UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

Trabajo final de licenciatura:

Fenotipado en ambientes hídricos contrastantes de la población WAMI de *Triticum aestivum* con énfasis en el rendimiento y sus componentes

Estudiante: Gabriel Yudewitz Pohl.

Directora: Dra. MSc. Lic. Mónica Ruiz.

Co-directora: Dra. Mariana Balmaceda.

AÑO: 2025

"Si antes no nos destruimos a nosotros mismos, el futuro pertenece a las comunidades sociales que permitan el florecimiento de los rasgos genuinamente humanos de nuestra naturaleza, a las sociedades dispuestas a invertir recursos en una multiplicidad de experimentos de orden social, político, económico y cultural, y que estén dispuestas a sacrificar ventajas inmediatas por beneficios a largo plazo. El futuro pertenece, en fin, a las sociedades que consideran las ideas innovadoras como delicadas, frágiles y preciosas vías hacia el futuro."

Los dragones del Edén - Carl Sagan

DEDICATORIA

A mi padre y hermanos, Marcelo, Nicolás y Ian

A mis tías y abuela, Roxana, Sonia, Jannine y Cotty

A mi compañera de vida, Lucía

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por confiar e invertir en estos años en mi carrera universitaria, por acompañarme y alentarme en cada logro, sostenerme en los malos momentos, y continuar siendo un pilar fundamental en mi vida

A mi Directora Mónica Ruiz, por toda su dedicación, compromiso y enseñanzas

A mi Co - Directora Mariana Balmaceda, por ser un apoyo incondicional, brindarme enseñanzas y oportunidades durante todo este periodo

A Sandra Páez, por enseñarme, acompañarme y apoyarme en todo mi camino trabajando con trigo

A Gustavo Schumacher, por sumarme a esta investigación e introducirme al mundo de la investigación del trigo

A todo el equipo y compañeros/as del INTA: Gonzalo Sánchez, Belén Heredia, Franco Barceló, Antonella Biazzetti, Silvina Hruby, Emanuel Ontivero, Emanuel Delfino, por su compañía, enseñanzas, apoyo y buena onda desde el día uno

A Alfredo "Nechi" y Eduardo, por enseñarme todo lo que pudieron del campo y su magia, por hacerme sentir un amigo más y brindar contención

A mis compañeros/as y docentes que hicieron que toda esta trayectoria fuera inolvidable y que cada viaje de campo y laboratorio compartido quede guardado para siempre en la memoria

A Sabina Prado, por acompañarme en mi camino de formación en el mundo de la biología siendo una gran coordinadora, profesora y amiga

A Martín Carrizo, por ser un gran compañero incondicional y amigo de la vida

A toda persona que haya compartido y apoyado esta trayectoria, ¡muchas gracias!

Resumen 5
1. Introducción 6
1.1. El trigo en el mundo, en Argentina y en San Juan. 6
1.2. Taxonomía, historia y morfología del trigo 8
1.3. El impacto de la sequía y el estrés hídrico en el desarrollo del cultivo. 9
1.4. Fenómica en programas de mejoramiento del cultivo 12
2. Objetivos 13
2.1. Objetivo general 13
2.2. Objetivos específicos 13
3. Hipótesis 13
4. Materiales y métodos 14
4.1. Localización del ensayo 14
4.2. Germoplasma 14
4.3. Diseño experimental 14
4.3.1. Tratamientos 17
4.4. Evaluaciones en campo 18
4.4.1. Fenología del cultivo 18
4.4.2. Altura (cm) de los genotipos 18
4.4.3. Temperatura de la canopia (TC) 18
4.4.4. Índice de verdor 19
4.5. Evaluaciones post-cosecha 19
4.5.1. Biomasa 19
4.5.2. Rendimiento y componentes del rendimiento 19
4.6. Análisis estadísticos 21
4.6.1. Índices de tolerancia a la sequía 21
5. Resultados 23
5.1. Tratamientos 23
5.2. Evaluaciones en campo 24
5.2.1. Fenología del cultivo 24
5.2.2. Altura y biomasa 24
5.3.2.Verdor y temperatura de la canopia 25
5.3. Evaluación post - cosecha 27
5.3.1. Rendimiento y componentes del rendimiento 27
5.3.2. Índices de tolerancia a la sequía 29
6. Discusión 36
7. Conclusiones 40
8. Anexo 41
9. Bibliografía 43

Resumen

El trigo (*Triticum aestivum*) es una de las especies agrícolas de mayor relevancia a nivel mundial, siendo el tercer cultivo alimenticio más importante después del maíz (*Zea mays* L.) y el arroz (*Oryza sativa* L.). En Argentina, la superficie cultivada en septiembre de 2024 alcanzó las 6.300.000 ha, esperándose un aumento para la temporada 2025. Muchas de estas áreas experimentan variaciones en la intensidad y frecuencia de los períodos de sequía, como consecuencia del cambio climático. El estrés hídrico afecta directamente el metabolismo y desarrollo del trigo, reduciendo considerablemente el rendimiento y provocando pérdidas económicas significativas. Desde la perspectiva de la fenómica, el fenotipado permite mejorar la producción vegetal mediante la evaluación, selección y desarrollo de cultivares mejor adaptados a condiciones adversas, se analizando los componentes del rendimiento sus relaciones, a fin de identificar los caracteres más relevantes en la selección de variedades tolerantes. Entre estos, el número de granos por metro cuadrado mostró ser de los principales determinantes del rendimiento final del cultivo en condiciones de riego, y también uno de los más afectados por la sequía, observándose una disminución significativa del número total de granos por espiga. Por lo tanto, mejorar este componente resulta clave para avanzar en programas de mejoramiento genético orientados a condiciones de déficit hídrico. El objetivo de este estudio fue caracterizar fenotípicamente la población WAMI (Wheat Association Mapping Initiative) evaluando 287 genotipos de élite en función del rendimiento y sus componentes bajo dos condiciones hídricas contrastantes, como aporte a programas de mejoramiento del cultivo. Se realizaron mediciones a campo (fenología, altura, temperatura del canopeo y verdor) y evaluaciones postcosecha (biomasa, rendimiento y componentes del rendimiento). Además, se utilizaron tres índices de tolerancia para identificar genotipos mejor adaptados a condiciones de riego y estrés: el Índice de Productividad Media (PM), el Índice de Productividad Media Geométrica (PMG) y el Índice de Tolerancia al Estrés (ITS). Los datos se analizaron mediante análisis de la varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de $p \leq 0,05$, y se calcularon coeficientes de correlación de Pearson (r) para evaluar las relaciones entre el rendimiento y sus componentes. También se llevó a cabo un análisis de sendero (path analysis) para estimar efectos causales directos e indirectos entre las variables correlacionadas. Los resultados mostraron que el estrés hídrico afectó significativamente las variables morfofisiológicas, los componentes del rendimiento y el rendimiento final, con respuestas variables entre los genotipos evaluados. El rendimiento (g/m^2) bajo el tratamiento de estrés se redujo un 27,5% respecto al tratamiento con riego. El número de granos por metro cuadrado fue el componente más correlacionado con el rendimiento final en ambos ambientes, seguido por el número de espigas por metro cuadrado. El análisis de sendero confirmó una fuerte asociación de ambas variables con el rendimiento, más marcada en condiciones de riego que de sequía. Los índices de tolerancia permitieron identificar genotipos con alto potencial de adaptación al estrés hídrico, destacándose como una herramienta clave para programas de selección y mejoramiento.

Palabras claves: *Triticum aestivum*, estrés hídrico, fenotipado, rendimiento, componentes del rendimiento, índices de tolerancia.

1. Introducción

1.1. El trigo en el mundo, en Argentina y en San Juan.

El trigo (*Triticum aestivum*) es una de las especies cultivadas más antiguas de la humanidad con más de 8000 años de historia. Actualmente, junto con el arroz (*Oryza sativa* L.) y la carne, son las principales fuentes de energía y proteína para la humanidad (Abbate, 2023). En términos de producción, el trigo es el tercer cultivo alimenticio más importante del mundo después del maíz (*Zea mays* L.) y el arroz (Green *et al.*, 2012). Las primeras proyecciones en 2025 hablan de un posible incremento de la producción de trigo en 796 millones de toneladas, representando un aumento interanual cercano al 1%. Este incremento se debe principalmente a la recuperación de la producción de la Unión Europea (tras la caída de producción en 2024), una mayor cosecha en países como Irán, y también en la obtención de resultados prometedores en el contexto de mejoramiento genético y adaptación de cultivos a diferentes condiciones ambientales, especialmente en regiones afectadas por el estrés hídrico. Sin embargo, en regiones trigueras importantes como la Federación de Rusia, la superficie sembrada con trigo de invierno ha disminuido por tercer año consecutivo, debido a factores climáticos como bajos niveles de humedad en el suelo y una capa de nieve delgada, previendo una caída del 2% interanual. En Ucrania, principalmente el impacto de la guerra actual continúa restringiendo el acceso a campos y dañando infraestructura que impacta negativamente a la rentabilidad del sector (FAO, 2025).

Argentina es uno de los principales productores y exportadores de trigo en América del Sur, con una superficie cultivada que se extiende entre las latitudes 30° y 40° Sur y las longitudes 57° y 68° Oeste (Figura 1). Esta vasta área se divide en diversas regiones conocidas como "subregiones trigueras" (Molfese, 2016). Cada subregión presenta diferentes condiciones climáticas, edáficas y geológicas que exigen la aplicación de diferentes técnicas de manejo del cultivo de trigo para obtener un mejor rendimiento.

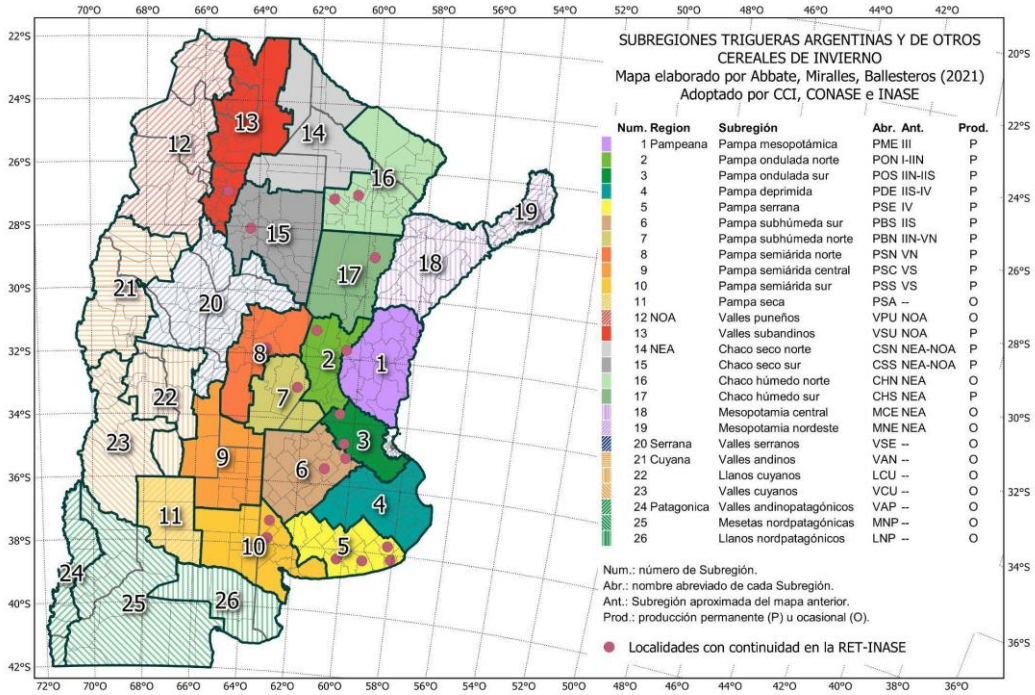

Figura 1: Mapa de las subregiones trigueras de Argentina y de otros cereales de invierno, teniendo en cuenta diferencias de precipitación, temperatura, suelo y relieve. (Extraído de *Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación [MAGyP] 2021)*.

Miralles (2014) indica que en la primera década del 1900 se exportaron alrededor de 3 millones de toneladas de trigo, posicionando a nuestro país como el principal exportador mundial con el 23% de la producción global. Entre 1900 y 1930, la superficie cultivada de trigo aumentó a una tasa de casi 123.000 hectáreas por año, alcanzando en 1928 el récord de un poco más de 9 millones de hectáreas y una producción de casi 9,5 millones de toneladas, cifra que sería superada diez años más tarde en 1938 (Miralles *et al.*, 2014).

En la temporada 1988-1989 se registró uno de los fenómenos de sequía más intensos en la historia de la producción en el país, lo que redujo la superficie cultivada en un 35% y provocó una caída del 15% en el rendimiento de los cultivos. Un fenómeno similar se reportó entre 2003 y 2004, afectando el rendimiento del trigo en aproximadamente un 50% (Sgroi *et al.*, 2021). Sin embargo, en la temporada 2022 se observó un repunte en la producción total, exportándose 14 millones de toneladas y generando ingresos de 4.315 millones de dólares. En la temporada 2023 se produjo una nueva caída en los valores exportados debido a una sequía que impactó la producción. La campaña de trigo 23/24 alcanzó una producción de 15,9 millones de toneladas, lo que representa un incremento del 26,3% respecto a la temporada 22/23; no obstante, al compararla con el promedio de los últimos 10 años (16,3 millones de toneladas), la campaña 23/24 es un 2,7% inferior (MAGyP, 2024). Desde el año 2000 hasta la actualidad, la producción de trigo ha mostrado un crecimiento constante, presentando rendimientos de 1,9 a 3,2 toneladas por hectárea en función de la diversidad de suelos y climas. Hoy los objetivos de producción

se centran en la aplicación de técnicas agrícolas que reduzcan el uso de recursos e insumos, especialmente en zonas áridas (Pellegrini *et al.*, 2022).

En la Provincia de San Juan, hacia finales del siglo XVI, se introdujeron cultivos como el trigo, la cebada, los frutales, el olivo y la vid (González *et al*., 2014). Al norte, en los departamentos de Iglesia y Jáchal, se destacó la producción masiva y la molienda de trigo en tierras que anteriormente se destinaban al cultivo de maíz. Al sur, cerca de las Lagunas de Guanacache, la agricultura aprovechaba la humedad retenida en el suelo para el desarrollo de los cultivos. Esta disponibilidad de agua provenía tanto de los ríos San Juan, Mendoza y Tunuyán, como también de las precipitaciones estivales (Escolar *et al*., 2013; Balmaceda, 2024). En 1858 se sancionó la ley de riego denominada "Reglamento de Irrigación y Agricultura", la cual impulsó una gestión estatal del agua destinada a los cultivos mediante la concesión de derechos a diversos agricultores. En los años siguientes, la producción de granos comenzó a disminuir y fue reemplazada por el cultivo de la vid. Esta transición no solo fue causada por la llegada de inmigrantes incentivando la actividad vitivinícola, sino también debido a su mayor rentabilidad y facilidad de manejo (Jorba, 2003). El cultivo de la vid, su procesamiento industrial a través de la gran bodega y la llegada del ferrocarril en 1885 impulsaron notablemente la economía sanjuanina, definiendo un modelo productivo que perduró durante muchas décadas (Gonzáles *et al*., 2014).

En 2021, el Sistema de Información Simplificada Agrícola del Instituto Nacional de Semillas (SISA - INASE) reportó un productor de trigo en San Juan con 100 ha de superficie sembrada (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 2021). Actualmente, se promueve la reintroducción del cultivo de trigo en la provincia a través de varios programas de mejoramiento impulsados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Los resultados de ensayos realizados con trigo, en los cuales se evaluaron el rendimiento y los costos de producción por hectárea bajo condiciones de estrés hídrico, demostraron el gran potencial del cultivo tanto en términos de rendimiento como de calidad en la Provincia (Gobierno de la Provincia de San Juan, 2023).

1.2. Taxonomía, historia y morfología del trigo

El trigo es una planta de la clase Liliopsida, Familia Poaceae y Género *Triticum*. Entre los nombres comunes de T. *aestivum* se incluyen trigo harinero o trigo blando (Figura 2) (Sierra Cuba, 2021).

↳ Plantas (Reino Plantae)
↳ Plantas Vasculares (Filo Tracheophyta)
↳ Plantas con Flores (subfilo Angiospermae)
↳ Pastos, Palmeras Y Parientes (Monocotiledóneas) (Clase Liliopsida)
↳ Pastos, Juncos, Bromelias Y Afines (orden Poales)
↳ Pastos Y Cereales (Familia Poaceae)
↳ subfamilia Pooideae
↳ Tribu Triticeae
↳ Subtribu Triticinae
↳ Trigos (género *Triticum*)
↳ **Trigo** (***Triticum aestivum***)

Figura 2: Taxonomía de *T. aestivum*. Extraído de: *ArgentiNat, 2025.*

Su origen e historia presentan aspectos enigmáticos. El botánico y genetista Nikolai Vavilov reconoció que los tres niveles de ploidía del trigo corresponden a centros geográficos de diversificación diferentes, es decir, que presentan un origen geográfico independiente (Vavilov, 1926). Para el trigo hexaploide (*T. aestivum*, AA-BB-DD), se asigna una región que abarca desde Afganistán y Turkmenistán hasta Transcaucasia (Dvorak *et al.*, 2011).

En términos evolutivos, *T. aestivum* evolucionó a partir de *T. urartu* (AA), en combinación con una especie relacionada con *Aegilops speltoides* (BB), hace aproximadamente medio millón de años, dando origen a *T. turgidum spp*. Posteriormente, el cruzamiento entre *T. turgidum durum* (AA-BB) y *A. tauschii* (DD) formó, hace unos 10 mil años, el genoma del trigo hexaploide moderno panificable (AA-BB-DD), *T. aestivum* (El Baidouri *et al.*, 2017; Feldman y Levy, 2009).

