

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**EFFECTO DEL DÉFICIT HÍDRICO EN RENDIMIENTO Y CALIDAD DE GRANO
DE TRIGO HARINERO (TRITICUM AESTIVUM L.)**

POR

JOAQUÍN FELIPE GUAJARDO MENDOZA

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO**

**CHILLÁN-CHILE
2025**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFFECTO DEL DÉFICIT HÍDRICO EN RENDIMIENTO Y CALIDAD DE GRANO
DE TRIGO HARINERO (TRITICUM AESTIVUM L.)**

POR

JOAQUÍN FELIPE GUAJARDO MENDOZA

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
AGRÓNOMO,**

CHILLÁN-CHILE

2025

Aprobada por:

Profesor Asistente, Abdelhalim Khaled E.
Ing. Agrónomo, Dr. Cs.

Guía

Investigadora, Dalma Castillo R.
Ing. Agrónomo, Dr. Cs.
INIA Quilamapu

Asesor

Profesor Asistente, Miguel Garriga C.
Lic. Biología, Dr. Cs.

Asesor

Profesor Auxiliar, Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen.....	1
Summary.....	1
Introducción.....	2
Objetivos.....	5
Materiales y métodos.....	5
Resultados y discusión	9
Conclusiones.....	19
Referencias.....	20
Apéndice.....	23
Anexo.....	24

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		Página
Figura 1	Esquema del diseño experimental	8
Figura 2	Rasgos agronómicos evaluados en los genotipos de trigo primaveral.....	13
Figura 3	Rasgos agronómicos y de calidad evaluados en los genotipos de trigo primaveral.....	14
Figura 4	Modelos espectrales predictivos de peso de mil granos (PMG) y peso hectolitro (PH).....	17
Figura 5	Modelos espectrales predictivos de humedad del grano (HG)	18
Tabla 1	Datos climáticos en Santa Rosa, Chillán, durante el ciclo 2024/2025.....	6
Tabla 2	Genotipos del estudio, organización y año de liberación.....	6
Tabla 3	Efecto del ambiente, los genotipos y su interacción sobre atributos agronómicos en condiciones de estrés (S) y riego (R).....	11

EFFECTO DEL DÉFICIT HÍDRICO EN RENDIMIENTO Y CALIDAD DE GRANO DE TRIGO HARINERO (TRITICUM AESTIVUM L.)

Effect of water deficit on yield and grain quality of bread wheat (*Triticum aestivum* L.)

Palabras índices: calidad del grano, espectrorradiometría, modelos predictivos, rendimiento del grano, trigo.

RESUMEN

El objetivo de esta tesis fue evaluar cómo el déficit hídrico afecta la calidad del grano en diferentes genotipos de trigo harinero primaveral, considerando parámetros como peso de mil granos, peso hectolitro y humedad del grano. Para ello, se llevó a cabo un experimento en la estación experimental INIA-Santa Rosa, Chillán, Chile, durante la temporada 2024-2025, en el que se seleccionaron nueve genotipos de trigo y se aplicaron dos tratamientos de riego (con y sin riegos suplementarios). Se emplearon métodos directos para analizar la calidad del grano y generar modelos predictivos basados en espectrorradiometría. Los resultados indicaron que los efectos genotípicos influyen significativamente en la mayoría de los rasgos evaluados y que algunos genotipos mostraron mayor resistencia a la sequía en términos de biomasa, rendimiento y calidad del grano. Además, la tecnología de espectrorradiometría demostró ser útil para estimar atributos clave del grano de forma rápida y no destructiva, con modelos que alcanzaron altos niveles de precisión (R^2 val entre 0,77 y 0,88). La investigación concluye que la selección de genotipos adaptados al ambiente en que se encuentra el cultivo ayuda significativamente a mejorar rasgos de calidad y el uso de tecnologías predictivas (espectrorradiometría) pueden contribuir a reducir los plazos de espera y simplificar el análisis de calidad del grano de trigo.

SUMMARY

The objective of this thesis was to evaluate how water deficit affects grain quality in

different genotypes of spring bread wheat, considering parameters such as thousand-kernel weight, test weight and grain moisture. For this purpose, an experiment was conducted at the INIA-Santa Rosa Experimental Station, Chillán, Chile, during the 2024–2025 season, in which nine wheat genotypes were selected, and two irrigation treatments were applied (with and without supplemental irrigation). Direct methods were used to analyze grain quality and to generate predictive models based on spectroradiometry. The results indicated that genotypic effects significantly influenced most of the traits evaluated, and that some genotypes showed greater drought tolerance in terms of biomass, yield, and grain quality. Furthermore, spectroradiometry technologies proved useful for rapidly and non-destructively estimating key grain attributes, with models achieving high levels of accuracy (R^2 values between 0.77 and 0.88). The study concludes that the selection of genotypes adapted to current environmental conditions is better for the compounds of quality, and the use of predictive technologies (spectroradiometry) can help reduce turnaround times and simplify the analysis of wheat grain quality.

INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum aestivum* L.), al igual que el maíz y el arroz, son los "tres grandes" cultivos de cereales, el trigo produciendo más de 700 millones de toneladas cada año (FAO, 2023). Este se distingue entre los "tres grandes" por su amplitud geográfica de cultivo, extendiéndose desde los 67° de latitud norte en Escandinavia y Rusia hasta los 45° de latitud sur en Argentina, abarcando incluso regiones de altura en zonas subtropicales y tropicales (Feldman, 1995). El alto contenido de almidón del trigo, que oscila entre el 60 % y el 70 % en la harina integral y entre el 65 % y el 75 % en la harina blanca hace que se considere una gran fuente de energía. A pesar de su contenido de proteína relativamente bajo (generalmente entre el 8 % y el 15 %), el trigo aporta tanta proteína a la nutrición humana y animal como la cosecha total de soja (Shewry, 2000).

En Chile el consumo de pan, según datos de la Federación Chilena de Industriales Panaderos (FECHIPAN, 2010), se estima que bordea los 98 kg/año per cápita, siendo el segundo consumidor mundial después de Turquía (FECHIPAN,

2010). En Chile existen condiciones climáticas favorables para la producción de este cereal. En la temporada 2023 – 2024 se cultivaron 217.000 hectáreas de trigo aproximadamente, de estas 194.000 hectáreas de trigo harinero, representando el 89,4 % del trigo nacional (ODEPA, 2024). Sin embargo, en Chile, gran parte de los alimentos de consumo básicos (entre ellos trigo, arroz y legumbres) no satisfacen la demanda debido a la limitada superficie agrícola, por ejemplo, en trigo se importa entre el 30 % y 40 % del grano (Osiac et al., 2020).

El trigo harinero presenta una gran diversidad genética para permitir el desarrollo de más de 25.000 tipos diferentes de este cereal (Feldman, 1995); debido a esto, pueden adaptarse a una amplia gama de condiciones edafoclimáticas. Los rendimientos pueden superar las 10 t ha⁻¹ si se cuenta con el agua suficiente, nutrientes minerales y un control eficaz de plagas y patógenos. Sin embargo, debido a la escasez de agua y fertilizantes, las infecciones parasitarias y otros factores, la productividad media mundial es baja, en torno a 2,8 t ha⁻¹ (Golik, 2022). El cambio climático está afectando el planeta, a través de sequías o inundaciones, exceso de calor o de frío y otros, generando cambios en el medio ambiente, por ende, un impacto también en los seres vivos y, por consiguiente, en sus patrones de crecimiento y desarrollo. En el caso específico de las plantas cultivadas está ocasionando disminución de productividad y de calidad poniendo en peligro la seguridad alimentaria (Lal, 2016).

Durante la Revolución Verde, iniciada en 1940 por científicos como Norman Borlaug, se implementaron técnicas de mejoramiento genético en el trigo, se destacó la combinación de variedades locales francesas con trigos enanos de otras regiones, la cruce ofrecía una estructura robusta y compacta, resistente al acame (caída del trigo) y capaz de soportar una mayor fertilización. El objetivo principal fue aumentar el rendimiento y la productividad agrícola para satisfacer la creciente demanda alimentaria global; este enfoque, sin embargo, a veces implicó reducir la calidad nutricional del grano (Mazoyer y Roudart, 2002).

