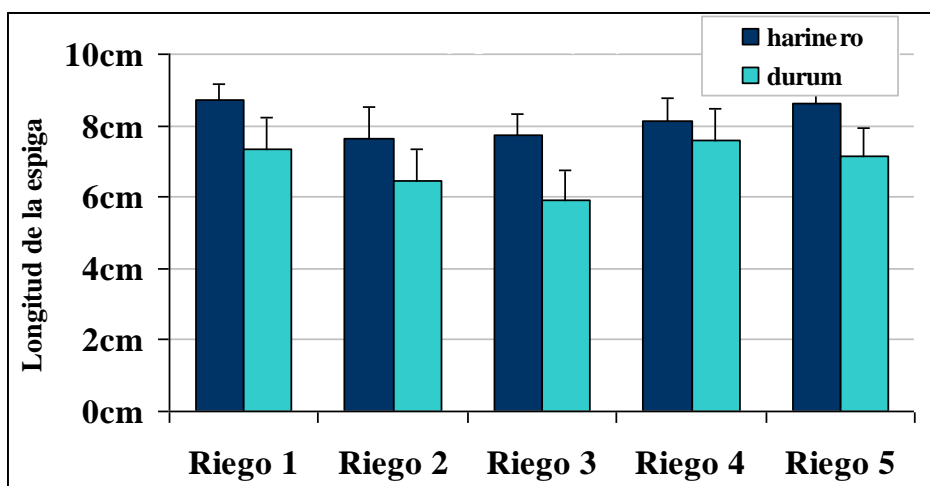
Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 10: ANVA, Longitud de la espiga, de trigo extraduro (*Triticum Turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo”. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.			
Riego	4	4.7280	0.0004
Error	45	0.7532	
Total	49		

Nota: CV: 12.61%

Por lo tanto, la longitud de la espiga disminuye su crecimiento como consecuencia del estrés hídrico, debido a que el crecimiento de la planta se retarda y se expresa en un menor tamaño de diversos órganos, como lo mencionan (Martínez, Ledent, Bajji, Kinet, & Lutts, 2003). Sin embargo, el efecto en trigo durum fue menos pronunciado en todos los casos (Figura 11).



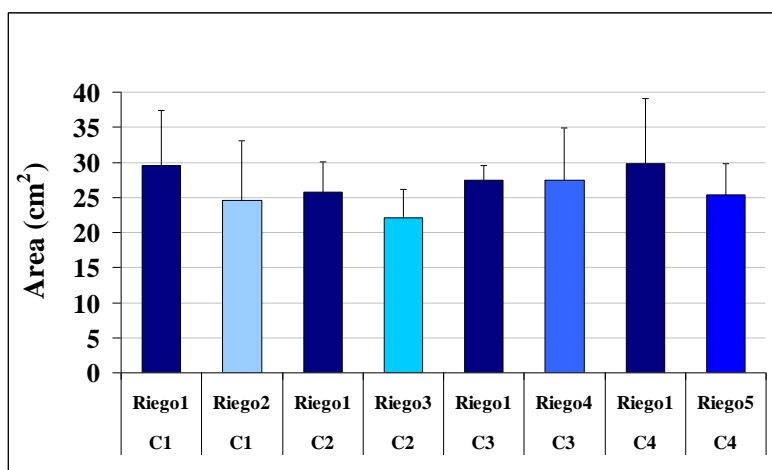
**Figura 11. Longitud de la espiga (cm), trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo- Cosecha Final. La Molina**

#### **4.1.3. Área de la hoja bandera (cm<sup>2</sup>)**

En la prueba de comparación de medias realizada (prueba de t), para las cuatro precosechas (C1, C2, C3, C4), entre el tratamiento de riego control (Riego 1) y los demás tratamientos (Riego 2, Riego 3, Riego 4, Riego 5), el área de la hoja bandera no mostró diferencias estadísticas significativas para el trigo harinero (Tabla 11 y Figura 12). Sin embargo, en el riego control se observó una mayor área en las hojas bandera, debido posiblemente a la ausencia de estrés hídrico en dicho tratamiento. Por otro lado, la falta de diferencias estadísticas para esta variable explica que posiblemente los tratamientos de riego no tienen un efecto significativo en la reducción del área de la hoja bandera.

**Tabla 11: Área de la hoja bandera (cm<sup>2</sup>), de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo- Cosecha Final. La Molina**

Tratamiento	Área hoja bandera (cm <sup>2</sup> )	CV	t-test (P <sub>value</sub> )
Riego1	29.5 +/- 7.9	27%	0.3699 ns
Riego2	24.6 +/- 8.5	35%	
Riego1	25.8 +/- 4.3	17%	0.2099 ns
Riego3	22.2 +/- 4.0	18%	
Riego1	27.5 +/- 2.1	8%	0.9948 ns
Riego4	27.5 +/- 7.5	27%	
Riego1	29.8 +/- 9.3	31%	0.3647 ns
Riego5	25.4 +/- 4.3	17%	



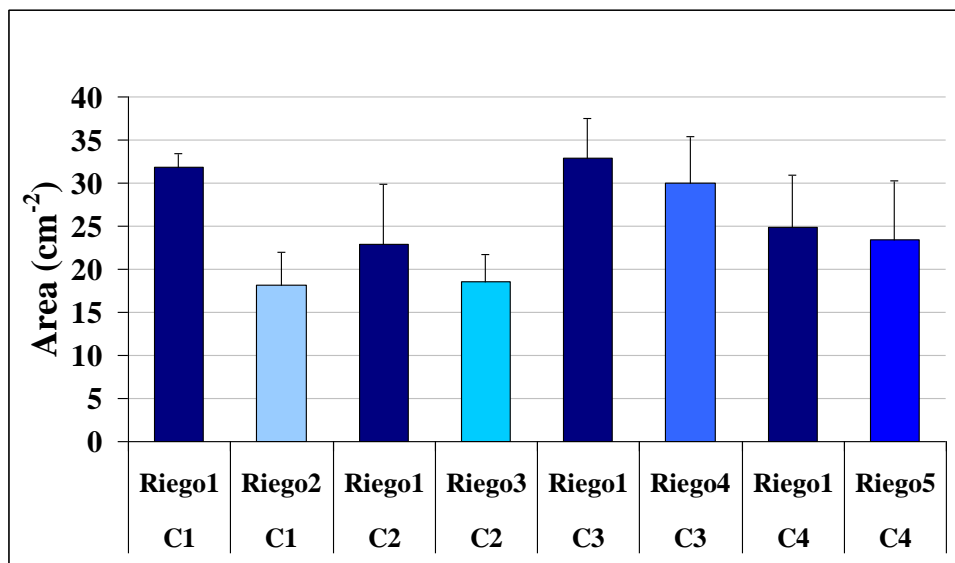
**Figura 12. Área de la hoja bandera (cm<sup>2</sup>), de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Para el trigo durum (Tabla 12 y Figura 13), la prueba de comparación de medias (prueba de t) del área de la hoja bandera muestra diferencias altamente significativas entre los tratamientos de riego 1 y riego 2 en la primera cosecha (C1), en los demás casos no hay diferencias significativas. En general, podemos decir que la variable área de la hoja bandera, no cambia significativamente por efecto de los tratamientos de limitación de riego, en ambas especies, salvo en un estadio temprano (macollamiento).

**Tabla 12: Área de la hoja bandera (cm<sup>2</sup>), de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo.**

**La Molina**

Cosecha	Tratamiento	Área de la hoja bandera (cm <sup>2</sup> )	CV	t-test (P <sub>value</sub> )	
C1	Riego1	31.9 ± 1.5	5%	0.0001	**
C1	Riego2	18.2 ± 3.8	21%		
C2	Riego1	22.8 ± 7.1	31%	0.2570	ns
C2	Riego3	18.6 ± 3.1	17%		
C3	Riego1	32.9 ± 4.6	14%	0.3941	ns
C3	Riego4	30.0 ± 5.4	18%		
C4	Riego1	24.9 ± 9.3	31%	0.3647	ns
C4	Riego5	23.5 ± 4.3	17%		



**Figura 13. Área de la hoja bandera (cm<sup>2</sup>), de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo.**

**La Molina.**

En el presente experimento, el área de la hoja bandera se vio afectada por la sequía debido a que el agua ejerce una presión sobre la membrana de las células, la cual está asociada a la expansión y división celular tal como lo menciona (Salisbury & Ross, 2000), debido a ello

y según los resultados encontrados, se confirma el enunciado de (Z. Chen et al., 2022; Golparvar, 2013) sobre una disminución en la división celular y el desarrollo del tejido foliar por efecto de la sequía.

#### 4.1.4. Biomasa seca (g)

El análisis de variancia para la variable peso seco de la biomasa en el trigo harinero indica que existen diferencias altamente significativas a casusa de los tratamientos de riego aplicados (Tabla 14). Asimismo, en la prueba de Waller-Duncan, se halló diferencias estadísticas significativas entre el tratamiento de riego 1 (riego control) con respecto a todos los demás tratamientos de riego (Tabla 13). Los tratamientos de estrés hídrico redujeron la formación de la biomasa en la variedad Centenario de trigo harinero en todos los estadios de desarrollo evaluados, comparados con el tratamiento de riego control. Esta respuesta muestra que la variedad Centenario se verá afectada por el estrés de sequía en todos los estadios de desarrollo estudiados en la presente investigación. Los menores pesos de biomasa en trigo harinero se producen en el tratamiento de riego 2 (estado de macollamiento) y riego 3 (estado de elongación de tallo).

**Tabla 13: Peso seco de la biomasa (g), trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Tratamiento	Peso seco de la biomasa (g)	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	9.2 ± 1.5	16%	a
Riego 2	3.3 ± 0.5	16%	d
Riego 3	3.3 ± 0.6	18%	d
Riego 4	5.0 ± 0.8	17%	c
Riego 5	6.1 ± 1.6	27%	b

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 14: ANVA, Peso seco de la biomasa, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.	4	58.7631	<.0001
Riego			
Error	45	1.2266	
Total	49		

Nota: CV: 20.62%

En trigo durum el análisis de variancia para el peso seco de la biomasa indica que existen diferencias significativas debido a los tratamientos de riego (Tabla 16).

En el trigo durum mutante Taray, la prueba estadística de comparación de medias o Waller-Duncan (Tabla 15) muestra diferencias significativas para la producción de biomasa seca entre el tratamiento de riego 1 y el riego 3. Esta reducción de la biomasa por efecto del estrés hídrico en el momento de la elongación del tallo (riego 3) muestra un nivel de susceptibilidad más alto en dicho estadio, mientras en los demás tratamientos posiblemente exista cierto nivel de tolerancia; si lo comparamos con los resultados observados con la variedad Centenario de trigo harinero.

**Tabla 15: Peso seco de la biomasa (g), trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Tratamiento	Peso seco de la biomasa (g)	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	12.6 ± 3.7	29%	a
Riego 2	10.2 ± 3.3	33%	a b
Riego 3	8.2 ± 2.8	34%	b
Riego 4	10.6 ± 3.0	28%	a b
Riego 5	12.9 ± 6.8	29%	a

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

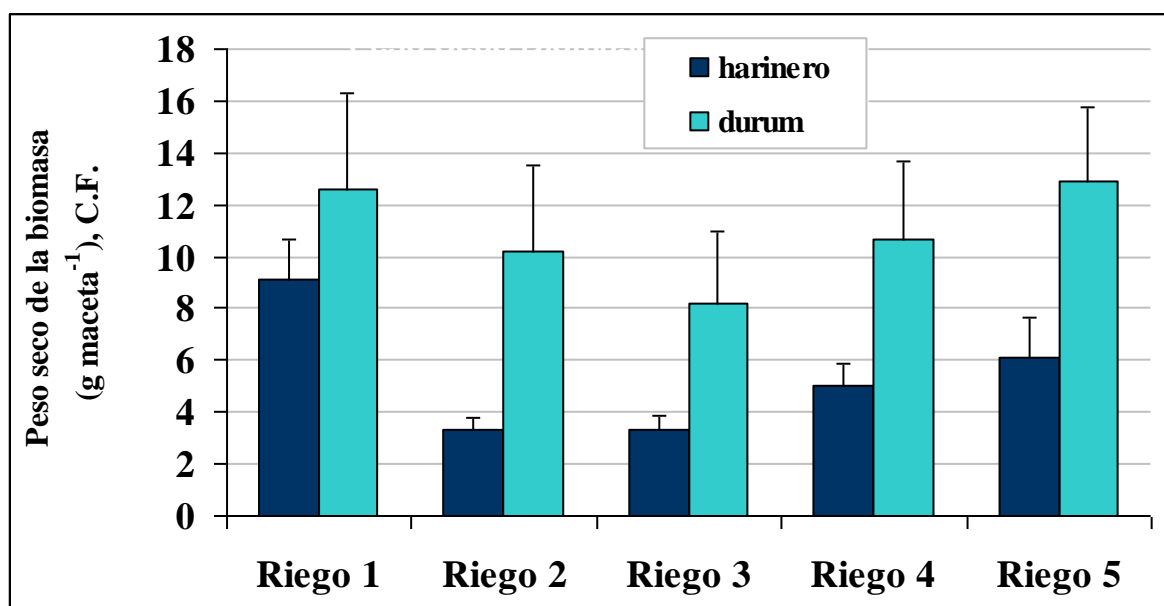
**Tabla 16: ANVA, Peso seco de la biomasa, de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo.**

**La Molina**

<b>Fv</b>	<b>GL</b>	<b>Cuadrados Medios</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Trat.			
Riego	4	36.7590	0.0114
Error	45	10.0154	
Total	49		

Nota: CV: 29.02%

La reducción de la biomasa por efecto del estrés hídrico fue mayor en el trigo harinero, a diferencia del trigo durum (Figura 14). Este último presenta mayores niveles de biomasa, pero menores diferencias entre los niveles de riego. En general se muestra una disminución de la biomasa por efecto de los tratamientos de estrés hídrico, esto confirma lo encontrado por (X. Chen et al., 2021; Mathew et al., 2019).



**Figura 14.** Peso de la biomasa seca ( $\text{g maceta}^{-1}$ ) de trigo harinero (*Triticum aestivum* s *sp aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s *sp durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo.

## 4.2. Características fisiológicas

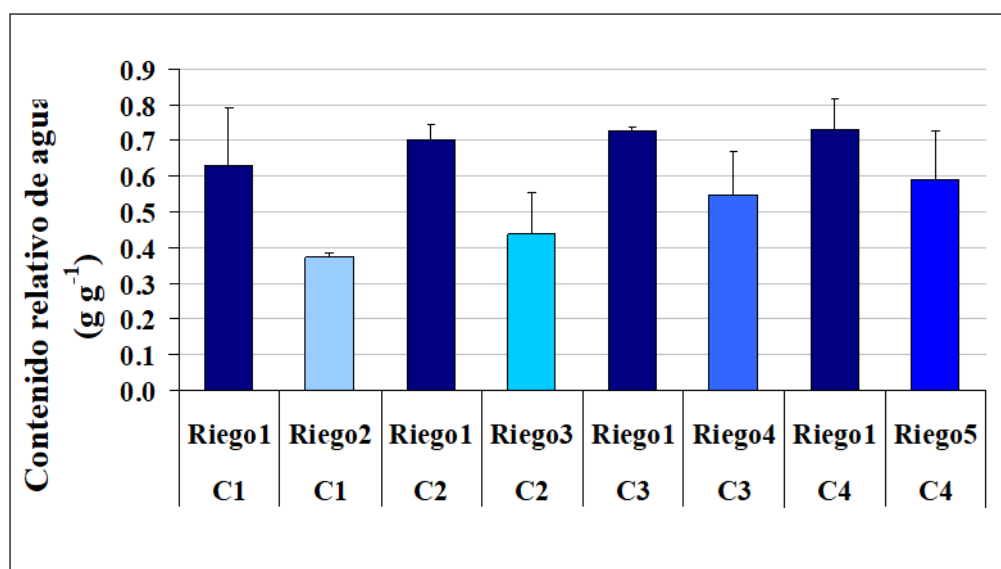
### 4.2.1. Contenido Relativo de Agua ( $\text{g g}^{-1}$ )

En la especie de trigo harinero, la prueba estadística de comparación de medias (prueba de t) para la variable contenido relativo de agua en la planta (Tabla 17 y Figura 15), muestra que el tratamiento R1 (riego 1) presentó un contenido relativo de agua superior al de los tratamientos de riego 2, riego 3 y riego 4. Hubo diferencias altamente significativas para el caso de riego 2 y 3, y significativas para el caso de riego 4, en cada uno de los momentos de cosecha realizados: C1, C2 y C3 respectivamente. Estas diferencias en el contenido relativo de agua tuvieron un mayor efecto durante estadios tempranos e intermedios de desarrollo (el macollamiento: riego 2; el encañado: riego 3; la floración y anthesis: riego 4). Esta variable es una medida relativa del estado de turgencia de la hoja, y estas se mantienen más turgentes cuando son jóvenes en comparación con las de mayor edad, por lo tanto, el efecto de un estrés hídrico es más notorio en estas hojas turgentes. Cuando la planta ya ha alcanzado la madurez completa como en el riego 5 (estrés hídrico en estadio de grano lechoso y acuoso) la turgencia de la hoja con riego normal fue menor y no mostró mucha diferencia con respecto a las hojas sometidas al tratamiento de estrés hídrico, debido al estado de senescencia general de las hojas en este estadio de desarrollo.



**Tabla 17: Contenido relativo de agua ( $\text{g g}^{-1}$ ), trigo harinero de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Cosecha	Tratamiento	Contenido relativo de agua ( $\text{g g}^{-1}$ )	CV	t-test ( $P_{\text{value}}$ )
C1	Riego1	0.63 +/- 0.16	26%	0.0071 **
C1	Riego2	0.37 +/- 0.02	4%	
C2	Riego1	0.70 +/- 0.04	6%	0.0014 **
C2	Riego3	0.44 +/- 0.11	26%	
C3	Riego1	0.73 +/- 0.01	1%	0.0121 *
C3	Riego4	0.55 +/- 0.12	22%	
C4	Riego1	0.73 +/- 0.09	12%	0.0888 ns
C4	Riego5	0.59 +/- 0.14	23%	



**Figura 15. Contenido relativo de agua, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

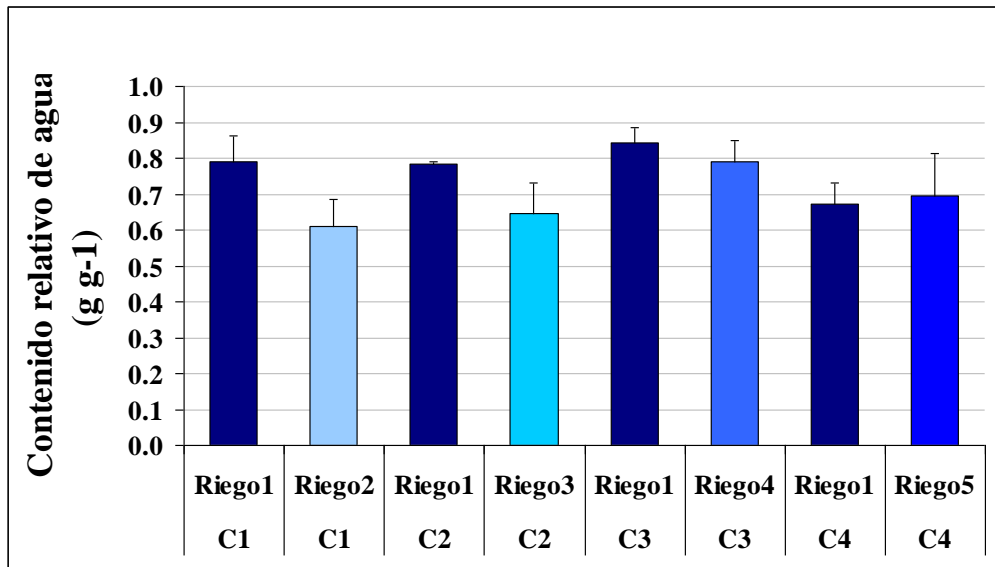
La prueba estadística de comparación de medias en el caso trigo durum para el contenido relativo de agua (Tabla 18 y Figura 16), muestra que el mayor valor corresponde al tratamiento de riego control (riego 1) comparado a los tratamientos de riego 2 y riego 3, observándose diferencias altamente significativas. Sin embargo, no hubo diferencias significativas con respecto a los tratamientos de riego 4 y riego 5. Se muestra una reducción en el contenido relativo de agua debido a los tratamientos de estrés hídrico en el trigo durum, en los estadios de macollamiento (riego 2) y el encañado (riego 3) y no, en el estadio de

floración y antesis (riego 4) o en el estadio de grano lechoso y acuoso (riego 5). Aparentemente, la variedad de trigo harinero estudiada en el presente experimento fue más afectada por la sequía que el genotipo mutante de trigo durum, para esta característica; pues se vio afectada en al menos tres de los cuatro estadios de sequía evaluados, mostrando diferencias desde la etapa de la floración y antesis.

**Tabla 18: Contenido relativo de agua ( $\text{g g}^{-1}$ ), de trigo durum (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo.**

**La Molina**

Cosecha	Tratamiento	Contenido relativo de agua ( $\text{g g}^{-1}$ )	CV	t-test ( $P_{\text{value}}$ )
C1	Riego1	0.79 +/- 0.07	9%	0.0052 **
C1	Riego2	0.61 +/- 0.07	12%	
C2	Riego1	0.78 +/- 0.01	1%	0.0073 **
C2	Riego3	0.65 +/- 0.08	13%	
C3	Riego1	0.84 +/- 0.05	5%	0.1555 ns
C3	Riego4	0.79 +/- 0.06	7%	
C4	Riego1	0.67 +/- 0.06	9%	0.7052 ns
C4	Riego5	0.69 +/- 0.12	17%	



**Figura 16. Contenido relativo de agua, de trigo durum (*Triticum turgidum s sp durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina 2010**

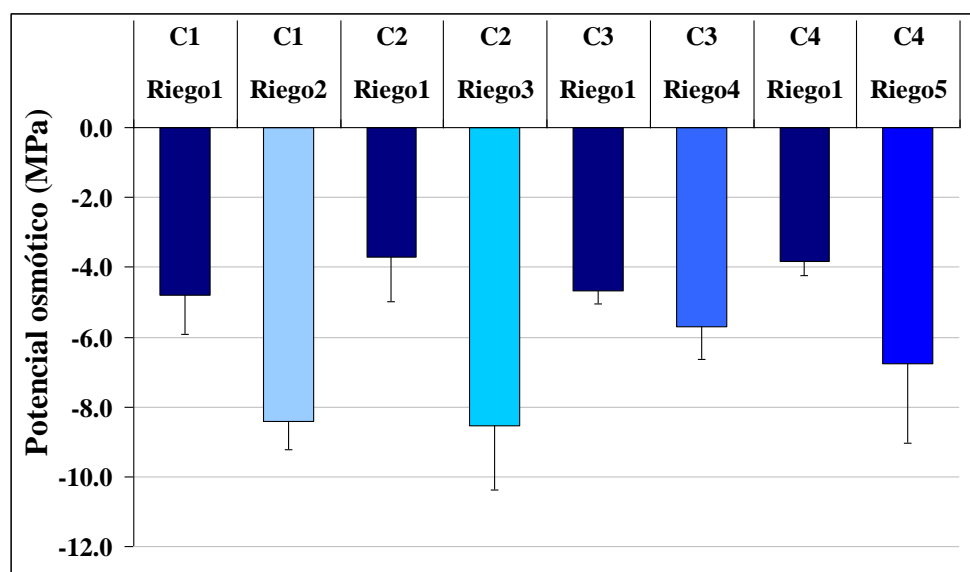
(Altaf, 2021; Gholamin & Khayatnezhad, 2020; Wasaya et al., 2021), sugieren que el contenido relativo de agua representa una variable fisiológica adecuada en la selección de genotipos tolerantes a la sequía en trigo, identificando aquellos tolerantes o susceptibles.