El trigo es una gramínea anual con hojas lanceoladas y una espiga terminal de flores hermafroditas. Su sistema radicular está compuesto por raíces adventicias que se ramifican y se extienden en el suelo. Durante su fase vegetativa, desarrolla macollos con tallos axilares que sostienen la hoja bandera, encargada de proteger la inflorescencia. Cada tallo produce una espiga (Figura 3) formada por espiguillas distribuidas a lo largo del raquis, cuyo número varía según la especie y la variedad. El grano de trigo se describe como un cariópside:,un fruto seco de forma ovoide (Figura 4), compuesto por el embrión, el endospermo y capas protectoras como la testa y el pericarpio (Canadian Food Inspection, 2012; Kirby y FAO, 2002; Lersten, 1987; Sisterna, 2021).

Su plasticidad agrícola se complementa con sus excelentes características culinarias y la capacidad de poder almacenar el grano seco durante largos períodos de tiempo (Abbate, 2023).

Figura 3: Espigas de trigo. Fotografía del autor (2021).

Figura 4: Granos de trigo previos a ser sembrados. Fotografía del autor (2021)

1.3. El impacto de la sequía y el estrés hídrico en el desarrollo del cultivo.

Muchas de las subregiones trigueras nombradas en la sección 1.1. presentan períodos de sequía que varían en intensidad y frecuencia. La sequía se define como un fenómeno meteorológico que denota la falta de precipitaciones durante un tiempo determinado, ocasionando que las plantas se vean afectadas por la escasez de agua disponible en el suelo (Munné-Bosch *et al*., 2004), induciendo cambios morfofisiológicos, genéticos y/o bioquímicos drásticos en los cultivos. Dependiendo de la etapa del ciclo del cultivo en la que se manifiesta este fenómeno, las plantas presentan diferentes respuestas. El ciclo del trigo se puede dividir en 6 etapas: establecimiento, pre-macollaje, macollaje, encañazón, espigazón/antesis y finalmente llenado del grano, con su posterior secado o senescencia (Figura 5). Durante las primeras fases del desarrollo, el estrés hídrico puede provocar una reducción en la altura de las plantas, en el área foliar total y en el número de macollos fértiles. Si la sequía ocurre entre la elongación del tallo y la formación de las espigas (espigazón), se ven afectados negativamente distintos niveles de la estructura reproductiva del trigo, reduciéndose el número de espiguillas fértiles por espiga y la cantidad de espigas fértiles por planta. Estas alteraciones repercuten directamente en la cantidad de granos por espiga. En caso de que el estrés hídrico persista después de la floración, el efecto más notorio se evidencia en una disminución del peso de los granos, debido a un deficiente llenado, lo cual compromete el rendimiento final del cultivo. Algunas variedades han demostrado respuestas diferenciales ante cambios en la intensidad del estrés, evidenciándose reducciones significativas en componentes clave del rendimiento como en la longitud de las espigas y la biomasa total (Başer *et al.*, 2024).

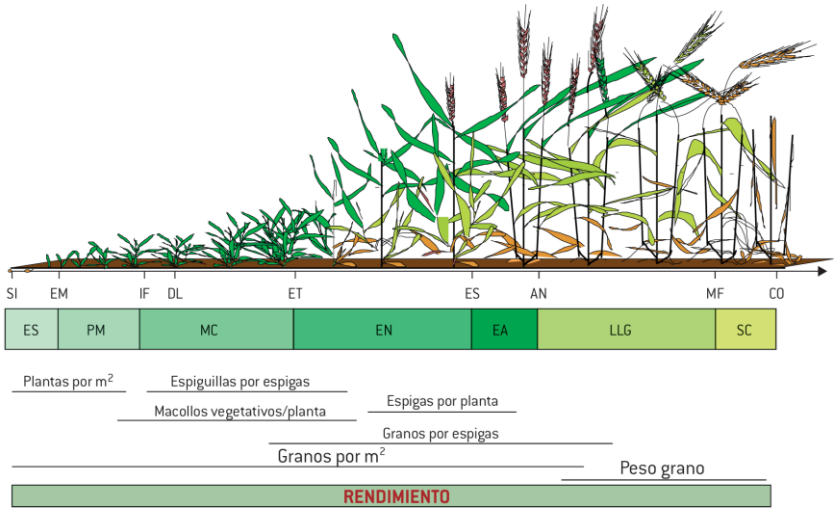

Figura 5: Etapas del ciclo de cultivo de trigo y generación de componentes numéricos del rendimiento (Modificado de *Slafer y Rawson 1994*). SI: siembra, EM: emergencia, IF: iniciación floral, DL: doble lomo, ET espiguilla terminal, ES: espigazón, AN: antesis, MF: madurez fisiológica, CO: cosecha. Etapas del desarrollo del trigo: Establecimiento (ES): periodo entre la siembra y la emergencia, Pre-macollaje (PM): periodo entre emergencia e inicio del macollaje, Macollaje (MC): periodo entre el macollaje y el encañazón, Encañazón (EN): periodo de inicio de encañazón e inicio de espigazón, Espigazón/Antesis (EA): periodo entre el inicio de espigazón y fin de antesis, Llenado de grano (LLG): periodo entre el final de la antesis y madurez fisiológica, Secado del grano (SC): El rendimiento del cultivo ya fue definido y el grano sólo pierde humedad (Extraído de Miralles *et al.*, 2014).

El rendimiento de un cultivo se puede entender como el peso de los granos dentro de un área determinada (Cifuentes Cornejo, 2014). El rendimiento en el grano es el resultado del desarrollo y la interacción de sus componentes a lo largo del ciclo del cultivo. La falta de agua en las plantas puede reducir la expansión del área foliar, responsable de la intercepción de la radiación solar y la generación de fotoasimilados. Sin embargo, si tras el periodo de sequía el cultivo logra desarrollar un área foliar suficiente para compensar las pérdidas ocasionadas, el rendimiento final podría no verse afectado (Ghanem *et al*., 2024; Bapela *et al.*, 2022; Abbate, 2004).

El estudio del rendimiento generalmente se centra en sus componentes principales: la cantidad de espigas por metro cuadrado, el número de granos por metro cuadrado y el peso de los granos. Aunque una modificación en alguno de estos componentes no necesariamente conlleva un cambio en el rendimiento final, cualquier variación en el rendimiento debe ir acompañada de alteraciones en uno o más de sus componentes (Balmaceda, 2024). El número de granos por metro cuadrado está determinado por el número de espigas por metro cuadrado y la cantidad de granos por espiga (Slafer, 2003), siendo este el componente principal que influye directamente en el rendimiento de los cultivos de trigo (García *et al.*, 2014). Por tanto, enfocar los estudios en la mejora del número de granos por metro cuadrado constituye una base fundamental para lograr genotipos de trigo con mejores rendimientos en el proceso de selección de variedades destacadas (Balmaceda, 2024). En este sentido, se esperaría observar una fuerte correlación positiva entre el rendimiento del cultivo y el número de granos por metro cuadrado, independientemente del genotipo o del tratamiento evaluado, mientras que las correlaciones entre el rendimiento y otros componentes tienden a ser más débiles y menos consistentes (Ruiz *et al.*, 2019).

En términos de variables de crecimiento, los estudios de Mirbahar *et al.* (2009) muestran que el estrés hídrico tiene un impacto negativo directo en la altura y la biomasa en cultivos de trigo, provocando una reducción significativa. Si la sequía se presenta en las estapas críticas del desarrollo, el impacto podría agravarse (Nezhadahmadi *et al.*, 2013). Una deficiencia hídrica gradual en los cultivos puede reducir el número de granos por metro cuadrado final, especialmente durante la etapa de crecimiento de las espigas, la cual depende directamente del número de flores desarrolladas en la inflorescencia. Una vez superado este periodo, el estrés hídrico puede afectar el llenado del grano, reduciendo la biomasa y alterando la variable del peso de mil granos. Esta última problemática, sin embargo, no es la que mayormente incide en el rendimiento total, ya que se ve comprometida únicamente cuando disminuye el número de granos (Abbate, 2004; Mirbahar *et al.*, 2009).

Los pigmentos fotosintéticos también representan un componente clave en la interacción entre la planta y su entorno bajo condiciones de estrés (Peremarti *et al.*, 2014). En términos fisiológicos, una mayor tasa fotosintética favorece el rendimiento del trigo, ya que existe una relación directa entre esta y la producción de biomasa seca total. En ambientes estresantes, la tasa fotosintética puede verse afectada por la disminución del contenido de clorofila en las células vegetales, lo que repercute negativamente en la producción final (Kubar *et al*, 2022). Por lo tanto, es necesario considerar el contenido de clorofila foliar para evaluar la tolerancia a la sequía, dado que las variaciones en la acumulación de pigmentos pueden estar correlacionadas con una reducción en el crecimiento de los brotes, así como en la acumulación y distribución de fotoasimilados. Diversos estudios señalan que el estrés hídrico acelera la senescencia foliar, lo que conlleva a la degradación de las membranas tilacoides y, en consecuencia, a una alteración de los pigmentos fotosintéticos. Este fenómeno ha sido considerado un marcador de estrés oxidativo inducido por la actividad de clorofilasas (Hosseinzadeh *et al.*, 2018; Ghanem *et al*., 2024). Así, el monitoreo de cambios en la coloración foliar podría constituir un estimador indirecto de gran valor para detectar respuestas tempranas al estrés hídrico en programas de mejoramiento genético.

1.4. Fenómica en programas de mejoramiento del cultivo

Para que las ciencias agrarias encuentren soluciones a la alta demanda de la sociedad sobre los cultivos y la generación de alimento, se debe priorizar los estudios de procesos que contribuyen al rendimiento, a sus componentes y sus interacciones, y al funcionamiento de estos en respuesta a diferentes ambientes. Para ello, una de las técnicas empleadas es el estudio del fenotipo en respuesta a las condiciones ambientales. El fenotipo es definido como la combinación de características morfológicas, fisiológicas, anatómicas, químicas, de desarrollo y comportamiento que en conjunto representan a un individuo. La relación entre el fenotipo expresado por la planta y su función es estudiada por la fenómica funcional, a través de la medición y análisis de rasgos cualitativos y cuantitativos, para caracterizarlos y utilizarlos en estudios de mejoramiento (Pieruschka *et al*., 2012).

El fenotipado es tan importante como el genotipado para establecer la relación entre genes y rasgos al evaluar distintos cultivos de trigo y mejorar su rendimiento en ambientes contrastantes. Desde los primeros pasos en la agricultura, la especie humana ha desarrollado la capacidad de fenotipar y seleccionar especies o variedades con mejores atributos para optimizar sus cultivos, un requisito fundamental para el desarrollo de las civilizaciones. Este proceso no solo implica la observación de rasgos visibles, sino también la interpretación de la interacción entre genotipo - ambiente, con el fin de desarrollar nuevos cultivares que presenten mayor rendimiento por unidad de área y una menor demanda de insumos (Pieruschka *et al*., 2012).

Para Fiorani *et al*., (2013), el genotipo y su interacción con el ambiente (G X A) influyen directamente en los rasgos cuantitativos de un cultivo de manera compleja y dinámica. Diferentes factores ambientales que intervienen en el crecimiento del brote y el desarrollo de la raíz covarían y se caracterizan por tener distintos niveles de heterogeneidad espacio - temporal. Por lo cual, muchas investigaciones de fenotipado de organismos en general concluyen que:

- El estrés ambiental puede desencadenar síndromes generalizados en las diferentes etapas del desarrollo posterior del organismo.
- Los genotipos responden al ambiente, pero también pueden modelar su entorno.
- La historia de vida puede influir en la expresión e intensidad del fenotipo, y este puede variar en determinadas etapas del desarrollo.
- La historia filogenética de un gen determinado y su expresión fenotípica debe ser considerada para inferencias en las relaciones de causalidad.
- Existen procesos genéticos y/o moleculares con gran aleatoriedad, que tienen efectos de gran alcance sobre expresiones fenotípicas macroscópicas seleccionadas.

Bajo esta perspectiva, el fenotipado se ha vuelto un campo científico en expansión, que combina la biología vegetal con técnicas automatizadas y desarrollos tecnológicos, con el fin de acelerar los avances de mejoramiento vegetal para el desarrollo de mejores cultivares en respuesta de una creciente demanda por parte del incremento de la población humana global (Fiorani *et al*., 2013).

En base a lo planteado en las secciones anteriores, queda expuesto el interés de encontrar genotipos de trigo, que manifiesten alto rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico, en concordancia a las nuevas perspectivas ambientales que se prevén como efecto del cambio climático. Para ello, se requiere de evaluar diferentes variables que conforman al rendimiento total de la planta, como el peso de mil granos, el número de espigas y el número total de granos, empleando la técnica de fenotipado con el fin de detectar variedades de trigo destacables en condiciones ambientales contrastantes en el campo.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

- Caracterizar fenotípicamente la población de asociación WAMI (Wheat Association Mapping Initiative) en función de las variables de rendimiento y sus componentes en dos condiciones hídricas contrastantes como aporte para el mejoramiento genético.

2.2. Objetivos específicos

1. Cuantificar variaciones en el rendimiento y sus componentes (número de espigas por metro cuadrado, número de granos por metro cuadrado y el peso de 1000 granos) de la población bajo estudio en ambientes hídricos contrastantes.
2. Cuantificar modificaciones en las variables de crecimiento (altura y biomasa) y fisiológicas (verdor y temperatura de canopia) en ambientes contrastantes.
3. Analizar las relaciones que se establecen entre los diversos componentes de rendimiento del cultivo de trigo pan en el contexto de dos condiciones hídricas contrastantes, que puedan aportar información relevante para el posterior mejoramiento genético del cultivo a la tolerancia a la sequía.
4. Identificar genotipos tolerantes al estrés hídrico mediante el empleo de diferentes índices de tolerancia a la sequía.

3. Hipótesis

- Las variables fenológicas, fisiológicas y de rendimiento obtenidas de la población de asociación WAMI permiten discriminar genotipos con distintas aptitudes frente a condiciones hídricas contrastantes, identificando así genotipos tolerantes.

4. Materiales y métodos

4.1. Localización del ensayo

El desarrollo del ensayo se llevó a cabo en las instalaciones de la Estación Experimental Agropecuaria Pocito - San Juan del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (EEA- INTA) ubicada en la calle 11 y Vidart, en la localidad de Pocito a 17 Km al suroeste de la ciudad capital de San Juan. La densidad de siembra fue de 250 plantas/m^2. La configuración del suelo posee las características pertenecientes al complejo El Salado, con texturas medias (franco limoso) de profundidad variable y baja infiltración, apoyada en un subsuelo arenoso con gravas y rodados (Liotta, 1999) (Figura 6).

Figura 6: Vista panorámica lateral del ensayo. Fotografía del autor (2021).

4.2. Germoplasma

El ensayo se realizó utilizando 287 genotipos avanzados pertenecientes a la población WAMI (Wheat Association Mapping Initiative), seleccionados bajo un programa de mejoramiento vegetal por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). Esta población fue elegida por su destacable tolerancia a la sequía y al estrés por calor. Las variedades genéticas se sometieron a estudios de fenotipado en las principales zonas de cultivo de trigo en países como India, Pakistán, Nepal, Bangladesh, Irán, Egipto, Sudán y México, logrando obtener datos en diferentes ambientes con distintos niveles de precipitación, estrés por calor, estrés por sequía y patrones de radiación solar (Lopes *et al.*, 2012). El fenotipado se enfocó en componentes clave, como el rendimiento de grano, el peso de mil granos, el número de granos y el tiempo térmico de floración, en un total de 18 entornos distintos, en los principales países productores de trigo en 2010 y 2011 (Sukumaran *et al.*, 2015).

4.3. Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques aumentados (Federer, 1961), con testigos conocidos replicados en cada bloque (A, B y C) permitiéndonos estimar y corregir el efecto ambiental entre bloques. El ensayo se llevó a cabo bajo un esquema de parcelas divididas, compuesto por dos parcelas principales que representan los tratamientos de riego (control y estrés hídrico), y 574 parcelas secundarias correspondientes a cada genotipo evaluado (Figura 7). Cada genotipo fue sembrado en parcelas conformadas por cuatro surcos de 2 m de longitud, separados entre sí por 0,20 m (Figura 8). Todo el ensayo y cada parcela principal estuvieron rodeados por cultivares comerciales de trigo no incluidos en el estudio, con el objetivo de minimizar el efecto de borde. Las evaluaciones a campo y la cosecha de los genotipos se realizaron de forma manual, tomando muestras de cada unidad muestral, definida como un metro lineal compuesto por 0,5 m de cada uno de los dos surcos centrales de cada parcela. Además, durante el desarrollo del ensayo, el suelo se fertilizó con Urea $CH_4N_2O^-$ realizando una aplicación de manera manual (al voleo) y homogénea sobre la superficie de cada parcela. Adicionalmente se realizó un adecuado control de malezas de manera manual durante todo el ciclo del cultivo, y también hubo control químico con los herbicidas MCPA (50 cm^3) y Starane (5 cm^3).