Los componentes que determinan la calidad del grano (peso de mil granos, peso hectólitro y humedad de granos) son afectados por el estrés hídrico, el trigo es una

planta sensible a la sequía en determinadas etapas de su crecimiento, considerándose la fase fenológica más crítica desde el espigado hasta el llenado de grano o las fases 5.0 a la 8.0 en la escala de Zadoks (Zadoks et al., 1974).

El estrés hídrico en trigo durante las etapas de llenado y maduración del grano tiene un efecto significativo sobre su contenido de humedad, peso de mil granos y peso hectolitro, acelerando la senescencia y reduciendo la duración del llenado, lo que conlleva a una menor acumulación de materia seca y una disminución en el tamaño y humedad final del grano. Esta condición limita la fotosíntesis por cierre estomático, afectando la translocación de asimilados hacia el grano y provocando una maduración anticipada. Aunque puede facilitar la cosecha por reducir la humedad, también compromete el rendimiento y la calidad del producto (Sandoval, 2012; Ali y Akmal, 2022).

Recientemente se han desarrollado métodos indirectos, los cuales no destruyen el grano, entre ellos está la espectrorradiometría (Osborne, 2006). Esta funciona mediante la medición de la cantidad de luz absorbida por una muestra a diferentes longitudes de onda. La espectrorradiometría (Ultravioleta, UV; Visible, VIS; e infrarrojo cercano, NIR) se utiliza para predecir características químicas, nutritivas y agronómicas del trigo. La técnica implica la calibración de modelos predictivos basados en la absorción de luz en el rango UV, VIS y NIR, lo que permite evaluar parámetros como el contenido de proteína, peso hectolitro, humedad de granos y otros componentes nutricionales de manera rápida y no destructiva (Williams y Norris, 2001).

De acuerdo con lo expuesto, se evidencia la importancia del cultivo de trigo en la seguridad alimentaria de Chile. En este contexto, y considerando el escenario actual de cambio climático y escasez hídrica, surge la necesidad de evaluar el comportamiento de las variedades de trigo más productivas de cada década, desde el inicio de la revolución verde hasta la actualidad, bajo condiciones ambientales de déficit hídrico. El objetivo es identificar cuál de los genotipos de trigo primaveral presenta mayor resistencia al estrés hídrico en términos de calidad del grano,

mediante el análisis de variables como el peso de mil granos, el peso hectolitro y la humedad del grano.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la calidad del grano en genotipos de trigo harinero primaveral bajo condiciones de riego óptimo y de estrés hídrico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el efecto del estrés hídrico en los componentes agronómicos.
- Determinar la calidad del grano (peso mil granos, humedad y peso hectolitro) mediante métodos directos e indirectos (espectrorradiometría).
- Evaluar la eficiencia de los modelos predictivos basados en espectrorradiometría aplicados a granos enteros, comparándolos con los resultados obtenidos mediante métodos directos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y condiciones experimentales: El estudio se realizó en la estación experimental Santa Rosa del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile (36°31' S, 71°54' O), durante la temporada 2024/2025. La estación presenta una temperatura media anual de 12,9 °C. La precipitación media anual es 1.029 mm y la evapotranspiración potencial es 968,9 mm (INIA, 2024). Los datos climáticos mensuales, incluyendo temperatura, humedad relativa, evapotranspiración y precipitación acumulada de la temporada, se resumen en la Tabla 1.

Material vegetal: Se utilizaron nueve genotipos de trigo harinero primaveral (*Triticum aestivum* L.) liberados en Chile entre 1955 y 2025. Estos genotipos corresponden a cultivares seleccionados por su desempeño agronómico y progreso genético en el país. La elección del material vegetal se realizó priorizando la evolución en el potencial de rendimiento. Esta diversidad genética permite analizar la respuesta al ambiente, especialmente en cuanto a sus componentes de calidad del grano y potencial de rendimiento, ofreciendo una perspectiva del progreso

varietal alcanzado en los programas nacionales de mejoramiento de trigo. Todos los genotipos seleccionados son de hábito primaveral, tipo harinero.

Tabla 1. Datos climáticos en Santa Rosa, Chillán, durante el ciclo 2024/2025.

Mes	T° min	T° max	T° promedio	H.R. (%)	Eto (mm)	Precipitación acum. (mm)	Condición de Riego (mm)	
							secano	riego
Julio	-1,0	11,4	5,2	87,6	23,18	17,8	0	0
Agosto	1,9	13,2	7,6	94,9	30,12	166,6	0	0
Septiembre	3,5	16,1	9,8	90,5	51,02	105,6	0	0
Octubre	6,8	21,3	14,1	89,9	86,73	22,8	0	0
Noviembre	6,9	23,0	15,0	81,0	114,93	20,9	0	100
Diciembre	9,0	27,4	18,2	74,4	153,97	0,6	0	150
Enero	9,8	31,0	20,4	68,7	156,66	0,0	0	0
Total					616,61	334,3	0	250

*Fuente: Agrometeorología INIA, estación experimental Santa Rosa, consultado en marzo de 2025.

Diseño experimental y manejo agronómico del ensayo: Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con parcelas divididas. Los dos niveles de estrés hídrico (Riego: R y Secano: S) fueron el factor principal en las parcelas principales, mientras que los diez genotipos de trigo fueron el factor secundario en las subparcelas. Cada tratamiento se replicó cuatro veces para garantizar la fiabilidad estadística de los resultados. Cada parcela experimental consistió en 5 hileras de 3 metros de longitud y un metro de ancho (3 m²), con una distancia de 0,2 metros entre hileras.

Tabla 2. Genotipos de estudio, mejorador y año de liberación.

CULTIVAR	LINAJE	MEJORADOR	AÑO
MENFLO	MTA/FLORENCE AURORE	SNA	1955
CHIFEN	N/MRQ588//KC9908/MT/3/FN	INIA	1964
ANTUFEN	908/FN*2//4160/3/YT54/ N10B/4/2*C14/5/OFN	INIA	1974
CIKO-INIA	MAYA74/NAC 76	INIA/CIMMYT	1988
HUAYUN	JUP/BJY//URES	INIA	1995
	TJB 358 - 251 / BUC" S"// CIKO		
PANTERA	(CLEARFIELD)	INIA	2008
SURI	QUP 1865-96/CAR3911//QUP1865-96	INIA	2013
MAYEN	Línea avanzada	INIA	2025
ANKÉN	Línea avanzada	INIA	2025

*CIMMYT, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo; INIA, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Chile); SNA, Sociedad Nacional de Agricultura (Chile).