#### 4.2.2. Potencial osmótico (MPa)

En la variable potencial osmótico para el trigo harinero, la prueba de comparación de medias, o prueba de t, mostró diferencias altamente significativas entre el tratamiento de riego 1 y los tratamientos de riego 2 y riego 3 (inicio de estrés hídrico durante el macollamiento y encañado, respectivamente) en cada una de las cosechas realizadas (C1, C2, C3 y C4). Además, existen diferencias significativas entre el riego 1 y los tratamientos de riego 4 y riego 5 (inicio de estrés hídrico durante la floración y antesis y estado acuoso y lechoso del grano respectivamente) – (Tabla 19 y Figura 17) -. En todos los estados de desarrollo evaluados se muestran diferencias estadísticas significativas con respecto al riego 1 o control, por lo que se estima que el potencial osmótico puede ser un buen indicador de los efectos del estrés hídrico en el trigo harinero.

**Tabla 19: Potencial osmótico (MPa), de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Cosecha	Tratamiento	Potencial osmótico (MPa)	CV	t-test (P <sub>value</sub> )
C1	Riego1	-4.79 +/- 1.15	-24%	0.0004 **
C1	Riego2	-8.41 +/- 0.81	-10%	
C2	Riego1	-3.72 +/- 1.27	-34%	0.0013 **
C2	Riego3	-8.53 +/- 1.84	-22%	
C3	Riego1	-4.67 +/- 0.37	-8%	0.0473 *
C3	Riego4	-5.71 +/- 0.92	-16%	
C4	Riego1	-3.83 +/- 0.41	-11%	0.0226 *
C4	Riego5	-6.76 +/- 2.29	-34%	



**Figura 17. Potencial osmótico (MPa), de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

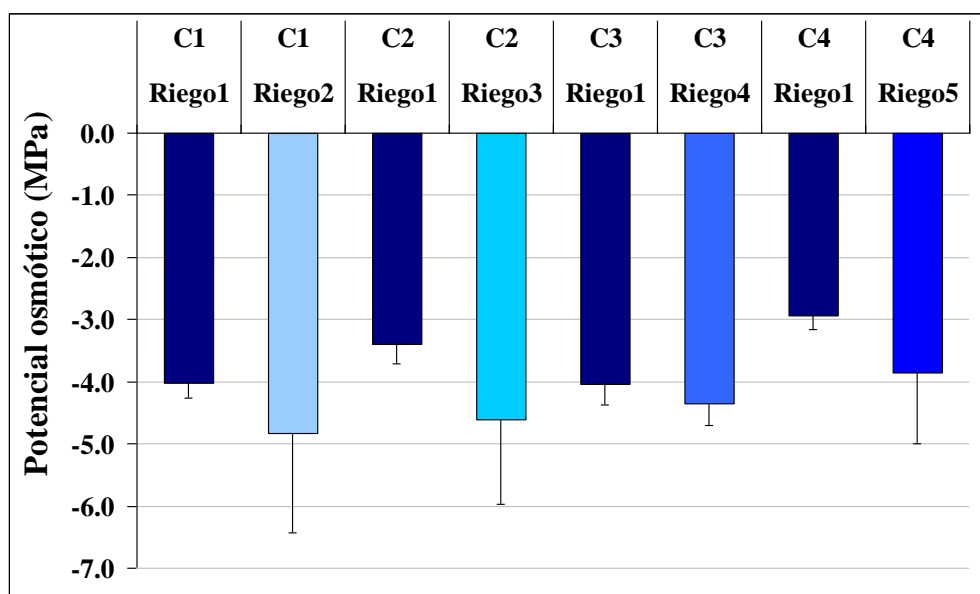
En la prueba de comparación de medias (prueba de t), la variable potencial osmótico no mostró diferencias estadísticas significativas a causa de los tratamientos de riego aplicados en ninguno de los estadios de desarrollo evaluados en la especie de trigo durum. Sin embargo, los tratamientos de sequía mostraron valores más negativos de su potencial

osmótico con respecto al control, en cada una de las precosechas realizadas (Tabla 20 y Figura 18).

**Tabla 20: Potencial osmótico (MPa), de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo.**

**La Molina**

Cosecha	Tratamiento	Potencial osmótico (MPa)	CV	t-test (P <sub>value</sub> )
C1	Riego1	-4.03 +/- 0.23	-6%	0.2913 ns
C1	Riego2	-4.84 +/- 1.59	-33%	
C2	Riego1	-3.40 +/- 0.31	-9%	0.0887 ns
C2	Riego3	-4.61 +/- 1.36	-30%	
C3	Riego1	-4.04 +/- 0.33	-8%	0.1735 ns
C3	Riego4	-4.36 +/- 0.35	-8%	
C4	Riego1	-2.93 +/- 0.23	-8%	0.1071 ns
C4	Riego5	-3.87 +/- 1.13	-29%	



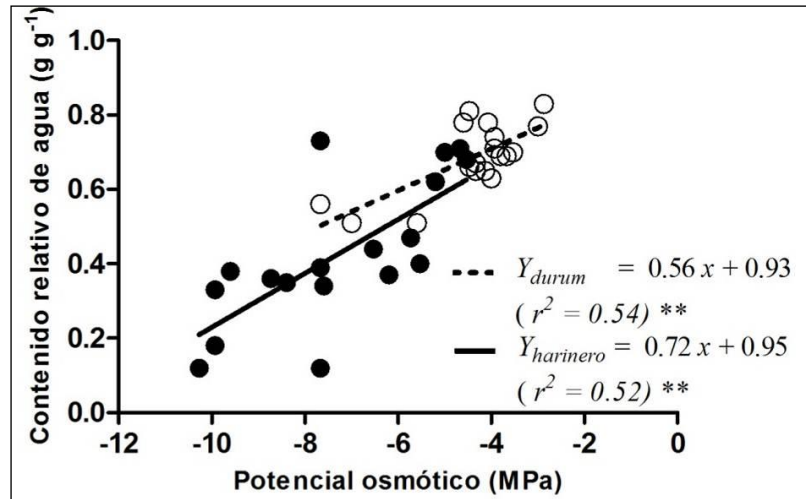
**Figura 18. Potencial osmótico (MPa), de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo.**  
**La Molina**

El trigo harinero mostró mayor variación en el potencial osmótico en respuesta a los tratamientos de sequía comparados al riego 1 o control, siendo mayor esta variación cuando la sequía se inicia en el período del encañado, expresado en una mayor acumulación de osmolitos a diferencia del trigo durum, donde no se observa diferencias estadísticas significativas en el potencial osmótico. Estos resultados pueden atribuirse a una mayor capacidad de sobrevivencia del trigo harinero sobre el durum, sin embargo esta respuesta debe ser considerada, además, con información del estado de turgencia al que llega con ese potencial osmótico, como recomienda (Morgan, 1992, 1995). Asimismo, (Bartlett et al., 2014; Mart, Veneklaas, & Bramley, 2016; Serraj & Sinclair, 2002) señalan que este mecanismo fisiológico no muestra un beneficio consistente sobre el rendimiento del cultivo.

#### **4.2.3. Ajuste osmótico**

El ajuste osmótico fue medido para cada uno de los genotipos de las especies de trigo evaluadas según la metodología propuesta por (Morgan, 1983, 1995). Los resultados muestran que el trigo harinero con una pendiente= 0.72, es decir con un menor ajuste osmótico; mientras que el trigo durum con una pendiente= 0.56, con un mayor ajuste osmótico (Figura 19). Al reducirse el contenido relativo de agua (o el estado de turgencia relativa) en una unidad, el potencial osmótico resulta ser más negativo en el trigo durum que

en el trigo harinero. Ese mayor ajuste osmótico del trigo durum esta generalmente relacionado con la capacidad que tiene la planta para tolerar condiciones de estrés y también para recuperarse del mismo.



**Figura 19. Ajuste osmótico de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

De acuerdo con los resultados y con lo que sugiere (Mahmood et al., 2020; Verbeke, Padilla-Díaz, Haesaert, & Steppe, 2022), esta metodología resultó útil para identificar genotipos con el mecanismo de alto o bajo ajuste osmótico, y puede ser útil para seleccionar genotipos o líneas tolerantes a sequía.

#### 4.2.4. Contenido de clorofila (SPAD)

En el Tabla 21 y la Figura 26 se presenta la prueba de comparación de medias (prueba de t) de la variable contenido de clorofila, expresado en unidades SPAD. Los valores corresponden a los 38 días después de la siembra, o primera precosecha, para trigo harinero y se puede apreciar que el valor fue mayor en el tratamiento de riego 1 (riego normal o control) respecto al tratamiento de riego 2 (inicio del estrés hídrico en el macollamiento), habiendo diferencias estadísticas altamente significativas entre estos resultados, esto muestra que el efecto del estrés hídrico cuando se inicia en el estado de macollamiento afecta el contenido de clorofila.

En la segunda precosecha, a los 50 días después de la siembra, la comparación de medias para esta misma variable en el trigo harinero muestra un mayor valor en el tratamiento de

riego 1 (control) en comparación a los tratamientos de: riego 2 (inicio del estrés hídrico al macollamiento) y riego 3 (inicio del estrés hídrico al encañado). Las diferencias estadísticas fueron significativas y altamente significativas, respectivamente (Tabla 21 y la Figura 21). Nuevamente se observa que el estrés hídrico en ambos tratamientos afectó el contenido de clorofila en la hoja bandera.

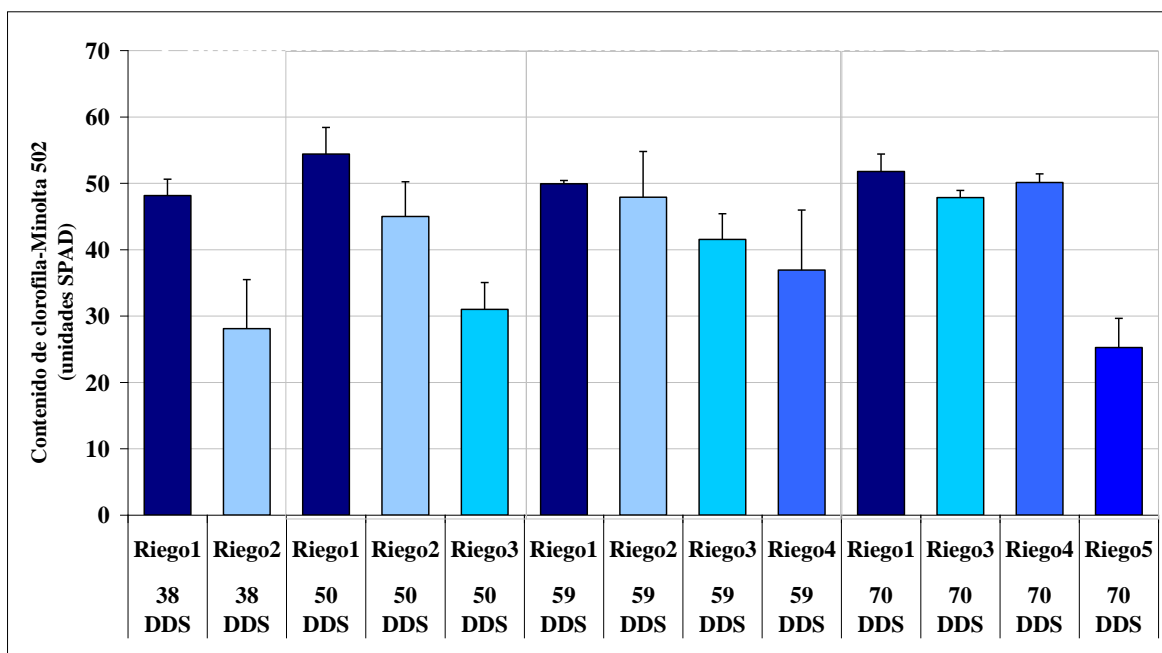
A los 59 días luego de la siembra (tercera precosecha), la prueba estadística de comparación de medias para el contenido de clorofila (SPAD) de trigo harinero, mostró que el tratamiento de riego control (riego 1) alcanzó un valor mayor a los tratamientos de riego 3 y riego 4 (inicio del estrés hídrico durante el encañado, la floración-espigado respectivamente), existiendo diferencias estadísticas altamente significativas en ambos casos. Sin embargo, no existen diferencias estadísticas en el contenido de clorofila (SPAD) con respecto al tratamiento del riego 2 (inicio del estrés hídrico en el macollamiento) y el riego 1 (control), debido probablemente a que las plantas para esta etapa del cultivo restablecieron su contenido de clorofila; al desaparecer el estrés hídrico por el riego normal conferido en los otros estadios posteriores del cultivo (Tabla 21 y la Figura 21).

A los 70 días después de la siembra (cuarta precosecha), la prueba estadística de comparación de medias para la variable contenido de clorofila (SPAD) en trigo harinero (Tabla 21 y la Figura 20), mostró que este valor fue mayor en el riego 1 (control) que en el tratamiento de riego 5 (inicio del estrés hídrico durante el estado de grano acuoso y lechoso), existiendo diferencias estadísticas altamente significativas. Asimismo, el contenido de clorofila (SPAD) en el riego control fue mayor con respecto al tratamiento de riego 3 (inicio del estrés hídrico durante el encañado), habiendo diferencias estadísticas significativas. A diferencia de los tratamientos de anteriores, el riego 4 no muestra diferencias estadísticas con el control. En el riego 3 se apreció que el contenido de clorofila no alcanzó los valores del tratamiento sin estrés hídrico, a pesar del tiempo transcurrido desde que volvió a ser regada con normalidad, probablemente esa respuesta sea un indicador de la susceptibilidad al estrés hídrico en el estadio fenológico de encañado en la variedad Centenario de trigo harinero estudiado en este experimento.



**Tabla 21: Contenido de clorofila (SPAD), de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés por estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fechas	Tratamiento	SPAD	CV	t-test (P <sub>value</sub> )	
38 DDS	Riego1	48.2 +/-2.5	5%		
38 DDS	Riego2	28.1 +/-7.4	26%	0.0001	**
50 DDS	Riego1	54.4 +/-4.0	7%		
50 DDS	Riego2	45.0 +/-5.2	12%	0.0289	*
50 DDS	Riego3	31.0 +/-4.0	13%	0.0001	**
59 DDS	Riego1	49.9 +/-0.5	1%		
59 DDS	Riego2	47.9 +/-6.9	14%	0.4889	ns
59 DDS	Riego3	41.5 +/-3.9	9%	0.0005	**
59 DDS	Riego4	36.9 +/-9.1	25%	0.0062	**
70 DDS	Riego1	51.8 +/-2.6	5%		
70 DDS	Riego3	47.9 +/-1.1	2%	0.0129	*
70 DDS	Riego4	50.1 +/-1.3	3%	0.2379	ns
70 DDS	Riego5	25.3 +/-4.4	17%	0.0000	**



**Figura 20. Contenido de clorofila, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Por otro lado, en la prueba de t o prueba estadística de comparación de medias para la variable contenido de clorofila (SPAD), en la primera precosecha, a los 48 días después de la siembra en el trigo durum muestra que el valor en el tratamiento de riego 1 (control) es mayor que en el tratamiento de riego 2 (inicio de estrés hídrico en macollamiento), observándose diferencias estadísticas altamente significativas (Tabla 22 y Figura 22).

A los 65 días después de la siembra (segunda precosecha), para trigo durum, el contenido de la clorofila (SPAD) fue mayor en el riego control (riego 1) que en los tratamientos de riego 2 y riego 3 (correspondientes al estrés hídrico en los estadios de macollamiento y encañado respectivamente), existiendo diferencias estadísticas altamente significativas entre estos tratamientos (Tabla 22 y Figura 22).

A los 92 días después de la siembra (tercera precosecha), en trigo durum, el contenido de la clorofila (SPAD) fue mayor en el riego control (riego 1) que en los tratamientos de riego 3 (inicio del estrés hídrico durante el estado de encañado) y riego 4 (inicio del estrés hídrico durante el estado de floración y antesis), habiendo diferencias estadísticas significativas y altamente significativas, respectivamente (Tabla 22 y Figura 21). Además, no existieron diferencias estadísticas entre el tratamiento de riego 1 (control) y el riego 2 (estrés hídrico al

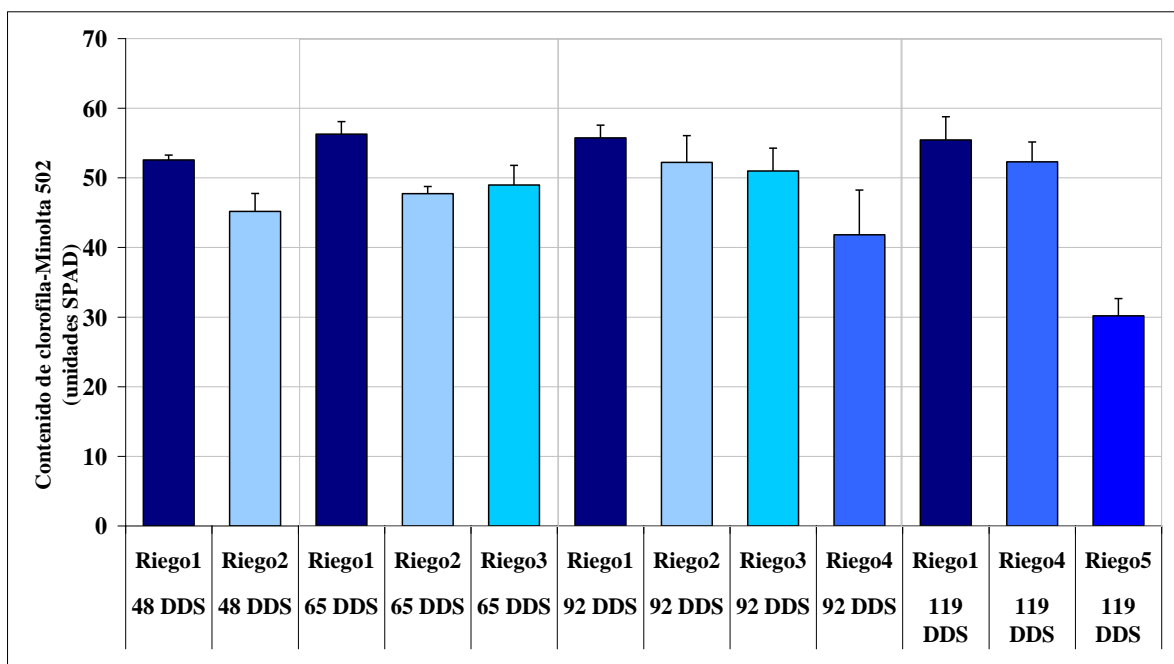
estado de macollamiento). En esta fase se observó una recuperación del contenido de clorofila, a diferencia del trigo harinero que se recuperó antes; en este estudio.

A los 119 días después de la siembra (cuarta precosecha), el contenido de la clorofila (SPAD) para el trigo durum fue mayor en el riego control (riego 1) que en el tratamiento de riego 5 (inicio de estrés hídrico en el estado de grano acuoso y lechoso), siendo las diferencias estadísticas altamente significativas en las comparaciones de los valores medios. Se observa también que el tratamiento de riego 4 restableció rápidamente su contenido de clorofila luego de volver a ser regado normalmente, no se observó diferencias estadísticas respecto al riego control.

**Tabla 22: Contenido de clorofila (SPAD), de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo.**

**La Molina**

Fechas	Tratamiento	SPAD	CV	t-test (P <sub>value</sub> )	
48 DDS	Riego1	52.6 +/- 0.7	1%		
48 DDS	Riego2	45.2 +/- 2.6	6%	0.0003	**
65 DDS	Riego1	56.3 +/- 1.8	3%		
65 DDS	Riego2	47.7 +/- 1.0	2%	0.0000	**
65 DDS	Riego3	49.0 +/- 2.8	6%	0.0008	**
92 DDS	Riego1	55.7 +/- 1.8	3%		
92 DDS	Riego2	52.2 +/- 3.8	7%	0.1029	ns
92 DDS	Riego3	51.0 +/- 3.3	6%	0.0223	*
92 DDS	Riego4	41.8 +/- 6.4	15%	0.0009	**
119 DDS	Riego1	55.4 +/- 3.3	6%		
119 DDS	Riego4	52.3 +/- 2.8	5%	0.1328	ns
119 DDS	Riego5	30.2 +/- 2.4	8%	0.0000	**



**Figura 21. Contenido de clorofila (unidades SPAD), de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

El general, se puede afirmar que la variable de contenido de clorofila, obtenido con el clorofilómetro SPAD 502 Minolta, mostró una disminución por efecto del estrés hídrico en todos los casos. Una vez retirado el estrés hídrico, logro recuperarse en los tratamientos de riego 2 y riego 4 en el trigo harinero, a los 59 dds y 70 dds, respectivamente y en el caso del durum, a los 92 dds y 119 dds, respectivamente. Estos resultados confirman las afirmaciones de (Ghosh et al., 2020; Mehrabi & Sepaskhah, 2022), respecto a la reducción de la clorofila por efecto del estrés, así como la utilidad del equipo para detectar estos cambios.

#### 4.2.5. Evapotranspiración total del cultivo (mm)

En la Tabla 24, correspondiente al análisis de variancia para la variable evapotranspiración total del cultivo en el trigo harinero, se encontró diferencias estadísticas altamente significativas para dicha variable debido a los tratamientos de riego. Asimismo, en la prueba de Waller-Duncan (comparación de medias) de la evapotranspiración total (Tabla 23), se encuentran diferencias estadísticas significativas entre el riego control (riego 1) con respecto a todos los demás tratamientos de riego aplicados en los diferentes estadios fenológicos evaluados (macollamiento, encañado, floración-antesis, grano acuoso y lechoso). El tratamiento de riego 1 tuvo un mayor valor de evapotranspiración (234 mm), seguido del

riego 5 (203 mm). Los valores de evapotranspiración se diferencian en forma más notoria cuando el estrés hídrico se inició durante el estado de macollamiento (riego 2 con 129 mm) y menos notoria cuando el estrés hídrico se inició durante el estado de grano acuoso y lechoso (riego 5 con 203 mm).

**Tabla 23: Evapotranspiración total del cultivo (mm), de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Tratamiento	Evapotranspiración total del cultivo (mm)	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	234.0 ± 24.6	11%	a
Riego 2	129.7 ± 24.0	19%	d
Riego 3	156.9 ± 15.9	10%	c
Riego 4	160.3 ± 9.4	6%	c
Riego 5	203.4 ± 11.3	6%	b

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 24: ANVA, Evapotranspiración total del cultivo, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.			
Riego	4	18.0662	<.0001
Error	45	0.3477	
Total	49		

Nota: CV: 10.28%

En el trigo durum, el análisis de variancia (Tabla 26) para la evapotranspiración total del cultivo, se encontraron diferencias estadísticas altamente significativas debido a los tratamientos de riego aplicados. La Tabla 25, muestra los resultados de la prueba Waller-Duncan (comparación de medias) para la misma variable y se observan diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de riego 1 (control) y los tratamientos de

riego 2, riego 3 y riego 4 (correspondientes al estrés hídrico iniciado en el macollamiento, encañado y floración-antesis, respectivamente). La mayor evapotranspiración se produjo en los tratamientos de riego 1 (283 mm) y riego 5 (272 mm), no habiendo diferencias entre ambos. Se observa un mayor efecto del estrés hídrico en el período fenológico de encañado (riego 3, 199 mm).