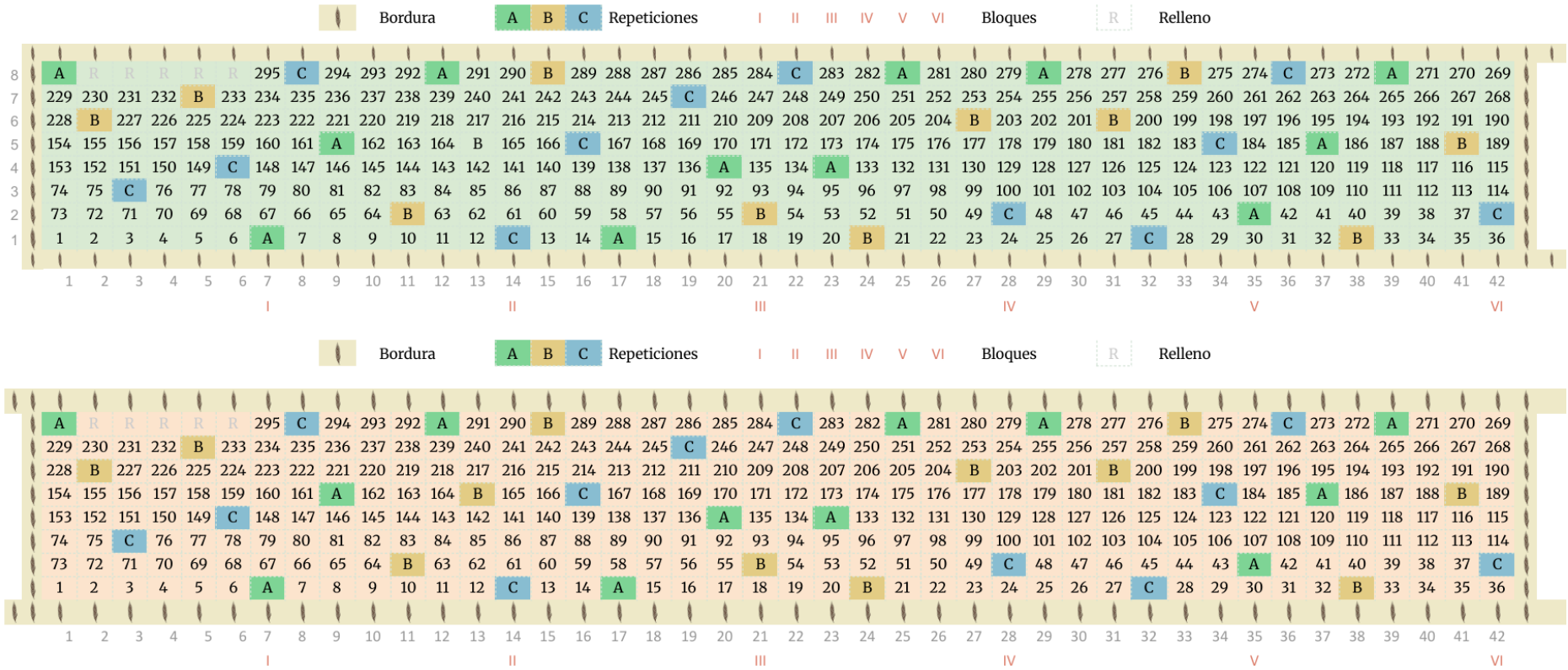

Figura 7: Diseño experimental del ensayo. En verde (arriba), configuración del tratamiento control, en naranja (abajo), configuración del tratamiento estrés hídrico. Los esquemas muestran la distribución de los genotipos y las repeticiones (A, B y C) correspondientes a cada bloque. Cada tratamiento está rodeado por una línea de cultivares comerciales de trigo, con el objetivo de minimizar el efecto de bordura externa. Los bloques están indicados con números romanos, mientras que cada columna y fila posee una coordenada numérica que permite ubicar con precisión cada parcela sembrada.

Figura 8: Etapas del montaje del ensayo y disposición de las parcelas secundarias. De izquierda a derecha: preparación del suelo y conformación de los surcos de siembra; disposición del sistema de riego por goteo; siembra manual de cada genotipo por parcela; ubicación de las mangueras de riego dentro de cada parcela secundaria; y vista general del ensayo en campo en las primeras etapas de crecimiento.

4.3.1. Tratamientos

Durante el desarrollo del ensayo se aplicaron dos tratamientos. El tratamiento control consistió en riego por goteo cubriendo el 100% de la evapotranspiración del cultivo (ETc) durante todo el ciclo del cultivo. En el tratamiento de estrés hídrico, se aplicó un riego al 100% de la ETc desde la siembra (Fecha de siembra: 13/07/2021) hasta el estado fenológico de primer nudo detectable (sub-fase Z3.1) según la escala propuesta por Zadoks *et al.*, (1974) (Tabla 1), momento en el cual el riego se redujo al 0% de la ETc (fecha de inicio del tratamiento: 27/09/2021). Finalmente, se restableció el riego al finalizar el periodo de antesis, ingresando al periodo de senescencia de los cultivos en el tratamiento estrés (fecha de restablecimiento del riego: 22/10/2021).

Tabla 1: Escala de Zadoks para el crecimiento y desarrollo del trigo.

Etapa principal	Descripción	Sub-fase
0	Germinación	**0.0 - 0.9**
1	Producción de hojas en tallo principal	**1.0 - 1.9**
2	Producción de macollos	**2.0 - 2.9**
3	Producción de nudos en tallo principal (encañado)	**3.0 - 3.9**
4	Vaina engrosada	**4.0 - 4.9**
5	Espigado	**5.0 - 5.9**
6	Antesis	**6.0 - 6.9**
7	Estado lechoso del grano	**7.0 - 7.9**
8	Estado pastoso del grano	**8.0 - 8.9**
9	Madurez fisiológica	**9.0 - 9.9**

Para controlar la eficiencia de la aplicación de los tratamientos y llevar un monitoreo constante se extrajeron semanalmente, de manera aleatoria, 10 muestras de suelo en ambos tratamientos. Las muestras se colectaron a una profundidad aproximada de 30 cm, utilizando un barreno manual para estandarizar la cantidad de suelo extraído. Posteriormente, se colocaron en pesafiltros previamente tarados con balanza digital marca “Marte” modelo AS5000 para determinar el peso húmedo. Finalmente

se llevaron a estufa a 105°C hasta alcanzar peso constante y se registró el peso seco (Conti, 1998). Con los datos obtenidos se calculó el valor de humedad gravimétrica según la Ecuación 1:

$$Hg = \left(\frac{PPSH - PPSS}{PPSS - PP}\right) \times 100$$

Ecuación 1: Hg: Humedad gravimétrica; PP: Peso del pesafiltro; PPSH: Peso del pesafiltro con suelo húmedo; PPSS: Peso del pesafiltro con suelo seco.

4.4. Evaluaciones en campo

4.4.1. Fenología del cultivo

Durante el desarrollo del cultivo se registró la transición de los estados fenológicos hasta la madurez fisiológica siguiendo la escala numérica de Zadoks *et al.*, (1974), considerando un estado cuando al menos el 50 % de la parcela experimental lo presenta. El registro de los diferentes estados fenológicos realizó en los siguientes momentos:

- Emergencia: primera hoja por encima de la superficie (sub-fase Z1.1).
- Primer nudo detectable: primer nudo detectable en el vástago principal por encima de la superficie (sub-fase Z3.1).
- Hoja bandera totalmente emergida (sub-fase Z3.9).
- Antesis: El 50% de las anteras de las espigas son amarillas, abiertas y visibles (sub-fase Z6.5).
- Madurez fisiológica: Detección de color amarillo - anaranjado en el pedúnculo de la espiga (sub-fase Z9).

4.4.2. Altura (cm) de los genotipos

Una vez alcanzada la madurez fisiológica del cultivo (Z9), se registró la altura (cm) de cada parcela en ambos tratamientos utilizando una regla graduada. Las mediciones se realizaron desde el nivel del suelo hasta la punta de la espiga (Figura 9a).

4.4.3. Temperatura de la canopia (TC)

Las mediciones se llevaron a cabo utilizando un termómetro infrarrojo portátil. Cada lectura se realizó cuidadosamente, manteniendo un ángulo menor a 45° respecto a la horizontal, evitando tomar datos sobre superficies foliares mojadas, en días nublados o con viento. Se efectuaron tres lecturas por unidad experimental en cada tratamiento y se calculó el promedio de dichas lecturas. Las mediciones se realizaron en dos estadios fenológicos: hoja bandera (Z3.9) (fecha de medición: 01/10/2021) y espigazón (Z5.9) (fecha de medición: 10/11/2021), con el objetivo de detectar posibles efectos del tratamiento aplicado (Figura 9b). Los datos se expresaron en grados centígrados (°C)

4.4.4. Índice de verdor

Para estimar el índice de verdor, relacionado con el contenido de clorofila, se midió el color de la parte media superior de la hoja bandera en cada unidad experimental mediante un medidor portátil marca “Minolta” (SPAD). Se tomaron tres lecturas por parcela para obtener un valor promedio por unidad experimental. Las mediciones se realizaron en dos momentos fenológicos distintos: hoja bandera

(Z3.9) (fecha de medición: 01/10/2021) y en madurez fisiológica (Z9) (fecha de medición: 12/11/2021), con el fin de observar la evolución del índice frente al tratamiento (Figura 9c).

(a) (b) (c)

Figura 9: a) Registro de los estados fenológicos de cada unidad experimental. b) Termómetro infrarrojo y planilla de registro de datos de temperatura y color. c) Método de registro de coloración de la hoja bandera utilizando SPAD.

4.5. Evaluaciones post-cosecha

La cosecha del ensayo se realizó de forma manual con tijeras de podar, cortando un metro lineal correspondiente a la unidad muestral definida (sección 4.3). Las muestras se almacenaron en bolsas identificadas con el número de genotipo y su posición en el campo. Luego se procedió a la separación de las espigas y los tallos para su posterior procesamiento en laboratorio. Adicionalmente, de cada unidad muestral se extrajeron al azar diez espigas representativas, las cuales se conservaron en bolsas de papel madera debidamente rotuladas para realizar las determinaciones asociadas al rendimiento y sus componentes. Las espigas restantes, así como los tallos, se almacenaron por separado en bolsas con su respectiva identificación para ser utilizadas en la medición de variables de crecimiento y rendimiento (Figura 10). Este procedimiento se replicó de manera uniforme en todos los genotipos y tratamientos evaluados.

4.5.1. Biomasa

La determinación de la biomasa se realizó pesando cada una de las muestras compuestas por los tallos y resto del material vegetal, excluyendo las espigas correspondientes a la muestra, en balanza analítica digital. Posteriormente cada peso registrado fue llevado a unidad de área de superficie (g/m^2).

4.5.2. Rendimiento y componentes del rendimiento

Para poder calcular el rendimiento final de cada parcela y los componentes del mismo, se procedió a medir las siguientes variables:

- **Número de espigas (m^2)**: Se contabilizó el número total de espigas en el metro lineal cosechado por cada genotipo en ambos tratamientos, y luego se extrapoló el valor a unidad de superficie (m^2).
- **Número de granos por espiga**: Las muestras de diez espigas representativas por genotipo se trillaron manualmente y se contabilizaron la cantidad de granos por espiga, obteniendo un

promedio final de las diez mediciones. Posteriormente, se estimó el número de granos por unidad de superficie multiplicando este valor por el número de espigas por metro cuadrado.

- **Peso de mil granos (PMG) (g)**: A partir de los granos obtenidos de las diez espigas seleccionadas por genotipo, se pesó la muestra en una balanza analítica digital y se extrapoló el valor para estimar el peso de 1000 granos.
- **Número de granos por metro cuadrado**: Se calculó como el producto entre el número promedio de granos por espiga y el número de espigas por metro cuadrado.
- **Rendimiento (g/m^2)**: Se trillaron manualmente todas las espigas restantes de la muestra del metro lineal, utilizando un cajón trillador. Luego, los granos fueron separados del resto de biomasa utilizando una aventadora. Los granos limpios se pesaron en una balanza analítica digital marca Pioneer con una precisión de tres decimales, para obtener el rendimiento por parcela, expresado en gramos por metro cuadrado.

Figura 10: Procedimiento y evaluaciones post-cosecha de las muestras: a) Cosecha manual con tijera de podar de la unidad muestral. b) Separado manual de las espigas del resto de biomasa de cada muestra cosechada. c) Pesado en balanza analítica de la biomasa. d y e) Proceso de trillado manual con cajón trillador, en donde se presionan las espigas sobre una superficie irregular para separar los granos de las mismas. f) Aventadora empleada para separar los granos de los restos de las espigas. g) Semillas limpias y h) Conteo manual de las semillas.

4.6. Análisis estadísticos

El diseño aumentado en bloques fue desarrollado por W. Federer *et al.*, (1961) en el área del fitomejoramiento con el objetivo de resolver problemas relacionados con los altos costos de los ensayos o con la imposibilidad de repetir múltiples veces un número elevado de tratamientos (Federer, 1961; Cotes *et al*., 2001). Además, la variación espacial en ensayos agrícolas a campo constituye un efecto importante a considerar al comparar un gran número de genotipos, especialmente si se busca obtener resultados confiables en programas de mejoramiento genético. Estos factores se combinan para generar microambientes que varían entre parcelas y afectan significativamente los rasgos evaluados. Por lo tanto, es necesario corregir dicha variación al estimar los efectos del tratamiento y/o del genotipo (Rodríguez-Álvarez *et al.*, 2018). Con el fin de obtener estimaciones más precisas de estos efectos, se realizó un

modelado y se emitió una corrección de la variación espacial para cada variable medida (Anexo: Figuras 16 y 17), utilizando el paquete libre de R "spATS" (Spatial Analysis of Field Trials with Splines), disponible en CRAN (Velazco *et al.*, 2017).

Una vez obtenidas las estimaciones de los datos, se analizaron a través del análisis de la varianza (ANOVA), utilizando el software de libre InfoStat, y las medias de los tratamientos se compararon con el test LSD (Least significant difference) de Fisher con niveles de significancia de $p \leq 0{,}05$.

Para evaluar los efectos del tratamiento hídrico sobre las variables agronómicas medidas, se utilizó un modelo lineal mixto (MLM) mediante la función lmer() del paquete lme4 (Bates *et al.*, 2015) en el entorno de R. El modelo se armó considerando a la variable tratamiento como efecto fijo y al bloque como efecto aleatorio, permitiendo modelar adecuadamente la estructura del diseño experimental, capturando la variabilidad asociada a los bloques sin aumentar la significancia de los efectos fijos (Zuur *et al.*, 2009).

Posteriormente se realizó el análisis de correlación de Pearson (r) para determinar la relación entre la variable rendimiento y sus componentes en cada uno de los tratamientos aplicados. Finalmente se llevó a cabo un análisis de sendero (path analysis), con el objetivo de estimar posibles explicaciones de causalidad (directas e indirectas) de las correlaciones observadas.

4.6.1. Índices de tolerancia a la sequía

El uso de diversos índices estadísticos que evalúan la tolerancia a la sequía de los cultivos, elaborados y perfeccionados por diferentes autores, nos permite identificar aquellos genotipos tolerantes al estrés hídrico en condiciones de campo (Balmaceda, 2024). Los mismos se desarrollaron en función de relaciones matemáticas considerando las diferencias del rendimiento en condiciones de estrés y un control (sin tratamiento aplicado), y se utilizan en estudios de fitomejoramiento para seleccionar genotipos acordes a sus resultados en ambientes contrastantes de estrés hídrico (Boicet-Fabre *et al.*, 2018). Basados en los resultados obtenidos por Balmaceda (2024), se evaluaron los genotipos de la población WAMI utilizando 3 índices de tolerancia que demostraron ser indicadores adecuados para la selección de genotipos en ambientes contrastantes, para luego incorporarlos a programas de mejoramiento genético:

- **Índice de Productividad Media (PM) (Rosielle y Hamblin, 1981):** Se calcula a partir del promedio del rendimiento del grano en estrés hídrico y control. Los mayores valores de este índice indican genotipos con tolerancia a la sequía (Ecuación(2)).

$$PM = (Rs + Rc)/2$$

Ecuación 2: Índice de Productividad Media (PM). Rs = Media del rendimiento de cada genotipo en condiciones de sequía. Rc = Media del rendimiento de cada genotipo en condiciones de riego.

- **Índice de Productividad Media Geométrica (PMG) (Schneider *et al.*, 1997)**: Los mayores valores de este índice permitirán seleccionar aquellos genotipos que presenten mayor

rendimiento en las condiciones de estrés, identificando mejor las diferencias de productividad entre ambos tratamientos (Ecuación (3)).

$$PMG = \sqrt{Rs * Rc}$$

Ecuación 3: Índice de Productividad Media Geométrica (PMG). Rs = Media del rendimiento de cada genotipo en condiciones de sequía. Rc = Media del rendimiento de cada genotipo en condiciones de riego.

- **El índice de tolerancia al estrés (ITS) (Fernandez, 1993)**: Nos permite seleccionar genotipos tanto en condiciones estrés y de riego, agrupando los genotipos evaluados en 4 grupos según el rendimiento obtenido en ambos tratamientos. Los genotipos que presentan valores altos en este índice se espera que tengan un buen comportamiento para la tolerancia al estrés hídrico. (Ecuación (4)).

$$ITS = (Rs * Rc)/(\underline{Rc})^2$$

Ecuación 4: Índice de Tolerancia al Estrés (ITS). Rs = Media del rendimiento de cada genotipo en condiciones de sequía. Rc = Media del rendimiento de cada genotipo en condiciones de riego. Rc = Media del rendimiento de todos los genotipos en condiciones de riego.

Para llevar a cabo la selección de genotipos mediante los índices de tolerancia a la sequía, se realizaron análisis de componentes principales (ACP) independientes para cada índice. El ACP es una técnica de reducción de dimensionalidad que permite transformar un conjunto de variables posiblemente correlacionadas en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas llamadas componentes principales, conservando la mayor parte de la variabilidad original (Hasan *et al*., 2021).