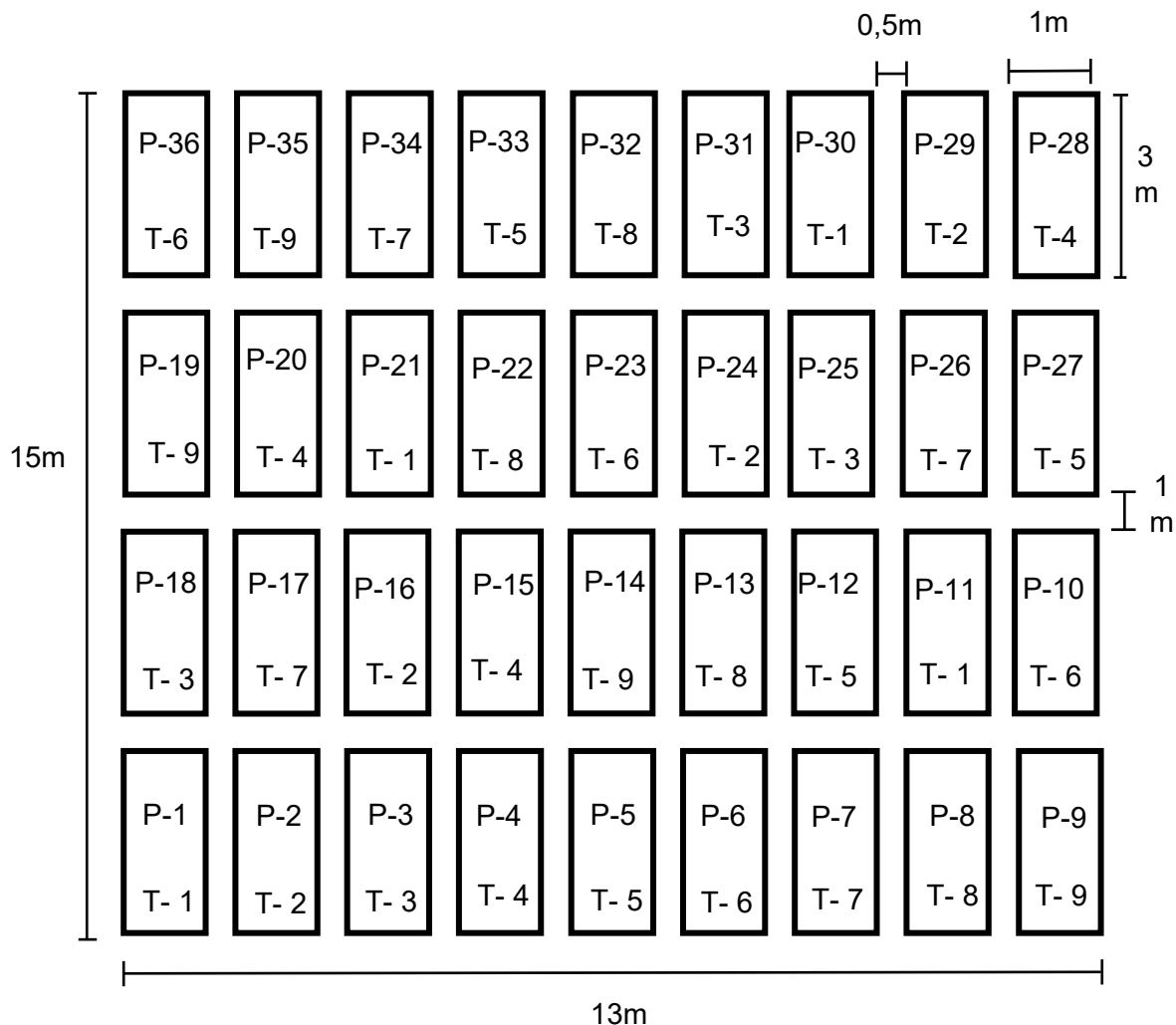
Para el tratamiento "R", se aplicó riego por surcos en cinco ocasiones durante el desarrollo del cultivo. El primer y segundo riegos se realizaron después de la etapa de anthesis (mediados de noviembre), ya que las precipitaciones naturales fueron suficientes para cubrir los requerimientos hídricos del cultivo en las etapas anteriores. En diciembre, se llevaron a cabo tres riegos adicionales con el objetivo de satisfacer las necesidades hídricas durante las etapas de cuajado y llenado de grano. Cada riego tuvo una lámina bruta de 50 mm. El tratamiento "S" dependió exclusivamente de la precipitación natural, sin riego suplementario. La fertilización se realizó según las recomendaciones del programa de mejoramiento del INIA y control de malezas, utilizando fosfato de amonio (46 % P_2O_5 y 18 % N), cloruro de potasio (60 % K_2O), sul-po-mag (22 % K_2O , 18 % MgO y 22 % S), boronatrocalcita (11 % B) y sulfato de zinc (35 % Zn), todos aplicados antes de la siembra y durante el macollamiento para asegurar condiciones óptimas de crecimiento.

Rasgos agronómicos: Los parámetros finales de crecimiento y rendimiento en el momento de la cosecha (madurez fisiológica) se determinaron mediante muestreo destructivo. En cada parcela, se cosechó biomasa de 1 m de longitud de una hilera en el centro de la parcela y se contó el número de espigas en ella. A continuación, se calculó el número de espigas por hectárea. De cosecharon 2 metros lineales de cada parcela (hileras centrales) para determinar la biomasa aérea de la planta, el rendimiento y el índice de cosecha. Se recogió aleatoriamente una submuestra de 30 espigas representativas de las hileras centrales para evaluar el número de granos por espiga y el peso de mil granos.

Análisis de calidad: El peso del hectolitro de los granos se determinó con una balanza Schopper (Don Agro, Hectolitro) y la humedad de los granos se obtuvo con una Termobalanza (Ohaus MB23). Los resultados de los análisis directos fueron contrastados con los resultados obtenidos mediante espectrorradiometría de los granos enteros, para este análisis se mide la reflectancia espectral en las regiones ultravioleta (UV), visible (Vis), infrarrojo cercano (NIR) y de onda corta (SWIR) de los granos enteros, obtenidos de todas las parcelas, utilizando el espectrómetro

portátil ASD FieldSpec® 4 Hi-Res NG (Malvern panalytical, Worcestershire, Reino Unido), que opera dentro del rango espectral de 350 – 2.500 nm.

Figura 1. Esquema del diseño experimental.



*Cada variedad fue asignada a un tratamiento específico (T1 a T9). Menflo (T1), Ciko (T2), Chifén (T3), Antufén (T4), Huayun (T5), Pantera (T6), Suri (T7), Mayen (T8) y Ankén (T9) y el P indica el número de parcela.

Análisis estadístico: Se realizó análisis de normalidad (prueba de Shapiro–Wilk) para analizar cuánto difiere la distribución de los datos observados respecto a lo esperado, si procediesen de una distribución normal con la misma media, desviación típica y de homocedasticidad (prueba de Levene), para verificar la homogeneidad de las varianzas.

El efecto del genotipo y ambiente se calculó mediante análisis de varianza (ANOVA) utilizando el procedimiento de modelo lineal general (GLM) del paquete estadístico SPSS 23 (SPSS Inc., Chicago, IL, EE. UU.).

Las separaciones de medias entre ambientes se realizaron mediante la prueba *t* de Student independiente ($P \leq 0.05$) y entre genotipos mediante la prueba de diferencia mínima significativa (DMS) de Fisher ($P \leq 0,05$).

Se desarrolló un modelo de regresión múltiple para predecir el rendimiento en base a valores de reflectancia a diferentes longitudes de onda. Para la selección de las variables en el modelo se utilizó el método de Algoritmo Genético (AG), en el cual diferentes combinaciones de variables se "aparean" entre sí, mutan, se cruzan, se reproducen y luego evolucionan a través de generaciones sucesivas hacia una solución óptima (Reeves, 2010). Las condiciones de simulación de los AG fueron 100 individuos y 1.000 generaciones y 35 % de mutación. Con base en las variables (reflectancia a determinadas longitudes de onda) seleccionadas, se desarrollaron modelos de regresión múltiple lineal (RML) que fueron validados mediante el método "leave-one-out" (LOO) y el cálculo de los valores de R^2 val. Los cálculos AG, RML y la validación LOO de los modelos se realizaron mediante el programa BuildQSAR (De Oliveira y Gaudio, 2000). Las relaciones entre todos los caracteres estudiados (humedad de granos, peso hectolitro y peso de mil granos) se realizaron mediante análisis de regresión. Las figuras (datos climáticos, comparaciones de rasgos y correlaciones) se hicieron con Excel (Microsoft Corp., EE. UU.).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según previos estudios (Saini y Westgate, 2000; Araus et al., 2002; Gooding et al., 2003; Farooq et al., 2014), la escasez hídrica modifica tanto el rendimiento como la calidad del trigo primaveral, con efectos que abarcan desde la biomasa hasta la composición del grano. Cuando las plantas enfrentan déficit de agua, tanto la biomasa acumulada como el rendimiento de grano tienden a disminuir, principalmente por la caída en la actividad fotosintética y una distribución menos eficiente de los recursos (Farooq et al., 2014). Además, el índice de cosecha

también sufre modificaciones, reflejando una menor capacidad de transportar asimilados hacia los granos (Araus et al., 2002). Los componentes clave del rendimiento, como el número de espigas por planta, el número de granos por espiga y el peso de mil granos, experimentan reducciones bajo condiciones de estrés hídrico (Saini y Westgate, 2000). Por otro lado, parámetros de calidad como el peso hectolitro y la humedad del grano pueden variar cuando la disponibilidad de agua es limitada (Gooding et al., 2003).