**Tabla 25: Evapotranspiración total del cultivo (mm), de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s *sp durum* L.) bajo estrés por sequía en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Tratamiento	Evapotranspiración total del cultivo (mm)	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	282.6 ± 39.3	14%	a
Riego 2	229.8 ± 46.5	20%	c
Riego 3	199.7 ± 29.3	15%	d
Riego 4	243.9 ± 22.2	9%	b c
Riego 5	271.6 ± 34.4	13%	a b

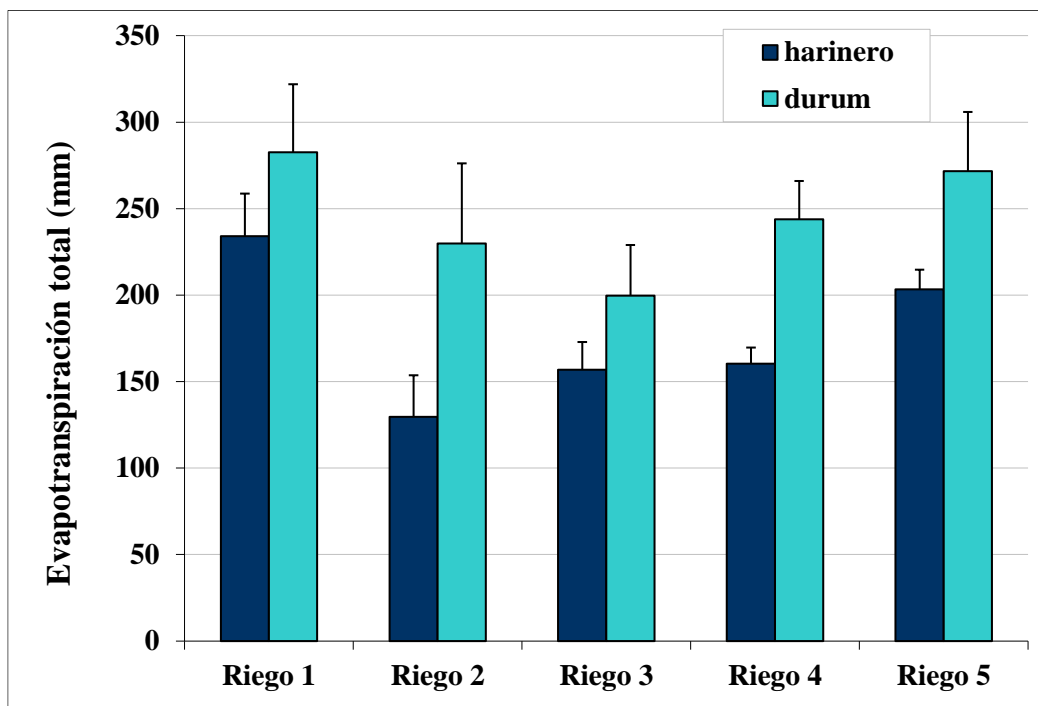
Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 26: ANVA, Evapotranspiración total del cultivo, de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s *sp durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina 2010**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.			
Riego	4	11.5839	<.0001
Error	45	1.3109	
Total	49		

Nota: CV: 14.38%

En una comparación entre los dos tipos de trigo, se observa que el trigo durum pierde más agua por unidad de materia seca, por lo tanto, requiere más agua, entonces la sequía lo puede dañar más (Figura 22).



**Figura 22. Evapotranspiración total del cultivo (mm) de trigo harinero (*Triticum aestivum s sp aestivum L.*) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum s sp durum L.*) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

#### 4.2.6. Eficiencia de uso de agua ( $\text{g kg}^{-1}$ )

En el caso del trigo harinero, la variable eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa muestra diferencias estadísticas altamente significativas a causa de los tratamientos de riego, según el análisis de variancia (Tabla 28). En la prueba estadística de Waller-Duncan (comparación de medias; Tabla 27 y Figura 29), para la variable eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa en trigo harinero, se encuentra que el riego control (riego 1) presentó mayor valor que los demás tratamientos de riego, haciéndose esta diferencia más acentuada con el tratamiento de riego 3 (estrés hídrico durante el encañado), donde las diferencias estadísticas fueron significativas. Se espera que la eficiencia de uso de agua mejore con el estrés hídrico, sin embargo, en esta variedad de trigo harinero se encontró que los valores más altos de la eficiencia de uso de agua corresponden al riego sino el riego control, donde las plantas crecieron en óptimas condiciones hídricas y no a los tratamientos con estreses de sequía en diferentes estadios fenológicos.

**Tabla 27: Eficiencia de uso de agua ( $\text{g kg}^{-1}$ ), biomasa de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Tratamiento	Eficiencia de uso de agua-biomasa ( $\text{g kg}^{-1}$ )	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	1.20 $\pm$ 0.23	19%	a
Riego 2	0.83 $\pm$ 0.18	22%	b
Riego 3	0.66 $\pm$ 0.12	17%	c
Riego 4	0.97 $\pm$ 0.16	17%	b
Riego 5	0.91 $\pm$ 0.21	23%	b

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 28: ANVA, Eficiencia de uso de agua, biomasa de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat. Riego	4	0.3823	<.0001
Error	45	0.0337	
Total	49		

Nota: CV: 20.07%

El análisis de variancia (Tabla 30), en la variable eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa en trigo durum, muestra diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de riego donde se aplicó la sequía aplicada en diferentes estadios de crecimiento de la planta. En el Tabla 29 y Figura 23 se muestran los resultados de la prueba de comparación de medias (prueba de Waller-Duncan), donde la eficiencia de uso de agua relativa a biomasa en el tratamiento de riego 2 (inicio de estrés hídrico durante el macollamiento) fue mayor que el riego control (riego 1), con diferencias estadísticas significativas.



**Tabla 29: Eficiencia de uso de agua ( $\text{g kg}^{-1}$ ), biomasa de trigo extraduro (*Triticum Turgidum s sp durum L.*) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

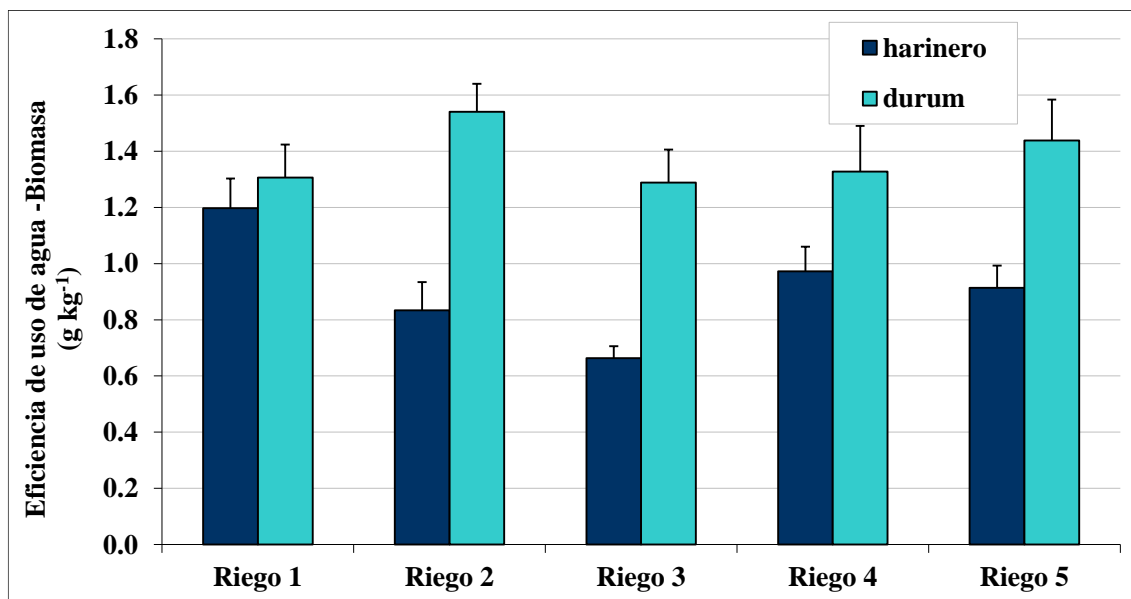
Tratamiento	Eficiencia de uso de agua-biomasa ( $\text{g kg}^{-1}$ )	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	1.31 $\pm$ 0.12	9%	b
Riego 2	1.54 $\pm$ 0.21	14%	a
Riego 3	1.29 $\pm$ 0.20	15%	b
Riego 4	1.33 $\pm$ 0.23	17%	b
Riego 5	1.44 $\pm$ 0.19	13%	a b

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 30: ANVA, Eficiencia de uso de agua, biomasa de trigo extraduro (*Triticum turgidum s sp durum L.*) bajo estrés por sequía en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat. Riego	4	0.11424297	0.0262
Error	45	0.03745171	
Total	49		

Nota: CV: 14.02%



**Figura 23. Eficiencia de uso de agua, biomasa (g kg<sup>-1</sup>) de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo.**

#### **La Molina**

En el análisis de variancia para la eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento de grano (Tabla 32), para trigo harinero, se encontró diferencias altamente significativas debido a los tratamientos de riego aplicados. Los resultados de la prueba de comparación de medias (prueba de Waller-Duncan y Figura 30) para la misma variable (Tabla 31), muestran que el riego control (riego 1) alcanzó un valor mayor al de todos los demás tratamientos de riego, con diferencias estadísticas significativas, siendo menor esta eficiencia de uso de agua en el riego 3 (correspondiente al estrés hídrico durante el encañado).

**Tabla 31: Eficiencia de uso de agua ( $\text{g kg}^{-1}$ ), rendimiento de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Tratamiento	Eficiencia de uso de agua-rendimiento ( $\text{g kg}^{-1}$ )	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>1</sup>
Riego 1	0.55 ± 0.11	19%	a
Riego 2	0.31 ± 0.10	32%	c
Riego 3	0.19 ± 0.04	23%	e
Riego 4	0.40 ± 0.09	22%	c
Riego 5	0.48 ± 0.08	16%	b

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 32: ANVA, Eficiencia de uso de agua, rendimiento de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat. Riego	4	0.2074	<.0001
Error	45	0.0073	
Total	49		

Nota: CV: 22.12%

En el análisis de variancias para la variable eficiencia de uso de agua en el rendimiento (Tabla 34), el trigo durum mostró diferencias significativas por efecto del estrés hídrico aplicado entre los tratamientos de riego del experimento. En la prueba de Waller-Duncan (Tabla 33 y Figura 24), se encontró diferencias estadísticas significativas entre el riego control (riego 1) y el tratamiento de riego 3 (inicio de estrés hídrico durante el encañado).

**Tabla 33: Eficiencia de uso de agua ( $\text{g kg}^{-1}$ ), rendimiento de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

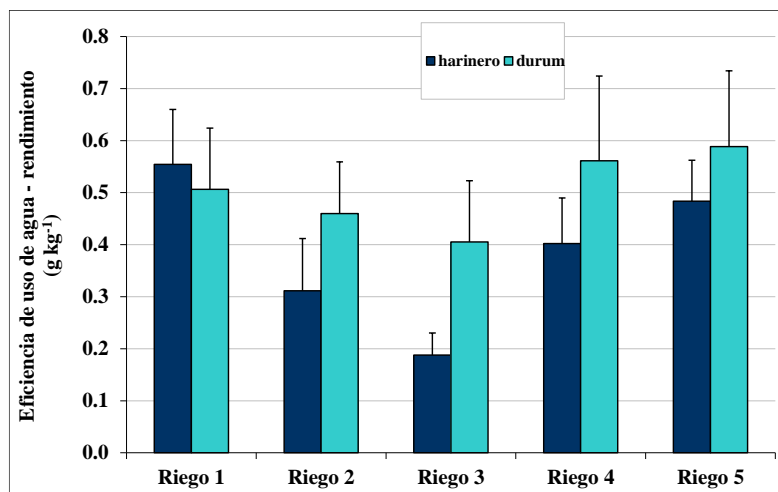
Tratamiento	Eficiencia de uso de agua- rendimiento ( $\text{g kg}^{-1}$ )	CV	Prueba Waller- Duncan <sup>1</sup>
Riego 1	0.51 $\pm$ 0.12	23%	a b c
Riego 2	0.46 $\pm$ 0.10	22%	b c
Riego 3	0.41 $\pm$ 0.12	29%	c
Riego 4	0.56 $\pm$ 0.16	29%	a b
Riego 5	0.59 $\pm$ 0.15	25%	a

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 34: ANVA, Eficiencia de uso de agua, rendimiento de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat. Riego	4	0.0553	0.0202
Error	45	0.0170	
Total	49		

Nota: CV: 25.92%



**Figura 24. Uso eficiente de agua, rendimiento ( $\text{g kg}^{-1}$ ) de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

En general, a partir de los resultados observados en el presente estudio los valores bajos de eficiencia de uso de agua, podrían atribuirse a que gran parte del agua aplicada a la maceta no fue usada por el cultivo de trigo; y se perdió en la evaporación (*E*). (Rawson & Gómez, 2001), señalan que la radiación solar que cae en un suelo son cobertura o suelo desnudo causa una pérdida de agua por evaporación y que por lo tanto es importante una cobertura temprana del suelo por parte del cultivo y que esto favorece una mejor eficiencia de uso de agua. Otro aspecto que también podría afectar los valores de eficiencia de uso de agua la baja fertilización nitrogenada como lo señalan (Rashid, Jabloun, Andersen, Zhang, & Olesen, 2019; Soares et al., 2021).

### 4.3. Características bioquímicas

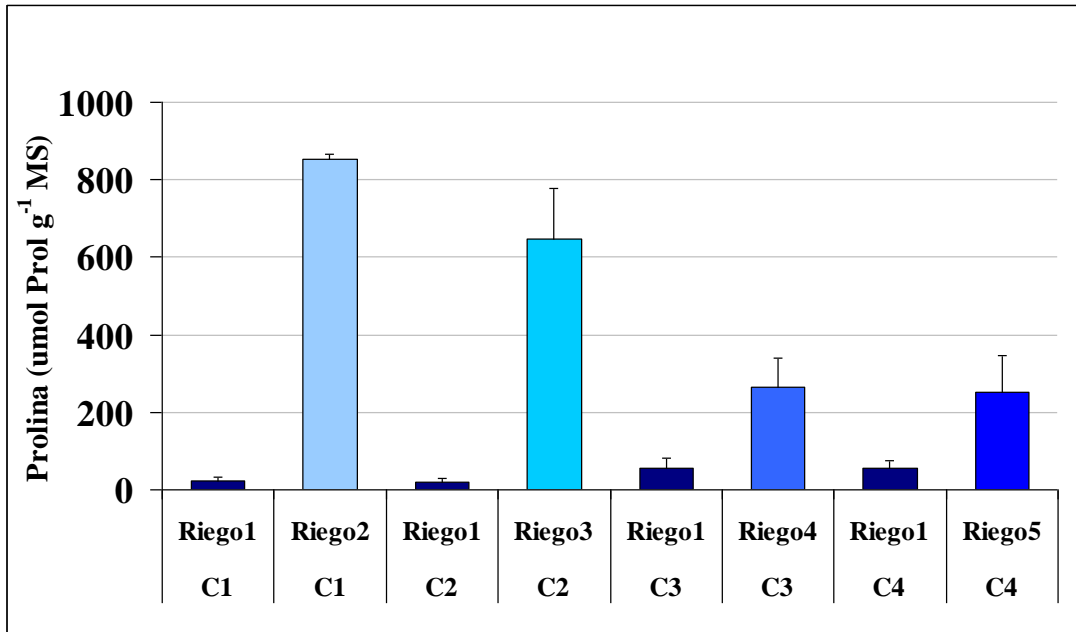
#### 4.3.1. Contenido de prolina libre ( $\mu\text{-mol por g}^{-1}\text{PF}$ )

Se encontró diferencias altamente significativas, en el contenido de prolina libre, entre el tratamiento de riego 1 (riego control) con respecto a todos los demás tratamientos de riego: Riego 2, Riego 3, Riego 4, y Riego 5; según la prueba estadística de comparación de medias o prueba de t (Tabla 35). Lo cual posiblemente indique que, bajo un estrés hídrico, la variedad Centenario presente un mecanismo fisiológico expresado en la acumulación de prolina libre, que le permite sobrevivir y recuperarse del estrés, durante todo su período de desarrollo o por lo menos durante todos los estadios evaluados.

Además, la Figura 25 muestra gráficamente que el contenido de prolina libre en el riego 1 (riego control) del trigo harinero que tiende a aumentar ligeramente a medida que la planta avanza hacia la madurez, por otro lado, en los tratamientos de riego se observa una tendencia decreciente.

**Tabla 35: Contenido de prolina libre en trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Cosecha	Tratamiento	Prolina libre (u-moles Prol g <sup>-1</sup> PF)	CV	t-test (Pvalue)
C1	Riego1	23,9 +/- 8,3	35%	0,0000 **
C1	Riego2	852,8 +/- 13,8	2%	
C2	Riego1	20,6 +/- 8,6	42%	0,0000 **
C2	Riego3	646,0 +/- 130,2	20%	
C3	Riego1	55,0 +/- 26,6	48%	0,0004 **
C3	Riego4	263,2 +/- 76,9	29%	
C4	Riego1	54,1 +/- 22,3	41%	0,0017 **
C4	Riego5	251,9 +/- 93,4	37%	

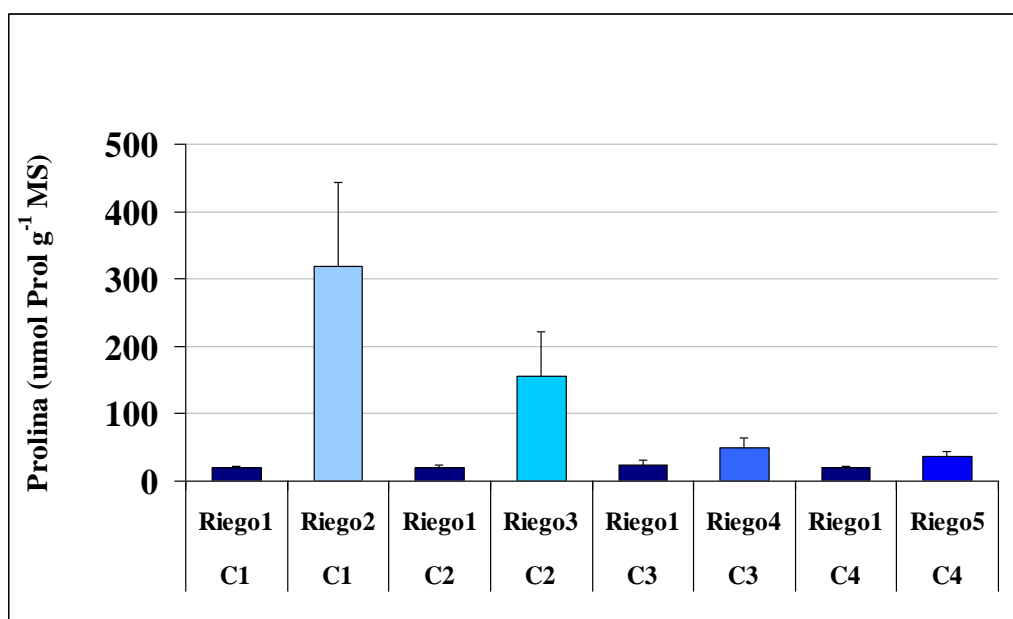


**Figura 25. Contenido de prolina libre (umol por g<sup>-1</sup>PF) en trigo harinero (*Triticum aestivum s sp aestivum L.*) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

En el caso del trigo durum, mutante Taray, la prueba de comparación de medias (prueba de t) para la variable contenido de prolina libre (Tabla 36 y Figura 26) en el riego 1 (riego control) fue menor y este valor mostró diferencias estadísticas altamente significativas con todos los demás valores obtenidos en los tratamientos de riego (Riego 2, Riego 3, Riego 4, Riego 5). Del mismo modo se podría señalar que este tipo de trigo mostró el mismo mecanismo de defensa al estrés hídrico que el trigo harinero.

**Tabla 36: Contenido de prolina libre, de trigo durum (*Triticum turgidum* s *sp durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Cosecha	Tratamiento	Prolina libre (u-moles Prol g <sup>-1</sup> MS)	CV	t-test (Pvalue)
C1	Riego1	20,1 +/- 2,8	14%	0,0007 **
C1	Riego2	317,9 +/- 125,8	40%	
C2	Riego1	19,3 +/- 4,4	23%	0,0018 **
C2	Riego3	155,4 +/- 66,3	43%	
C3	Riego1	24,3 +/- 6,6	27%	0,0084 **
C3	Riego4	49,2 +/- 14,6	30%	
C4	Riego1	20,3 +/- 2,4	12%	0,0024 **
C4	Riego5	36,5 +/- 8,0	22%	



**Figura 26. Contenido de prolina libre, (umol por g<sup>-1</sup>PF) de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s *sp durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**



(Itam et al., 2020; Kaur & Asthir, 2020; A. Ullah et al., 2022) señalan que la producción de prolina fue mayor en los primeros estadios de desarrollo en la planta de trigo, bajo estrés de sequía. Lo que se observó, también, en el presente trabajo de investigación. Es importante señalar que el trigo harinero produjo mayor contenido de prolina que el trigo durum.

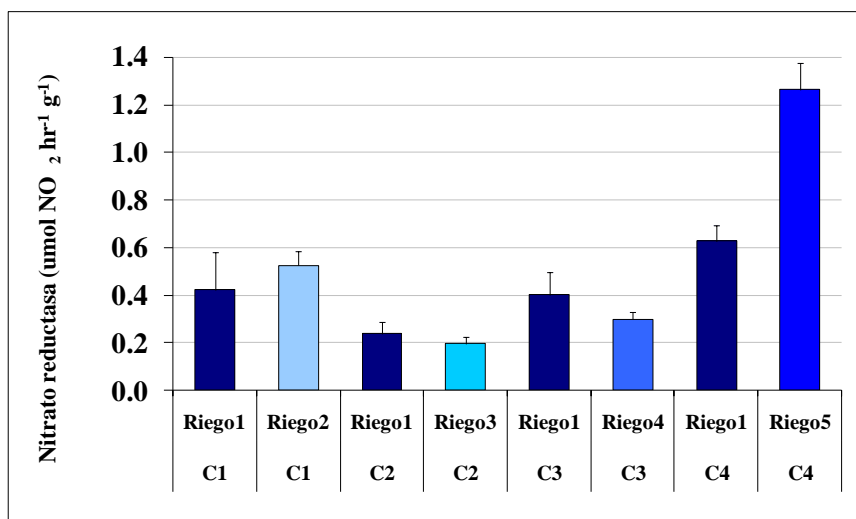
#### 4.3.2. Actividad de la enzima de nitrato reductasa.

En la Tabla 37 se aprecia que el trigo harinero tuvo mayor actividad de la enzima nitrato reductasa en el riego 5 (estrés hídrico en estadio de grano lechoso y acuoso); siendo este valor superior y significativamente diferente al del riego 1 o control (prueba de t). En una cosecha anterior (C3), la actividad de la enzima nitrato reductasa fue mayor en el riego 1 (control) que en el riego 4 (estrés hídrico en estadio de floración-antesis), encontrándose diferencias significativas en la prueba estadística de t. De otro lado, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de riego 2 y riego 3 con el riego 1 (control).

Gráficamente se observa una tendencia ligeramente creciente en la actividad de la enzima nitrato reductasa (Figura 27) en el trigo harinero, a medida que la planta avanza hacia la madurez a partir del encañado (riego 3), tanto para el riego control (riego 1) como para los demás tratamientos de riego en estudio.