Se ejecutó un ACP tomando como variables explicativas al promedio del rendimiento total obtenido en el tratamiento control (Rc), rendimiento total obtenido en el tratamiento estrés (Rs), y cada índice de tolerancia evaluado por separado (PM, PMG e ITS). Luego, se obtuvieron las coordenadas para cada genotipo de la población en función de los resultados obtenidos de cada ACP. El objetivo fue identificar la distribución de los genotipos en un espacio bidimensional y destacar visualmente aquellos con mejor comportamiento según cada índice específico. El índice PM es útil para identificar aquellos genotipos con alto rendimiento en general. El índice PMG podría considerarse más balanceado en la asociación con Rc y Rs, haciéndolo útil para destacar genotipos estables y con buen desempeño en ambientes diversos. Finalmente, el índice ITS se perfila como el destacado para discriminar genotipos con mejores rendimientos bajo condiciones de sequía, convirtiéndose en una herramienta valiosa para priorizar tolerancia a condiciones de estrés hídrico y no solo la productividad total obtenida.

Con los resultados obtenidos de los ACP, elaboraron gráficos biplot que permitieron visualizar simultáneamente la distribución de los genotipos y la representación vectorial de las variables activas en un mismo plano. Los genotipos fueron clasificados en cuatro grupos según la propuesta de Fernandez (1993), en función del rendimiento obtenido en ambos tratamientos: Grupo A, genotipos que destacan

con buenos rendimientos en los dos tratamientos (control y estrés); Grupo B, genotipos que expresan el mejor rendimiento solamente en el tratamiento control; Grupo C, aquellos genotipos que solo tienen buen rendimiento en condiciones de estrés hídrico; y grupo D, genotipos con bajo desempeño en ambos ambientes.

Los análisis de componentes principales y los gráficos biplot fueron realizados en el software RStudio (versión 4.5.0), empleando los paquetes FactoMineR (Lê *et al.*, 2008) y factoextra (Kassambara *et al.*, 2016). Además, se calcularon las contribuciones de cada variable a las dimensiones principales y se extrajeron los autovectores con el objetivo de interpretar la relación entre las variables originales y los componentes resultantes.

5. Resultados

5.1. Tratamientos

Los resultados presentados en la Figura 11 muestran los cambios en humedad del suelo en función del tiempo para ambos tratamientos. Desde el día en que se interrumpió el riego en el tratamiento de estrés hídrico (27/09/2021), la humedad contenida en el suelo disminuyó progresivamente desde la capacidad de campo (17,9%) hasta niveles cercanos a marchitez permanente (7,9%). En comparación, el tratamiento control mantuvo valores superiores. Luego, al reestablecer el riego (22/10/2021) se observó el incremento de la humedad.

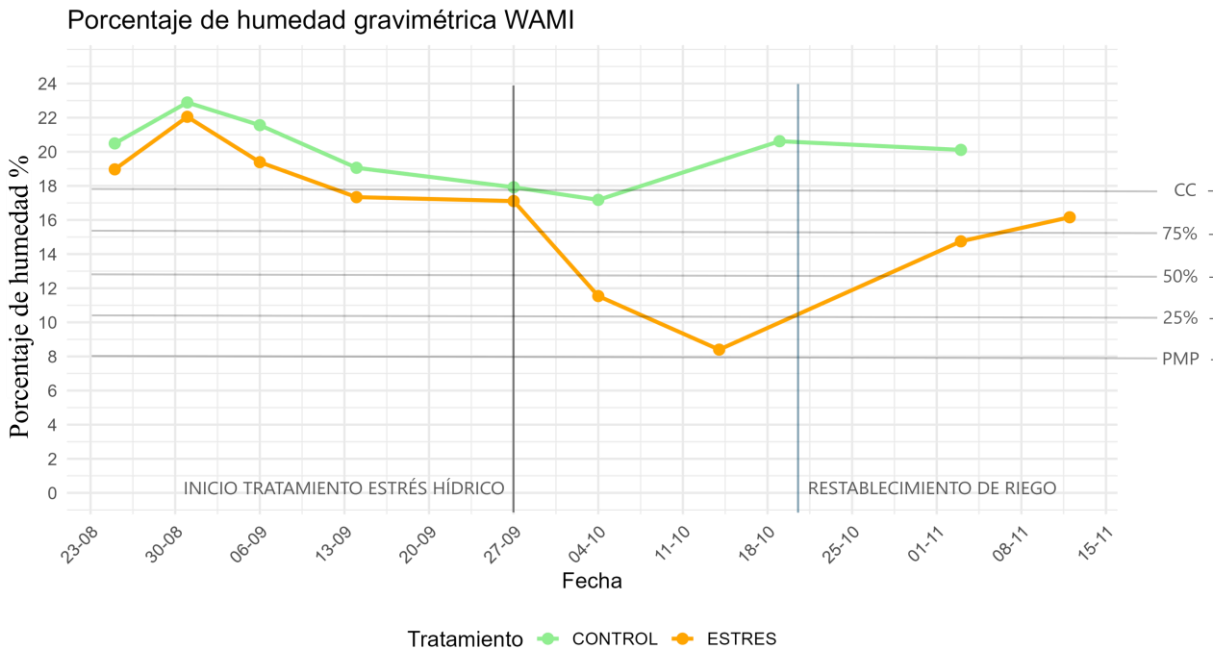

Figura 11: Variación del contenido de humedad del suelo (%) en los tratamientos control y estrés a lo largo del tiempo de duración del ensayo en el campo. Líneas horizontales indican los valores de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) respecto al suelo donde se llevó a cabo el ensayo.

5.2. Evaluaciones en campo

5.2.1. Fenología del cultivo

Los resultados del seguimiento del estado fenológico del cultivo bajo ambos tratamientos se presentan en la Tabla 2, donde se muestra la moda de las fechas registradas por los genotipos en cada

una de las etapas fenológicas.

Tabla 2: Fechas de ocurrencia de los estadios fenológicos según la escala de Zadoks (1974), a partir de la fecha de siembra de los tratamientos Control y Estrés.

Tratamiento	Siembra	Emergencia	Primer nudo	Comienzo tratamiento estrés	Hoja Bandera	Antesis	Pedúnculo amarillo
CONTROL	13/07/2021	09/08/2021	23/09/2021	27/09/2021	01/10/2021	15/10/2021	15/11/2021
ESTRÉS	13/07/2021	09/08/2021	23/09/2021		04/10/2021	18/10/2021	10/11/2021

Desde la siembra, no se observaron diferencias significativas en las fechas de ocurrencia de los primeros estados fenológicos entre tratamientos. Sin embargo, a partir de la aplicación del tratamiento de estrés hídrico, se comenzaron a registrar leves diferencias en las fechas de los estadios posteriores. En la etapa de madurez fisiológica (pedúnculo amarillo), bajo las condiciones de estrés se observa un adelanto de cinco días respecto al tratamiento control, ocurriendo a los 120 días (Tabla 3).

Tabla 3: Días desde la fecha de siembra hasta cada momento fenológico medido bajo los tratamientos Control y Estrés.

Momento fenológico	CONTROL	ESTRÉS
Siembra	0	0
Emergencia (Z1.1)	27	27
1° Nudo detectable (Z3.1)	72	72
Hoja Bandera (Z3.9)	80	83
Antesis (Z6.5)	94	97
Madurez fisiológica (Z9)	125	120

5.2.2. Altura y biomasa

Las variables altura (cm) y biomasa (g/m^2) se vieron significativamente afectadas por el tratamiento de riego aplicado ($p < 0,001$). Sin embargo, las respuestas por parte de los genotipos difirieron entre ambas variables (Tabla 4). En el caso de la altura, se detectaron diferencias significativas entre genotipos ($p < 0,001$), indicando que algunos presentaron diferencias entre ellos independientemente del tratamiento aplicado. En promedio, los individuos en el tratamiento control alcanzaron una altura de 78 cm, mientras que en el tratamiento estrés se alcanzó un promedio de 66 cm, evidenciando una disminución promedio de 12 cm (15%). En la biomasa no se observó diferencia entre genotipos ($p = 0,0539$), sugiriendo que entre genotipos no hubo una variación considerablemente significativa de la biomasa total producida. El promedio de biomasa obtenida en el tratamiento control

fue de 392,7 g/m^2, mientras que en el tratamiento de estrés fue de 314,5 g/m^2, representando una disminución de 78,2 g/m^2 (19,9%).

Tabla 4: Resultados del ANOVA para variables altura(cm) y biomasa (g)

	Variables	p value
Tratamiento	**Altura (cm)**	<0,0001 ***
Genotipo		<0,0001 ***
Tratamiento	**Biomasa (g/m^2)**	<0,0001 ***
Genotipo		0,0539 ns

Nota: ns = no significativo; * = significativo a P < 0,05; ** = significativo a p < 0,01; *** = significativo a p < 0,0005

5.3.2. Verdor y temperatura de la canopia

Los resultados del análisis de las variables fisiológicas verdor y temperatura de la canopia revelaron respuestas diferenciales entre los tratamientos a lo largo del ciclo del cultivo, como así también entre las fechas en las que se realizaron las mediciones (Tabla 5).

Tabla 5: Resultados del ANOVA para variables verdor y temperatura, teniendo en cuenta las fechas de medición y los tratamientos aplicados.

	Variables	p value
Fechas	**Verdor (SPAD)**	<0,0001 ***
Tratamiento		<0,0001 ***
Fechas	**Temperatura (°C)**	<0,0001 ***
Tratamiento		<0,0001 ***

Nota: ns = no significativo; * = significativo a p < 0,05; ** = significativo a p < 0,01; *** = significativo a p < 0,0005

Las mediciones de índice de verdor de hoja mostraron diferencias significativas entre los tratamientos (p < 0,0001) y entre ambas fechas en cada tratamiento de medición (p < 0,0001). En general, los genotipos bajo tratamiento control presentaron mayores valores en de verdor en la primera fecha de medición (1/10/21), donde progresivamente estos valores fueron disminuyendo hacia las etapas finales del ciclo, en concordancia con la fecha de inicio del proceso de senescencia del cultivo (10/11/21). El mismo patrón se observó para los genotipos expuestos al tratamiento estrés, sin embargo, estos genotipos obtuvieron valores mucho más bajos en la fecha de la última medición realizada, evidenciándose el fuerte efecto de la sequía en el tratamiento (Figura 12A).

Las mediciones de la temperatura de la canopia también mostraron efectos significativos de la aplicación del tratamiento en las diferentes fechas de medición (Figura 12B). En la primera fecha de medición se observó una diferencia marcada entre las temperaturas promedio registradas en el control con respecto a las temperaturas registradas en el estrés. En este último, las temperaturas fueron más altas

que las del control, reflejando el impacto del tratamiento aplicado en las plantas, posiblemente por una disminución en la capacidad de enfriamiento por transpiración. En la segunda fecha de medición existe diferencia estadísticamente significativa de temperaturas entre tratamientos, evidenciando una diferencia de aproximadamente 1°C entre el control y el estrés, producto posiblemente del restablecimiento del riego en el ensayo y por el acercamiento a la fecha de senescencia del cultivo.

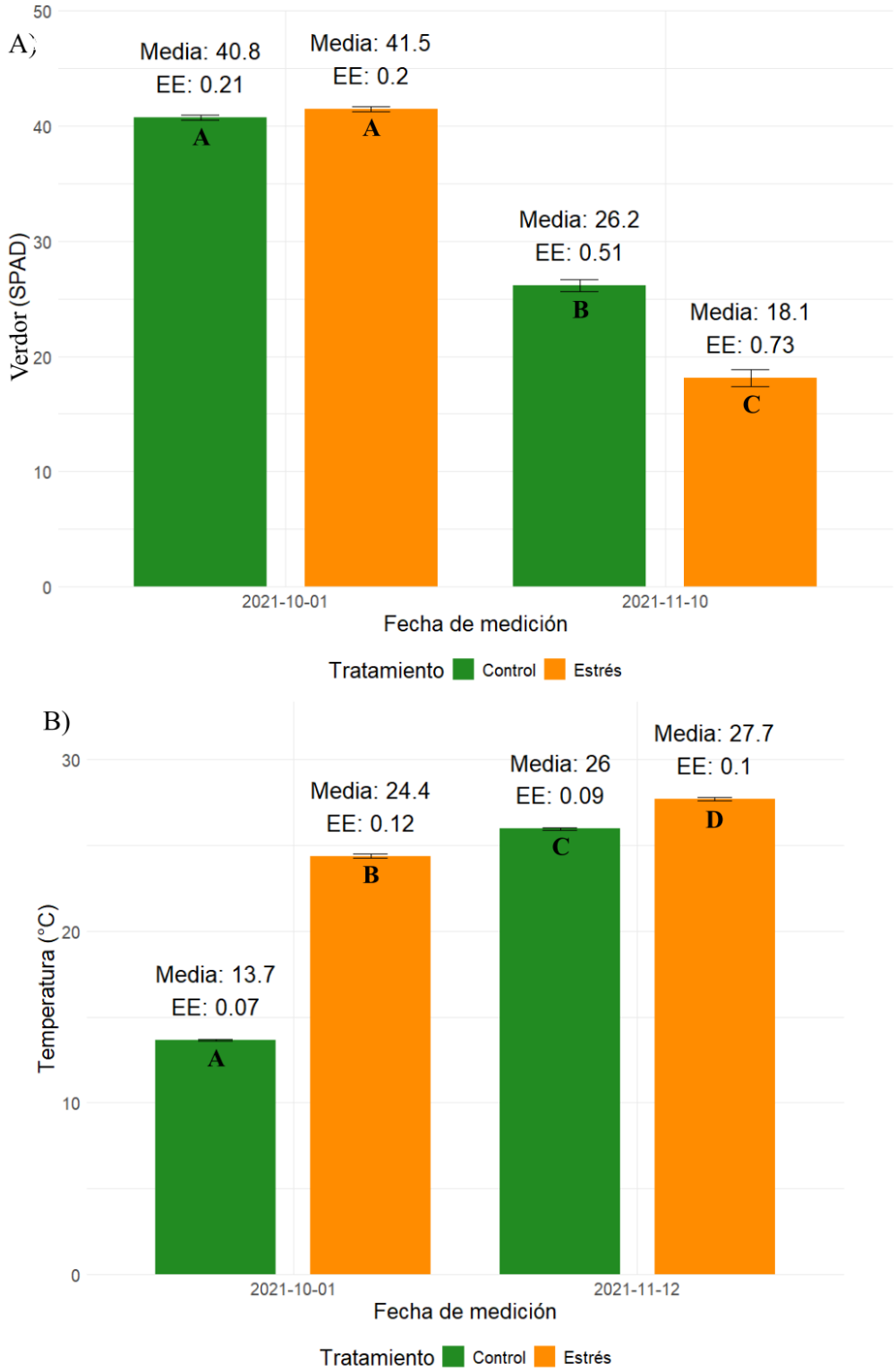

Figura 12: A) Evolución del índice de verdor (SPAD); (B) temperatura media de la canopia (°C), a lo largo del ciclo del cultivo para los tratamientos Control (verde) y Estrés (naranja).

5.3. Evaluación post - cosecha

5.3.1. Rendimiento y componentes del rendimiento

El análisis de la varianza (ANOVA) indicó que los tratamientos hídricos aplicados tuvieron efecto significativo sobre el rendimiento del cultivo ($p < 0{,}001$), mientras que no se observaron diferencias significativas entre los genotipos evaluados ($p = 0{,}657$) (Tabla 6).

Tabla 6: Resultados del ANOVA para el rendimiento (g/m²), considerando tratamiento y genotipo como efectos fijos.

Variables	p value
Tratamiento	<0,001 ***
Genotipo	0,657 ns

Nota: ns = no significativo; * = significativo a p < 0,05; ** = significativo a p < 0,01; *** = significativo a p < 0,0005

Los resultados presentados en la Tabla 7 muestran las medias ajustadas del rendimiento y sus componentes, junto con los valores de significancia para la comparación entre tratamientos. El rendimiento total del cultivo (g/m^2) fue diferente entre tratamientos, obteniendo un promedio de 371 g/m^2 en el control mientras que bajo estrés se obtuvo un promedio de 269 g/m^2, estableciendo una diferencia de 102 g/m^2 entre ambos tratamientos. Para los componentes del rendimiento del cultivo, la variable número de espigas por metro cuadrado en el tratamiento control presentó un promedio de 392 espigas/m^2, mientras que bajo estrés el promedio fue de 343 espigas/m^2, lo que representa una diferencia de 49 espigas/m^2 entre tratamientos ($p < 0{,}001$). En cuanto al número de granos por metro cuadrado, se registró un promedio de 13577 granos/m^2 en el tratamiento control y de 12095 granos/m^2 bajo estrés, evidenciando una diferencia de 1482 granos/m^2 ($p < 0{,}001$). Finalmente, el peso de 1000 granos presentó un promedio de 40,15 g en el control y de 33,22 g en el tratamiento con estrés, con una diferencia de 6,93 g entre ambos ($p < 0{,}001$).