Sin embargo, los resultados del presente estudio fueron en su mayoría contradictorios con los estudios anteriores sobre el efecto del estrés hídrico en los rasgos agronómicos y de calidad del trigo. El análisis de varianza mostró que el efecto de los tratamientos de riego no fue significativo para la mayoría de los rasgos, excepto para el peso de mil granos (PMG). El PMG fue significativamente mayor bajo condiciones de secano (S) con un incremento cercano a 1 g en comparación con el riego. Los resultados reflejan una clara influencia del genotipo, con diferencias significativas en todos los rasgos agronómicos evaluados, excepto en el contenido de humedad del grano (HG). La interacción entre tratamiento de riego y genotipo (TR × G) fue significativa para la mayoría de los componentes agronómicos, excluyendo el número de granos por espiga (NGE). En cuanto a los atributos de calidad del grano (HG y peso hectolitro (PH)), no se observaron diferencias significativas por interacción TR × G, a excepción de PMG. En resumen, el efecto de riego tuvo un impacto limitado en términos generales, salvo en algunos aspectos puntuales vinculados a la calidad del grano, como el PMG. El genotipo resultó fundamental para los rasgos agronómicos y su interacción con el riego subrayó la relevancia de seleccionar variedades adaptadas a condiciones hídricas específicas.

Esta ausencia de contrastes marcados entre tratamientos puede atribuirse a que el estrés hídrico impuesto no alcanzó un nivel de severidad suficiente para afectar el desarrollo del cultivo durante la temporada 2024/2025. Dicha temporada se caracterizó por una alta disponibilidad hídrica, con una precipitación acumulada de 1.029 mm, superior al promedio anual de las cuatro temporadas anteriores

(Apéndice 1). Además, la aplicación del riego suplementario se realizó en noviembre (Tabla 1), durante la etapa de antesis, cuando las plantas ya habían completado su ciclo vegetativo.

Tabla 3. Efecto del ambiente, los genotipos y su interacción sobre atributos agronómicos en condiciones de estrés (S) y riego (R).

Rasgos	Reps	TR	G	TR x G	R	S
BA	0,660	0,470	0,016*	0,008**	21,19 ± 1,09a	20,88 ± 0,77a
RG	0,270	0,220	0,000***	0,027*	8,99 ± 0,47a	8,6 ± 0,36a
IC	0,210	0,560	0,000***	0,036*	43,24 ± 1,48a	42,07 ± 1,59a
NE	0,180	0,110	0,054*	0,024*	$5,8 \cdot 10^{-5} \pm 2,8 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-5} \pm 1,7 \cdot 10^{-4}a$
NGE	0,660	0,690	0,000***	0,420	38,07 ± 0,54a	37,79 ± 0,75a
PMG	0,400	0,029*	0,000***	0,000***	40,24 ± 0,94a	41,29 ± 0,90b
PH	0,720	0,380	0,000***	0,930	86,27 ± 0,43a	85,79 ± 0,47a
HG	0,430	0,500	0,390	0,430	11,97 ± 0,65a	11,53 ± 0,05a

Los datos representan la media de los genotipos evaluados en cada condición de riego. BA, biomasa acumulada (ton ha^{-1}); RG, rendimiento de grano (ton ha^{-1}); IC, índice de cosecha (relación RG/BA); NE, número de espigas por planta; NGE, número de granos por espiga; PMG, peso de mil granos (g); PH, peso hectolitro (kg hl^{-1}); HG, humedad del grano (%). TR, tratamientos de riego; G, genotipos; TR x G, interacción tratamiento por genotipo. Medias con letras diferentes son significativamente distintas según la prueba t ($p \leq 0,05$). Valores significativos: * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$.

Efecto de las condiciones de riego en rasgos agronómicos y parámetros de calidad en los diferentes genotipos.

La biomasa acumulada por planta (BA) de los cultivares de trigo harinero evaluados bajo condiciones de riego y estrés hídrico se presenta en la Figura 2-A. En la condición de riego, el genotipo Ankén presentó la mayor BA, seguido por Mayén y Antufén. En contraste, bajo la condición seco, la mayoría de los genotipos redujeron levemente su BA. No obstante, Ciko, Chifén y Mayén lograron mantener valores relativamente altos de BA, lo que podría sugerir una ligera adaptabilidad a condiciones de escasez hídrica.

En el rendimiento de grano (RG), Antufén, seguido por Ankén alcanzaron mayores valores en condición de riego, mientras que, bajo S, fue Mayén quien obtuvo el mayor rendimiento (Figura 2-B). En general, los genotipos presentaron una disminución en el RG bajo seco, lo que indica una mejor adaptación a

ambientes con disponibilidad de riego. Respecto al índice de cosecha (IC) (Figura 2-C), las variedades antiguas mostraron valores elevados en la condición de riego, mientras que las variedades modernas como Pantera, Suri, Mayén y Ankén alcanzaron mayores IC en seco.

Este comportamiento indica que las variedades modernas poseen una mayor eficiencia en la asignación de biomasa hacia el grano bajo condiciones limitantes, reflejando una mejor adaptación fisiológica al estrés hídrico (Aisawi et al., 2015).

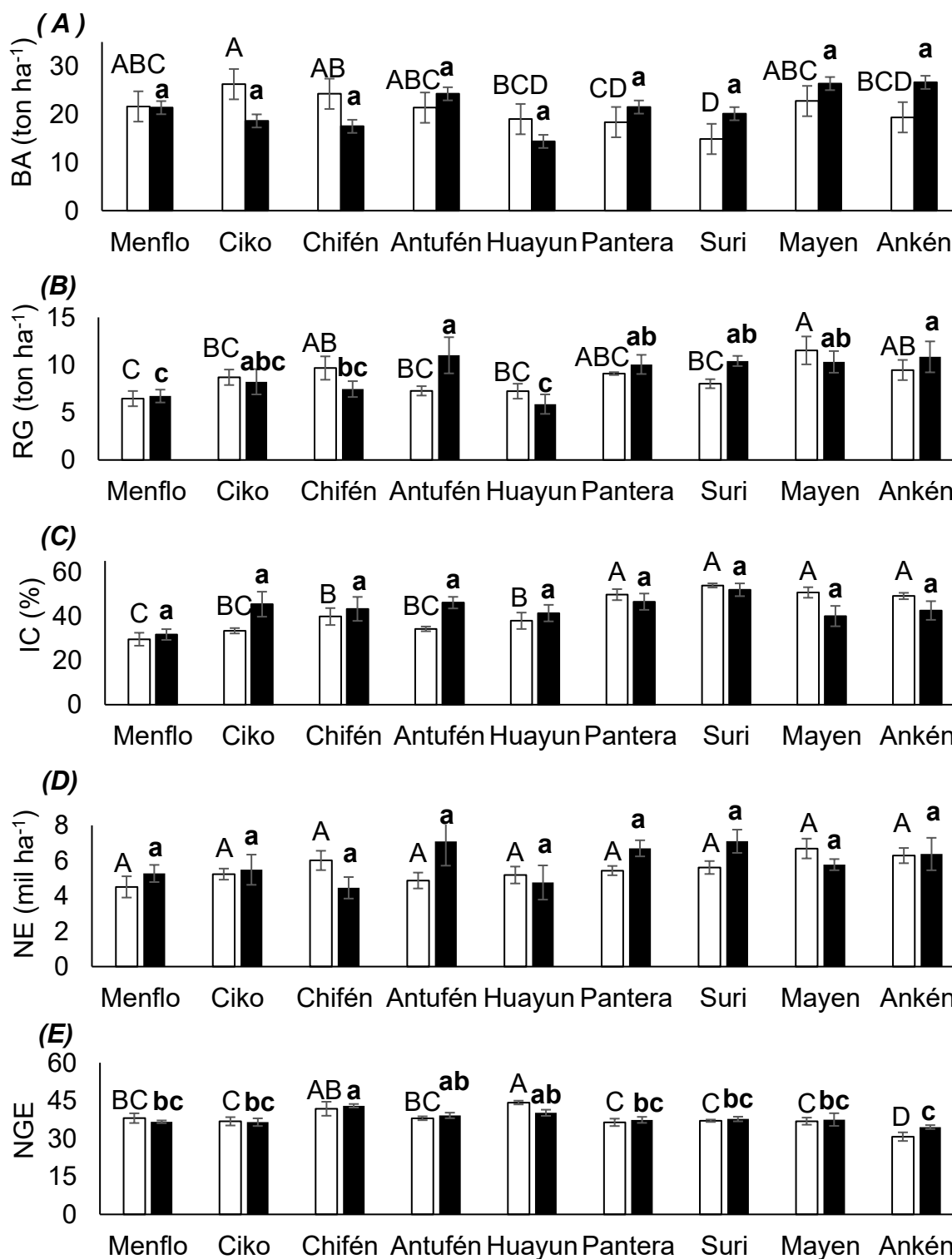
En cuanto al número de espigas por planta (NE) (Figura 2-D), no se observaron diferencias significativas entre tratamientos y las diferencias entre genotipos fueron mínimas. Esto podría atribuirse a que el NE es un componente menos sensible al estrés hídrico en comparación con otros, debido a que su determinación ocurre en etapas fenológicas tempranas, menos afectadas por la disponibilidad de agua (Fischer, 1985).