**Tabla 37: Actividad de la enzima nitrato reductasa en trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Cosecha	Tratamiento	Nitrato reductasa ( $\mu\text{mol NO}_2 \text{ hr}^{-1} \text{ g}^{-1}$ )	CV	t-test ( $P_{\text{value}}$ )
C1	Riego1	0.42 +/- 0.16	37%	0.2098 ns
C1	Riego2	0.53 +/- 0.06	11%	
C2	Riego1	0.24 +/- 0.05	20%	0.1355 ns
C2	Riego3	0.20 +/- 0.03	14%	
C3	Riego1	0.40 +/- 0.09	23%	0.0467 *
C3	Riego4	0.30 +/- 0.03	9%	
C4	Riego1	0.63 +/- 0.06	10%	0.0000 **
C4	Riego5	1.26 +/- 0.11	9%	



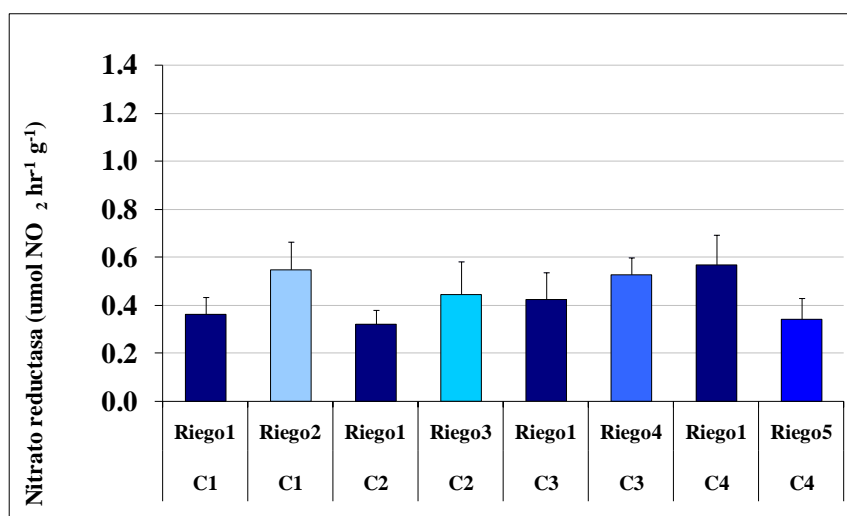
**Figura 27. Actividad de la enzima nitrato reductasa en trigo harinero (*Triticum aestivum s sp aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

En la variable actividad de la enzima nitrato reductasa para el trigo durum en la primera cosecha realizada (C1), se encontró que el tratamiento de riego 2 (inicio de estrés hídrico durante el macollamiento) fue mayor al riego 1 (control), mientras que en la última cosecha realizada (C4) el tratamiento de riego 1 (control) fue mayor al riego 5 (inicio de estrés hídrico en estado de grano lechoso y acuoso), habiendo en ambos casos diferencias estadísticas significativas en la prueba de comparación de medias (prueba de t). En los demás casos la actividad del nitrato reductasa no fue diferente estadísticamente en los tratamientos evaluados, para las cosechas realizadas (C2 y C3). Se presentan los resultados en la Tabla 38.

En el trigo durum, al igual que en el trigo harinero, gráficamente se observa una tendencia creciente para variable actividad de la enzima nitrato reductasa en las cosechas realizadas (C1, C2, C3 y C4) para el tratamiento del riego control (riego 1) a medida que la planta avanza hacia la madurez. Sin embargo, en los tratamientos de riego la variable no muestra una tendencia definida según el desarrollo fenológico (Figura 28).

**Tabla 38: Actividad de la enzima nitrato reductasa de trigo durum (*Triticum Turgidum s sp durum L.*) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Cosecha	Tratamiento	Nitrato reductasa (umol NO <sub>2</sub> hr <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> )	CV	t-test (P <sub>value</sub> )
C1	Riego1	0.36 +/- 0.07	20%	0.0166 *
C1	Riego2	0.55 +/- 0.12	21%	
C2	Riego1	0.32 +/- 0.06	18%	0.0987 ns
C2	Riego3	0.44 +/- 0.14	31%	
C3	Riego1	0.42 +/- 0.11	27%	0.1233 ns
C3	Riego4	0.53 +/- 0.07	14%	
C4	Riego1	0.57 +/- 0.12	22%	0.0100 *
C4	Riego5	0.34 +/- 0.09	25%	



**Figura 28. Actividad del nitrato reductasa de trigo extraduro (*Triticum turgidum s sp durum L.*) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

En general, podemos decir por los resultados encontrados que la actividad del nitrato reductasa no muestra un patrón de reducción por efecto del estrés hídrico, posiblemente debido a que la actividad de la enzima no llego a expresarse en niveles adecuados en estas dos líneas evaluadas de trigo harinero y durum. Un comportamiento similar fue informado

por (Mahmoud et al., 2020; Wang et al., 2021), quien atribuye esta respuesta a la existencia de variabilidad genética para esta característica.

#### 4.4. Componentes de rendimiento del cultivo

##### 4.4.1. Número de granos por espiga

La variable el número de granos por espiga mostró diferencias estadísticas altamente significativas por efecto de los tratamientos de riego en el trigo harinero de la variedad Centenario, según el análisis de varianza (Tabla 40). En la prueba de Waller-Duncan (comparación de medias, Tabla 39 y Figura 30), el número de granos por espiga del trigo harinero mostró diferencias estadísticas significativas entre el número de granos por espiga para el riego control o riego 1 con respecto a los tratamientos de riego 2 (estrés hídrico en estadio de macollamiento) y riego 3 (estrés hídrico en estadio de encañado). Sin embargo, en los estadios de mayor edad de la planta como los tratamientos de riego 4 y riego 5 no se ve ningún efecto del estrés hídrico sobre el número de granos por espiga.

Al respecto, la literatura menciona que al final del estado de buche o bota se determina el número potencial de granos que habrá por espiga (X. Chen et al., 2021; Frantová et al., 2022). Por lo tanto, es de esperar que la variable número de granos por espiga muestre una reducción significativa en el tratamiento de riego 3, donde estrés hídrico controlado se realizó durante el encañado. Es importante señalar que el encañado se traslapo con el estado de buche o bota, donde el agua en la maceta llegó a hacerse menos disponible para la planta debido a la evapotranspiración diaria.

**Tabla 39: Número de granos por espiga, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Tratamiento	Número de granos por espiga	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	21.2 ± 3.5	16%	a
Riego 2	13.7 ± 2.9	21%	b
Riego 3	12.1 ± 4.0	33%	b
Riego 4	19.1 ± 2.9	15%	a
Riego 5	20.5 ± 4.0	19%	a

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 40: ANVA, Número de granos por espiga, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.			
Riego	4	174.978	<.0001
Error	45	12.2378	
Total	49		

Nota: CV: 20.19%

En el análisis de varianza para el número de granos por espiga (Tabla 42), el trigo durum, mutante Taray; mostró diferencias estadísticas altamente significativas como consecuencia de los tratamientos de estrés hídrico aplicados en los diferentes estadios de su desarrollo (Tabla 41 y Figura 29). En la prueba de Waller-Duncan (comparación de medias), la especie de trigo durum presentó diferencias estadísticas significativas, para esta característica, entre el riego 1 (riego control) y los tratamientos de riego 2 y riego 3 (inicio de estrés hídrico durante macollamiento y encañado respectivamente). Igual que en el trigo harinero, en esta especie se encuentra que el estrés hídrico aplicado en períodos posteriores a la formación de la espiga no tiene ningún efecto sobre el número de granos formados por espiga (Tabla 41).

**Tabla 41: Número de granos por espiga, de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

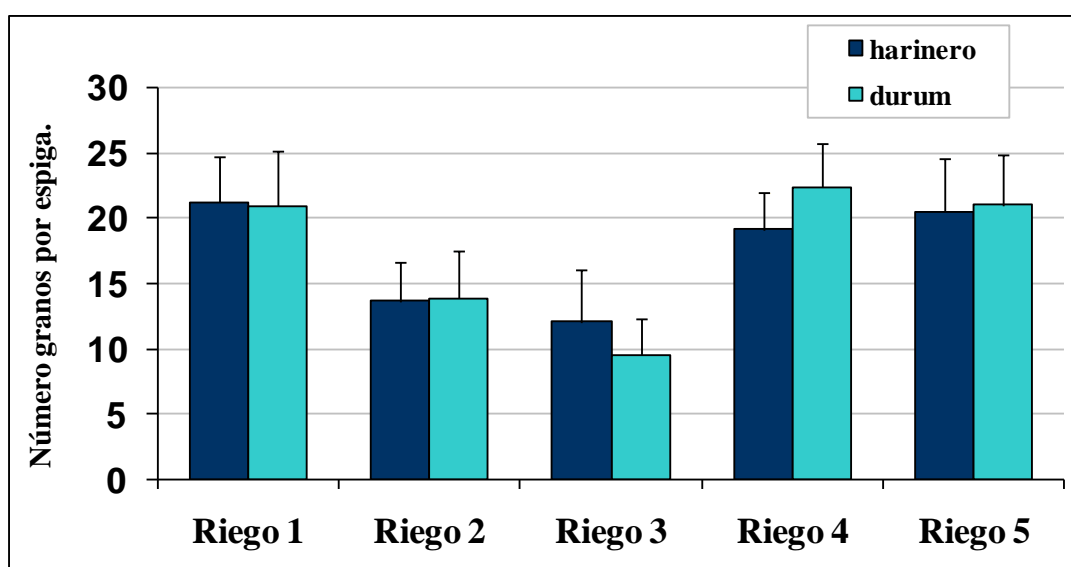
Tratamiento	Número de granos por espiga	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	20.9 ± 4.2	20%	a
Riego 2	13.9 ± 3.6	26%	b
Riego 3	9.5 ± 2.7	29%	b
Riego 4	22.4 ± 3.4	15%	a
Riego 5	21.0 ± 3.8	18%	a

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 42: ANVA, Número de granos por espiga, de trigo extraduro (*Triticum turgidum s sp durum L.*) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

	Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat. Riego		4	310.5276	<.0001
Error		45	12.7641	
Total		49		

Nota: CV: 20.37%



**Figura 29. Número de granos por espiga de trigo extraduro (*Triticum aestivum s sp aestivum L.*) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

#### 4.4.2. Peso de mil granos (g)

La variable peso de mil granos en trigo harinero mostró diferencias estadísticas altamente significativas, en el análisis de variancia (Tabla 44), por efecto de los tratamientos de riego aplicados para los diferentes estadios de desarrollo. En la prueba de Waller-Duncan o comparación de medias, se aprecian diferencias estadísticas significativas entre el tratamiento de riego 1 (riego control) y los tratamientos de riego 2, riego 3 y riego4 (correspondientes al estrés hídrico aplicado durante los períodos de macollamiento, encañado y floración-antesis, respectivamente). Sin embargo, los valores obtenidos para peso de mil granos se ven mucho más afectados durante el riego 3 (floración y antesis). El mayor valor de la variable peso de mil granos se logró con los tratamientos de riego 1 (31.9

g) y riego 5 (31.6 g), sin embargo, no hay diferencias entre ambos valores (Tabla 43 y Figura 30).

**Tabla 43: Peso de mil granos (g), de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Tratamiento	Peso de mil granos (g)	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	31.9 ± 1.6	5%	a
Riego 2	19.3 ± 6.6	34%	b c
Riego 3	17.7 ± 7.2	41%	c
Riego 4	22.2 ± 5.2	23%	b
Riego 5	31.6 ± 3.8	12%	a

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 44: ANVA, Peso de mil granos, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.			
Riego	4	462.2249	<.0001
Error	45	27.7365	
Total	49		

Nota: CV: 21.44%

En el análisis de variancia realizado para el peso de mil granos en trigo durum, hubo diferencias altamente significativas como consecuencia de los tratamientos de riego aplicado (Tabla 46). Asimismo, en la prueba de Waller-Duncan, hubo diferencias estadísticas significativas entre el riego control (riego 1) con el tratamiento de riego 2 (estrés hídrico aplicado durante el macollamiento); observándose reducción de peso por efecto de estrés hídrico, y con el tratamiento 4 (estrés hídrico aplicado durante floración-anteses) donde se incrementó el peso. A diferencia de lo observado en trigo harinero, en este caso el único estadio aparentemente sensible al estrés hídrico fue el de macollamiento (Tabla 45).

Asimismo, para estas condiciones se observó que el trigo durum logró formar granos de mayor peso seco en condiciones de estrés hídrico que el harinero (Figura 30).

**Tabla 45: Peso de mil granos (g), de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp durum L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Tratamiento	Peso de mil granos (g)	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	30.4 ± 4.3	14%	b c
Riego 2	25.0 ± 6.0	24%	d
Riego 3	29.1 ± 7.4	26%	c d
Riego 4	36.0 ± 3.6	10%	a
Riego 5	34.5 ± 5.1	15%	a b

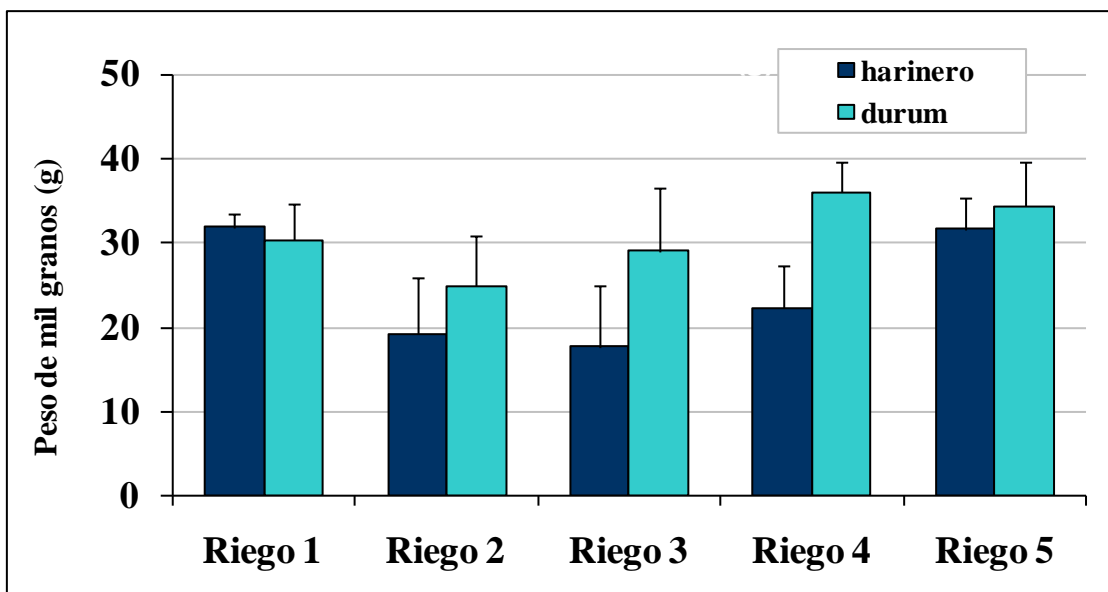
Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 46: ANVA, Peso de mil granos, de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp durum L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.			
Riego	4	192.4988	0.0003
Error	45	29.8619	
Total	49		

Nota: CV: 17.64%





**Figura 30. Peso de mil granos (g) de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

#### **4.4.3. Número de espiguillas por espiga**

El ANVA para el número de espiguillas por espiga, como consecuencia del estrés hídrico aplicado en los tratamientos evaluados, para trigo harinero presentó diferencias estadísticas altamente significativas (Tabla 48). En la prueba de Waller-Duncan, se encontró diferencias estadísticas significativas en el número de espiguillas por espiga del riego control, con respecto al tratamiento de riego 2 y riego 3 (estrés hídrico aplicado durante los períodos de macollamiento y encañado, respectivamente - Tabla 47 y Figura 33). El mayor número de espiguillas por espiga en el trigo harinero fue alcanzado en el riego 4 (10.5), riego 1 (10.1) y riego 5 (10.0) pero no hubo diferencias estadísticas entre ellos.

**Tabla 47: Número de espiguillas por espiga, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Tratamiento	Número de espiguillas por espiga	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	10.1 ± 1.2	12%	a
Riego 2	8.8 ± 1.5	17%	b
Riego 3	8.9 ± 0.8	9%	b
Riego 4	10.5 ± 1.1	10%	a
Riego 5	10.0 ± 0.4	4%	a

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 48: ANVA, Número de espiguillas por espiga, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.			
Riego	4	5.8743	0.0015
Error	45	1.1196	
Total	49		

Nota: CV: 10.94%

Por otro lado, el ANVA para trigo durum muestra diferencias estadísticas altamente significativas como consecuencia del estrés hídrico aplicado en los tratamientos en diferentes estadios de su desarrollo (Tabla 50). En la prueba de comparación de medias para la misma variable (Tabla 49 y Figura 31), se encontró diferencias estadísticas significativas en el número de espiguillas por espiga entre el tratamiento de riego control (riego 1) y el tratamiento de riego 3 (estrés hídrico aplicado durante el período de encañado). Del mismo modo, el mayor número de espiguillas por espiga en el trigo durum fue alcanzado en el riego 4 (10.2), riego 5 (9.7) y riego 1 (9.6) pero no hubo diferencias estadísticas entre ellos.

**Tabla 49: Número de espiguillas por espiga, trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo.**

**La Molina**

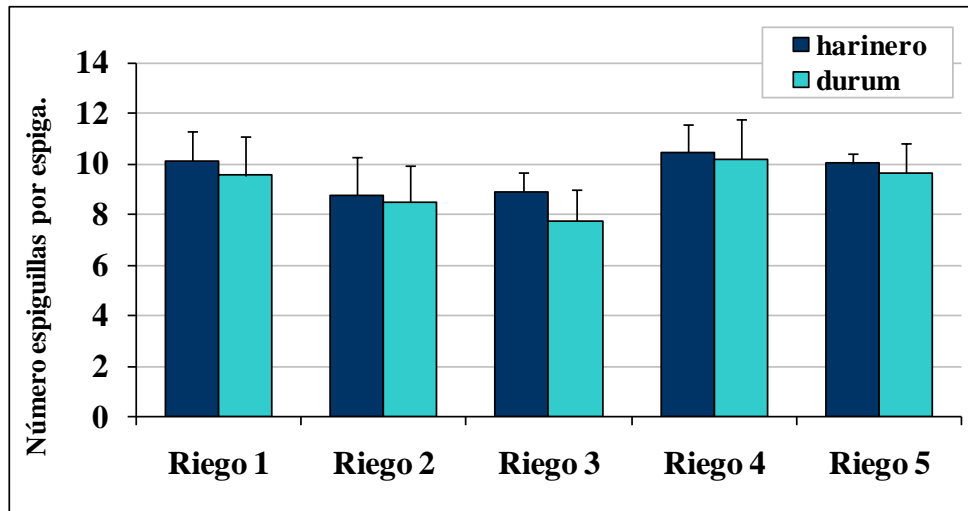
Tratamiento	Número de espiguillas por espiga	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	9.6 ± 1.5	16%	a b
Riego 2	8.5 ± 1.5	17%	b c
Riego 3	7.8 ± 1.3	16%	c
Riego 4	10.2 ± 1.6	15%	a
Riego 5	9.7 ± 1.2	12%	a b

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 50: ANVA, Número de espiguillas por espiga, trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

<b>Fv</b>	<b>GL</b>	<b>Cuadrados Medios</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Trat. Riego	4	9.7777	0.0021
Error	45	1.9736	
Total	49		

Nota: CV: 15.37%



**Figura 31. Número de espiguillas por espiga de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

#### 4.4.4. Número de flores por espiguilla

Para la variable número de flores por espiguilla, en el análisis de varianzas para trigo harinero (Tabla 52) muestra diferencias estadísticas altamente significativas como consecuencia del estrés hídrico aplicado en los tratamientos del experimento. En la prueba de Waller-Duncan (comparación de medias), hubo diferencias estadísticas significativas entre el tratamiento de riego control (riego 1) y los tratamientos de riego 2 y riego 3 (correspondientes al estrés hídrico aplicado durante los períodos de macollamiento y encañado, respectivamente), (Tabla 51 y Figura 32). Los tratamientos con estrés hídrico afectaron el número de flores por espiguilla coincidieron con los períodos de formación y desarrollo de la espiga, desde la formación de la espiga embrionaria hasta la espiga completamente formada dentro de la vaina de la hoja bandera.

**Tabla 51: Número de flores por espiguilla, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Tratamiento	Número de flores por espiguilla.	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	4.6 ± 0.3	7%	a
Riego 2	3.9 ± 0.6	14%	b
Riego 3	3.9 ± 0.4	11%	b
Riego 4	4.5 ± 0.3	7%	a
Riego 5	4.4 ± 0.3	8%	a

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 52: ANVA, Número de flores por espiguilla, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.			
Riego	4	174.9789	<.0001
Error	45	12.2378	
Total	49		

Nota: CV: 20.19%

En el análisis de varianzas (Tabla 54), el número de flores por espiguilla en trigo durum mostró diferencias altamente significativas a causa de los tratamientos de riego, y en la prueba Waller-Duncan, se encontró diferencias estadísticas significativas para la misma variable, entre el riego control (riego 1) y el tratamiento de riego 2 y riego 3 (correspondientes al estrés hídrico aplicado durante los períodos de macollamiento y encañado, respectivamente; Tabla 53 y Figura 32). En estadios de madurez, sin embargo, no se observa ninguna diferencia, es decir el estrés hídrico no produjo ningún efecto en el número de flores por espiguilla.

**Tabla 53: Número de flores por espiguilla, de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo.**

**La Molina**

Tratamiento	Número de flores por espiguilla.	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	4.2 ± 0.3	6%	a
Riego 2	3.8 ± 0.4	9%	b c
Riego 3	3.6 ± 0.3	8%	c
Riego 4	4.1 ± 0.3	8%	a
Riego 5	4.0 ± 0.2	6%	a b

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 54: ANVA, Número de flores por espiguilla, de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.			
Riego	4	0.6542	0.0001
Error	45	0.0905	
Total	49		

Nota: CV: 7.60%

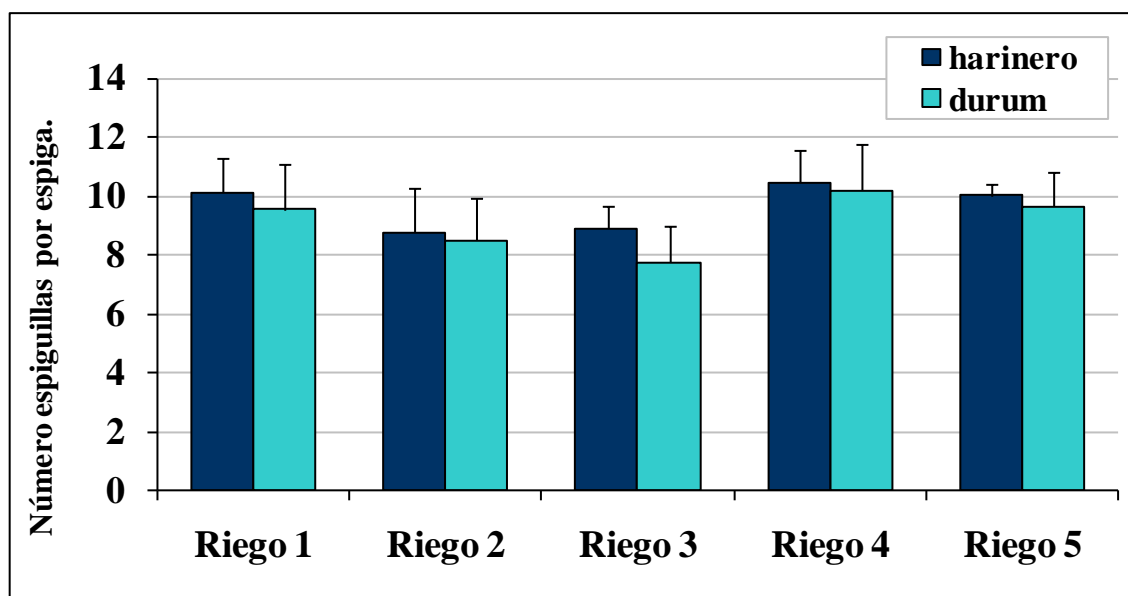


Figura 32. Número de flores por espiguilla de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina

#### 4.4.5. Número de espigas por metro cuadrado

En el análisis de variancia realizado para número de espigas por metro cuadrado del trigo harinero (Tabla 56) muestra que existen diferencias estadísticas altamente significativas como consecuencia del estrés hídrico aplicado en los tratamientos del experimento. En la prueba de Waller Duncan se encontraron diferencias estadísticas significativas en la variable número de espigas por metro cuadrado entre el riego control (riego 1) y todos los demás tratamientos de riego. Además, se encontró que entre todos los tratamientos de estrés hídrico (riego 2, riego 3, riego 4 y riego 5) no existen diferencias, (Tabla 55 y Figura 33).