Tabla 7: Medias ajustadas (emmean) del rendimiento y sus componentes bajo los tratamientos aplicados

Tratamiento	Variable	Medias	p value
Control	**Rendimiento(g/m^2)**	371,13	
Estrés		269,19	<0,001 ***
Control	**N°Espigas/m^2**	392	
Estrés		343	<0,001 ***
Control	**Peso 1000 Granos(g)**	40,15	
Estrés		33,22	<0,001 ***
Control	**N°Granos/m^2**	13577	
Estrés		12095	<0,001 ***

Nota: ns = no significativo; * = significativo a p < 0,05; ** = significativo a p < 0,01; *** = significativo a p < 0,0005

Los resultados de la correlación de Pearson entre las variables componentes del rendimiento y el rendimiento (g/m^2) mostraron que, en el tratamiento control, el rendimiento de las parcelas está altamente correlacionado con el número de granos/m^2 ($r = 0{,}70$, $p < 0{,}001$) y con el número de espigas/m^2 ($r = 0{,}65$, $p < 0{,}001$), pero no así con la variable peso de 1000 granos ($r = 0{,}09$, $p = 0{,}12$).

Mientras que bajo el tratamiento de estrés hídrico, se observó una correlación significativa similar a la del control entre el rendimiento (g/m^2) y el número de espigas/m^2 ($r = 0,65$, $p < 0,001$), así como con el número de granos/m^2 ($r = 0,64$, $p < 0,001$), con poca diferencia en la magnitud de la correlación. En este caso, el peso de 1000 granos tampoco presentó una correlación significativa con el rendimiento ($r = -0,02$, $p = 0,71$) (Figura 13).

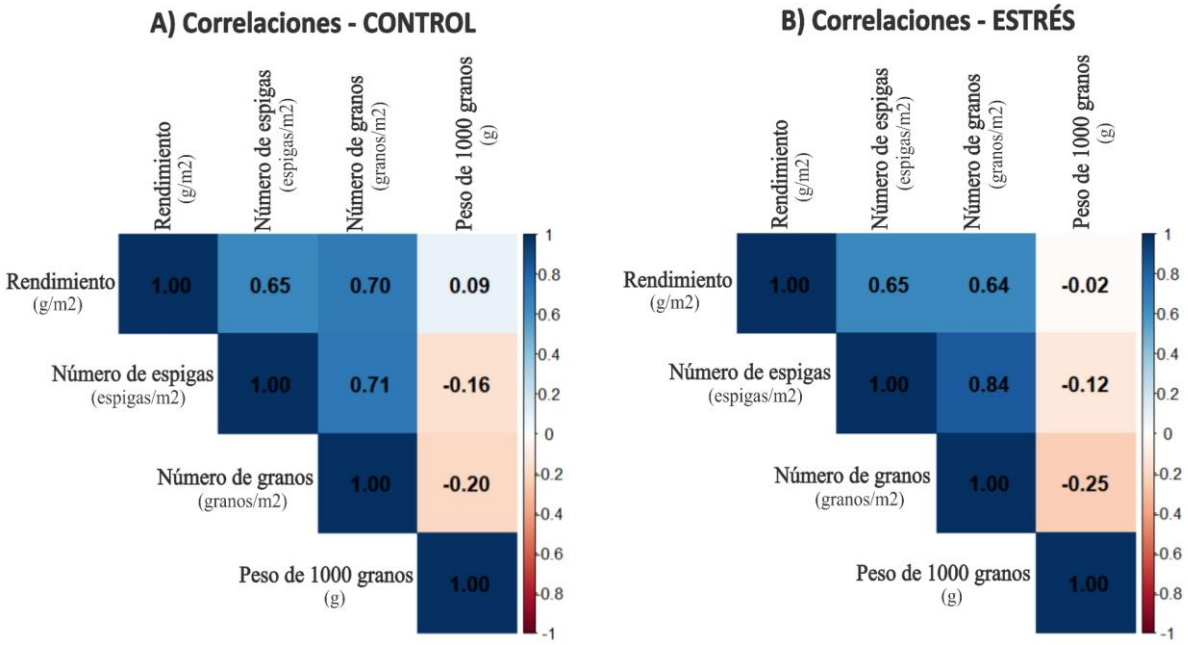

Figura 13: Matrices de correlación de Pearson entre componentes del rendimiento y el rendimiento del cultivo bajo dos condiciones hídricas contrastantes: Tratamiento control (A) y Tratamiento estrés (B). La escala de color denota el valor del coeficiente de correlación (r).

Los modelos de sendero realizados mostraron como resultado que bajo el tratamiento control (Tabla 8; Figura 14 izquierda), los tres componentes del rendimiento evaluados mostraron asociaciones positivas y significativas con el rendimiento: número de granos/m^2 fue el predictor más importante ($\rho = 0,620$, $p < 0,001$), seguido de peso de 1000 granos ($\rho = 0,267$, $p < 0,001$), y el número de espigas/m^2 ($\rho = 0,225$, $p < 0,001$). El modelo explicó el 62,5% de la varianza del rendimiento ($R^2 = 0,625$).

Tabla 8: Coeficientes estandarizados del modelo de sendero para el tratamiento control.

Variable dependiente	Variable independiente	p value	Coef. estandarizado (ρ)
Rendimiento (g/m^2)	Número de granos/m^2	<0,001 ***	0,62
Rendimiento (g/m^2)	Peso 1000 granos	<0,001 ***	0,225
Rendimiento (g/m^2)	Número de espigas/m^2	<0,001 ***	0,267

Nota: ns = no significativo; * = significativo a p < 0,05; ** = significativo a p < 0,01; *** = significativo a p < 0,0005. Coef. estandarizado (ρ): coeficiente estandarizado o coeficiente de sendero.

En el caso del tratamiento estrés (Tabla 9; Figura 14 derecha) el patrón de relaciones cambió: el número de granos/m^2 continuó siendo un predictor significativo (ρ = 0,389, p < 0,001) pero con menor influencia que en el tratamiento control, seguido por número de espigas/m^2 (ρ = 0,338, p < 0,001), mientras que el peso de 1000 granos presentó un efecto reducido (ρ = 0,118, p = 0,009). La varianza explicada por el modelo fue de un R^2 de 0,469.

Tabla 9: Coeficientes estandarizados del modelo de sendero para el tratamiento estrés.

Variable dependiente	Variable independiente	p value	Coef. estandarizado (ρ)
Rendimiento (g/m^2)	Número de granos/m^2	<0,001 ***	0,389
Rendimiento (g/m^2)	Número de espigas/m^2	<0,001 ***	0,338
Rendimiento (g/m^2)	Peso 1000 granos	0,009 ***	0,118

Nota: ns = no significativo; * = significativo a p < 0,05; ** = significativo a p < 0,01; *** = significativo a p < 0,0005. Coef. estandarizado (ρ): coeficiente estandarizado o coeficiente de sendero.

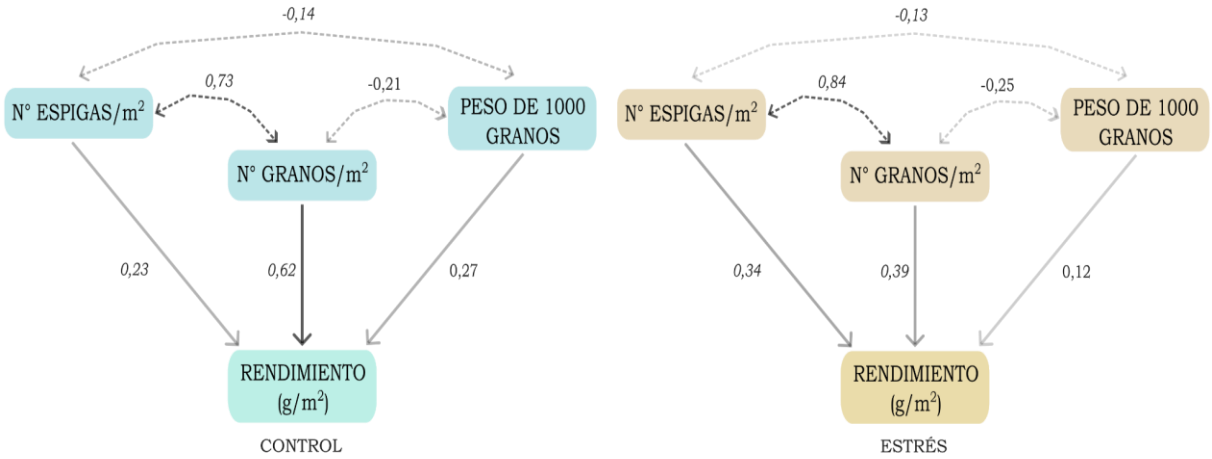

Figura 14: Gráficos de sendero para el tratamiento control (izquierda) y el tratamiento estrés (derecha). Las flechas con líneas continuas representan una relación directa fuerte y significativa entre las variables, mientras que las flechas punteadas indican una asociación más débil.

5.3.2. Índices de tolerancia a la sequía

La utilización de los índices permitió identificar los genotipos con buen desempeño bajo condiciones hídricas contrastantes. En la Tabla 10 se presentan los 20 genotipos que obtuvieron valores más altos en cada uno de los índices empleados (PM, PMG, e ITS), junto con sus respectivos valores de rendimientos obtenidos en los tratamientos control y de estrés. De estos genotipos, 17 fueron seleccionados simultáneamente por los 3 índices. No obstante, se identificaron tres genotipos exclusivos del índice PM (274, 200 y 116) y tres exclusivos de PMG e ITS (94, 114 y 100), indicando que no todos los genotipos fueron consistentes en términos de rendimiento en diferentes condiciones hídricas (Figura 15).

Tabla 10: Top 20 genotipos seleccionados por los valores más altos en el Índice de Productividad Media (PM), Índice de Productividad Media Geométrica (PMG) e Índice de Tolerancia a la Sequía (ITS).

Genotipo	Rend. Control (g/m^2)	Rend. Estrés (g/m^2)	PM	PMG	ITS
258	936,38	380,13	658,25	596,61	2,584
35	768,87	455,59	612,23	591,85	2,543
199	628,06	455,74	541,90	535,01	2,078
133	739,67	357,19	548,43	514,01	1,918
31	629,76	400,56	515,16	502,25	1,831
122	652,42	370,06	511,24	491,36	1,753
72	490,06	478,27	484,16	484,13	1,702
197	602,05	376,60	489,32	476,16	1,646
33	498,46	432,16	465,31	464,13	1,564
1	396,93	541,44	469,19	463,59	1,560
115	774,08	246,16	510,12	436,52	1,383
94	492,76	382,37	-	434,07	1,368
262	581,55	319,79	450,67	431,25	1,350
114	573,04	324,13	-	430,97	1,348
263	645,67	283,96	464,81	428,19	1,331
100	586,05	312,28	-	427,80	1,329
254	643,36	284,07	463,72	427,50	1,327
153	588,83	309,54	449,18	426,92	1,323
261	795,27	228,05	511,66	425,86	1,317
265	655,18	272,43	463,80	422,48	1,296
274	825,43	194,64	510,03	-	-
200	706,06	236,13	471,10	-	-
116	629,43	270,35	449,89	-	-

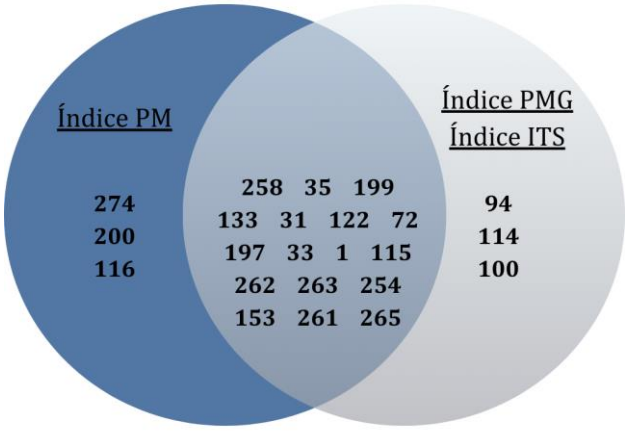

Figura 15: Diagrama de Venn con los 20 genotipos destacados por los índices de tolerancia a la sequía (PM, PMG e ITS). En el centro del diagrama se encuentran 17 genotipos seleccionados simultáneamente por los 3 índices (obteniendo los valores más altos respectivamente). En la sección izquierda, 3 genotipos exclusivamente seleccionados por el índice PM, y del lado derecho, 3 genotipos seleccionados exclusivamente por los índices PMG e ITS.

En la Tabla 11 se presentan los valores de los autovectores correspondientes a cada análisis de componentes principales (ACP) realizados. El primer componente (Dim. 1) explica la mayor parte de la variabilidad en los tres análisis, integrando de manera positiva las tres variables explicativas: el rendimiento bajo riego (Rc), el rendimiento bajo estrés (Rs) y el índice correspondiente (PM, PMG o ITS). Dentro de esta dimensión, los valores de Rc y de los índices son relativamente altos y positivos, mientras que Rs presenta valores positivos más bajos (entre 0,3 y 0,5). Esto sugiere que los genotipos con valores altos en CP1 tienden a mostrar un desempeño alto y estable en ambos ambientes evaluados. Por su parte, el segundo componente (CP2) muestra valores contrastantes para Rc y Rs, con valores negativos en el primero y positivos en el segundo respectivamente. En este sentido, los genotipos con valores altos en CP2 podrían destacarse en condiciones de sequía.

Tabla 11: Coordenadas de los autovectores para los dos primeros componentes principales (Dim. 1 y Dim. 2), siendo: Rc, rendimiento del cultivo en condiciones de riego; Rs, rendimiento del cultivo en condiciones de estrés hídrico; PM, índice de productividad media; PMG, índice de productividad media geométrica e ITS, índice de tolerancia al estrés.

Variable	Dim. 1	Dim. 2
Rc	0,9153	-0,4028
Rs	0,3739	0,9275
PM	0,9998	0,0219

Variable	Dim. 1	Dim. 2
Rc	0,8610	-0,5016
Rs	0,4717	0,8804
PMG	0,9952	0,0167

Variable	Dim. 1	Dim. 2
Rc	0,8474	-0,5196
Rs	0,4880	0,8702
ITS	0,9918	0,0158

Las figuras 16a, 16b, y 16c podemos visualizar los biplots correspondientes al análisis de componentes principales sobre cada índice de tolerancia a la sequía empleados (PM, PMG, ITS) respectivamente, permitiendo evaluar simultáneamente los rendimientos de cada tratamiento (Rc y Rs) y el índice de tolerancia seleccionado. En cada biplot, se representan dos componentes principales que

sintetizan la información contenida en las variables originales (Rc, Rs y el índice empleado) y la distribución de los genotipos en los grupos definidos por Fernandez (1993): Los genotipos del grupo A (puntos de color rojo), con alto rendimiento tanto en condiciones de riego como de estrés hídrico, se ubican mayoritariamente en el cuadrante derecho del gráfico, próximos a la intersección entre los vectores Rc y Rs, alineados en dirección con el vector del índice empleado, sugiriendo que en este sector se identifican efectivamente a los genotipos con mejores rendimientos en ambas condiciones hídricas. Dentro de este grupo además, encontramos los 20 genotipos destacados por el índice empleado, por lo que se podrían considerar como buenos candidatos para mejoramiento vegetal del cultivo. Los genotipos del grupo B (puntos de color verde), caracterizados por tener buen rendimiento solamente bajo condiciones de riego, se distribuyeron mayoritariamente en el cuadrante inferior, próximos al vector Rc, concordando con su bajo desempeño bajo estrés hídrico. Los genotipos del grupo C (puntos de color azul), ubicados en el cuadrante superior del gráfico, mostraron buen rendimiento únicamente bajo condiciones de sequía. Finalmente, los genotipos del grupo D (puntos de color violeta), con bajo rendimiento en ambos ambientes, se situaron en el cuadrante izquierdo del gráfico, alejados relativamente de ambos vectores de rendimientos y del vector del índice empleado, justificado por su bajo rendimiento bajo ambas condiciones hídricas.

En el biplot 16a (PM), el componente 1 (Dim 1) explica el 65,9 % de la variabilidad total, mientras que el componente 2 (Dim 2) explica el 34,1 %, acumulando así el 100 % de la variabilidad contenida en los datos originales. En el biplot 16b (PMG), el componente 1 aporta el 65,1 % y el componente 2 el 34,2 %, alcanzando un total del 99,3 %. Finalmente, en el biplot 16c (ITS), el componente 1 explica el 64,7 % de la variabilidad y el componente 2 el 34,3 %, sumando un 99 % de la variabilidad total contenida. En los tres gráficos puede observarse que por la distribución de los grupos de genotipos (A, B, C y D), la componente 1 absorbe la variabilidad relacionada a genotipos que tienen altos rendimientos en ambas condiciones (cuadrante derecho del biplot) y los que tienen bajos rendimientos en ambas condiciones (cuadrante izquierdo del biplot). Mientras que la componente 2 representa menor variabilidad de los datos y lo hace en relación al rendimiento en control (Rc) (cuadrante inferior del biplot) y el rendimiento en sequía (Rs) (cuadrante superior del biplot).

En los tres gráficos biplot, los vectores correspondientes a las variables Rc y Rs forman un ángulo cercano a 90°, sugiriendo una baja correlación entre los rendimientos en ambas condiciones hídricas evaluadas. Los vectores de los índices de tolerancia a la sequía confirman en los tres casos analizados, la fuerte correlación positiva con el rendimiento bajo el tratamiento control (Rc). El vector del índice de Productividad Media (PM) es el que evidencia una mayor correlación con Rc al contener un ángulo de menor amplitud entre vectores, seguido por el vector del Índice de Productividad Media Geométrica (PMG) y, el vector con un ángulo de mayor amplitud, el Índice de Tolerancia al Estrés (ITS). La relación entre los índices y el rendimiento en sequía (Rs) mantiene también una correlación positiva, aunque menor que con el vector Rc. En este caso, el vector ITS es el índice con mayor proximidad al vector Rs, seguido por el PMG y por último, el PM.