Respecto al número de granos por espiga (NGE) (Figura 2-E), los genotipos Huayún y Chifén destacaron con altos valores tanto en riego como en seco, lo que evidencia un buen potencial de rendimiento. Sin embargo, estos genotipos no alcanzaron valores elevados de peso de mil granos (Figura 3-A), lo que refleja una compensación entre el número y el peso de los granos, atribuida a la competencia por asimilados durante el llenado del grano (Abbate et al., 1998).

En cuanto el PMG (Figura 3-A), los genotipos Ankén y Mayén alcanzaron las medias más altas, destacando nuevamente a Ankén por lograr un PMG elevado incluso bajo condición seco. Esto sugiere una buena capacidad de llenado de grano bajo estrés, posiblemente asociada a una mayor eficiencia en el uso de asimilados o a una menor competencia por recursos durante esta etapa (Slafer et al., 2014).

Respecto al peso hectolitro (PH) (Figura 3-B), Ankén, Mayén y Suri se destacaron por mantener altos valores en ambos ambientes, reflejando buena calidad física del grano, asociada a un mayor PMG y a una mayor densidad del endospermo, incluso bajo estrés hídrico (Blanco-Canqui y Lal, 2007).

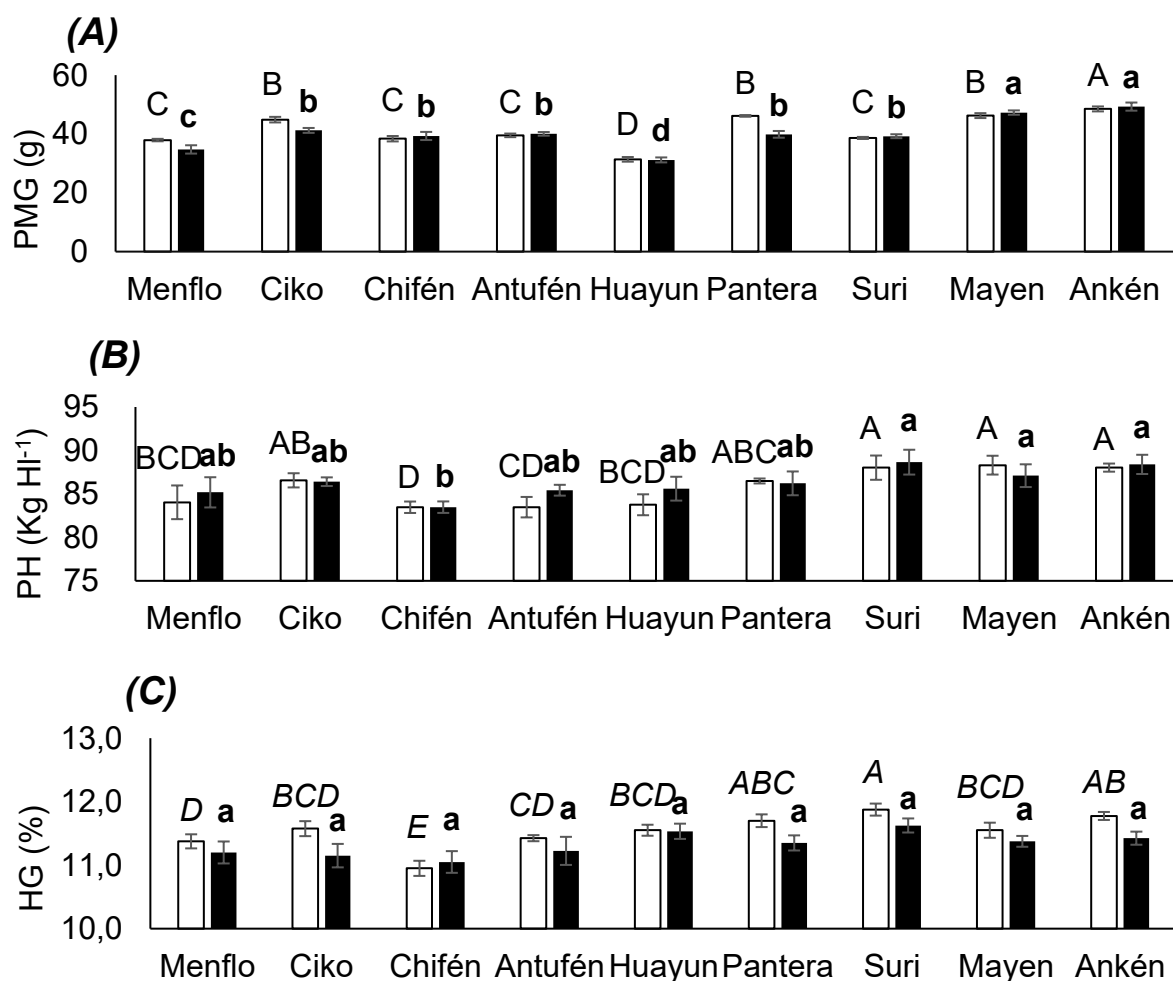
Figura 2. Rasgos agronómicos evaluados en los genotipos de trigo primaveral.



(A) biomasa acumulada (BA, ton ha⁻¹), (B) rendimiento de grano (RG, ton ha⁻¹), (C) índice de cosecha (IC, %), (D) número de espigas (NE, ha⁻¹) y (E) número de granos por espiga (NGE); las barras blancas representan la condición de secano y las barras negras la condición de riego.

La humedad del grano (HG) (Figura 3-C) no presentó variaciones bajo condición de riego y bajo secano se observaron solo mínimas diferencias entre genotipos. Esto contrasta con lo reportado por Álvaro et al. (2008), quienes señalan que el estrés hídrico severo reduce significativamente la HG al momento de cosecha. Por tanto, se infiere que la intensidad del estrés hídrico en la condición de secano en estudio no fue lo suficientemente severa como para generar efectos marcados en este parámetro.

Figura 3. Rasgos agronómicos y de calidad evaluados en los genotipos de trigo primaveral.



(A) peso de mil granos (PMG, g), (B) peso hectolitro (PH, kg hl⁻¹) y (C) humedad del grano (HG, %), las barras blancas representan la condición de secano y las barras negras la condición de riego.

Espectrorradiometría y modelos predictivos

Los modelos predictivos que se han desarrollado a partir de firmas espectrales para estimar propiedades clave en los granos de trigo primaveral han demostrado una notable capacidad predictiva y robustez estadística, con coeficientes de determinación (R^2) que oscilan entre 0,77 y 0,88 (Figuras 4-5). El modelo para PMG destacó con un desempeño notable ($R^2_{\text{val}} = 0,88$) empleando únicamente 13 variables espectrales. A este le siguieron el modelo de PH ($R^2_{\text{val}} = 0,80$) y finalmente el de HG ($R^2_{\text{val}} = 0,77$). Todos los modelos presentaron valores F significativos (entre 16,19 y 51,30), lo que evidencia una relación estadísticamente significativa entre las variables predictoras y las variables de respuesta. Estos hallazgos confirman la viabilidad y efectividad de la espectrorradiometría combinada con análisis multivariado para evaluar de manera rápida y no destructiva la calidad del trigo (Williams y Norris, 2001; Caporaso et al., 2018). Desde una perspectiva fisiológica y agronómica, el análisis de las firmas espectrales subraya la importancia de las bandas en el rango visible (400 – 700 nm) asociadas a pigmentos como carotenoides indicando el color del grano (Araus y Cairns, 2014). Al mismo tiempo, las bandas en las regiones NIR-SWIR evidencian la influencia de componentes bioquímicos como almidón, proteínas y agua en las propiedades físicas y químicas del grano (Cozzolino, 2014). Estas variables espectrales son marcadores potenciales para la selección temprana en programas de mejoramiento, permitiendo, por ejemplo, identificar genotipos con mayor contenido proteico o determinar el grado óptimo de maduración mediante análisis no destructivos (Zhang et al., 2013, 2020).