**Tabla 55: Número de espigas por metro cuadrado, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Tratamiento	Número de espigas por metro cuadrado	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	194.3 ± 32.7	17%	a
Riego 2	157.3 ± 9.8	6%	b
Riego 3	154.2 ± 14.5	9%	b
Riego 4	154.2 ± 0.1	0%	b
Riego 5	154.2 ± 0.1	0%	b

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 56: ANVA, Número de espigas por metro cuadrado, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.			
Riego	4	3142.4700	<.0001
Error	45	277.6222	
Total	49		

Nota: CV: 10.24%

El análisis de variancia realizado para ver el efecto del estrés hídrico aplicado en los tratamientos sobre el número de espigas por metro cuadrado en trigo durum (Tabla 58), encontró diferencias estadísticas altamente significativas. Los resultados de la prueba de Waller-Duncan (comparación de medias) para la misma variable, muestran que existen diferencias estadísticas significativas entre el riego 1 (control) y los tratamientos de riego 3, riego 4 y riego 5 (correspondientes al estrés hídrico durante el estadio de encañado, floración-antesis, grano acuoso y lechoso, respectivamente (Tabla 57 y Figura 33). Para trigo durum, en este experimento, se observó que cuando el estrés hídrico se inicia durante el macollamiento, no queda limitada la producción de macollos con espigas fértiles por metro cuadrado.



**Tabla 57: Número de espigas por metro cuadrado, de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

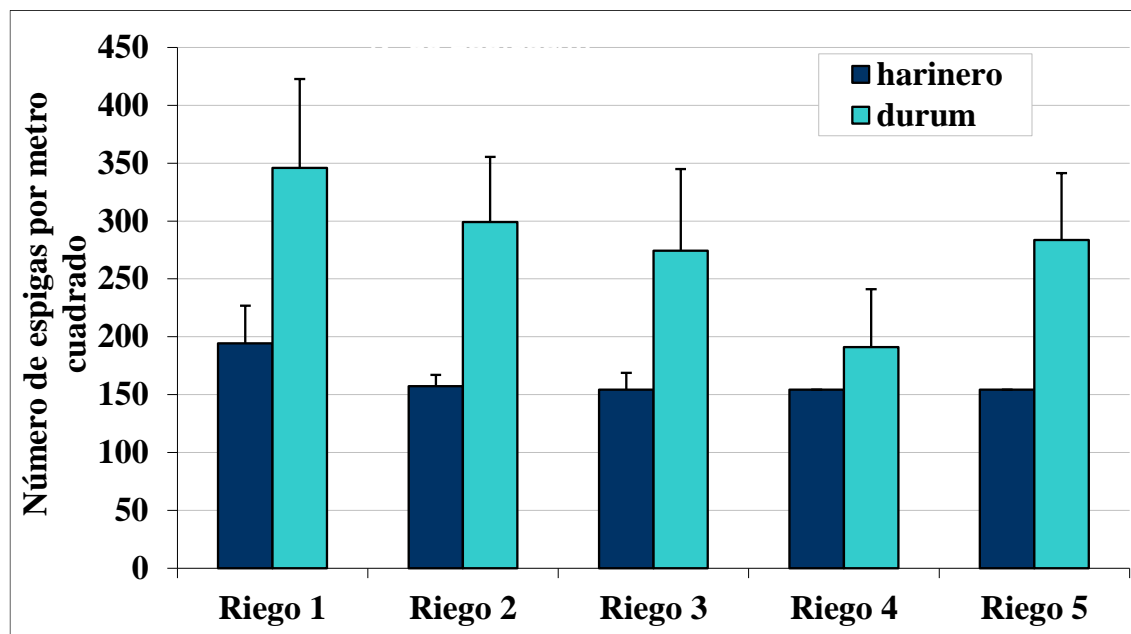
Tratamiento	Número de espigas por metro cuadrado	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	346.1 ± 76.6	22%	a
Riego 2	299.1 ± 56.4	19%	a b
Riego 3	274.4 ± 70.4	26%	b
Riego 4	191.2 ± 49.9	26%	b
Riego 5	283.7 ± 57.8	20%	b

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 58: ANVA, Número de espigas por metro cuadrado, de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.			
Riego	4	31690.0200	0.0011
Error	45	3968.8200	
Total	49		

Nota: CV: 22.58%



**Figura 33. Número de espigas por metro cuadrado de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

#### 4.4.6. Índice de cosecha (%).

En la Tabla 60, se muestra el análisis de varianza para la variable índice de cosecha del trigo harinero y se observan diferencias estadísticas altamente significativas a causa del estrés hídrico aplicado en los tratamientos del experimento. La Tabla 59 y Figura 34 muestran los resultados de la prueba de Waller-Duncan para la misma variable, dónde se encontraron diferencias estadísticas significativas entre el riego control (riego 1) y los tratamientos de riego 2 y riego 3 (estrés hídrico iniciado en los períodos de macollamiento y encañado respectivamente). Sin embargo, en el riego 3 el índice de cosecha disminuye hasta alcanzar valores cercanos a la mitad de los alcanzados por el riego control. Los mayores índices de cosecha fueron alcanzados por el riego 5 (54%) y riego 1 (47%), sin haber diferencias estadísticas entre ambos valores.

**Tabla 59: Índice de cosecha (%) de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina 2010**

Tratamiento	Índice de cosecha, trigo harinero (%)	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	47 ± 10	21%	a b
Riego 2	32 ± 10	31%	c
Riego 3	24 ± 6	24%	c
Riego 4	42 ± 12	28%	b
Riego 5	54 ± 10	18%	a

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 60: ANVA, Índice de cosecha, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.			
Riego	4	0.1416	<.0001
Error	45	0.0094	
Total	49		

Nota: CV: 24.29%

La variable índice de cosecha en el trigo durum registró diferencias estadísticas altamente significativas, debido al estrés hídrico aplicado en los tratamientos, según en el análisis de varianza (Tabla 62). En la prueba Waller-Duncan (comparación de medias) de la misma variable se hallaron diferencias estadísticas significativas entre el riego 1 (control) y los tratamientos de riego 2 y riego 3 (correspondientes al estrés hídrico en los períodos de macollamiento y encañado; Tabla 61 y Figura 34). Los mayores índices de cosecha se encontraron en el riego 4 (43%), el riego 5 (40%) y el riego 1 (39%); sin embargo, no hay diferencias estadísticas entre estos valores. Los valores observados en esta especie fueron similares al del trigo harinero.

**Tabla 61: Índice de cosecha (%) de trigo extraduro (*Triticum turgidum s sp durum L.*) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Tratamiento	Índice de cosecha, trigo durum (%)	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	39 ± 11	28%	a
Riego 2	26 ± 7	27%	b
Riego 3	29 ± 10	34%	b
Riego 4	43 ± 10	23%	a
Riego 5	40 ± 8	20%	a

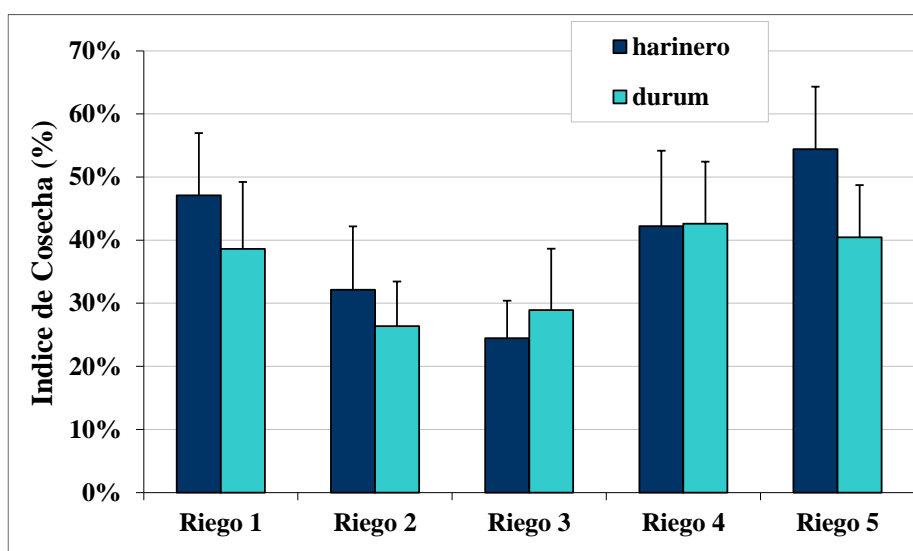
Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 62: ANVA, Índice de cosecha, de trigo extraduro (*Triticum turgidum s sp durum L.*) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo.**

**La Molina**

Fv	GL	Cuadrados	
		Medios	Pr > F
Trat. Riego	4	0.0527	0.0004
Error	45	0.0084	
Total	49		

Nota: CV: 26.00%



**Figura 34. Índice de cosecha (%) de trigo harinero (*Triticum aestivum s sp aestivum L.*) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum s sp durum L.*) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

#### 4.4.7. Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>)

Para trigo harinero, el ANVA de rendimiento mostró diferencias altamente significativas (ver Tabla 64), como consecuencia de los tratamientos aplicados. En la prueba de Waller-Duncan o comparación de medias para el rendimiento, se encontró que existen diferencias estadísticas significativas entre el tratamiento de riego control (riego 1) y todos los demás tratamientos de riego (Tabla 63 y Figura 35). Sin embargo, el estrés hídrico afectó mucho más al rendimiento durante los estadios de macollamiento y encañado (riego 2 y riego 3, respectivamente). Los mayores rendimientos en este trigo harinero se produjeron en el riego control (1,301 kg ha<sup>-1</sup>) y el riego 5 (989 kg ha<sup>-1</sup>), con diferencias estadísticas significativas entre ambos valores.

(Jara, 1993) señala que el consumo de agua por la planta aumenta a medida que ésta se acerca más a la floración. El estrés hídrico afecta más cuando el tejido se encuentra en rápido crecimiento y desarrollo.

**Tabla 63: Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>), de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Tratamiento	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> ).	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	1300.5 ± 343.1	26%	a
Riego 2	394.0 ± 205.4	52%	d
Riego 3	256.4 ± 89.2	35%	d
Riego 4	642.5 ± 132.1	21%	c
Riego 5	988.5 ± 199.8	20%	b

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 64: ANVA, Rendimiento, de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat. Riego	4	1840884.630	<.0001
Error	45	45076.022	
Total	49		

Nota: CV: 29.63%

El ANVA aplicado en el rendimiento de trigo durum mostró diferencias altamente significativas (Tabla 66), debido a los tratamientos de riego aplicados en los diferentes estadios de desarrollo de la planta. En la prueba estadística de Waller-Duncan del rendimiento, se encuentran diferencias significativas entre el riego control (riego 1) y los tratamientos de riego 2 y riego 3 (correspondientes al estrés hídrico aplicado en el estadio de macollamiento y encañado, respectivamente (Tabla 65 y Figura 35). Los mayores rendimientos se lograron en el riego 5 (1,602 kg ha<sup>-1</sup>), el riego 1 (1,471 kg ha<sup>-1</sup>) y riego 4 (1,384 kg ha<sup>-1</sup>), no habiendo diferencias estadísticas entre ellos. A diferencia del trigo harinero, en esta especie el estrés hídrico solo afecto significativamente durante los primeros estadios de desarrollo de la planta. Según los resultados de este estudio, el trigo durum mutante Taray se muestra más tolerante a los tratamientos de estrés hídrico que la variedad Centenario de trigo harinero; en los diversos momentos de inicio de v y/o estadios evaluados.

**Tabla 65: Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>), de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

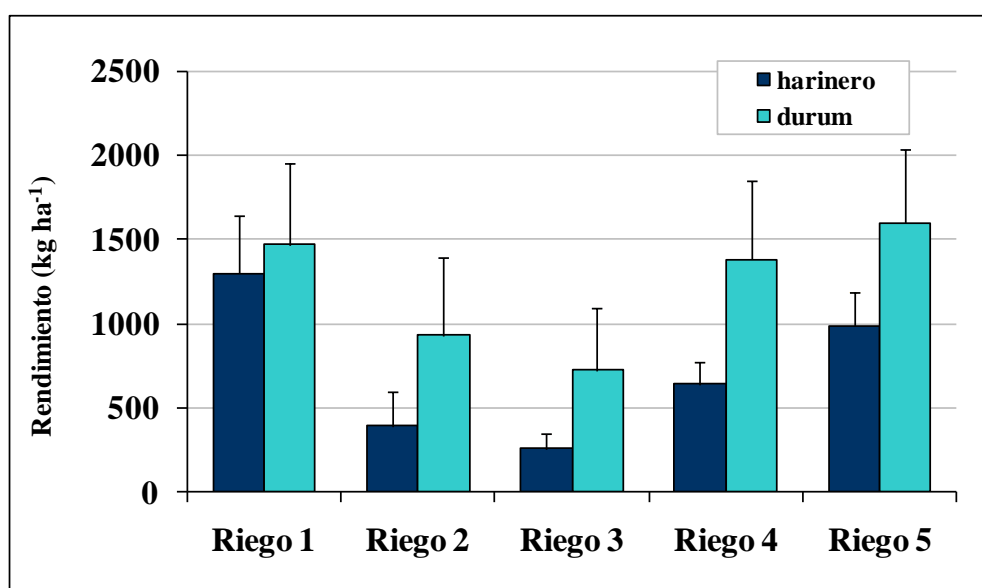
Tratamiento	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> ).	CV	Prueba Waller-Duncan <sup>[1]</sup>
Riego 1	1470.7 ± 481.0	33%	a
Riego 2	930.6 ± 465.3	50%	b
Riego 3	725.9 ± 372.9	51%	b
Riego 4	1384.3 ± 465.8	34%	a
Riego 5	1601.5 ± 199.8	20%	a

Nota: [1] significancia al 0.05 de probabilidad

**Tabla 66: ANVA, Rendimiento, de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

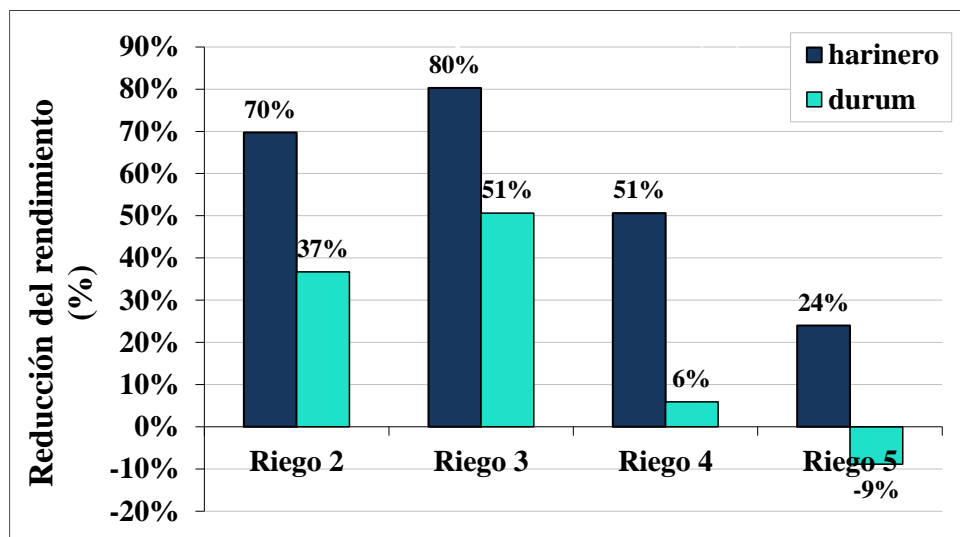
Fv	GL	Cuadrados Medios	Pr > F
Trat.			
Riego	4	1408371.60	0.0002
Error	45	199926.30	
Total	49		

Nota: CV: 36.57%.



**Figura 35. Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

En la Figura 36 se muestra el efecto del estrés hídrico sobre el rendimiento de ambos trigos comparando el grado de reducción del rendimiento con referencia al rendimiento en riego control o riego 1. Se puede observar que las mayores reducciones se producen en trigo harinero. Asimismo, estas reducciones fueron más altas cuando el estrés hídrico se produjo en los estadios de macollamiento (70% en harinero y 37% en durum) y encañado (80% en harinero y 51% en durum).



**Figura 36. Reducción del rendimiento (%) de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

En base a los resultados de diferentes estudios, como (Dietz, Zörb, & Geilfus, 2021; Langridge & Reynolds, 2021; Pequeno et al., 2021), se tiene que el estrés de agua aplicado al estado de anthesis ocasiona una disminución en el rendimiento de trigo en todos los genotipos probados, esta respuestas son similares a las encontrada en la presente investigación. En el trigo harinero se encontró que la sequía afectó de manera significativa el rendimiento también durante los estadios de floración-anthesis (Riego 4) y el estado de grano acuoso y lechoso (Riego 5) aunque con menor intensidad. Sin embargo, en trigo durum los tratamientos de Riego 4 y Riego 5 no afectaron significativamente el rendimiento.

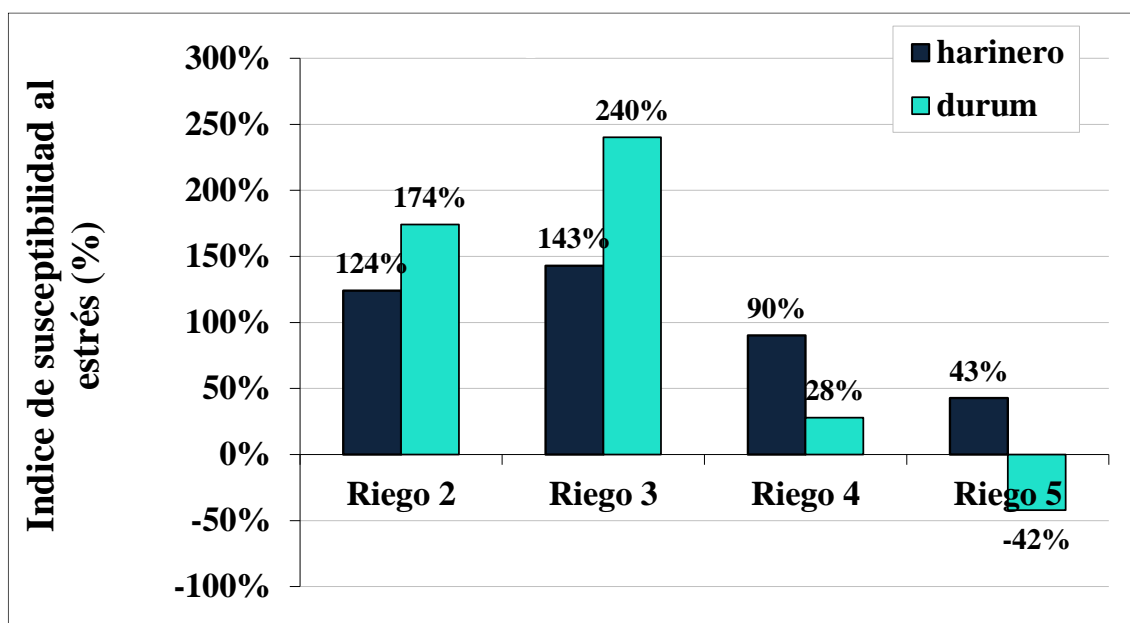


**OBJETIVO 2.-** Determinación de los índices de tolerancia al déficit hídrico y las correlaciones entre las diferentes variables analizadas, por efecto del estrés hídrico controlado.

#### 4.5. Índices de tolerancia y correlaciones

##### 4.5.1. Índice de susceptibilidad al estrés (%)

Esta variable indica el grado en el cual los tratamientos de estrés hídrico afectaron los rendimientos (en una relación porcentual. Para el trigo harinero el mayor índice de susceptibilidad se observó en el estrés hídrico durante el estado de encañado (riego 3) con 143%, seguido del estrés hídrico en el estadio de macollamiento (riego 2) con 124% (Figura 37). Lo mismo ocurre para el trigo durum, donde el mayor efecto ocurre en el riego 3 (240%) y el riego 2 (174%). En tanto, lo menores efectos ocurren para los riegos 4 (estrés hídrico en floración-antesis) y riego 5 (estrés hídrico en el estado de grano acuoso y lechoso), en ambas especies de trigo.

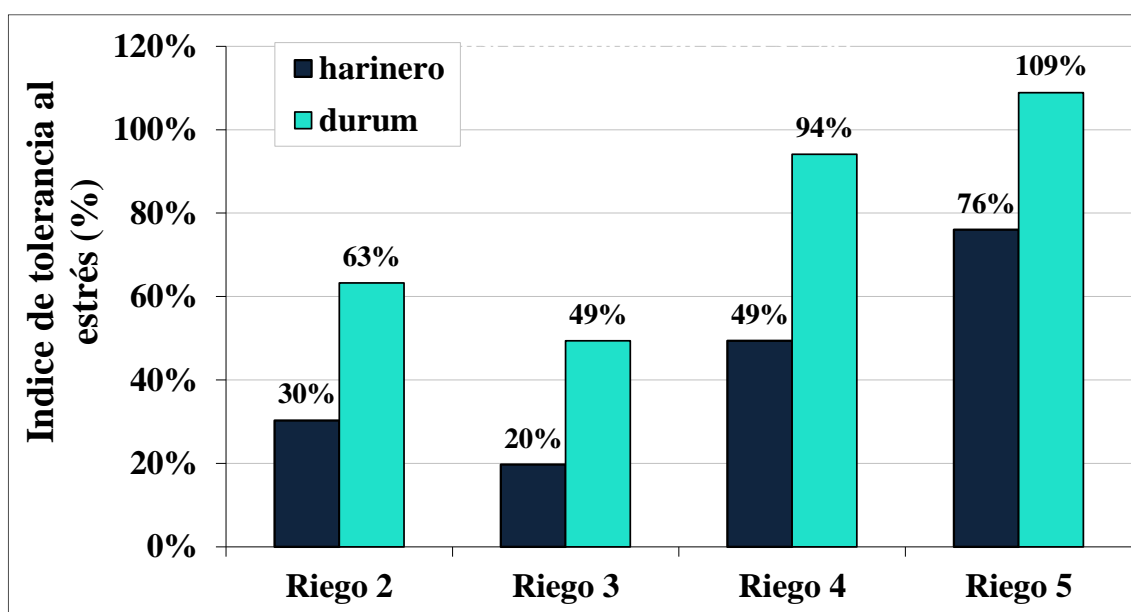


**Figura 37.** Índice de susceptibilidad al estrés de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina

Debido a que el índice de susceptibilidad a la sequía (SSI) es una medida de la estabilidad del rendimiento basada en la disminución bajo condiciones de estrés, tal como lo sugiere (Anwaar et al., 2020; Ayed et al., 2021; Ghodke, Ramakrishnan, Shirsat, Vani, & Arora, 2019), estos resultados comparados para cada trigo harinero y durum, muestran que la mayor reducción del rendimiento se produce cuando el estrés hídrico se inicia en el encañado o riego 3, seguido del tratamiento de estrés hídrico en el estadio de macollamiento o riego 2.

#### 4.5.2. Índice de tolerancia al estrés (%)

Esta variable es menor en los tratamientos de riego 3, correspondiente al estrés hídrico durante el estadio del encañado, para ambos tipos de trigo; harinero (con 20%) y durum (con 49%). El segundo estadio con menor tolerancia es el macollamiento, correspondiente al tratamiento de riego 2 estrés hídrico en el estadio de macollamiento. Este bajo valor de la tolerancia se expresa en la reducción del rendimiento en los tratamientos de riego 3 y riego 2, para ambos tipos de trigo (Figura 38).



**Figura 38. Índice de tolerancia al estrés de trigo harinero (*Triticum aestivum* s sp *aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum* s sp *durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Los resultados observados se ajustan a lo señalado por (Fernandez, 1992; Mathew et al., 2019), quienes señalan que el efecto de la sequía en el encañado produce una mayor reducción del rendimiento y rendimiento relativo.