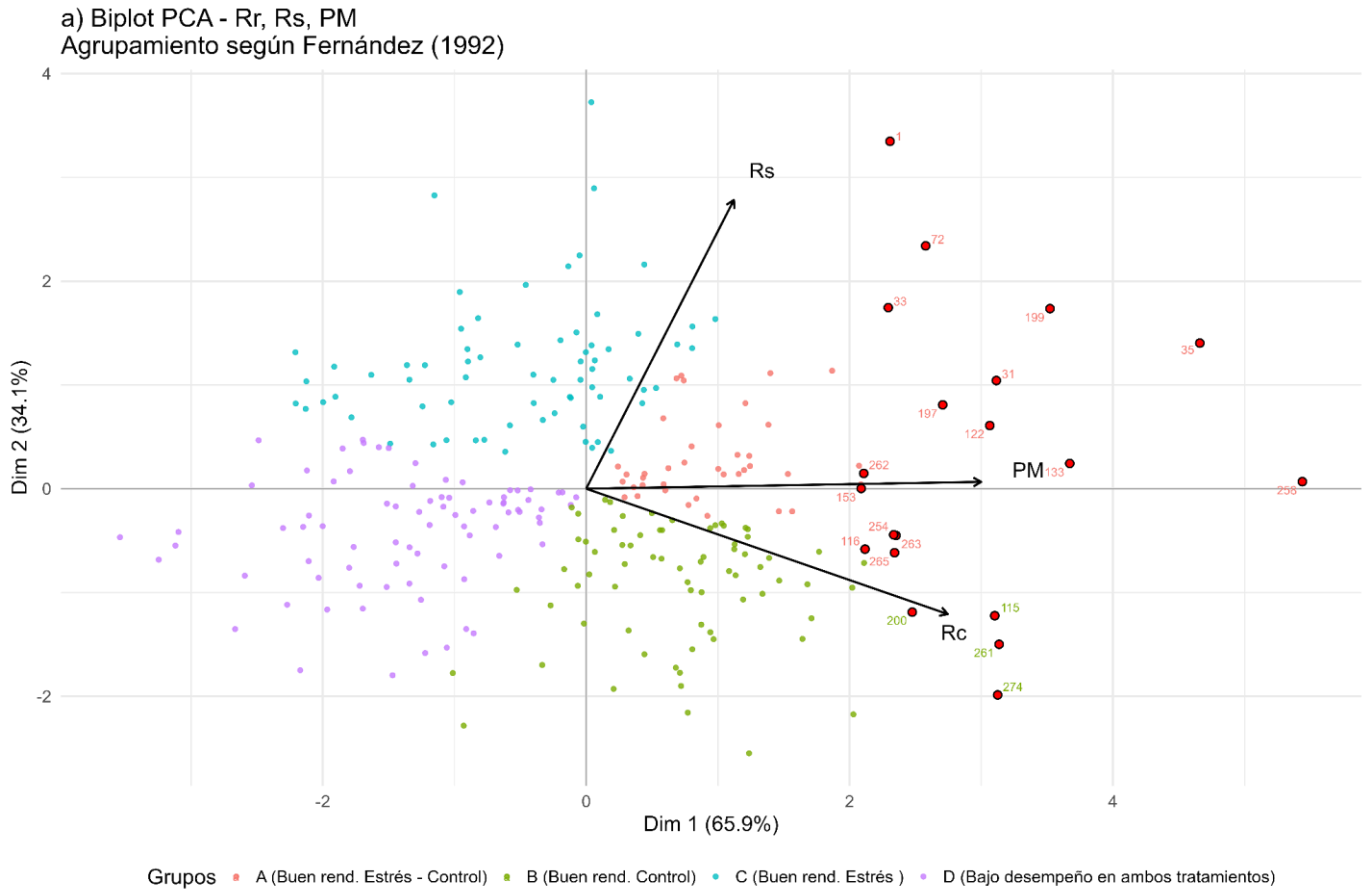

Figura 16a) Biplot del análisis de componentes principales (ACP) con Índice de Productividad Media (PM). Se observan en los ejes de coordenadas las dos componentes principales (Dim. 1 y Dim. 2), que explican la mayor parte de la variabilidad en cada caso. Los vectores indican la contribución de las variables originales (Rc, Rs, PM) a cada componente. Los puntos representan la proyección de los genotipos en el espacio de las dos primeras componentes principales, destacando en rojo y con su numeración respectiva, los 20 genotipos con mejor desempeño para el índice empleado. En rojo se indican genotipos del grupo A (alto rendimiento en ambos ambientes), en verde los del grupo B (alto rendimiento en control), en azul los del grupo C (alto rendimiento en sequía) y en morado los del grupo D (bajo rendimiento en ambos ambientes).

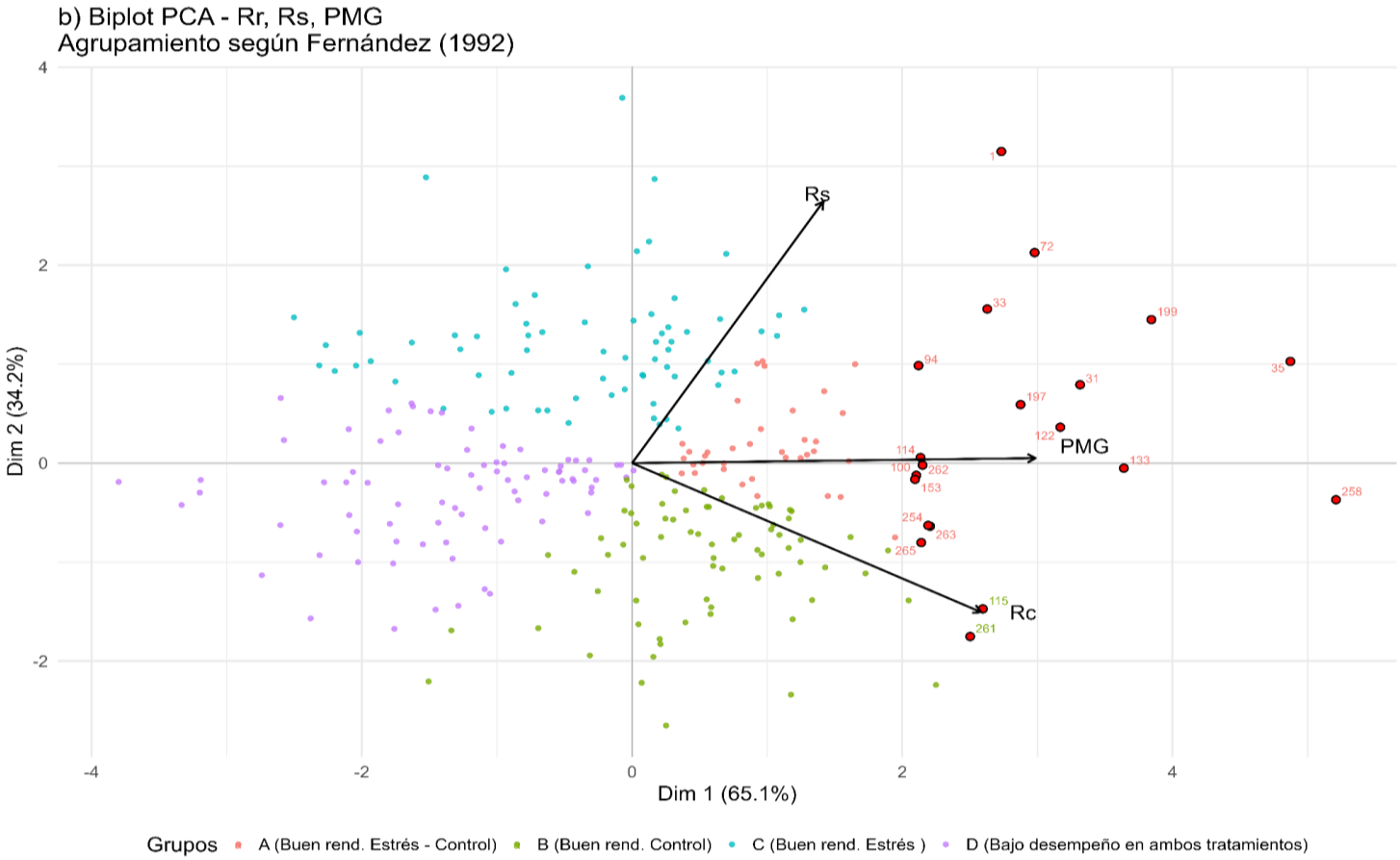

Figura 16b). Biplots del análisis de componentes principales (ACP) con Índice de Productividad Media Geométrica (PMG). Se observan en los ejes de coordenadas las dos componentes principales (Dim. 1 y Dim. 2), que explican la mayor parte de la variabilidad en cada caso. Los vectores indican la contribución de las variables originales (Rc, Rs, PMG) a cada componente. Los puntos representan la proyección de los genotipos en el espacio de las dos primeras componentes principales, destacando en rojo y con su numeración respectiva, los 20 genotipos con mejor desempeño para el índice empleado. En rojo se indican genotipos del grupo A (alto rendimiento en ambos ambientes), en verde los del grupo B (alto rendimiento en control), en azul los del grupo C (alto rendimiento en sequía) y en morado los del grupo D (bajo rendimiento en ambos ambientes).

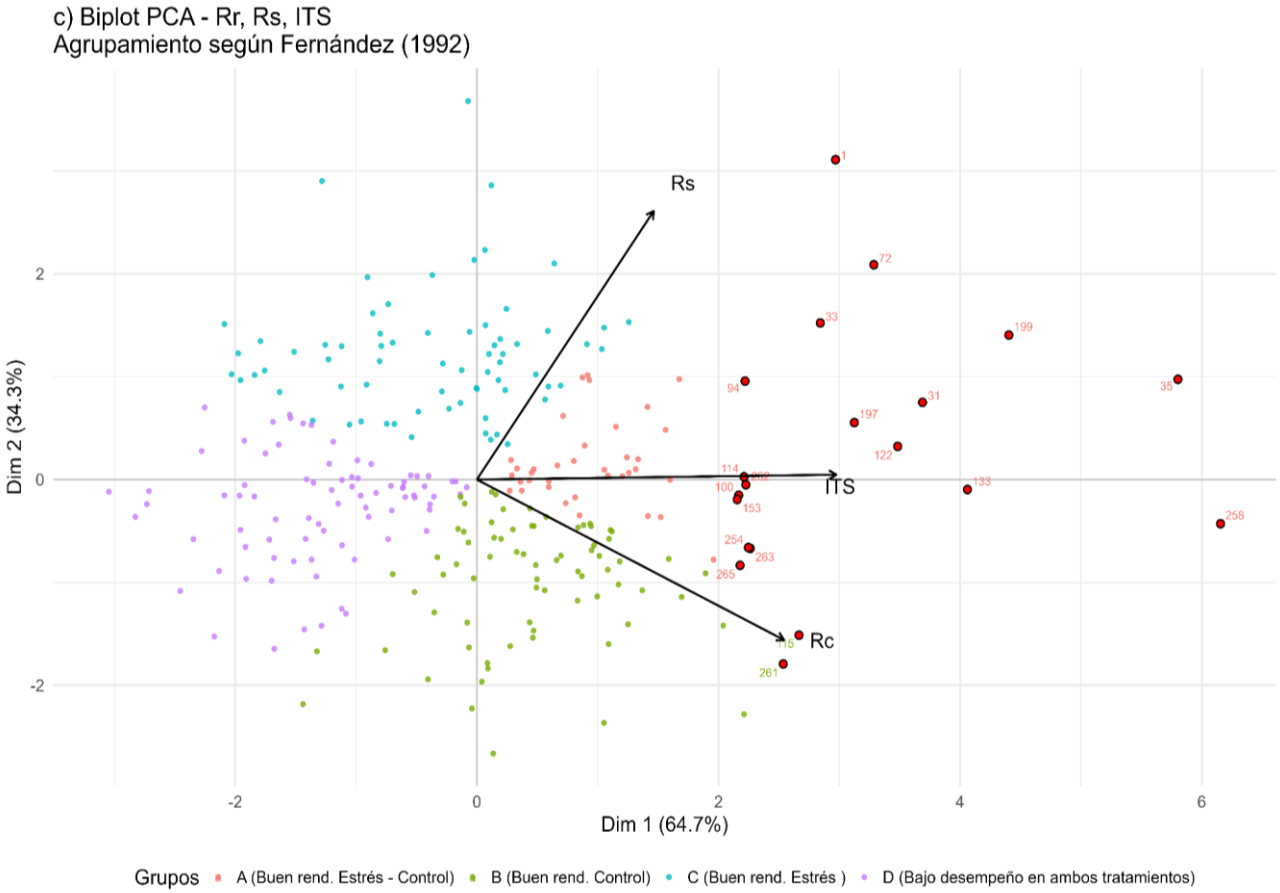

Figura 16c). Biplots del análisis de componentes principales (ACP) con Índice de Tolerancia al Estrés (ITS). Se observan en los ejes de coordenadas las dos componentes principales (Dim. 1 y Dim. 2), que explican la mayor parte de la variabilidad en cada caso. Los vectores indican la contribución de las variables originales (Rc, Rs, ITS) a cada componente. Los puntos representan la proyección de los genotipos en el espacio de las dos primeras componentes principales, destacando en rojo y con su numeración respectiva, los 20 genotipos con mejor desempeño según el índice empleado. En rojo se indican genotipos del grupo A (alto rendimiento en ambos ambientes), en verde los del grupo B (alto rendimiento en control), en azul los del grupo C (alto rendimiento en sequía) y en morado los del grupo D (bajo rendimiento en ambos ambientes).

6. Discusión

Nuestros resultados permitieron cuantificar los cambios de las variables estudiadas bajo el efecto del tratamiento de estrés hídrico aplicado en los genotipos de la población WAMI. El monitoreo fenológico del cultivo reveló que desde la fecha de aplicación del estrés hídrico, las etapas fenológicas posteriores se detectaron en distintas fechas entre tratamientos. En el control, el estado de hoja bandera (Z3.9) se detectó 3 días antes que en el tratamiento estrés, patrón que también se observó para la antesis (Z6.5). Sin embargo, el estado de madurez fisiológica mostró un comportamiento opuesto: en el tratamiento estrés esta etapa se detectó 5 días antes que en el control. En promedio, los genotipos expuestos a condiciones de estrés hídrico alcanzaron la madurez fisiológica a los 120 días después de la siembra, mientras que en condiciones de riego alcanzaron esta etapa a los 125 días, evidenciando el impacto del tratamiento aplicado y la respuesta diferencial de los genotipos (Hoffmann *et al.*, 2005).

Las mediciones del verdor foliar mostraron que esta variable se ve fuertemente afectada por el estado hídrico de la planta, con una pérdida más acelerada del color bajo condiciones de estrés (Peremarti *et al.*, 2014). El estrés hídrico acelera la senescencia foliar, provocando la degradación de las membranas tilacoides y, en consecuencia, una alteración de los pigmentos fotosintéticos. Este fenómeno ha sido considerado un marcador de estrés oxidativo inducido por la actividad de clorofilasas (Hosseinzadeh *et al.*, 2018). La respuesta de la pigmentación al estrés hídrico refuerza el valor de esta variable como un indicador fisiológico del desempeño de los genotipos en ambientes contrastantes, consistentes con los estudios de Ghanem *et al*., (2024), donde se observa una disminución en el verdor del cultivo, en relación con la intensidad y la duración del tratamiento aplicado.

Las temperaturas foliares registradas en las unidades muestrales de ambos tratamientos del ensayo también sugieren que esta variable puede considerarse como un indicador sensible al estado hídrico de las plantas, presentando una fuerte variación en función del tiempo en el que se desarrolla el cultivo (Amani *et al.*, 1996). Se pudo observar que desde el día de aplicación del tratamiento, los genotipos expuestos a la sequía no manifestaron buen efecto amortiguador a la temperatura, registrando valores mucho más altos que los que se detectaron en el tratamiento control. Esta respuesta podría ser explicada por el cierre estomático de las plantas en respuesta a la sequía, en donde los genotipos que logran mantener un dosel más fresco bajo estas condiciones son capaces de sostener una mayor extracción de agua del perfil del suelo, manteniendo los estomas abiertos por más tiempo. Por el contrario, genotipos con temperaturas elevadas mantienen los estomas cerrados de manera temprana (Mohammadi *et al.*, 2012).

Los resultados obtenidos en los análisis de las variables altura (cm) y biomasa (g/m^2) revelan respuestas contrastantes frente al estrés hídrico. Ambas variables disminuyeron significativamente bajo las condiciones de déficit hídrico, evidenciando el impacto del tratamiento. Se detectaron diferencias en la altura entre genotipos independientemente del tratamiento aplicado, sugiriendo que existe una posible variabilidad genética en esta característica dentro de la población en estudio (Nagy *et al.*, 2017). Sin

embargo, las mediciones en biomasa no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre genotipos, aunque se detectó una tendencia marginal ($p = 0,0539$). Estos resultados coinciden con lo informado por Mirbahar *et al.* (2009), donde se pudo observar que la aplicación de estrés hídrico con diferentes intensidades afecta de manera diferencial a la altura de las variedades de trigo. Algunas de las variedades estudiadas mostraron mayor altura y biomasa frente al estrés hídrico, reforzando la idea de que luego de un periodo de sequía, el cultivo puede desarrollarse lo suficiente para compensar la pérdida de biomasa ocasionadas por el estrés (Abbate, 2004; Wu *et al*., 2024), sin embargo la gran mayoría mostró una reducción significativa de la misma en comparación al tratamiento control.