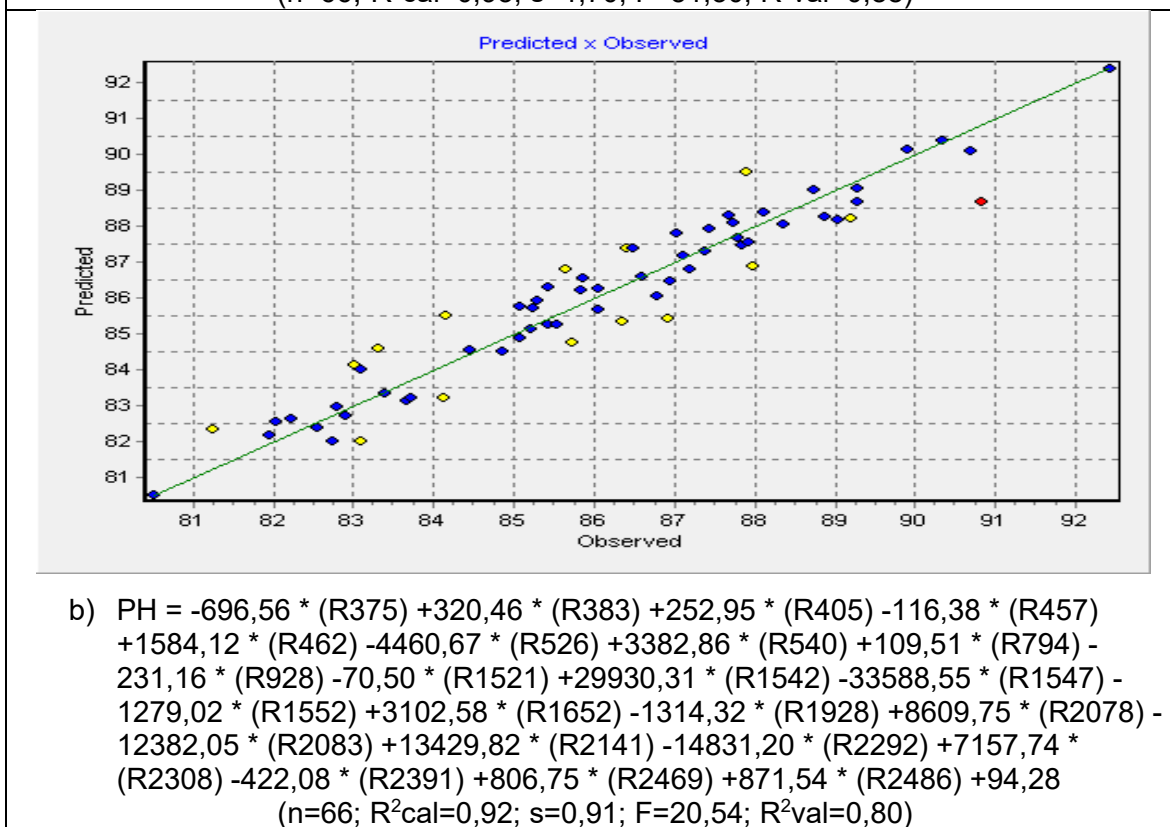
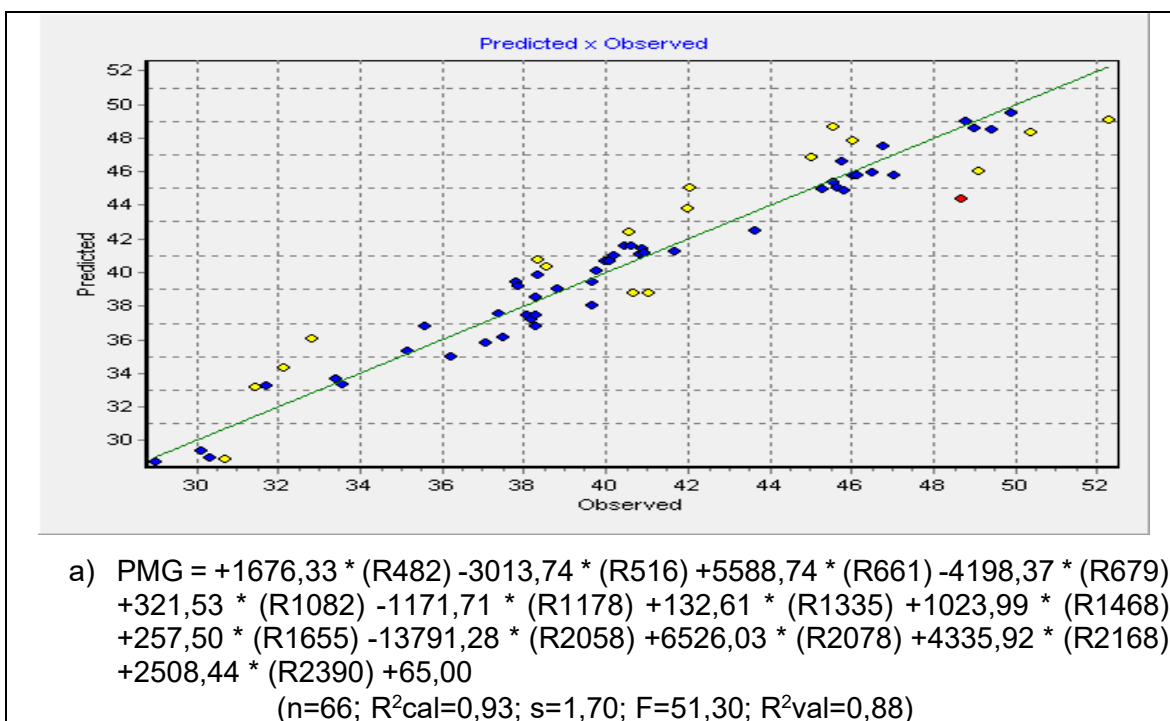
El modelo del peso de mil granos, que combina 13 variables espectrales, logró un poder de predicción del 88%, lo que indica una alta precisión y confiabilidad en sus predicciones. Este modelo identificó bandas clave como 482 nm, 661 nm y 679 nm, que están relacionadas con carotenoides y otros pigmentos del grano. Investigaciones anteriores han demostrado que la acumulación de carotenoides en el endospermo está asociada con la eficiencia fotosintética durante el llenado del grano (Digesù et al., 2009). Además, la notable contribución negativa de 2.058 nm

(SWIR) sugiere que la compactación del almidón tiene un impacto en el peso final del grano, lo que coincide con los hallazgos de Caporaso et al. (2018), quienes notaron que los granos con mayor densidad de almidón tienden a tener un peso específico más alto. Este desempeño se relaciona con la capacidad del modelo para captar la reflectancia en bandas que están vinculadas a la densidad y el tamaño del grano, influenciadas por el contenido de almidón y la estructura celular, procesos fisiológicos que reflejan la capacidad genotípica y ambiental para acumular reservas durante el llenado del grano (Triboi et al., 2006). Desde una perspectiva agronómica, esta precisión facilita la selección de genotipos superiores, optimizando las decisiones comerciales y reduciendo costos y tiempo en comparación con los métodos analíticos tradicionales (Mulla et al., 2013; Caporaso et al., 2018; Nuttall et al., 2024).

El modelo para el peso hectolitro mostró una precisión del 80%. Este modelo mostró una fuerte dependencia de bandas en 1.542 nm y 1.547 nm, que están relacionadas con las vibraciones de grupos CH y OH en carbohidratos. Estas longitudes de onda son sensibles a la organización molecular del almidón, especialmente a la relación entre amilosa y amilopectina (Manley, 2014). Además, la fuerte contribución negativa de 2.083 y 2.292 nm (SWIR) sugiere que la compactación del almidón influye en el peso final del grano, lo que coincide con los hallazgos de Caporaso et al. (2018), quienes notaron que los granos con mayor densidad de almidón tienen un peso específico más alto. La contribución negativa de 526 nm podría estar relacionada con compuestos fenólicos que afectan la estructura del pericarpio, reduciendo así la densidad aparente del grano (Serrano et al., 2009).

El contenido de humedad es fundamental para la conservación y el procesamiento después de la cosecha. Se estimó utilizando un modelo que incorporó 25 variables espectrales, logrando un poder de predicción del 77%. Este modelo destacó bandas en 1.443 nm (primer sobretono OH) y 873 nm (combinación OH), que son características de los estados vibracionales del agua (Workman y Weyer, 2012).