### 4.5.3. Correlaciones entre variables

En los resultado de la Figura 39 se observa la matriz de correlación de todas las unidades experimentales (n=100) de las variables medidas en la cosecha final. Existe una correlación directa entre el rendimiento con el peso seco de biomasa (r=0.86), evapotranspiración total (r=0.81), número de granos por espiga (r=0.73), altura de planta (r=0.72) y peso de mil semillas (r=0.72). Del mismo modo el índice de cosecha presentó correlación directa con la variable eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano (r=0.66) y el número de granos por espiga (r=0.57). En el caso de la variable eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano presentó una correlación directa con el agua total evapotranspirada (r=0.74) y la variable eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa total (r=0.74). Finalmente, la variable eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa total mostró una correlación directa media con: el total de agua evapotranspirada (r=0.69), el número de granos por metro cuadrado (r=0.65) y el peso seco de biomasa (r=0.65).

	HP_CF	HE_CF	NFPE_CF	NGPE_CF	PD1000S	NEPE_CF	PS_BIOMAS	REND	NEPMC	HI	EV_TR	EUA_GRA	EUA_BIO
HP_CF													
HE_CF	-0.01 ns												
NFPE_CF	0.17 ns	0.59 **											
NGPE_CF	0.56 **	0.59 **	0.62 **										
PD1000S	0.55 **	0.05 ns	0.16 ns	0.43 **									
NEPE_CF	0.33 **	0.84 **	0.49 **	0.64 **	0.24 *								
PS_BIOMAS	0.77 **	-0.03 ns	0.09 ns	0.48 **	0.59 **	0.29 **							
REND	0.72 **	0.24 *	0.33 **	0.73 **	0.72 **	0.46 **	0.86 **						
NEPMC	0.47 **	-0.37 **	-0.17 ns	0.06 ns	0.25 *	-0.10 ns	0.68 **	0.50 **					
HI	0.19 ns	0.40 **	0.46 **	0.57 **	0.40 **	0.36 **	0.21 **	0.44 **	0.09 ns				
EV_TR	0.69 **	-0.05 ns	0.13 ns	0.51 **	0.60 **	0.19 ns	0.84 **	0.81 **	0.77 **	0.45 **			
EUA_GRA	0.54 **	0.03 ns	0.23 *	0.56 **	0.54 **	0.19 ns	0.58 **	0.68 **	0.48 **	0.66 **	0.74 **		
EUA_BIO	0.61 **	-0.35 **	-0.01 ns	0.27 **	0.46 **	-0.07 ns	0.65 **	0.58 **	0.65 **	0.20 *	0.69 **	0.74 **	

**Figura 39: Matriz de correlación de variables morfológicas y agronómicas de trigo harinero (*Triticum aestivum s sp aestivum* L.) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum s sp durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Nota: n=100

Leyenda: \* : significativo al 0.05 de probabilidad, \*\* : altamente significativo al 0.01 de probabilidad, ns : no significativo. HP\_CF: Altura de planta en cosecha final; HE\_CF: Longitud de la espiga en cosecha final; NFPE\_CF: Número de flores por espiga en cosecha final; NGPE\_CF: Número de granos por espiga en cosecha final; PD1000S: Peso de mil semillas; NEPE\_CF: Número de espiguillas por espiga en cosecha final; PS\_BIOM: Peso seco de biomasa total; REND: Rendimiento en cosecha final; NEPMC: Número de espigas por metro cuadrado; HI: Índice de cosecha; EV\_TR: Evapotranspiración del cultivo; EUA\_GRA: Eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano; EUA\_BIO: Eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa.

Para trigo harinero, la matriz de correlación para cada una de las observaciones (n=50) o unidades experimentales de las variables medidas en la cosecha final (ver resultados en Figura 40) muestra una correlación directa entre el rendimiento con las variables: altura de planta (r=0.70), número de granos por espiga (r=0.80), peso de mil semillas (r=0.74), peso seco de biomasa (r=0.87), índice de cosecha (r=0.76), evapotranspiración total (r=0.89), eficiencia de uso de agua relativa al grano (r=0.88) y eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa total (r=0.81). Del mismo modo, el índice de cosecha presenta una correlación directa media entre el número de granos por espiga (r=0.70), la evapotranspiración total (r=0.71), la eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano (r=0.84) y la eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa total (r=0.76). La variable eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano presenta una correlación directa media con: la altura de planta (r=0.67), el número de granos por espiga (r=0.77), el peso seco de la biomasa total (r=0.73), la evapotranspiración total (r=0.76) y la eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa total (r=0.85). Finalmente, la eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa total muestra una correlación directa media con: el número de granos por espiga (r=0.73), el peso seco de biomasa (r=0.68), el número de espigas por metro cuadrado (r=0.69) y la evapotranspiración total (r=0.73).

	HP_CF	HE_CF	NFPE_CF	NGPE_CF	PD1000S	NEPE_CF	PS_BIOMAS	REND	NEPMC	HI	EV_TR	EUA_GRA	EUA_BIO
HP_CF													
HE_CF	0.67 **												
NFPE_CF	0.68 **	0.57 **											
NGPE_CF	0.86 **	0.60 **	0.66 **										
PD1000S	0.40 **	0.31 *	0.36 **	0.40 **									
NEPE_CF	0.64 **	0.83 **	0.50 **	0.45 **	0.19 ns								
PS_BIOMAS	0.71 **	0.64 **	0.56 **	0.72 **	0.60 **	0.51 **							
REND	0.70 **	0.54 **	0.59 **	0.80 **	0.74 **	0.37 **	0.87 **						
NEPMC	0.27 ns	0.22 ns	0.39 **	0.43 **	0.38 **	0.03 ns	0.59 **	0.70 **					
HI	0.64 **	0.40 **	0.55 **	0.70 **	0.64 **	0.33 *	0.54 **	0.76 **	0.38 **				
EV_TR	0.59 **	0.54 **	0.52 **	0.70 **	0.70 **	0.32 *	0.82 **	0.89 **	0.68 **	0.71 **			
EUA_GRA	0.67 **	0.41 **	0.48 **	0.77 **	0.62 **	0.31 *	0.73 **	0.88 **	0.56 **	0.84 **	0.76 **		
EUA_BIO	0.60 **	0.34 *	0.51 **	0.73 **	0.50 **	0.27 ns	0.68 **	0.81 **	0.69 **	0.76 **	0.73 **	0.85 **	

**Figura 40: Matriz de correlación de variables morfológicas y agronómicas, de trigo harinero (*Triticum aestivum s sp aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Nota: n=50

Leyenda: \* : significativo al 0.05 de probabilidad, \*\* : altamente significativo al 0.01 de probabilidad, ns : no significativo. HP\_CF: Altura de planta en cosecha final; HE\_CF: Longitud de la espiga en cosecha final; NFPE\_CF: Número de flores por espiga en cosecha final; NGPE\_CF: Número de granos por espiga en cosecha final; PD1000S: Peso de mil semillas; NEPE\_CF: Número de espiguillas por espiga en cosecha final; PS\_BIOM: Peso seco de biomasa total; REND: Rendimiento en cosecha final; NEPMC: Número de espigas

por metro cuadrado; HI: Índice de cosecha; EV\_TR: Evapotranspiración del cultivo; EUA\_GRA: Eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano; EUA\_BIO: Eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa.

Para trigo durum, la matriz de correlación para cada una de las observaciones (n=50) o unidades experimentales de las variables medidas en la cosecha final (ver resultados en Figura 41) muestra una correlación directa entre el rendimiento con las variables: longitud de la espiga (r=0.79), altura de la planta (r=0.60), número de granos por espiga (r=0.81), número de espiguillas por espiga (r=0.77), peso seco de biomasa (r=0.83) y evapotranspiración total (r=0.65). Del mismo modo, el índice de cosecha presenta una correlación directa media con la evapotranspiración total (r=0.80) y la eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano (r=0.74). La variable eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano presenta una correlación directa media con la evapotranspiración total (r=0.65) y la eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa total (r=0.60).

	HP_CF	HE_CF	NFPE_CF	NGPE_CF	PD1000S	NEPE_CF	PS_BIOMAS	REND	NEPMC	HI	EV_TR	EUA_GRA
HP_CF												
HE_CF	0.72 **											
NFPE_CF	0.59 **	0.53 **										
NGPE_CF	0.72 **	0.83 **	0.70 **									
PD1000S	0.44 **	0.48 **	0.30 *	0.55 **								
NEPE_CF	0.68 **	0.97 **	0.47 **	0.79 **	0.52 **							
PS_BIOMAS	0.47 **	0.61 **	0.40 **	0.58 **	0.38 **	0.60 **						
REND	0.60 **	0.79 **	0.59 **	0.81 **	0.59 **	0.77 **	0.83 **					
NEPMC	-0.14 ns	0.05 ns	0.02 ns	-0.02 ns	-0.22 ns	0.04 ns	0.35 *	0.21 ns				
HI	0.32 *	0.70 **	0.24 ns	0.48 **	0.34 *	0.37 **	0.44 **	0.47 **	0.40 **			
EV_TR	0.35 *	0.46 **	0.40 **	0.60 **	0.25 ns	0.44 **	0.68 **	0.65 **	0.65 **	0.80 **		
EUA_GRA	0.25 ns	0.27 ns	0.30 *	0.44 **	0.26 ns	0.26 ns	0.31 *	0.40 **	0.40 *	0.74 **	0.65 **	
EUA_BIO	-0.10 ns	-0.07 ns	0.09 ns	0.02 ns	-0.08 ns	-0.08 ns	0.03 ns	0.04 ns	0.04 ns	0.05 ns	0.17 ns	0.60 **

**Figura 41: Matriz de correlación de variables morfológicas y agronómicas, de trigo extraduro (*Triticum turgidum s sp durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Nota: n=50

Leyenda: \* : significativo al 0.05 de probabilidad, \*\* : altamente significativo al 0.01 de probabilidad, ns : no significativo. HP\_CF: Altura de planta en cosecha final; HE\_CF: Longitud de la espiga en cosecha final; NFPE\_CF: Número de flores por espiga en cosecha final; NGPE\_CF: Número de granos por espiga en cosecha final; PD1000S: Peso de mil semillas; NEPE\_CF: Número de espiguillas por espiga en cosecha final; PS\_BIOM: Peso seco de biomasa total; REND: Rendimiento en cosecha final; NEPMC: Número de espigas por metro cuadrado; HI: Índice de cosecha; EV\_TR: Evapotranspiración del cultivo; EUA\_GRA: Eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano; EUA\_BIO: Eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa.

	HP_CF	HE_CF	NFPE_CF	NGPE_CF	PD1000S	NEPE_CF	PS_BIOMAS	REND	NEPMC	HI	EV_TR	EUA_GRA	EUA_BIO	SPAD	CRA	PROL	NR	PO	
HP_CF																			
HE_CF	-0.28 ns																		
NFPE_CF	0.06 ns	0.88 **																	
NGPE_CF	0.58 ns	0.60 ns	0.80 **																
PD1000S	0.81 **	0.02 ns	0.26 ns	0.66 *															
NEPE_CF	0.28 ns	0.80 **	0.92 **	0.90 **	0.37 ns														
PS_BIOMAS	0.91 **	-0.33 ns	0.01 ns	0.49 ns	0.79 **	0.13 ns													
REND	0.87 **	0.03 ns	0.34 ns	0.77 *	0.90 **	0.44 ns	0.92 **												
NEPMC	0.61 ns	-0.67 *	-0.37 ns	0.00 ns	0.38 ns	-0.36 ns	0.81 **	0.56 ns											
HI	0.27 ns	0.71 *	0.84 **	0.83 **	0.61 ns	0.81 **	0.19 ns	0.53 ns	-0.26 ns										
EV_TR	0.87 **	-0.17 ns	0.13 ns	0.58 ns	0.82 **	0.23 ns	0.97 **	0.94 **	0.75 *	0.30 ns									
EUA_GRA	0.82 **	0.07 ns	0.39 ns	0.75 *	0.92 **	0.47 ns	0.83 **	0.94 **	0.43 ns	0.63 *	0.83 **								
EUA_BIO	0.84 **	-0.54 ns	-0.18 ns	0.25 ns	0.66 *	-0.09 ns	0.90 **	0.74 *	0.80 **	0.00 ns	0.80 **	0.76 *							
SPAD	0.01 ns	-0.44 ns	-0.33 ns	-0.36 ns	-0.19 ns	-0.48 ns	0.18 ns	-0.06 ns	0.48 ns	-0.54 ns	0.10 ns	-0.12 ns	0.30 ns						
CRA	0.85 **	-0.29 ns	0.08 ns	0.47 ns	0.72 *	0.19 ns	0.88 **	0.81 **	0.65 *	0.15 ns	0.81 **	0.76 *	0.82 **	0.39 ns					
PROL	-0.77 **	0.02 ns	-0.36 ns	-0.58 ns	-0.83 **	-0.38 ns	-0.78 **	-0.80 **	-0.49 ns	-0.50 ns	-0.81 **	-0.82 **	-0.69 *	-0.04 ns	-0.77 **				
NR	0.01 ns	0.30 ns	0.24 ns	0.23 ns	0.32 ns	0.16 ns	-0.07 ns	0.11 ns	-0.20 ns	0.58 ns	0.03 ns	0.25 ns	-0.07 ns	-0.43 ns	-0.29 ns	-0.13 ns			
PO	0.83 **	-0.25 ns	0.17 ns	0.49 ns	0.78 **	0.21 ns	0.91 **	0.86 **	0.70 *	0.29 ns	0.87 **	0.85 **	0.88 **	0.24 ns	0.92 **	-0.90 **	-0.13 ns		
AF	0.26 ns	0.72 *	0.81 **	0.82 **	0.36 ns	0.86 **	0.12 ns	0.41 ns	-0.30 ns	0.70 *	0.20 ns	0.39 ns	-0.14 ns	-0.16 ns	0.32 ns	-0.31 ns	0.06 ns	19.00 ns	

**Figura 42: Matriz de correlación de variables morfo-agronómicas y fisiológicas, de trigo harinero (*Triticum aestivum s sp aestivum L.*) y de trigo extraduro (*Triticum turgidum s sp durum L.*) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Nota: n=10

Leyenda: \* : significativo al 0.05 de probabilidad, \*\* : altamente significativo al 0.01 de probabilidad, ns : no significativo

HP\_CF: Altura de planta en cosecha final; HE\_CF: Longitud de la espiga en cosecha final; NFPE\_CF: Número de flores por espiga en cosecha final; NGPE\_CF: Número de granos por espiga en cosecha final; PD1000S: Peso de mil semillas; NEPE\_CF: Número de espiguillas por espiga en cosecha final; PS\_BIOM: Peso seco de biomasa total; REND: Rendimiento en cosecha final; NEPMC: Número de espigas por metro cuadrado; HI: Índice de cosecha; EV\_TR: Evapotranspiración del cultivo; EUA\_GRA: Eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano; EUA\_BIO: Eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa; SPAD: Contenido de clorofila en unidades SPAD; CRA: Contenido relativo de agua; PROL: Contenido de prolina libre; NR: Actividad de la encima de nitrato reductasa; PO: Potencial osmótico; AF: Área foliar de la hoja bandera

	HP_CF	HE_CF	NFPE_CF	NGPE_CF	PD1000S	NEPE_CF	PS_BIOMAS	REND	NEPMC	HI	EV_TR	EUA_GRA	EUA_BIO	SPAD	CRA	PROL	NR	PO	
HP_CF																			
HE_CF	0.89 *																		
NFPE_CF	0.99 **	0.88 *																	
NGPE_CF	0.98 **	0.94 *	0.97 **																
PD1000S	0.81 ns	0.97 **	0.80 ns	0.90 *															
NEPE_CF	0.98 **	0.79 ns	0.97 **	0.91 *	0.68 ns														
PS_BIOMAS	0.79 ns	0.91 *	0.84 ns	0.86 ns	0.89 *	0.70 ns													
REND	0.84 ns	0.96 *	0.87 ns	0.92 *	0.97 **	0.72 ns	0.97 **												
NEPMC	0.38 ns	0.57 ns	0.50 ns	0.49 ns	0.58 ns	0.30 ns	0.85 ns	0.74 ns											
HI	0.90 *	0.91 *	0.86 ns	0.95 *	0.92 *	0.80 ns	0.74 ns	0.86 ns	0.31 ns										
EV_TR	0.74 ns	0.95 *	0.75 ns	0.80 ns	0.92 *	0.63 ns	0.94 ns	0.93 *	0.73 ns	0.73 ns									
EUA_GRA	0.89 *	0.91 *	0.91 *	0.96 **	0.93 *	0.78 ns	0.91 *	0.97 **	0.63 ns	0.92 *	0.81 ns								
EUA_BIO	0.80 ns	0.78 ns	0.87 ns	0.86 ns	0.77 ns	0.73 ns	0.92 *	0.90 *	0.80 ns	0.71 ns	0.74 ns	0.92 *							
SPAD	-0.38 ns	-0.32 ns	-0.24 ns	-0.31 ns	-0.28 ns	-0.37 ns	0.09 ns	-0.07 ns	0.59 ns	-0.50 ns	-0.11 ns	-0.13 ns	0.21 ns						
CRA	0.60 ns	0.55 ns	0.71 ns	0.63 ns	0.50 ns	0.59 ns	0.81 ns	0.70 ns	0.87 ns	0.38 ns	0.60 ns	0.69 ns	0.91 *	0.51 ns					
PROL	-0.94 *	-0.94 *	-0.95 *	-0.93 *	-0.85 ns	-0.91 *	-0.89 *	-0.88 **	-0.54 ns	-0.82 ns	-0.89 *	-0.85 ns	-0.79 ns	0.28 ns	-0.65 ns				
NR	0.38 ns	0.52 ns	0.28 ns	0.47 ns	0.63 ns	0.22 ns	0.21 ns	0.43 ns	-0.16 ns	0.72 ns	0.34 ns	0.48 ns	0.11 ns	-0.70 ns	-0.30 ns	-0.27 ns			
PO	0.86 ns	0.82 ns	0.93 *	0.88 ns	0.75 ns	0.84 ns	0.93 *	0.88 *	0.77 ns	0.68 ns	0.80 ns	0.87 ns	0.95 *	0.12 ns	0.91 *	-0.90 *	0.01 ns		
AF	0.85 ns	0.69 ns	0.91 *	0.86 ns	0.65 ns	0.84 ns	0.78 ns	0.78 ns	0.60 ns	0.71 ns	0.57 ns	0.87 ns	0.95 *	0.10 ns	0.86 ns	-0.76 ns	0.08 ns	0.92 *	

**Figura 43: Matriz de correlación de variables morfo-agronómicas y fisiológicas, de trigo harinero (*Triticum aestivum s sp aestivum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Nota: n=10

Leyenda: \* : significativo al 0.05 de probabilidad, \*\* : altamente significativo al 0.01 de probabilidad, ns : no significativo

HP\_CF: Altura de planta en cosecha final; HE\_CF: Longitud de la espiga en cosecha final; NFPE\_CF: Número de flores por espiga en cosecha final; NGPE\_CF: Número de granos por espiga en cosecha final; PD1000S: Peso de mil semillas; NEPE\_CF: Número de espiguillas por espiga en cosecha final; PS\_BIOM: Peso seco de biomasa total; REND: Rendimiento en cosecha final; NEPMC: Número de espigas por metro cuadrado; HI: Índice de cosecha; EV\_TR: Evapotranspiración del cultivo; EUA\_GRA: Eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano; EUA\_BIO: Eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa; SPAD: Contenido de clorofila en unidades SPAD; CRA: Contenido relativo de agua; PROL: Contenido de prolina libre; NR: Actividad de la encima de nitrato reductasa; PO: Potencial osmótico; AF: Área foliar de la hoja bandera

	HP_CF	HE_CF	NFPE_CF	NGPE_CF	PD1000S	NEPE_CF	PS_BIOMAS	REND	NEPMC	HI	EV_TR	EUA_GRA	EUA_BIO	SPAD	CRA	PROL	NR	PO	
HP_CF																			
HE_CF	0.96 **																		
NFPE_CF	0.88 *	0.97 **																	
NGPE_CF	0.96 *	0.99 **	0.96 *																
PD1000S	0.77 ns	0.71 ns	0.58 ns	0.73 ns															
NEPE_CF	0.99 **	0.99 **	0.93 *	0.99 **	0.77 ns														
PS_BIOMAS	0.67 ns	0.77 ns	0.82 ns	0.83 ns	0.42 ns	0.75 ns													
REND	0.85 ns	0.90 **	0.89 *	0.95 *	0.71 ns	0.91 *	0.93 *												
NEPMC	-0.42 ns	-0.21 ns	-0.01 ns	-0.18 ns	-0.58 ns	-0.31 ns	0.33 ns	0.01 ns											
HI	0.89 *	0.90 *	0.84 ns	0.91 *	0.93 *	0.92 *	0.68 ns	0.89 *	-0.33 ns										
EV_TR	0.68 ns	0.81 ns	0.88 *	0.85 ns	0.42 ns	0.77 ns	0.98 **	0.93 *	0.35 ns	0.70 ns									
EUA_GRA	0.91 *	0.86 ns	0.78 ns	0.92 *	0.79 ns	0.92 *	0.80 ns	0.93 *	-0.29 ns	0.87 ns	0.75 ns								
EUA_BIO	-0.02 ns	-0.12 ns	-0.15 ns	-0.05 ns	-0.42 ns	-0.07 ns	0.17 ns	-0.03 ns	0.15 ns	-0.37 ns	0.05 ns	0.13 ns							
SPAD	-0.50 ns	-0.35 ns	-0.19 ns	-0.46 ns	-0.71 ns	-0.47 ns	-0.40 ns	-0.55 ns	0.45 ns	-0.56 ns	-0.27 ns	-0.76 ns	-0.20 ns						
CRA	0.79 ns	0.87 ns	0.86 ns	0.82 ns	0.75 ns	0.83 ns	0.50 ns	0.71 ns	-0.27 ns	0.89 *	0.61 ns	0.61 ns	-0.59 ns	-0.13 ns					
PROL	-0.53 ns	-0.66 ns	-0.71 ns	-0.58 ns	-0.53 ns	-0.58 ns	-0.29 ns	-0.46 ns	0.12 ns	-0.68 ns	-0.43 ns	-0.28 ns	0.76 ns	-0.20 ns	-0.93 *				
NR	-0.02 ns	-0.11 ns	-0.16 ns	-0.22 ns	-0.37 ns	-0.13 ns	-0.54 ns	-0.50 ns	-0.39 ns	-0.38 ns	-0.49 ns	-0.35 ns	0.22 ns	0.48 ns	-0.12 ns	0.03 ns			
PO	0.48 ns	0.66 ns	0.75 ns	0.70 ns	0.51 ns	0.61 ns	0.84 ns	0.83 ns	0.39 ns	0.73 ns	0.88 ns	0.58 ns	-0.36 ns	-0.22 ns	0.67 ns	-0.59 ns	-0.73 ns		
AF	0.86 ns	0.93 **	0.91 *	0.88 ns	0.75 ns	0.89 *	0.56 ns	0.76 ns	-0.29 ns	0.90 *	0.65 ns	0.68 ns	-0.47 ns	-0.18 ns	0.99 *	-0.88 *	-0.07 ns	0.65 ns	

**Figura 44: Matriz de correlación de variables morfo-agronómicas y fisiológicas, de trigo extraduro (*Triticum turgidum s sp durum* L.) bajo estrés hídrico en diferentes estadios de desarrollo del cultivo. La Molina**

Nota: n=10

Leyenda: \* : significativo al 0.05 de probabilidad, \*\* : altamente significativo al 0.01 de probabilidad, ns : no significativo

HP\_CF: Altura de planta en cosecha final; HE\_CF: Longitud de la espiga en cosecha final; NFPE\_CF: Número de flores por espiga en cosecha final; NGPE\_CF: Número de granos por espiga en cosecha final; PD1000S: Peso de mil semillas; NEPE\_CF: Número de espiguillas por espiga en cosecha final; PS\_BIOM: Peso seco de biomasa total; REND: Rendimiento de grano en cosecha final; NEPMC: Número de espigas por metro cuadrado; HI: Índice de cosecha; EV\_TR: Evapotranspiración del cultivo; EUA\_GRA: Eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano; EUA\_BIO: Eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa; SPAD: Contenido de clorofila en unidades SPAD; CRA: Contenido relativo de agua; PROL: Contenido de prolina libre; NR: Actividad de la encima de nitrato reductasa; PO: Potencial osmótico; AF: Área foliar de la hoja bandera



La matriz de correlación para los promedios de los tratamientos ( $n=10$ ) o medias de las variables medidas en las cosechas intermedia y en la cosecha final de ambos tipos de trigo (ver resultados en Figura 42), mostró una alta correlación directa entre el rendimiento y las variables: evapotranspiración total ( $r=0.94$ ), eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano ( $r=0.94$ ), peso seco de biomasa total ( $r=0.92$ ), peso de mil semillas ( $r=0.90$ ), altura de planta en la cosecha final ( $r=0.87$ ), el potencial osmótico ( $r=0.86$ ) y el contenido relativo de agua ( $r=0.81$ ); por otro lado, la correlación fué negativa con la prolina libre ( $r=0.80$ ). El índice de cosecha tiene una alta correlación directa con: el número de flores por espiga ( $r=0.84$ ), el número de granos por espiga ( $r=0.83$ ), el número de espigas por espiguilla ( $r=0.81$ ), longitud de la espiga ( $r=0.71$ ) y el área foliar de la hoja bandera ( $r=0.70$ ). Asimismo, el contenido relativo de agua mostró una alta correlación positiva con: el potencial osmótico ( $r=0.92$ ), el peso seco de la biomasa ( $r=0.88$ ), la altura de planta en la cosecha final ( $r=0.85$ ), la eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa ( $r=0.82$ ), el agua total evapotranspirada ( $r=0.81$ ) y el rendimiento de grano ( $r=0.81$ ) y por otro lado muestra una correlación negativa con respecto al contenido de prolina libre ( $r=0.77$ ). En tanto, el contenido de la prolina libre tiene una alta correlación negativa con: el potencial osmótico ( $r=0.90$ ), el peso de mil semillas ( $r=0.83$ ), la eficiencia de uso agua relativa al rendimiento de grano ( $r=0.82$ ), el agua total evapotranspirada ( $r=0.81$ ), el peso seco de biomasa ( $r=0.78$ ) y la altura de planta en la cosecha final ( $r=0.77$ ). Finalmente, el potencial osmótico se correlaciona positivamente con: el peso seco de biomasa total ( $r=0.91$ ), la eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa ( $r=0.88$ ), el agua total evapotranspirada ( $r=0.87$ ), la eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento de grano ( $r=0.85$ ) y la altura de planta en la cosecha final ( $r=0.83$ ).