Con relación al rendimiento del cultivo, los datos obtenidos concuerdan con lo reportado por Balmaceda, (2024), demostrando el efecto negativo del estrés aplicado en el ensayo, con una disminución de aproximadamente un 27,5% en el rendimiento final (g/m^2) del tratamiento estrés versus el tratamiento control. En cuanto a los componentes del rendimiento, se observó una reducción del 12,6% en el número de espigas/m^2, del 11,5% en el número de granos/m^2, y del 17,3% en el peso de 1000 granos. El efecto de este fenómeno también se vio reflejado en los estudios llevados a cabo por Mirbahar *et al.* (2009), donde se demuestra que un aumento progresivo de la intensidad de la sequía afecta de manera gradual a parámetros del rendimiento como la longitud de la espiga, los granos por espigas y el peso de 1000 granos (Nezhadahmadi *et al.*, 2013; Mirbahar *et al.*, 2009), reduciéndose significativamente en la intensidad más alta de sequía aplicada. Además, nuestros resultados complementan los estudios de Abbate (2004), en donde se demuestra que el rendimiento total del grano es el resultado del desarrollo y la interacción de sus componentes a lo largo del ciclo del cultivo. La falta de agua es un factor abiótico importante que provoca en las plantas la reducción de la expansión del área foliar y radicular, disminuyendo la intercepción de la radiación solar y, en consecuencia, la generación de fotoasimilados (Ghanem *et al*., 2024; Bapela *et al.*, 2022; Mirbahar *et al.*, 2009), induciendo a una reducción significativa en el rendimiento y en los componentes del rendimiento en diferentes variedades de trigo.

Los análisis de cómo se estructuran las relaciones entre los distintos componentes del rendimiento bajo condiciones hídricas contrastantes muestran que el número de granos por metro cuadrado fue la variable con mayor influencia sobre el rendimiento final del cultivo independientemente del tratamiento aplicado, concordando con los resultados obtenidos también por Ruiz *et al.* (2019) y Balmaceda (2024). No obstante, el número de espigas por metro cuadrado también evidenció una correlación significativa con el rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico, sugiriendo que esta variable podría desempeñar un rol más relevante bajo limitaciones hídricas. En concordancia con los valores de rendimiento total en cada tratamiento, se observa una reducción generalizada cuando los genotipos son expuestos al estrés hídrico, acompañada por disminuciones en el número de granos, número de espigas y peso de 1000 granos. Al analizar la contribución relativa de cada componente con el rendimiento total, se observó que en el tratamiento control, el número de granos/m^2 fue el principal predictor del rendimiento, obteniendo un coeficiente de sendero relativamente elevado (0,62) en

comparación con las demás variables analizadas. Sin embargo, bajo condiciones de sequía, la influencia del número de granos/m² disminuyó (0,39), acercándose a la magnitud obtenida por el número de espigas/m² (0,34). Esto indica que, en escenarios de déficit hídrico, la capacidad del cultivo para obtener un buen rendimiento final no solo se centra en el número de granos formados, sino también de la capacidad de producir espigas (Abbate, 2023). Además, se obtuvieron relaciones fuertes entre el número de granos por metro cuadrado y el número de espigas por metro cuadrado, lo cual concuerda con lo reportado por Slafer (2003). La reducción en la importancia del peso de 1000 granos bajo el tratamiento aplicado sugiere que, para el mejoramiento de la tolerancia a la sequía, no es necesario priorizar el aumento del tamaño del grano, sino más bien centrarse en la capacidad del trigo para mantener una buena producción de granos en condiciones de estrés. Estos resultados refuerzan la idea de que el número de granos/m² es un componente estable y confiable para predecir rendimiento bajo distintas condiciones hídricas (García *et al.*, 2014).

El uso combinado de los índices de tolerancia a la sequía y el análisis de componentes principales permitió identificar genotipos con altos rendimientos en: condiciones de buen riego, condiciones de sequía y en ambos ambientes simultáneamente, en concordancia con lo reportado por Balmaceda (2024). El índice PM (productividad media) se calculó como el promedio de rendimientos obtenidos por cada genotipo en ambos tratamientos. Aquellos que obtuvieron mayores valores en este índice indican una mejor tolerancia a la sequía, evidenciando cierta estabilidad productiva. A su vez, el índice PMG (productividad media geométrica) seleccionó genotipos que mostraron un desempeño equilibrado en ambientes contrastantes, con cierta penalización con respecto al rendimiento bajo estrés hídrico. Los genotipos con valores altos en este índice mostraron una aptitud superior al obtener buen rendimiento bajo sequía, haciendo a este índice un poco más exigente que el índice PM al discriminar genotipos más tolerantes. El índice ITS (tolerancia al estrés) está más centrado en la identificación de genotipos con alto rendimiento tanto en condiciones de estrés como en el control. Los valores elevados de ITS correspondieron a genotipos que se destacaron por manifestar un buen potencial productivo y sostuvieron el rendimiento obtenido bajo déficit hídrico. La combinación de los 3 índices ofreció una mejor evaluación de los genotipos seleccionados al considerar que PM detecta estabilidad del rendimiento promedio, PMG afina la selección considerando aún más las variaciones del rendimiento bajo estrés hídrico, y el ITS identifica aquellos genotipos potencialmente destacados en cuanto a su rendimiento y tolerancia. Esta discriminación por parte de cada índice se observa en la Figura 15: el índice PM seleccionó exclusivamente 3 genotipos, mientras que los índices PMG e ITS coincidieron en otros 3 genotipos distintos. No obstante, 17 genotipos fueron seleccionados simultáneamente por los 3 índices, destacando por su consistencia de rendimiento en condiciones contrastantes.

Los resultados en los biplot permitieron distinguir y agrupar de manera eficaz a los genotipos dentro de los 4 grupos descritos por Fernandez (1993), patrón observado en los 3 gráficos obtenidos a partir de los índices de tolerancia a la sequía (PM, PMG, ITS), aunque con ligeras diferencias en la proporción de la varianza explicadas por las componentes y la distribución relativa de los genotipos.

En el grupo A (puntos de color rojo) encontramos los genotipos destacados por presentar valores elevados de rendimiento bajo condiciones hídricas contrastantes, agrupados de forma consistente en un mismo sector de los gráficos (cuadrante derecho), y también se proyectan en la dirección de los vectores de Rc, Rs y del vector del índice utilizado en cada caso. Dentro de este grupo, fue posible identificar 20 genotipos prometedores que combinan un buen rendimiento y adaptabilidad en ambientes estresantes. Los genotipos del grupo B (puntos de color verde), con buen rendimiento solamente bajo condiciones de riego, se observaron distribuidos en el cuadrante inferior de los gráficos, próximos al vector Rc y alejados del vector Rs, evidenciando el bajo desempeño en condiciones de sequía. Los genotipos del grupo C (puntos de color azul) son los seleccionados por tener buen rendimiento solamente en condiciones de sequía, ubicados en el cuadrante superior de los gráficos, evidenciando su buen rendimiento obtenido en condiciones de sequía pero con bajo rendimiento en condiciones de riego. Y finalmente, los genotipos del grupo D (puntos de color violeta), con bajo rendimiento en ambos ambientes hídricos, se localizaron en dirección opuesta a ambos vectores de rendimiento y al vector del índice empleado, en el cuadrante izquierdo de los gráficos.

De los 20 genotipos destacados dentro del grupo A, 17 fueron seleccionados simultáneamente por los tres índices empleados (258, 35, 199, 133, 31, 122, 72, 197, 33, 1, 115, 262, 263, 254, 153, 261 y 265), reflejando un desempeño consistente tanto en condiciones de riego como de estrés hídrico. Tres genotipos fueron seleccionados exclusivamente por el índice PM (274, 200 y 116) y tres genotipos exclusivos de los índices PMG e ITS (94, 114 y 100) (Figura 15). Los primeros corresponden a genotipos con rendimientos promedios elevados en ambos tratamientos, pero que fueron mayormente penalizados bajo condiciones de estrés hídrico, haciendo que no sean seleccionados en los índices PMG e ITS (más exigentes frente a estas condiciones). Contrariamente, los tres genotipos seleccionados por estos dos últimos índices mostraron un rendimiento más equilibrado o incluso superior bajo condiciones de sequía en comparación con su rendimiento obtenido en condiciones de riego, lo que los favoreció en índices que ponderan de manera proporcional el desempeño en ambientes estresantes. Por lo cual, la evaluación combinada de los índices mejora aún más la selección de genotipos candidatos para programas de mejoramiento orientados a condiciones hídricas cambiantes (Boicet-Fabre *et al.*, 2018). Sin embargo, podemos destacar que el Índice de Productividad Media resulta más útil para identificar genotipos con buen rendimiento general en ambos ambientes, aunque con menor capacidad de adaptación a cambios hídricos. En cambio, el PMG es más crítico para seleccionar genotipos que obtuvieron un mejor desempeño bajo condiciones de sequía en comparación al PM. El ITS se establece como una herramienta adecuada para seleccionar genotipos con desempeño estable y superior en ambientes contrastantes, evidenciando una mayor tolerancia a la variabilidad en la disponibilidad del agua.

7. Conclusiones

Los resultados obtenidos permitieron comprobar que el estrés hídrico provocó una disminución significativa en el rendimiento final de los diferentes genotipos que componen la población WAMI. Esta

reducción estuvo mayormente explicada por la disminución en el número de granos por metro cuadrado registrados en cada unidad muestral, probablemente como consecuencia de un menor desarrollo de las espigas y/o aborto floral inducido por el estrés. Asimismo, se observó que bajo condiciones de sequía el verdor, la biomasa generada y la altura de las plantas se vieron afectados significativamente, reflejándose en una aceleración del tiempo transcurrido en las diferentes etapas fenológicas hasta la senescencia.

El uso combinado de los índices de tolerancia a la sequía específicos y el análisis de componentes principales nos permitió identificar genotipos destacables por sus rendimientos obtenidos en condiciones hídricas contrastantes. Esta metodología facilitó la comparación simultánea de los rendimientos obtenidos en control y estrés, así como la clasificación de los genotipos según cada uno de los índices, permitiendo agruparlos de acuerdo a sus perfiles productivos.

En cuanto a la utilidad de cada índice, el Índice de Productividad Media, al ser un promedio de los rendimientos obtenidos, resulta ser adecuado para identificar genotipos que obtienen buen rendimiento en ambientes contrastantes, pero con una menor capacidad de adaptación a cambios en las condiciones hídricas. El Índice de Productividad Media Geométrica al penalizar en mayor medida los rendimientos bajo sequía, permite una evaluación más estricta para detectar genotipos con buenos rendimientos en ambientes estresantes. Finalmente, el Índice de Tolerancia al Estrés se destacó por identificar genotipos con altos rendimientos en ambas condiciones hídricas, pero especialmente aquellos que mantienen un desempeño estable, con una mayor tolerancia frente a la variabilidad en la disponibilidad del agua, evidenciando un buen potencial productivo. En base a estas diferencias, destacamos a los genotipos seleccionados por PMG e ITS: 94, 114 y 100, como los genotipos que mostraron mayor estabilidad frente a condiciones de sequía, siendo candidatos interesantes para estudios en ambientes con limitada capacidad de agua. Los genotipos 274, 200 y 116, seleccionados únicamente por PM, si bien son los destacados por tener buenos rendimientos en condiciones de riego y sequía, no presentan buena tolerancia si se presentan en condiciones de sequía, indicando que poseen buena productividad pero solo en condiciones favorables. Los 17 genotipos: 258, 35, 199, 133, 31, 122, 72, 197, 33, 1, 115, 262, 263, 254, 153, 261 y 265, constituyen el grupo más sólido y estable al ser los seleccionados simultáneamente por los 3 índices. Presentan un alto rendimiento en ambas condiciones ambientales, y muestran consistencia bajo condiciones estresantes, por lo cual, son los principales candidatos para estudiar bajo programas de mejoramiento vegetal, especialmente si se plantean objetivos de obtener cultivares que combinen productividad con tolerancia a la variabilidad hídrica.

8. Anexo

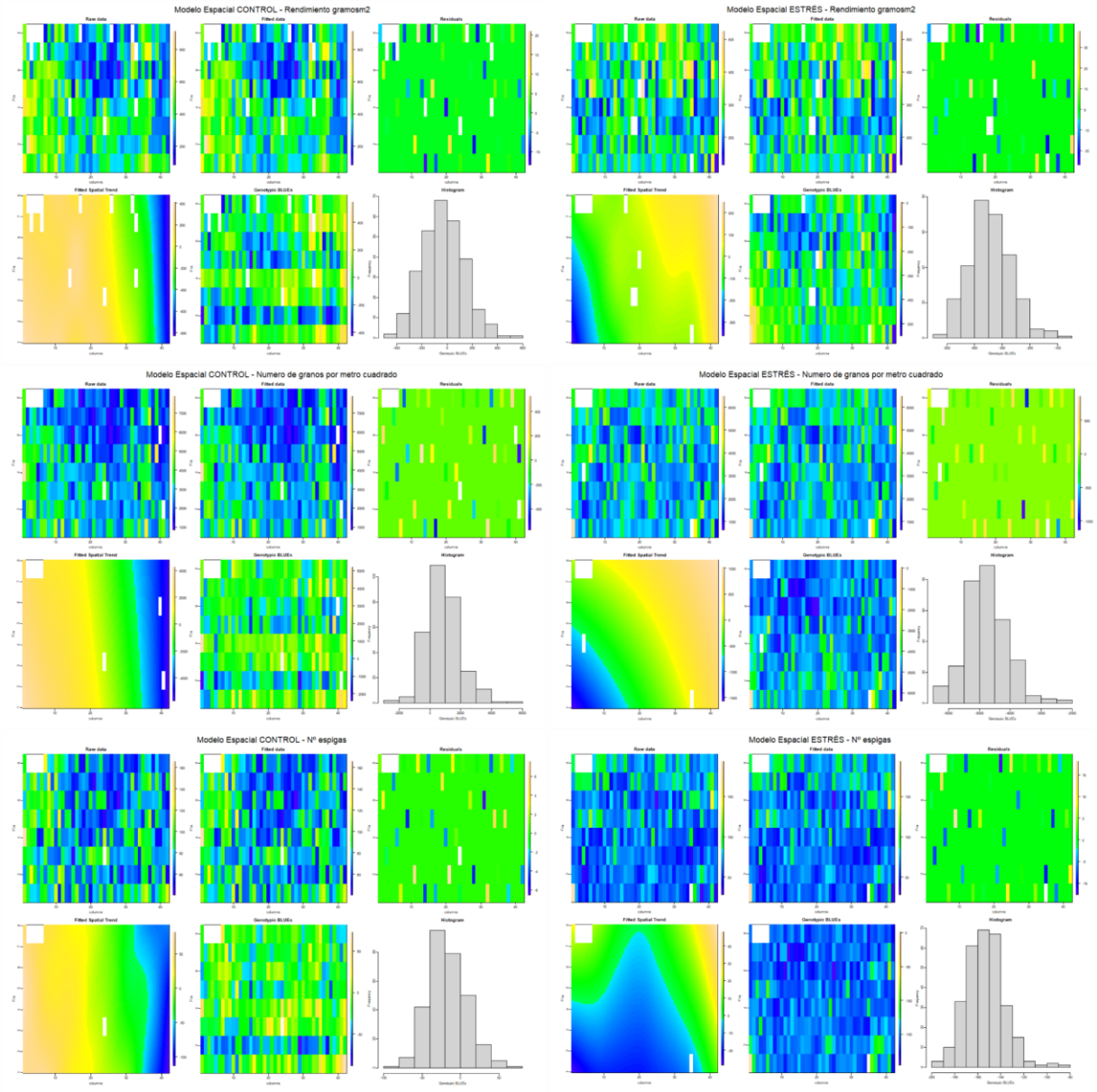

Figura 17: Distribución espacial ajustada por el modelo SpATS para las variables: rendimiento (g/m2), número de granos por metro cuadrado y número de espigas por metro cuadrado en condiciones hídricas contrastantes. En cada sección, se detallan: Raw data: Distribución espacial de los datos observados según las posiciones de las parcelas en el campo; Fitted data: Valores predichos por el modelo para cada variable y parcela evaluada, considerando los efectos incluídos; Residuals: resultados obtenidos de la diferencia entre los valores observados y los ajustados por el modelo SpATS; Fitted Spatial Trend: Efecto espacial ajustado por el modelo utilizando PSANOVA, muestra cómo las condiciones espaciales afectan a la variable medida en las parcelas; Genotypic BLUE: representa los efectos genéticos de los genotipos eliminando la influencia ambiental y tendencias espaciales; y un histograma de distribución de los efectos genotípicos.