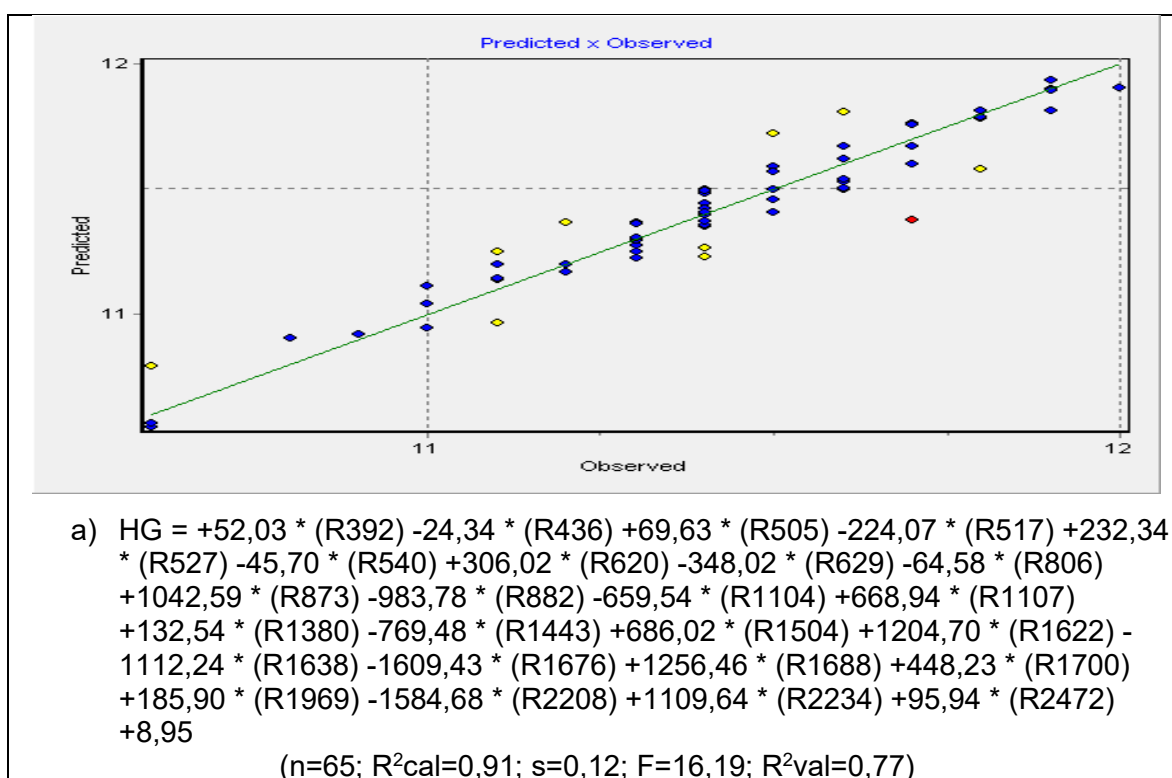
Figura 4. Modelos espectrales predictivos de peso de mil granos (PMG) y peso hectolitro (PH)



*PMG, peso mil granos; PH, peso hectolitro; s, error estándar; F, estadístico F de Fisher; n, número de parcelas; R^2_{cal} , R^2 de calibración del modelo; R^2_{val} , R^2 de validación del modelo.

Sin embargo, la inclusión de bandas en 517 nm y 620 nm sugiere que la interacción entre el agua y los pigmentos, así como la degradación de la clorofila, también juega un papel en la retención de humedad (Tigabu y Oden, 2004). La sensibilidad del modelo se basa en la detección de vibraciones moleculares del agua en las regiones NIR y SWIR, que afectan directamente la absorción y reflectancia (Workman y Weyer, 2012). La dinámica de la humedad, que depende del estado de madurez y de las condiciones ambientales al momento de la cosecha, hace que el monitoreo espectral sea una herramienta valiosa para optimizar la logística, evitando pérdidas por fermentaciones o daños, además de reemplazar métodos tradicionales, lo que genera ahorros económicos y operativos.

Figura 5. Modelos espectrales predictivos de humedad del grano (HG)



*HG, humedad del grano; s, error estándar; F, estadístico F de Fisher; n, número de parcelas, R^2_{cal} , R^2 de calibración del modelo; R^2_{val} , R^2 de validación del modelo.

Limitaciones y perspectivas futuras

A pesar de que los modelos muestran un alto poder de predicción, su uso en diferentes entornos y genotipos necesita validación externa para asegurar que los resultados sean robustos y se puedan generalizar (Roggo et al., 2007). La interpretación precisa de las bandas espectrales se ve obstaculizada por los solapamientos de múltiples compuestos presentes en el grano, lo que resalta la necesidad de realizar estudios mecanicistas complementarios que integren datos multi-ómicos, como la transcriptómica y la metabolómica, para establecer conexiones con las bases genéticas de los rasgos de calidad (Nicolai et al., 2007; Yendrek et al., 2017). Además, para implementar esta técnica a gran escala, es fundamental desarrollar equipos portátiles y protocolos estandarizados que permitan su uso rutinario en el campo. El avance en algoritmos de “machine learning” podría ser clave para mejorar la capacidad predictiva en condiciones ambientales cambiantes, integrándose con tecnologías emergentes de IoT y “Big Data”, lo que facilitaría la agricultura inteligente de hoy en día. Las investigaciones futuras deberían centrarse en ampliar el rango de variables consideradas, perfeccionar las técnicas de calibración y validación externa y fortalecer los modelos para su implementación práctica y masiva en el sector agrícola (Roggo et al., 2007; Yendrek et al., 2017).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que las condiciones de riego y secano no generaron diferencias estadísticamente significativas en la mayoría de los parámetros agronómicos y de calidad evaluados. Esta ausencia de contrastes marcados entre tratamientos puede atribuirse a que el estrés hídrico impuesto no alcanzó un nivel de severidad suficiente para afectar el desarrollo del cultivo durante la temporada 2024–2025.

En este escenario hídrico favorable, las diferencias observadas en los atributos agronómicos y de calidad estuvieron fuertemente determinadas por el componente genético. Esto subraya la relevancia de la selección varietal como herramienta clave en el manejo del cultivo. En particular, los genotipos Ankén y Mayén se destacaron por su alto rendimiento en biomasa acumulada y rendimiento de grano, así como

por sus favorables características de calidad (peso de mil granos y peso hectolitro). Además, evidenciaron una notable estabilidad productiva bajo condiciones de restricción hídrica moderada, posicionándolos como buen material genético para ambientes con disponibilidad hídrica moderadamente limitada. Lo anterior demuestra que el mejoramiento genético en los últimos años se ha enfocado no solo en incrementar el rendimiento, sino también en mejorar la calidad del grano y la adaptabilidad a diversas condiciones ambientales.

Los modelos espectrales que se desarrollaron en este estudio han demostrado ser precisos y estadísticamente robustos para predecir propiedades agronómicas, físico-químicas en granos de trigo de un modo no destructivo. En particular, el modelo que predice el peso de mil granos mostró un rendimiento excepcional, seguido de cerca por los modelos que evalúan el peso hectolitro y porcentaje de humedad, todos con coeficientes de regresión de calibración superiores a 0,88 y coeficientes de determinación de validación (R^2_{val}) que oscilan entre 0,77 y 0,88.

Las variables espectrales elegidas logran captar la variabilidad inherente a los atributos analizados, lo que permite procedimientos rápidos, precisos y confiables para su uso en el manejo agronómico, el mejoramiento genético y la comercialización. Sin embargo, es fundamental seguir realizando estudios adicionales para optimizar y validar estos modelos en condiciones reales de campo, ampliando las variables y técnicas de calibración e integrándolos con tecnologías digitales para mejorar su aplicabilidad en sistemas productivos.