### Trigo Harinero

La matriz de correlación de trigo harinero para los promedios de los tratamientos ( $n=10$ ) o medias de las variables medidas en las cosechas intermedia y en la cosecha final (ver resultados en Figura 43), mostró correlación directa alta entre la variable de rendimiento de grano y las variables: longitud de la espiga ( $r=0.96$ ), número de granos por espiga ( $r=0.92$ ), peso de mil semillas ( $r=0.97$ ), peso seco de biomasa total ( $r=0.97$ ), evapotranspiración total ( $r=0.93$ ), eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano ( $r=0.97$ ), eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa total ( $r=0.90$ ) y el potencial osmótico ( $r=0.88$ ). Asimismo,

se observa una correlación inversamente proporcional entre el rendimiento en grano y la prolina libre ( $r = -0.88$ ). Por otro lado, el índice de cosecha tiene una alta correlación directa con las variables: altura de planta ( $r = 0.90$ ), longitud de la espiga ( $r = 0.91$ ), número de granos por espiga ( $r = 0.95$ ), peso de mil semillas ( $r = 0.92$ ) y el uso eficiente de agua relativa al rendimiento en grano ( $r = 0.92$ ). Asimismo, la variable contenido relativo de agua mostró una alta correlación positiva con: la eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa total ( $r = 0.91$ ) y el potencial osmótico ( $r = 0.91$ ). En tanto, el contenido de la prolina libre tiene una alta correlación inversa (o negativa) con: la altura de planta en la cosecha final ( $r = -0.94$ ), la longitud de la espiga ( $r = -0.94$ ), el número de flores por espiga ( $r = -0.95$ ), el número de granos por espiga ( $r = -0.93$ ), el número de espiguillas por espiga ( $r = 0.91$ ), la evapotranspiración total ( $r = 0.89$ ) y el potencial osmótico ( $r = 0.90$ ). Finalmente, el potencial osmótico tiene una alta correlación positiva con el número de flores por espiga ( $r = 0.93$ ), el peso seco de biomasa total ( $r = 0.93$ ), la eficiencia de uso de agua relativa a la biomasa ( $r = 0.95$ ) y el área foliar de la hoja bandera ( $r = 0.92$ ).

### Trigo Durum

La matriz de correlación en trigo durum para los promedios de los tratamientos ( $n = 10$ ) o medias de las variables medidas en las cosechas intermedia y en la cosecha final (ver resultados en Figura 44), mostró correlación directa alta entre el rendimiento de grano y las variables: longitud de la espiga ( $r = 0.90$ ), número de flores por espiga ( $r = 0.89$ ), número de granos por espiga ( $r = 0.95$ ), número de espigas por espiguilla ( $r = 0.91$ ), peso seco de biomasa total ( $r = 0.93$ ), índice de cosecha ( $r = 0.89$ ), evapotranspiración total ( $r = 0.93$ ) y eficiencia de uso de agua relativa al rendimiento en grano ( $r = 0.93$ ). Por otro lado, el índice de cosecha tiene una alta correlación directa con: la altura de planta ( $r = 0.89$ ), longitud de la espiga ( $r = 0.90$ ), el número de granos por espiga ( $r = 0.91$ ), peso de mil semillas ( $r = 0.93$ ), el contenido relativo de agua ( $r = 0.89$ ) y el área foliar de la hoja bandera ( $r = 0.90$ ). Asimismo, el contenido relativo de agua mostró una alta correlación directa con: el área foliar de la hoja bandera ( $r = 0.99$ ) y una correlación inversamente proporcional con el contenido de prolina ( $r = -0.93$ ). En tanto, el contenido de la prolina libre tiene una alta correlación inversa (o negativa) con el área de hoja bandera ( $r = -0.88$ ).

## V. CONCLUSIONES

### Objetivo 1

Las características morfológicas que más se vieron afectadas por el estrés hídrico fueron: altura de planta y área foliar. Las características fisiológicas que se vieron afectados por el estrés hídrico fueron: potencial osmótico, contenido de clorofila y contenido relativo de agua. La característica bioquímica que se vio más afectada por el estrés hídrico fue el contenido de prolina. El componente de rendimiento mayor afectado por efecto del estrés hídrico fue el peso de mil granos. El estadio fenológico en el cual el rendimiento en grano se vio más afectado por efecto del estrés hídrico en trigo harinero y trigo durum fue en el estadio de elongación del tallo o encañado (Riego 3).

### Objetivo 2

El índice de susceptibilidad al estrés hídrico SSI fue mayor en el tratamiento de riego 3 y riego 2, correspondientes a los periodos de estrés hídrico aplicado en los estadios de crecimiento de encañado o elongación de tallo y macollamiento para ambos genotipos evaluados. El índice de tolerancia al estrés hídrico STI fue menor en el tratamiento de riego 3, donde se expresó la mayor reducción del rendimiento, para ambos genotipos evaluados.

Con respecto a las correlaciones entre las variables analizadas, se encontró que: el potencial osmótico presentó una correlación inversa ( $r = -0.90$ ) con el contenido de prolina libre en la hoja solo en el caso del trigo harinero, no así en trigo durum. El contenido de prolina libre en trigo harinero se correlaciono negativamente con el rendimiento ( $r = -0.88$ ), los componentes de rendimiento (excepto el peso de mil granos y el número de espigas por metro cuadrado) y la evapotranspiración del cultivo ( $r = -0.89$ ). El contenido de prolina libre en trigo durum presentó correlación negativa solo con el CRA ( $r = -0.93$ ) y el área foliar ( $r = -0.88$ ).

## **VI. RECOMENDACIONES**

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en el presente estudio, se recomienda:

- Aplicar el estrés hídrico en el estadio de elongación del tallo o encañado para hacer la selección de líneas de trigo tolerantes.
- Realizar un estudio similar al descrito en la presente investigación en condiciones de campo para establecer las similitudes o diferencias, y en base a ello establecer un protocolo de selección de líneas tolerantes al estrés hídrico.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abbate, P., & Divito, G. A. (2017). *Como crece y se desarrolla el cultivo de trigo*.
- Abrão, C. E. B. C., Silva, A. V., Silva, L. M. da, Reis, R. P. dos, & Barbosa, L. S. (2022). Clorofila e teor de nitrogênio foliar de diferentes cultivares de trigo em muzambinho. *Mg. 15ª Jornada científica e tecnológica e 12ª Simpósio de pós-graduação do ifsuldeminas*, 14(1). Recuperado de <https://josif.ifsuldeminas.edu.br/ojs/index.php/anais/article/view/155>
- Agraria.pe. (2023, junio 5). Perú importó trigo por US\$ 235 millones entre enero y abril de 2023. Recuperado 25 de febrero de 2024, de Agraria.pe Agencia Agraria de Noticias website: <https://agraria.pe/noticias/peru-importo-trigo-por-us-235-millones-entre-enero-y-abril-d-32033>
- Ahmad, M. J., Iqbal, M. A., & Choi, K. S. (2020). Climate-driven constraints in sustaining future wheat yield and water productivity. *Agricultural Water Management*, 231, 105991. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105991>
- Ahmed, H., Sajjad, M., Li, M., Azmat, M., Rizwan, M., Maqsood, R., & Khan, S. (2019). Selection Criteria for Drought-Tolerant Bread Wheat Genotypes at Seedling Stage. *Sustainability*, 11(9), 2584. <https://doi.org/10.3390/su11092584>
- Ali, M., Gul, A., Hasan, H., Gul, S., Fareed, A., Nadeem, M., ... Jamil, M. (2020). Chapter 9—Cellular mechanisms of drought tolerance in wheat. En M. Ozturk & A. Gul (Eds.), *Climate Change and Food Security with Emphasis on Wheat* (pp. 155-167). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819527-7.00009-1>
- Altaf, L., Adiland Gull, Sadiand Zhu, Xin-kaiand Zhu, Minand Rasool, Ghulamand Hussienibrahim, Muhi Eldeenand Aleem, Muhammadand Uddin, Saleemand Saeed,

- Aamirand Shah, Amir Zamanand Zada, Ahmadand Quan, Maand Yonggang, Dingand Xu, Dong-yiand Chen. (2021). Study of the effect of peg-6000 imposed drought stress on wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars using relative water content (RWC) and proline content analysis. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 58(1), 357-367.
- Anwaar, H. A., Perveen, R., Mansha, M. Z., Abid, M., Sarwar, Z. M., Aatif, H. M., ... Khan, K. A. (2020). Assessment of grain yield indices in response to drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(7), 1818-1823. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.12.009>
- Arifuzzaman, M., Barman, S., Hayder, S., Azad, M. A. K., Turin, M. T. S., Amzad, M. A., & Masuda, M. S. (2020). Screening of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under drought stress conditions using multivariate analysis. *Cereal Research Communications*, 48(3), 301-308. <https://doi.org/10.1007/s42976-020-00039-8>
- Ayed, S., Othmani, A., Bouhaouel, I., & Teixeira Da Silva, J. A. (2021). Multi-Environment Screening of Durum Wheat Genotypes for Drought Tolerance in Changing Climatic Events. *Agronomy*, 11(5), 875. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050875>
- Ayele, M., Blum, A., & Nguyen, H. (2001). Diversity for osmotic adjustment and root depth in TEF [*Eragrostis tef* (Zucc) Trotter]. *Euphytica*, 121, 237-249. <https://doi.org/10.1023/A:1012099914738>
- Bartlett, M. K., Zhang, Y., Kreidler, N., Sun, S., Ardy, R., Cao, K., & Sack, L. (2014). Global analysis of plasticity in turgor loss point, a key drought tolerance trait. *Ecology Letters*, 17(12), 1580-1590. <https://doi.org/10.1111/ele.12374>
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39(1), 205-207.

- Benedetto, D. (2016). *Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: Su aplicación a cultivos intensivos*. 42.
- Beyá-Marshall, V., & Galleguillos, M. (2020). *Optimización del riego en paltos y cítricos* (Facultad de ciencias agronómicas, Universidad de Chile, Vol. 1). Santiago de Chile.
- Bhogapurapu, N., Dey, S., Mandal, D., Bhattacharya, A., & Rao, Y. S. (2021). Monitoring Wheat Crop Growth Using a New Vegetation Index from Sentinel-1 GRD SAR Data. *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, 5921-5924. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554351>
- Blum, A. (1989). Osmotic Adjustment and Growth of Barley Genotypes under Drought Stress. *Crop Science - CROP SCI*, 29. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900010052x>
- Blum, A. (1998). Improving wheat grain filling under stress by stem reserve mobilisation. *Euphytica*, 100, 77-83. <https://doi.org/10.1023/A:1018303922482>
- Bogale Gonfa, A., & Tesfaye, K. (2016). Relationship between grain yield and yield components of the Ethiopian durum wheat genotypes at various growth stages. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 19(1). <https://doi.org/10.56369/tsaes.1419>
- Borges, C. E. U., Escobar, C. I. M. R., Adriano, C. J., Rodríguez, C., Guevara, C. D. M., & Sánchez, S. G. (2014). *Las relaciones hídricas y el metabolismo del nitrógeno en plantas de tomate (Lycopersicon esculentum M.) cultivadas en un suelo tratado con biosólidos y diferentes niveles de abastecimiento hídrico*. 1.
- Bowne, J. B., Erwin, T. A., Juttner, J., Schnurbusch, T., Langridge, P., Bacic, A., & Roessner, U. (2012). Drought responses of leaf tissues from wheat cultivars of differing drought tolerance at the metabolite level. *Molecular Plant*, 5(2), 418-429. <https://doi.org/10.1093/mp/ssr114>

- Calvo, N. R., Rozas, H. S., Wyngaard, N., Carciochi, W., Diovisalvi, N., Prystupa, P., & García, F. (2020). *¿Cómo? ¿Cuándo? ¿Con qué? Y ¿Para qué?*
- Celestina, C., Hunt, J., Kuchel, H., Harris, F., Porker, K., Biddulph, B., ... Brown, H. (2023). A cultivar phenology classification scheme for wheat and barley. *European Journal of Agronomy*, *143*, 126732. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126732>
- Chen, X., Zhu, Y., Ding, Y., Pan, R., Shen, W., Yu, X., & Xiong, F. (2021). The relationship between characteristics of root morphology and grain filling in wheat under drought stress. *PeerJ*, *9*, e12015. <https://doi.org/10.7717/peerj.12015>
- Chen, Z., Jia, K., Wei, X., Liu, Y., Zhan, Y., Xia, M., ... Zhang, X. (2022). Improving leaf area index estimation accuracy of wheat by involving leaf chlorophyll content information. *Computers and Electronics in Agriculture*, *196*, 106902. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106902>
- CIMMYT. (2019, septiembre 3). El uso del “trigo hexaploide sintético” derivado de plantas *Aegilops* agrega diversidad y resiliencia al trigo harinero moderno. Recuperado 9 de febrero de 2024, de CIMMYT website: <https://www.cimmyt.org/es/noticias/el-uso-del-trigo-hexaploide-sintetico-derivado-de-plantas-aegilops-agrega-diversidad-y-resiliencia-al-trigo-harinero-moderno/>
- CIMMYT. (2023, junio 16). Wheat output in Africa and South Asia will suffer severely from climate change by 2050, modelling study shows. Recuperado 1 de marzo de 2024, de CIMMYT website: <https://www.cimmyt.org/news/wheat-output-in-africa-and-south-asia-will-suffer-severely-from-climate-change-by-2050-modelling-study-shows/>
- CIMMYT. (2024a, febrero 1). Wheat blast spread globally under climate change modeled for the first time. Recuperado 17 de febrero de 2024, de CIMMYT website:



<https://www.cimmyt.org/news/wheat-blast-spread-globally-under-climate-change-modeled-for-the-first-time/>

- CIMMYT. (2024b, febrero 9). Wheat research. Recuperado 17 de febrero de 2024, de CIMMYT website: <https://www.cimmyt.org/work/wheat-research/>
- Daryanto, S., Wang, L., & Jacinthe, P.-A. (2016). Global Synthesis of Drought Effects on Maize and Wheat Production. *PLOS ONE*, *11*(5), e0156362. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156362>
- Dietz, K. -J., Zörb, C., & Geilfus, C. -M. (2021). Drought and crop yield. *Plant Biology*, *23*(6), 881-893. <https://doi.org/10.1111/plb.13304>
- Ding, J., Huang, Z., Zhu, M., Li, C., Zhu, X., & Guo, W. (2018). Does cyclic water stress damage wheat yield more than a single stress? *PLOS ONE*, *13*(4), e0195535. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195535>
- Ekanayake, I. J. (1993). *Evaluación de resistencia a la sequía en genotipos de papa y batata (camote)*. ,.
- Eser, C., Soyulu, S., & Ozkan, H. (2024). Drought responses of traditional and modern wheats in different phenological stages. *Field Crops Research*, *305*, 109201. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109201>
- Evans, J. R. (1983). Nitrogen and Photosynthesis in the Flag Leaf of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology*, *72*(2), 297-302. <https://doi.org/10.1104/pp.72.2.297>
- FAO. (2011). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. Recuperado 9 de febrero de 2024, de [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-39252005000300002](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252005000300002)
- FAO. (2018). El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo. <https://doi.org/10.4060/CC3017ES>

- FAO. (2024). Nota informativa de la FAO sobre la oferta y la demanda de cereales | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado 17 de febrero de 2024, de WorldFoodSituation website: <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>
- FAOSTAT. (2024). Recuperado 17 de febrero de 2024, de <https://www.fao.org/faostat/es/#country/170>
- Fernandez, G. C. J. (1992). *Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance*. 257-270. <https://doi.org/10.22001/WVC.72511>
- Fischer, R., & Maurer, R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29(5), 897. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>
- Frantová, N., Rábek, M., Elzner, P., Středa, T., Jovanović, I., Holková, L., ... Prášil, I. T. (2022). Different Drought Tolerance Strategy of Wheat Varieties in Spike Architecture. *Agronomy*, 12(10), 2328. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102328>
- Gao, Z., Wang, Y., Tian, G., Zhao, Y., Li, C., Cao, Q., ... He, M. (2020). Plant height and its relationship with yield in wheat under different irrigation regime. *Irrigation Science*, 38(4), 365-371. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00678-z>
- Geravandi, M., Farshadfar, E., & Kahrizi, D. (2011). Evaluation of some physiological traits as indicators of drought tolerance in bread wheat genotypes. *Russian Journal of Plant Physiology*, 58(1), 69-75. <https://doi.org/10.1134/S1021443711010067>
- Ghodke, P. H., Ramakrishnan, S., Shirsat, D. V., Vani, G. K., & Arora, A. (2019). Morphological characterization of wheat genotypes for stay green and physiological traits by multivariate analysis under drought stress. *Plant Physiology Reports*, 24(3), 305-315. <https://doi.org/10.1007/s40502-019-00458-8>

- Gholamin, R., & Khayatnezhad, M. (2020). Study of Bread Wheat Genotype Physiological and Biochemical Responses to Drought Stress. *Helix - The Scientific Explorer / Peer Reviewed Bimonthly International Journal*, 10(05), 87-92.
- Ghosh, M., Swain, D. K., Jha, M. K., Tewari, V. K., & Bohra, A. (2020). Optimizing chlorophyll meter (SPAD) reading to allow efficient nitrogen use in rice and wheat under rice-wheat cropping system in eastern India. *Plant Production Science*, 23(3), 270-285. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2020.1717970>
- Golparvar, A. R. (2013). Genetic control and combining ability of flag leaf area and relative water content traits of bread wheat cultivars under drought stress condition. *Genetika*, 45(2), 351-360.
- González, Á. (2009). Aplicación del medidor portátil de clorofila en programas de mejora de trigo y cebada. *Agroecología*, 4, 111-116.
- GraphPad Software Inc. (2010). Actualizaciones de Prism 5—GraphPad. Recuperado 10 de febrero de 2024, de <https://www.graphpad.com/support/prism-5-updates/>
- Harper, J. E., & Hageman, R. H. (1972). Canopy and Seasonal Profiles of Nitrate Reductase in Soybeans (*Glycine max* L. Merr.) 1. *Plant Physiology*, 49(2), 146-154.
- Itam, M., Mega, R., Tadano, S., Abdelrahman, M., Matsunaga, S., Yamasaki, Y., ... Tsujimoto, H. (2020). Metabolic and physiological responses to progressive drought stress in bread wheat. *Scientific Reports*, 10(1), 17189. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74303-6>
- Jara, V. J. (1993). Cultivo de trigo en la sierra del Perú. *Instituto Nacional de Innovación Agraria*. Presentado en Manual;N. 12. Instituto Nacional de Investigación Agraria. Recuperado de <https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/983>
- Javed, A., Ahmad, N., Ahmed, J., Hameed, A., Ashraf, M. A., Zafar, S. A., ... Ali, E. F. (2022). Grain yield, chlorophyll and protein contents of elite wheat genotypes under

- drought stress. *Journal of King Saud University - Science*, 34(7), 102279.  
<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102279>
- Kaur, G., & Asthir, B. (2020). Impact of exogenously applied ABA on proline metabolism conferring drought and salinity stress tolerance in wheat genotypes. *Cereal Research Communications*, 48(3), 309-315. <https://doi.org/10.1007/s42976-020-00041-0>
- Khadka, K., Earl, H. J., Raizada, M. N., & Navabi, A. (2020). A Physio-Morphological Trait-Based Approach for Breeding Drought Tolerant Wheat. *Frontiers in Plant Science*, 11. Recuperado de <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2020.00715>
- Khayatnezhad, M., & Gholamin, R. (2021). The Effect of Drought Stress on the Superoxide Dismutase and Chlorophyll Content in Durum Wheat Genotypes. *Advancements in Life Sciences*, 8(2), 119-123.
- Khedr, A. H. A., Abbas, M. A., Wahid, A. A. A., Quick, W. P., & Abogadallah, G. M. (2003). Proline induces the expression of salt-stress-responsive proteins and may improve the adaptation of *Pancreaticum maritimum* L. to salt-stress. *Journal of Experimental Botany*, 54(392), 2553-2562. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg277>
- Kirigwi, F. M., van Ginkel, M., Trethowan, R., Sears, R. G., Rajaram, S., & Paulsen, G. M. (2004). Evaluation of selection strategies for wheat adaptation across water regimes. *Euphytica*, 135(3), 361-371.  
<https://doi.org/10.1023/B:EUPH.0000013375.66104.04>
- Langridge, P., & Reynolds, M. (2021). Breeding for drought and heat tolerance in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(6), 1753-1769.  
<https://doi.org/10.1007/s00122-021-03795-1>
- Ledent, J. F. (2002). *Deficit hidrico y crecimiento de las plants: Respuestas al deficit hidrico. Comportamiento morfofisiologico*. International Potato Center.