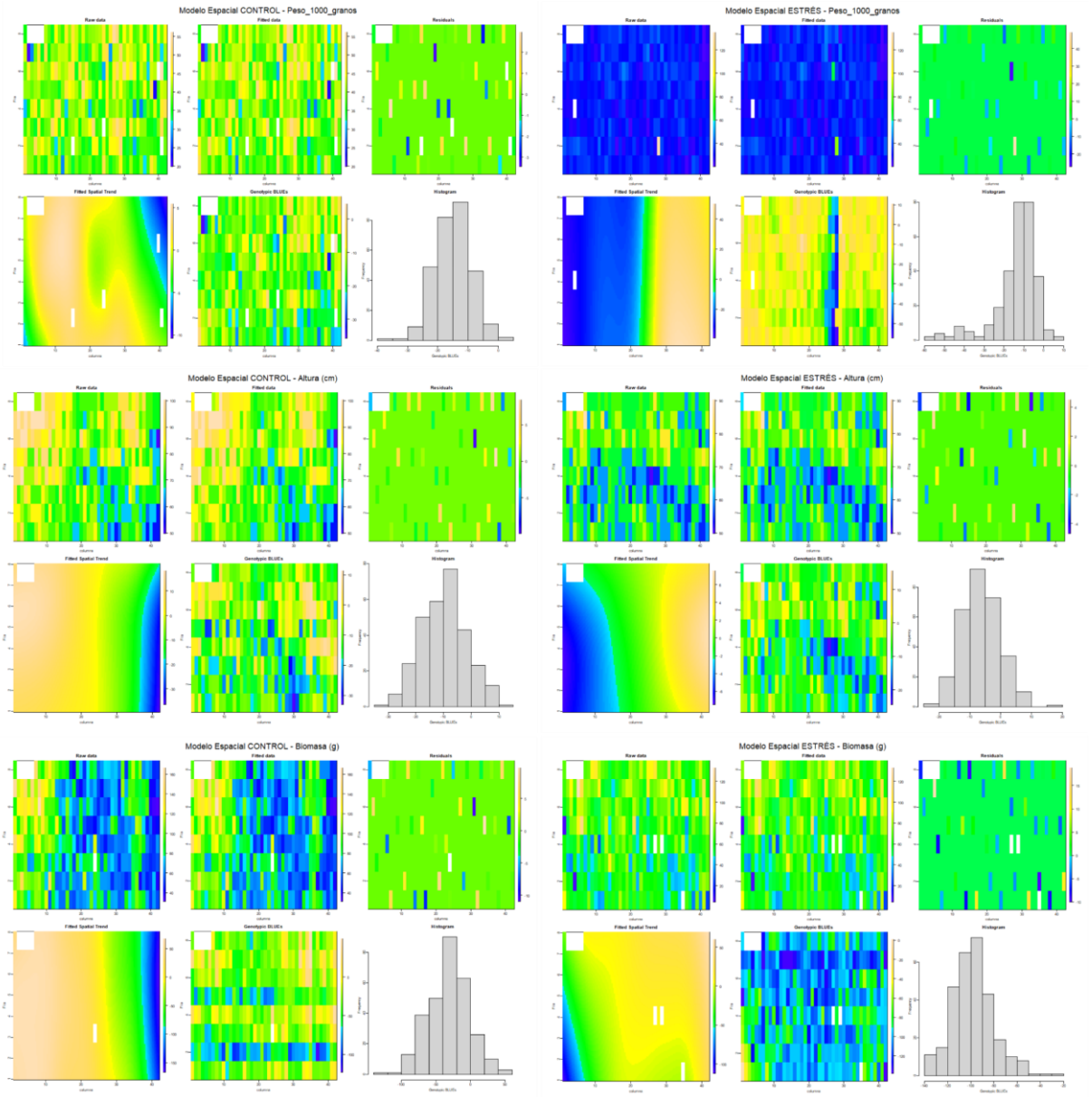

Figura 17: Distribución espacial ajustada por el modelo SpATS para las variables: peso 1000 granos, altura (cm) y biomasa (g) en condiciones hídricas contrastantes. En cada sección, se detallan: Raw data: Distribución espacial de los datos observados según las posiciones de las parcelas en el campo; Fitted data: Valores predichos por el modelo para cada variable y parcela evaluada, considerando los efectos incluídos; Residuals: resultados obtenidos de la diferencia entre los valores observados y los ajustados por el modelo SpATS; Fitted Spatial Trend: Efecto espacial ajustado por el modelo utilizando PSANOVA, muestra cómo las condiciones espaciales afectan a la variable medida en las parcelas; Genotypic BLUE: representa los efectos genéticos de los genotipos eliminando la influencia ambiental y tendencias espaciales; y un histograma de distribución de los efectos genotípicos.

9. Bibliografía

1. Abbate, P. E. (2004). *Ecofisiología de trigo: aspectos prácticos para el manejo del cultivo*. 12° Congreso Nacional de AAPRESID. Rosario.
2. Abbate, P. E. (2023). *Trigo como alimento: Su cultivo y producción en Latinoamérica*. Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA.
3. ArgentiNat (Accedido: 2025-02-27). *Triticum aestivum.* https://www.argentinat.org/taxa/64161-Triticum-aestivum
4. Balmaceda, M. (2024). *Identificación de QTL asociados a caracteres de rendimiento de una población de trigo bajo condiciones de estrés hídrico en San Juan, Argentina.* [Tesis de Doctorado en Agronomía de la Universidad Nacional de Cuyo]. https://ddhh.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/20090/m.-balmceda.tesis-doctoral.pdf
5. Başer, İsmet, Akseki, S., Göçmen, D., Balkan, A., y Bilgin, O. (2024). The Effects of Water Stress on Grain Yield and Yield Components in Bread Wheat. *Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences*, 77(6), 924–935.
6. Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., y Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48..
7. Boicet-Fabre, Tony, Baldaquín-Hernández, Michel, Boudet-Antomarchi, Ana D., Merino-Hernández, Yanitza, Alarcón-Zayas, Alejandro, y Almarales-Frías, Wilmer. (2018). Evaluación de diferentes índices de tolerancia a la sequía basado en análisis multivariados. *Cultivos Tropicales*, 39(1), 61-67.
8. Canadian Food Inspection. (2012, March 5). *The biology of Triticum aestivum L. (wheat)*. http://inspection.canada.ca/en/plant-varieties/plants-novel-traits/applicants/directive-94-08/biology-documents/triticum-aestivum
9. Cifuentes Cornejo, M. (2014). *Efecto del estrés hídrico en el rendimiento y la calidad del trigo candeal (Triticum turgidum L. ssp. Durum). [*Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo - Universidad de Chile]. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/147860
10. Conti, M. E. (1998). *Principios de edafología con énfasis en suelos argentinos*. Buenos Aires Orientación Gráfica.
11. Cotes Torres, J. M., y Ñústez López, C. E. (2001). Propuesta para el Análisis de Diseños Aumentados en Fitomejoramiento: Un Caso en Papa. *Revista Latinoamericana de la Papa, 12*(1), 15–34.
12. Dvorak, J., Luo, M.-C., y Akhunov, E. D. (2011). N.I. Vavilov's theory of centres of diversity in the light of current understanding of wheat diversity, domestication and evolution. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding, 47(Special Issue)*, S20–S27.
13. El Baidouri, M., Murat, F., Veyssiere, M., Molinier, M., Flores, R., Burlot, L., Alaux, M., Quesneville, H., Pont, C., y Salse, J. (2017). Reconciling the evolutionary origin of bread wheat (Triticum aestivum). *New Phytologist, 213(3)*, 1477–1486.
14. Escolar, Diego; Saldi, Leticia; *Canales fantasmas en el "desierto huarpe": Riego legal, discursos ecológicos y apropiación del agua en Cuyo, Argentina, siglos XIX-XX*; Universidad Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Programa de Pós-graduacao em Políticas Sociais; Agenda Social; 7; 1; 6-2013; 68-94
15. FAO. (2025). *Crop Prospects and Food Situation*. FAO; https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd4597en
16. Federer, W. T. (1961). Augmented Designs with One-Way Elimination of Heterogeneity. *Biometrics, 17(3)*, 447–473.
17. Feldman, M., y Levy, A. A. (2009). Genome evolution in allopolyploid wheat—A revolutionary reprogramming followed by gradual changes. *Journal of Genetics and Genomics, 36(9)*, 511–518.

18. Fernandez, G. C. J. (1993). Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance.
19. Fiorani, F., y Schurr, U. S. (2013). Future Scenarios for Plant Phenotyping. *Annual Reviews of Plants Biology* 64(1), 267-291.
20. García, G. A., Serrago, R. A., González, F. G., Slafer, G. A., Reynolds, M. P., y Miralles, D. J. (2014). Wheat grain number: identification of favourable physiological traits in an elite doubled-haploid population. *Field Crops Research, 168*, 126-134.
21. Ghanem, H. E., y Al-Farouk, M. O. (2024). Wheat drought tolerance: Morpho-physiological criteria, stress indexes, and yield responses in newly sand soils. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(7), 2234-2250.
22. Gobierno de la Provincia de San Juan. (2023). *San Juan evalúa ampliar las hectáreas de cultivo de trigo*. S.I San Juan. https://sisanjuan.gob.ar/produccion-y-desarrollo-economico/2023-01-27/46819-san-juan-evalua-la-posibilidad-de-ampliar-las-hectareas-de-cultivo-de-trigo
23. González Aubone, F., Reggio, L., y Graffigna, L. (2014). Marco histórico del riego en San Juan, Argentina. *Congreso Internacional de Códigos y Desafíos para Enfrentar la Crisis del Agua (La Plata, 2014)*.
24. Green, A. J., Berger, G., Griffey, C. A., Pitman, R., Thomason, W., Balota, M., y Ahmed, A. (2012). Genetic Yield Improvement in Soft Red Winter Wheat in the Eastern United States from 1919 to 2009. *Crop Science, 52(5)*, 2097–2108.
25. Salih Hasan, B. M. ., y Abdulazeez, A. M. . (2021). A Review of Principal Component Analysis Algorithm for Dimensionality Reduction. *Journal of Soft Computing and Data Mining, 2(1),* 20-30.
26. Hoffmann, B., y Burucs, Z. (2005). Adaptation of wheat (*Triticum aestivum* L) genotypes and related species to water deficiency. *Cereal Research Communications, 33(4)*, 681-687.
27. Hosseinzadeh, S. R., Amiri, H., y Ismaili, A. (2018). Evaluation of photosynthesis, physiological, and biochemical responses of chickpea (Cicer arietinum L. cv. Pirouz) under water deficit stress and use of vermicompost fertilizer. *Journal of Integrative Agriculture, 17(11)*, 2426-2437.
28. Amani, I., Fischer, R. A., y Reynolds, M. P. (1996). Canopy temperature depression association with yield of irrigated spring wheat cultivars in a hot climate. *Journal of Agronomy and Crop Science, 176(2),* 119-129.
29. Jorba, R. R. (2003). Transformaciones en la región centro-oeste de la Argentina. De un espacio económico binacional a la formación de la economía regional vitivinícola y la integración al mercado nacional: Mendoza y San Juan, 1870-1914. *Andes, (14).*
30. Kassambara, y Mundt. (2016). factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. *CRAN: Contributed Packages.*
31. Kirby, M., y FAO. (2002). *Botany of the wheat plant.* https://www.fao.org/4/Y4011e/y4011e05.htm
32. Kubar, M. S., Alshallash, K. S., Asghar, M. A., Feng, M., Raza, A., Wang, C., ... y Alshamrani, S. M. (2022). Improving winter wheat photosynthesis, nitrogen use efficiency, and yield by optimizing nitrogen fertilization. *Life, 12(10)*, 1478.
33. Lê, S., Josse, J., y Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software, 25,* 1–18.
34. Lersten, N. R. (1987). Morphology and Anatomy of the Wheat Plant. *Wheat and Wheat Improvement 13, 33-75.*
35. Liotta, M. (1999). *Los suelos en los valles de Tulum, Ullum y Zonda* [PDF]. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, San Juan. http://www.web-hrl.net/pdf/evento5.pdf
36. Lopes, M. S., Reynolds, M. P., Jalal-Kamali, M. R., Moussa, M., Feltaous, Y., Tahir, I. S. A., ... y Baum, M. (2012). The yield correlations of selectable physiological traits in a population of advanced spring wheat lines grown in warm and drought environments. *Field Crops Research, 128,* 129-136.
37. Ministerio de Agricultura, G. y. P. d. A. (2024). *Resultado Campaña Trigo 2023-24.*

https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/estimaciones/cierre/_archivos/ResultadoCampa%C3%B1a-Trigo-2023-24.pdf
38. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. (2021). *Sistemas de información sobre la agricultura: Informe técnico.* https://www.argentina.gob.ar/sites/default/les/sisa_if_trigo2021.pdf
39. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación [MAGyP]. (2021). *Subregiones Trigueras en Argentina.* https://www.argentina.gob.ar/sites/default/les/subregiones_trigueras_2021-06-18_nal.pdf
40. Miralles, D. J., González, F. G., Abeledo, L. G., Serrago, R. A., Alzueta, I., García, G. A., ... y Lo Valvo, P. J. (2014). Manual de trigo y cebada para el cono sur procesos fisiológicos y bases de manejo. *Orientación Gráfica; 2014; 56*
41. Mirbahar, A. A., Markhand, G. S., Mahar, A. R., Abro, S. A., y Kanhar, N. A. (2009). Effect of water stress on yield and yield components of wheat (Triticum aestivum L.) varieties. *Pak. J. Bot, 41(3)*, 1303-1310.
42. Mohammadi, M., Karimizadeh, R., Sabaghnia, N., y Shefazadeh, M. K. (2012). Effective application of canopy temperature for wheat genotypes screening under different water availability in warm environments. *Bulgarian Journal of Agricultural Science, 18(6)*, 934-941.
43. Molfese, E. R. (2016). *Caracterización de la calidad del Trigo Pan en el centro sur bonaerense.* Ediciones INTA.
44. Munné-Bosch, S., y Alegre, L. (2004). Die and let live: leaf senescence contributes to plant survival under drought stress. *Functional Plant Biology, 31(3),* 203-216.
45. Nagy, É., Lantos, C., y Pauk, J. (2017). Selection of drought tolerant and sensitive genotypes from wheat DH population. *Acta Physiologiae Plantarum, 39(12),* 261.
46. Nezhadahmadi, A., Prodhan, Z. H., y Faruq, G. (2013). Drought tolerance in wheat. *The Scientific World Journal, 2013(1)*, 610721.
47. Pellegrini, P., Alvarez Prado, S., Monzon, J. P., Oesterheld, M., y Sadras, V. O. (2022). Spatial and temporal variation in drought types for wheat in Argentina and its association with actual yield and fertilization rate. *Field Crops Research, 280*, 108469.
48. Peremarti, A., Marè, C., Aprile, A., Roncaglia, E., Cattivelli, L., Villegas, D., y Royo, C. (2014). Transcriptomic and proteomic analyses of a pale-green durum wheat mutant shows variations in photosystem components and metabolic deficiencies under drought stress. *BMC genomics, 15(1)*, 125.
49. Pieruschka, R., y Poorter, H. (2012). Phenotyping plants: Genes, phenes and machines. *Functional Plant Biology, 39(11)*, 813–820.
50. Rodriguez-Alvarez, M. X., Boer, M. P., van Eeuwijk, F. A., y Eilers, P. H. (2018). Correcting for spatial heterogeneity in plant breeding experiments with P-splines. *Spatial Statistics, 23*, 52-71.
51. Rosielle, A. A., y Hamblin, J. (1981). Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment 1. *Crop science, 21(6),* 943-946.
52. Ruiz, M. B., D'Andrea, K. E., y Otegui, M. E. (2019). Phenotypic plasticity of maize grain yield and related secondary traits: Differences between inbreds and hybrids in response to contrasting water and nitrogen regimes. *Field Crops Research, 239,* 19–29.
53. Sgroi, L. C., Lovino, M. A., Berbery, E. H., y Müller, G. V. (2021). Characteristics of droughts in Argentina's core crop region. *Hydrology and Earth System Sciences, 25(5)*, 2475-2490.
54. Schneider K.A., Rosales-Serna R., Ibarra-Perez F., Cazares-Enriquez B., Acosta-Gallegos J.A., Ramirez-Vallejo P., Wassimi N., Kelly J.D. (1997) Improving common bean performance under drought stress. *Crop science 37,* 43-50.
55. Sierra Cuba, N. (2021). *Descripción fenotípica de 100 líneas de trigo harinero (Triticum aestivum L.) y la respuesta a cuatro razas de roya amarilla (Puccinia striiformis west f.sp. Tritici) en la*

Estación Experimental Agraria Andenes – Cusco. [Tesis para alcanzar el grado de Licenciatura - Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/5915

56. Sisterna, C. (2021). *Efecto del riego deficitario controlado en la distribución de fotoasimilados alterando la relación fuente- destino en genotipos comerciales de trigo (Triticum aestivum).* [Tesis para alcanzar el grado de Ingeniería Agronómica - Universidad Nacional de San Juan - Facultad de Ingeniería].
57. Slafer, G. A. (2003). Genetic basis of yield as viewed from a crop physiologist's perspective. *Annals of applied biology, 142(2),* 117-128.
58. Sukumaran, S., Dreisigacker, S., Lopes, M., Chavez, P., y Reynolds, M. P. (2015). Genome-wide association study for grain yield and related traits in an elite spring wheat population grown in temperate irrigated environments. *Theoretical and applied genetics, 128(2*), 353-363.
59. Vavilov, N. I. (1926). *Studies on the Origin of Cultivated Plants.* Institute of Applied Botany and Plant Breeding, Leningrad.
60. Velazco, J. G., Rodríguez-Álvarez, M. X., Boer, M. P., Jordan, D. R., Eilers, P. H., Malosetti, M., y Van Eeuwijk, F. A. (2017). Modelling spatial trends in sorghum breeding field trials using a two-dimensional P-spline mixed model. *Theoretical and Applied Genetics, 130(7)*, 1375-1392.
61. Wu, H., y Yang, Z. (2024). Effects of Drought Stress and Postdrought Rewatering on Winter Wheat: A Meta-Analysis. *Agronomy, 14(2),* 298.
62. Zadoks, J. C., Chang, T. T., y Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research, 14(6)*, 415-421.
63. Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A., y Smith, G. M. (2009). *Mixed effects models and extensions in ecology with R (Vol. 574, p. 574)*. New York: springer.