REFERENCIAS

1. Ali, N., & Akmal, M. (2022). Wheat growth, yield, and quality under water deficit and reduced nitrogen supply: A review. *Gesunde Pflanzen*, 74(4), 371–383. <https://doi.org/10.1007/s10343-021-00615-w>
2. Aisawi, K. A. B., Reynolds, M. P., Singh, R. P., & Foulkes, M. J. (2015). The physiological basis of yield gains in CIMMYT spring wheat released between 1966 and 2009. *Crop Science*, 55(4), 1749–1764. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.09.0656>
3. Araus, J. L., & Cairns, J. E. (2014). Field high-throughput phenotyping: The new crop breeding frontier. *Trends in Plant Science*, 19(1), 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.09.008>

4. Araus, J. L., Slafer, G. A., Reynolds, M. P., & Royo, C. (2002). Plant breeding and drought in C3 cereals: What should we breed for? *Annals of Botany*, 89(7), 925–940. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf049>
5. Blanco Canqui, H., & Lal, R. (2007). Soil and crop response to harvesting corn residues for biofuel production. *Geoderma*, 141(3–4), 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.06.012>
6. Caporaso, N., Whitworth, M. B., & Fisk, I. D. (2018). Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging for non-destructive quality assessment of cereal grains. *Applied Spectroscopy Reviews*, 53(8), 667–687. <https://doi.org/10.1080/05704928.2018.1425214>
7. Cozzolino, D. (2014). An overview of the use of infrared spectroscopy and chemometrics in authenticity and traceability of cereals. *Food Research International*, 60, 262–265. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.08.034>
8. Digesù, A. M., Platani, C., Cattivelli, L., Mangini, G., & Blanco, A. (2009). Genetic variability in yellow pigment components in cultivated and wild tetraploid wheats. *Journal of Cereal Science*, 50(2), 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.05.002>
9. Fechipan. (2010). *Reseña del sector productivo de la Panadería Tradicional* [Online report]. Federación Chilena de Industriales Panaderos. <https://www.fechipan.cl/resena-del-sector-productivo-de-la-panaderia-tradicional>
10. Feldman, M. (1995). Wheats. In J. Smartt & N. W. Simmonds (Eds.), *Evolution of crop plants* (pp. 185–192). Longman Scientific and Technical.
11. Fischer, R. A. (1985). Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science*, 105(2), 447–461. <https://doi.org/10.1017/S0021859600056495>
12. Food and Agriculture Organization (FAO). (2023). FAOSTAT database. Consultado 13 agosto 2023 <http://faostat.fao.org> Licencia: CC-BY-4.0.
13. Golik, S. I. (2022). Trigo: origen, sistemática, importancia. In *Cereales de invierno* (pp. 10–21). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/156560>
14. Gooding, M. J., Ellis, R. H., Shewry, P. R., & Schofield, J. D. (2003). Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat. *Journal of Cereal Science*, 37(3), 295–309. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2002.0501>

15. Lal, R. (2016). Climate change and agriculture. In T. M. Letcher (pp. 465–489). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63524-2.00028-2>
16. Manley, M. (2014). Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: Non-destructive analysis of biological materials. *Chemical Society Reviews*, 43(24), 8200–8214. <https://doi.org/10.1039/C4CS00062E>
17. Mazoyer, M., & Roudart, L. (2002). *Histoire des agricultures du monde: Du néolithique à la crise contemporaine*. Éditions du Seuil.
18. Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
19. Nicolaï, B. M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K. I., & Lammertyn, J. (2007). Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 46(2), 99–118. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.06.024>
20. Osborne, B. G. (2006). Near-infrared spectroscopy in food analysis. In *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a1018>
21. Osiac, L. R., Rojas, D. E., Espinoza, P. G., Navarro-Rosenblatt, D., B, M. A., Carroza, M. B., & G, C. B. (2020). Evitemos la inseguridad alimentaria en tiempos de COVID-19 en Chile. *Revista Chilena de Nutrición*, 47(3), 347–349.
22. Reeves, C. R. (2010). Genetic algorithms. In M. Gendreau & J. Y. Potvin (Eds.), *Handbook of metaheuristics* (pp. 109–139). Springer.
23. Roggo, Y., Chalus, P., Maurer, L., Lema-Martinez, C., Edmond, A., & Jent, N. (2007). A review of near infrared spectroscopy and chemometrics in pharmaceutical technologies. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 44(3), 683–700.
24. Saini, H. S., & Westgate, M. E. (2000). Reproductive development in grain crops during drought. *Advances in Agronomy*, 68, 59–96. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60843-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60843-3)
25. Sandoval, I. (2012). Evaluación de la calidad fisicoquímica y fitosanitaria de trigo (*Triticum aestivum*) de temporal de México [Undergraduate thesis]. Universidad Autónoma Chapingo.

26. Serrano, J., Puupponen-Pimiä, R., Dauer, A., Aura, A. M., & Saura-Calixto, F. (2009). Tannins: Current knowledge of food sources, intake, bioavailability and biological effects. *Molecular Nutrition & Food Research*, 53(S2), S310–S329. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200900039>
27. Shewry, P. R. (2000). Seed proteins. In M. Black & J. D. Bewley (Eds.), *Seed technology and its biological basis* (pp. 42–84). Sheffield Academic Press.
28. Tigabu, M., & Oden, P. C. (2004). Rapid and non-destructive analysis of vigour of *Pinus patula* seeds using single seed near infrared transmittance spectra and multivariate analysis. *Seed Science and Technology*, 32(2), 593–606. <https://doi.org/10.15258/sst.2004.32.2.24>
29. Triboui, E., Martre, P., & Triboui-Blondel, A. M. (2000). Environmentally-induced changes in protein composition in developing grains of wheat are related to changes in total protein content. *Journal of Experimental Botany*, 51(341), 1681–1689. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.341.1681>
30. Williams, P., & Norris, K. (Eds.). (2001). *Near-infrared technology in the agricultural and food industries* (2nd ed.). American Association of Cereal Chemists.
31. Workman, J., & Weyer, L. (2012). *Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy* (2nd ed.). CRC Press.
32. Yendrek, C. R., Tomaz, T., Montes, C. M., Cao, Y., Morse, A. M., Brown, P. J., McIntyre, L. M., Leakey, A. D. B., & Ainsworth, E. A. (2017). High-throughput phenotyping of maize leaf physiological and biochemical traits using hyperspectral reflectance. *Plant Physiology*, 173(1), 614–626. <https://doi.org/10.1104/pp.16.01447>
33. Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14(6), 415–421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
34. Zhang, M., Zhou, J., Sudduth, K. A., & Kitchen, N. R. (2020). Estimation of maize yield and effects of variable-rate nitrogen application using UAV-based RGB imagery. *Biosystems Engineering*, 189, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.001>
35. Zhang, X., Liu, F., He, Y., & Gong, X. (2013). Detecting macronutrients content and distribution in oilseed rape leaves based on hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*, 115(1), 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.01.003>

APÉNDICE

Apéndice 1. Tabla Precipitaciones anuales acumuladas en la Estación experimental INIA- Santa Rosa en el período 2019 – 2024.

Mes	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Enero	9,1	5,2	15,0	1,6	7,4	0,0
Febrero	7,8	1,6	0,1	9,5	0,0	0,0
Marzo	8,2	0,2	3,1	9,9	2,2	46,8
Abril	7,4	80,0	36,1	142,6	41,1	78,0
Mayo	140,6	40,0	114,0	109,6	98,4	143,1
Junio	221,6	301,0	50,8	185,9	285,0	427,6
Julio	93,9	163,4	95,4	226,4	177,4	17,8
Agosto	52,1	87,4	95,6	121,8	249,0	166,6
Septiembre	57,3	27,5	95,6	68,4	227,1	105,6
Octubre	15,1	23,8	24,8	18,7	58,5	22,8
Noviembre	12,6	0,2	6,0	25,7	61,0	20,9
Diciembre	5,8	15,5	13,0	0,0	2,0	0,6
pp acum. Anual (mm)	631,5	745,8	649,0	920,1	1209,1	1029,8

*Fuente: Agrometeorología INIA, estación experimental Santa Rosa, consultado en marzo de 2025.

ANEXO

Anexo 1. Resultados del análisis químico del suelo en la Estación experimental INIA- Santa Rosa en la temporada 2024-2025.

Suelo	Unidades	Valor	Nivel
pH en agua	--	6,02	Medio
Materia Orgánica	%	4,24	Medio
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/Kg	19,61	Medio
Amonio (N-NH ₄ ⁺)	mg/Kg	3,10	Bajo
Nitrógeno Disponible	mg/Kg	23,50	Medio
Fósforo Olsen	mg/Kg	52,40	Alto
K disponible	mg/Kg	176,70	Alto
K intercambiable	cmol/Kg	0,45	Alto

* El análisis fue hecho en el Laboratorio de análisis de suelo y plantas de la Universidad de Concepción.