- Liu, X., Li, L., Li, M., Su, L., Lian, S., Zhang, B., ... Li, L. (2018). AhGLK1 affects chlorophyll biosynthesis and photosynthesis in peanut leaves during recovery from drought. *Scientific Reports*, 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20542-7>
- Machado, S., & Paulsen, G. M. (2001). Combined effects of drought and high temperature on water relations of wheat and sorghum. *Plant and Soil*, 233(2), 179-187. <https://doi.org/10.1023/A:1010346601643>
- Mahmood, T., Abdullah, M., Ahmar, S., Yasir, M., Iqbal, M. S., Yasir, M., ... Mora-Poblete, F. (2020). Incredible Role of Osmotic Adjustment in Grain Yield Sustainability under Water Scarcity Conditions in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plants*, 9(9), 1208. <https://doi.org/10.3390/plants9091208>
- Mahmoud, D., Pandey, R., Sathee, L., Dalal, M., Singh, M. P., & Chinnusamy, V. (2020). Regulation of expression of genes associated with nitrate response by osmotic stress and combined osmotic and nitrogen deficiency stress in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology Reports*, 25(2), 200-215. <https://doi.org/10.1007/s40502-020-00503-x>
- Mart, K. B., Veneklaas, E. J., & Bramley, H. (2016). Osmotic potential at full turgor: An easily measurable trait to help breeders select for drought tolerance in wheat. *Plant Breeding*, 135(3), 279-285. <https://doi.org/10.1111/pbr.12367>
- Martínez Cruz, E., Espitia Rangel, E., Villaseñor Mir, H. E., Hortelano SantaRosa, R., Martínez Cruz, E., Espitia Rangel, E., ... Hortelano SantaRosa, R. (2020). La productividad del trigo harinero bajo diferentes condiciones de riego. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(6), 1349-1360. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2050>
- Martinez, J. M., Landriscini, M. R., Cerda, C. C., Carrasco, S. S., Matone, L., & Galantini, J. A. (2020). Predicción del rendimiento y calidad en diferentes variedades de trigo

pan mediante el índice de verdor. En *XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Suelos: Desafíos para una producción y desarrollo sustentables*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/190352>

Martínez, J. P., Ledent, J. F., Bajji, M., Kinet, J. M., & Lutts, S. (2003). Effect of water stress on growth, Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> accumulation and water use efficiency in relation to osmotic adjustment in two populations of *Atriplex halimus* L. *Plant Growth Regulation*, *41*(1), 63-73. <https://doi.org/10.1023/A:1027359613325>

Mathew, I., Shimelis, H., Mutema, M., Clulow, A., Zengeni, R., Mbava, N., & Chaplot, V. (2019). Selection of wheat genotypes for biomass allocation to improve drought tolerance and carbon sequestration into soils. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *205*(4), 385-400. <https://doi.org/10.1111/jac.12332>

Mehrabi, F., & Sepaskhah, A. R. (2022). Leaf Nitrogen, Based on SPAD Chlorophyll Reading Can Determine Agronomic Parameters of Winter Wheat. *International Journal of Plant Production*, *16*(1), 77-91. <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00172-2>

Méndez-Espinoza, C., Vallejo Reyna, M. Á., 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>

Mercado, D. A., Paiva, E. A. P., Chávez, E. M. M., Cáceres, M. B., Arriola, A. R. V., & Cáceres, A. B. (2024). Determinación de componentes de rendimiento de variedades de trigo locales e introducidas. *Revista sobre estudios e investigaciones del saber académico*, (18), e2024001-e2024001.

MIDAGRI. (2023a). *Boletín Estadístico Mensual. El Agro en Cifras. Mes: Diciembre 2022*.

- MIDAGRI. (2023b). *Nota técnica de coyuntura económica agraria N.º17-2023-MIDAGRI*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5056149/N.%C2%B0017%7C%20La%20situaci%C3%B3n%20del%20trigo%20en%20Ucrania%20no%20afectara%20al%20Per%C3%BA.pdf?v=1693250622>
- Morgan, J. M. (1983). Osmoregulation as a selection criterion for drought tolerance in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 34(6), 607-614. <https://doi.org/10.1071/ar9830607>
- Morgan, J. M. (1984). Osmoregulation and Water Stress in Higher Plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 35(1), 299-319. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.35.060184.001503>
- Morgan, J. M. (1992). Osmotic Components and Properties Associated With Genotypic Differences in Osmoregulation in Wheat. *Functional Plant Biology*, 19(1), 67-76. <https://doi.org/10.1071/pp9920067>
- Morgan, J. M. (1995). Growth and yield of wheat lines with differing osmoregulative capacity at high soil water deficit in seasons of varying evaporative demand. *Field Crops Research*, 40(3), 143-152. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00100-Q](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00100-Q)
- Morsy, S. M., Elbasyoni, I. S., Abdallah, A. M., & Baenziger, P. S. (2022). Imposing water deficit on modern and wild wheat collections to identify drought-resilient genotypes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(4), 427-440. <https://doi.org/10.1111/jac.12493>
- Mukherjee, A., Wang, S.-Y., & Promchote, P. (2019). Examination of the Climate Factors That Reduced Wheat Yield in Northwest India during the 2000s. *Water*, 11(2), 343. <https://doi.org/10.3390/w11020343>

- Nardino, M., Perin, E. C., Aranha, B. C., Carpes, S. T., Fontoura, B. H., Sousa, D. J. P. de, & Freitas, D. S. de. (2022). Understanding drought response mechanisms in wheat and multi-trait selection. *PLOS ONE*, *17*(4), e0266368. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266368>
- Pequeno, D. N. L., Hernández-Ochoa, I. M., Reynolds, M., Sonder, K., MoleroMilan, A., Robertson, R. D., ... Asseng, S. (2021). Climate impact and adaptation to heat and drought stress of regional and global wheat production. *Environmental Research Letters*, *16*(5), 054070. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd970>
- Poehlman, J. M., & Borthakur, D. (1969). *Breeding Asian Field Crops: With Special Reference to Crops of India*. Oxford & IBH Publishing Company. Recuperado de [https://books.google.com.pe/books?id=F\\_jwAAAAMAAJ](https://books.google.com.pe/books?id=F_jwAAAAMAAJ)
- Rampino, P., Pataleo, S., Gerardi, C., Mita, G., & Perrotta, C. (2006). Drought stress response in wheat: Physiological and molecular analysis of resistant and sensitive genotypes. *Plant, Cell & Environment*, *29*(12), 2143-2152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01588.x>
- Rashid, M. A., Jabloun, M., Andersen, M. N., Zhang, X., & Olesen, J. E. (2019). Climate change is expected to increase yield and water use efficiency of wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, *222*, 193-203. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.004>
- Rawson, H. M., & Gómez, M. H. (2001). *Trigo regado: Manejo del cultivo*. Roma : FAO. Recuperado de [http://archive.org/details/bub\\_gb\\_7DFnSPSFA5kC](http://archive.org/details/bub_gb_7DFnSPSFA5kC)
- Rodríguez-Larramendi, L. A., Salas-Marina, M., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Cruz-Macías, W. O., Cruz-Morales, M., ... Guevara-Hernández, F. (2021). Efecto fisiológico de la disponibilidad de agua y nitrógeno en plantas de guayaba. *Tropical and subtropical Agroecosystems*, *24*, 19.



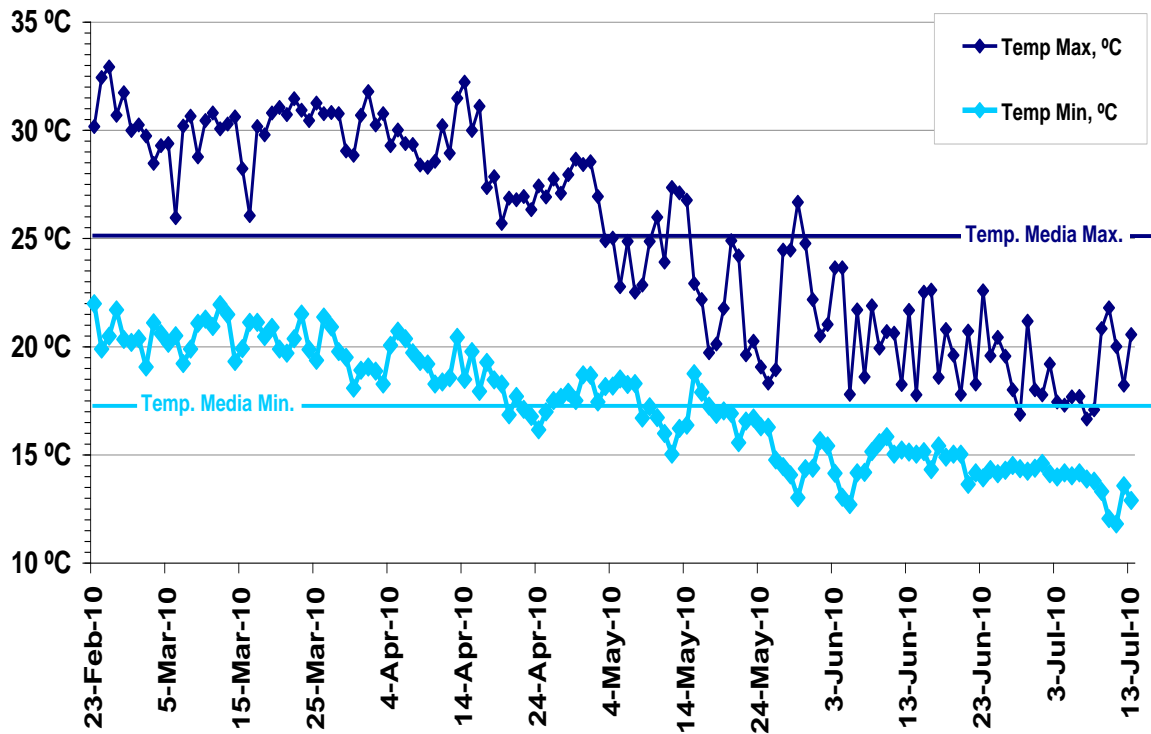
- Saeidi, M., Ardalani, S., Jalali Honarmand, S., Ghobadi, M., & Abdoli, M. (2015). Evaluation of drought stress at vegetative growth stage on the grain yield formation and some physiological traits as well as fluorescence parameters of different bread wheat cultivars. *Acta Biologica Szegediensis*, 59, 35-44.
- Salisbury, F. B., & Ross, C. (2000). *Fisiología de las plantas / Frank B. Salisbury, Cleon W. Ross*. Madrid: Paraninfo.
- Sarto, M. V. M., Sarto, J. R. W., Rampim, L., Rosset, J. S., Bassegio, D., da, C. P. F., & Inagaki, A. M. (2017). Wheat phenology and yield under drought: A review. *Australian Journal of Crop Science*, 11(8), 941-946.  
<https://doi.org/10.3316/informit.168397552267074>
- Serraj, R., & Sinclair, T. R. (2002). Osmolyte accumulation: Can it really help increase crop yield under drought conditions? *Plant, Cell & Environment*, 25(2), 333-341.  
<https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00754.x>
- Shahryari, R., & Mollasadeghi, V. (2011). Correlation study of some traits affecting yield and yield components of wheat genotypes in terms of normal irrigation and end drought stress. *Advances in Environmental Biology*, 5, 523-527.
- Simmons, S. R. (1987). Growth, Development, and Physiology. En *Wheat and Wheat Improvement* (pp. 77-113). John Wiley & Sons, Ltd.  
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr13.2ed.c3>
- Simón, M. R. (2022). Trigo: Crecimiento y desarrollo: Etapa reproductiva y llenado del grano. En *Cereales de invierno* (Vol. 1, p. 442). Buenos Aires: Editorial de la Universidad Nacional de la Plata. (34-59).
- Soares, G. F., Ribeiro Júnior, W. Q., Pereira, L. F., Lima, C. A. D., Soares, D. D. S., Muller, O., ... Ramos, M. L. G. (2021). Characterization of wheat genotypes for drought

- tolerance and water use efficiency. *Scientia Agricola*, 78(5), e20190304.  
<https://doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0304>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2013). Livro—Fisiologia Vegetal—Taiz—Taiz—Zeiger 3ª Edição | Docsity. Recuperado 9 de febrero de 2024, de <https://www.docsity.com/pt/livro-fisiologia-vegetal-taiz/4836176/>
- Talebi, R. (2009). Effective selection criteria for assessing drought stress tolerance in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *General and Applied plant physiology*, 35.
- Tottman, D. R., Makepeace, R. J., & Broad, H. (1979). An explanation of the decimal code for the growth stages of cereals, with illustrations. *Annals of Applied Biology*, 93(2), 221-234. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1979.tb06534.x>
- Ullah, A., Al-Busaidi, W. M., Al-Sadi, A. M., & Farooq, M. (2022). Bread Wheat Genotypes Accumulating Free Proline and Phenolics Can Better Tolerate Drought Stress Through Sustained Rate of Photosynthesis. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(1), 165-176. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00641-7>
- Ullah, H., Santiago-Arenas, R., Ferdous, Z., Attia, A., & Datta, A. (2019). Chapter Two - Improving water use efficiency, nitrogen use efficiency, and radiation use efficiency in field crops under drought stress: A review. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 156, pp. 109-157). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.02.002>
- Verbeke, S., Padilla-Díaz, C. M., Haesaert, G., & Steppe, K. (2022). Osmotic Adjustment in Wheat (*Triticum aestivum* L.) During Pre- and Post-anthesis Drought. *Frontiers in Plant Science*, 13, 775652. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.775652>
- Wang, X., Li, Q., Yang, M., Zhang, J., Huang, M., Cai, J., ... Jiang, D. (2021). Crosstalk between hydrogen peroxide and nitric oxide mediates priming-induced drought

- tolerance in wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(2), 224-235.  
<https://doi.org/10.1111/jac.12458>
- Wasaya, A., Manzoor, S., Yasir, T. A., Sarwar, N., Mubeen, K., Ismail, I. A., ... El Sabagh, A. (2021). Evaluation of Fourteen Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes by Observing Gas Exchange Parameters, Relative Water and Chlorophyll Content, and Yield Attributes under Drought Stress. *Sustainability*, 13(9), 4799.  
<https://doi.org/10.3390/su13094799>
- Wencomo-Cárdenas, H. B. (2019). Actividad de la enzima nitrato reductasa en plántulas de *Jatropha curcas* L. bajo diferentes porcentajes de sombra. *Pastos y Forrajes*, 42(4), 268-276.
- Yana, A., Emma. (2018). Identificación de genotipos de trigo harinero (*Triticum aestivum* ssp *aestivum*) tolerantes a sequía empleando indicadores morfológicos y fisiológicos. *Universidad Nacional Agraria La Molina*. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3399>
- Zhang, J., Zhang, S., Cheng, M., Jiang, H., Zhang, X., Peng, C., ... Jin, J. (2018). Effect of Drought on Agronomic Traits of Rice and Wheat: A Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(5), 839.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph15050839>

## VIII. ANEXOS

**Anexo 1. Temperaturas máximas y mínimas observadas en el interior de la casa de mallas en el periodo experimental del estudio de estrés de sequía de dos especies de trigo. La Molina.**



## Anexo 2: Análisis de suelos



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
 FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS  
 LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES  
**ANÁLISIS DE SUELOS : CARACTERIZACIÓN**



Solicitante : ANA GABRIELA AMADO ARGUELLES  
 Departamento : LIMA  
 Distrito : LA MOLINA  
 Referencia : H.R. 25518-007C-10

Provincia : LIMA  
 Predio :  
 Fecha : 12-02-10

Lab	Número de Muestra Campo	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO <sub>3</sub> %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico		Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables meq/100g				Suma de Cationes Bases	Suma de de Bases	% Sat. De Bases		
								Arena %	Limo %			Arcilla %	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>				Na <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup>
0727		6.72	3.37	0.00	4.75	39.0	429	66	28	6	Fr.A.	15.36	12.53	1.73	0.74	0.36	0.00	15.36	15.36	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso;  
 Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Ing. Gerardo La Torre Martínez  
 Jefe del Laboratorio

## METODOS SEGUIDOS EN EL ANALISIS DE SUELOS

1. Textura de suelo: % de arena, limo y arcilla; método del hidrómetro.
2. Salinidad: medida de la conductividad eléctrica (CE) del extracto acuoso en la relación suelo: agua 1:1 o en el extracto de la pasta de saturación(es).
3. PH: medida en el potenciómetro de la suspensión suelo: agua relación 1:1 ó en suspensión suelo: KCl N, relación 1:2.5.
4. Calcareo total (CaCO<sub>3</sub>): método gaso-volumétrico utilizando un calcímetro.
5. Materia orgánica: método de Walkley y Black, oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio. %M.O. = %CX1.724.
6. Nitrógeno total: método del micro-Kjeldahl.
7. Fósforo disponible: método del Olsen modificado, extracción con NaHCO<sub>3</sub>=0.5M, pH 8.5.
8. Potasio disponible: extracción con acetato de amonio (CH<sub>3</sub> - COONH<sub>4</sub>)N, pH 7.0.
9. Capacidad de intercambio catiónico (CIC): saturación con acetato de amonio (CH<sub>3</sub> - COOCH<sub>3</sub>)N; pH 7.0.
10. Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> cambiabiles: reemplazamiento con acetato de amonio (CH<sub>3</sub> - COONH<sub>4</sub>)N; pH 7.0 cuantificación por fotometría de llama y/o absorción atómica.

11. Al<sup>+3</sup>, H<sup>+</sup>: método de Yuan. Extracción con KCl, N
12. Iones solubles:
  - a) Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> solubles: fotometría de llama y/o absorción atómica.
  - b) Cl<sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>=</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>=</sup>, NO<sub>3</sub><sup>=</sup> solubles: volumetría y colorimetría. SO<sub>4</sub> turbidimetría con cloruro de Bario.
  - c) Boro soluble: extracción con agua, cuantificación con curcumina.
  - d) Yeso soluble: solubilización con agua y precipitación con acetona.

### Equivalencias:

- 1 ppm = 1 mg/kilogramo
- 1 milimho (mmho/cm) = 1 deciSiemens/metro
- 1 miliequivalente / 100 g = 1 cmol(+)/kg
- Sales solubles totales (TDS) en ppm ó mg/kg = 640 x CEes
- CE (1 : 1) mmho/cm x 2 = CE(es) mmho/cm

## TABLA DE INTERPRETACION

Salinidad	CE(es)	Materia Orgánica	Fósforo disponible	Potasio disponible	Relaciones Cationicas	
					Clasificación	Ca/Mg
Clasificación del Suelo		%	ppm P	ppm K	Clasificación	Ca/Mg
*muy ligeramente salino	<2	<2.0	<7.0	<100	*Normal	0.2 - 0.3
*ligeramente salino	2 - 4	2 - 4	7.0 - 14.0	100 - 240	*defc. Mg	>0.5
*moderadamente salino	4 - 8	>4.0	>14.0	>240	*defc. K	>0.2
*fuertemente salino	>8				*defc. Mg	>10

Reacción o pH	CLASES TEXTURALES		Distribución de Cationes %
Clasificación del Suelo	A	Fr.Ar.A	Ca <sup>+2</sup>
*fuertemente ácido	= arena	= franco arcillo arenoso	=
*moderadamente ácido	A.Fr = arena franca	Fr.Ar = franco arcilloso	60 - 75
*ligeramente ácido	Fr.A = franco arenoso	Fr.Ar.L = franco arcilloso limoso	15 - 20
*neutro	Fr.L = franco limoso	Ar.A = arcilloso arenoso	3 - 7
*ligeramente alcalino	Fr.L.L = franco limoso	Ar.L = arcilloso limoso	=
*moderadamente alcalino	L = limoso	Ar. = arcilloso	<15
*fuertemente alcalino			

### Anexo 3: Análisis de agua



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
 FACULTAD DE AGRONOMIA  
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES  
**ANALISIS DE AGUA**



SOLICITANTE : JAKELLIN MILAGROS LOAYZA BRAVO  
 PROCEDENCIA : LIMA/LIMA/LA MOLINA/PROGRAMA DE CEREALES  
 REFERENCIA : H.R. 30112

No. Laboratorio	0134	
No. Campo	Agua de Riego	
pH		6.42
C.E.	dS/m	0.48
Calcio	meq/L	3.82
Magnesio	meq/L	0.56
Potasio	meq/L	0.18
Sodio	meq/L	0.64
SUMA DE CATIONES		5.20
Nitratos	meq/L	0.02
Carbonatos	meq/L	0.00
Bicarbonatos	meq/L	2.21
Sulfatos	meq/L	1.36
Cloruros	meq/L	1.50
SUMA DE ANIONES		5.09
Sodio	%	12.31
RAS		0.43
Boro	ppm	0.13
Clasificación		C2-S1

La Molina, 18 de Marzo del 2011.

*Ing. Arqulio La Torre Martínez*  
 Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM  
 Telf.: 614 7800 Anexo 222 Telefax: 349 5622  
 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

## Interpretación de la Calidad de Riego

La salinidad total es determinada por la medición de la conductividad del agua. (CE.) Expresada en unidades de deci Siemens por metro (d Sm<sup>-1</sup>) o en milimhos por centímetro (mmhos cm<sup>-1</sup>). También puede ser expresada como la cantidad total de sales disueltas (TDS), donde: TDS (en ppm o mgL<sup>-1</sup>) = 640 x CE ( en d Sm<sup>-1</sup> ó mmhos cm<sup>-1</sup>)

**Cuadro 1 Clasificación de las aguas de riego basada en su CE y TDS**

Peligro de Salinidad	Características	CE dSm-1	TDS ppm
Bajo (C <sub>1</sub> )	* Bajo peligro de salinidad, no se espera efectos dañinos sobre las plantas y suelos.	<0.25	< 160
Medio (C <sub>2</sub> )	* Plantas sensibles pueden mostrar estres a sales; moderada lixiviación previene la acumulación de sales en el suelo.	0.25 - 0.75	160 - 500
Alto (C <sub>3</sub> )	* Salinidad afectará a muchas plantas. Requiere: selección de plantas tolerantes a salinidad, buen drenaje y lixiviación.	0.75 - 2.25	500 - 1500
Muy Alto (C <sub>4</sub> )	* Generalmente no aceptable, excepto para plantas muy tolerantes a sales, se requiere excelente drenaje y lixiviación.	>2.25	>1500

\* SAR (Relación de Absorción de Sodio):  $SAR = Na \text{ en meq. L}^{-1} / ((Ca + Mg \text{ en meq L}^{-1})/2)^{1/2}$

**Cuadro 2 Peligro de Sodio basado en el valor del SAR**

Peligro de Na	SAR del agua	Comentarios sobre el peligro de Na
Bajo (S <sub>1</sub> )	<10	* Puede usarse para el riego de casi todos los suelos, sin peligro de destrucción de la estructura.
Medio (S <sub>2</sub> )	10 - 18	* Puede desmejorarse la permeabilidad de suelos de textura fina con alta CIC. Puede usarse en suelos de textura gruesa con buen drenaje.
Alto (S <sub>3</sub> )	18 - 26	* Se producen, daños de lo suelos, por acumulación de Na. Se requerirá intensivas prácticas de aplicación de enmiendas, drenaje y lixiviación.
Muy Alto (S <sub>4</sub> )	>26	* Generalmente no recomendable para el riego excepto en suelos de muy bajo contenido de sales: Se requerirá prácticas de manejo.

\* Carbonato de sodio residual. (RCS.) Tercer criterio que se usa para juzgar el peligro de sodio en las aguas de riego. Es definido como:  $RCS = (CO_3 + HCO_3) - (Ca + Mg)$ .

**Cuadro 3 Peligro de Sodio basado en el valor del RSC**

Valores de RSC (meq L <sup>-1</sup> )	Peligro de Na
> 0 (valores negativos)	* <i>Ninguno.</i> Ca y Mg del agua no participarán como carbonatos, ellos se mantienen Activos para prevenir la acumulación de Na en los sitios de cambio de la CIC.
0 - 1.25	* <i>Bajo.</i> Existe alguna remoción del Ca y Mg del agua de riego.
1.25 - 2.50	* <i>Medio.</i> Apreciable remoción de Ca y Mg del agua de riego.
> 2.50	* <i>Alto.</i> Todo o mayor parte del Ca y Mg del agua de riego es removido como carbonato precipitado produciendo acumulación de Na.