



Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
Escuela para Graduados

**ANÁLISIS MULTIAMBIENTAL REGIONAL DE LA PRODUCTIVIDAD
DEL TRIGO (*Triticum aestivum* L.), ESTABILIDAD Y ADAPTABILIDAD
SEGÚN SU MADUREZ RELATIVA**

Fernando Miguel Marchisone

Trabajo Final
Para optar al Grado Académico de
Especialista en Producción de Cultivos Extensivos

Córdoba - 2023

**ANÁLISIS MULTIAMBIENTAL REGIONAL DE
LA PRODUCTIVIDAD DEL TRIGO (*Triticum
aestivum* L.), ESTABILIDAD Y ADAPTABILIDAD
SEGÚN SU MADUREZ RELATIVA**

Fernando Miguel Marchisone

Director: Ing. Agr. MSc. Sebastián Zuil

Co-Directora: Ing. Agr. Lucía Rosetti

Tribunal Evaluador

Dr. Ing. Agr. Biasutti Carlos

.....

Dr. M.Sc. Ing. Agr. Cantarero Marcelo

.....

Ing. Agr. Ferraguti Facundo

.....

Presentación Formal Académica

12 de abril de 2023

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Córdoba



Este trabajo se lo dedico a mi familia, por su incondicional apoyo durante toda mi carrera y desarrollo profesional.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Agr. (M. Sc.) Sebastián Zuil, por aceptar ser mi director de tesis, dedicar su tiempo, predisposición y conocimientos a lo largo de todo este proceso.

A la Ing. Agr. Lucía Rosetti, por aceptar ser mi co-directora de tesis, dedicar su tiempo, predisposición y conocimientos a lo largo de todo este proceso.

A la Universidad Nacional de Córdoba por formarme en esta Especialización para ser un mejor profesional.

A la comisión revisora por las correcciones y aportes realizados.

Por último, a todas aquellas personas que de una u otra forma se interesaron y me acompañaron en el desarrollo de este trabajo.

RESUMEN

El rendimiento del cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) es el resultado del genotipo, el ambiente y su interacción. En distintas localidades de Argentina se lleva a cabo la Red Nacional de Evaluación de cultivares de Trigo (RET), donde se puede observar el comportamiento productivo para cada genotipo. En este trabajo se analizaron 38 ambientes presentes en la RET distribuidos en las localidades de Reconquista, Rafaela, Oliveros, Marcos Juárez, Venado Tuerto y Pergamino, para evaluar la estabilidad y adaptabilidad de cada grupo de madurez (ciclos) en cada ambiente. Los cultivares se clasificaron según la duración total de su ciclo en largos (CL), intermedios (CI) y cortos (CC). Para analizar estabilidad se siguieron dos metodologías: i) diferencial de rendimiento porcentual (DRTO) versus coeficiente de variación (CV) y ii) rendimiento medio en función del coeficiente Shukla (1972). Para conocer la adaptabilidad se empleó la técnica de regresión, siguiendo la metodología de Finlay y Wilkinson (1963). Se observó que los cultivares de CL fueron los que presentaron mayor rendimiento, pero no alcanzaron la estabilidad de los CI, mientras que los CC presentaron menor estabilidad y rendimiento. Las localidades más productivas fueron Marcos Juárez y Pergamino y la menos productiva fue Oliveros. Todos los ciclos presentaron alta adaptabilidad al ambiente. Se analizó el impacto de las variables ambientales mediante un análisis de componentes principales, donde se observó que las precipitaciones acumuladas fue la variable de mayor importancia a nivel de subregión, mientras que al analizarlo por localidad la más significativa fue la temperatura media.

Palabras clave: genotipo – ambiente – ciclos – Shukla – RET.

ABSTRACT

The yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) is the result of genotype, environment and their interaction. In different sites of Argentina, the National Wheat Cultivar Evaluation Network (RET) is carried out, where the productive behavior for each genotype can be observed. In this work, 38 environments distributed in the sites of Reconquista, Rafaela, Oliveros, Marcos Juárez, Venado Tuerto and Pergamino, were analysed to evaluate the stability and adaptability of each maturity group (cycles) to each environment. The cultivars were classified according to the total duration of their cycle in long (CL), intermediate (CI) and short (CC). To analyse stability, two methodologies were followed: i) percentage yield differential (DRTO) versus coefficient of variation (CV) and ii) mean yield based on the Shukla coefficient (1972). To estimate the adaptability, regressions were carried out, following the methodology of Finlay and Wilkinson (1963). It was observed that the CL cultivars were the ones that achieved the highest yield but they did not reach the stability that those of CI. The CC genotypes had the lowest stability as well as yield. The most productive localities were Marcos Juárez and Pergamino while the least one was Oliveros. All cycles presented high adaptability to the environment. The impact of the environmental variables on yield was also analysed through a principal components analysis, where it was observed that the accumulated rainfall was the most important variable at the subregion level, while when analysing it by locality, the most significant was the average temperature.

Keywords: genotype - environment - cycles - Shukla - RET.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
TABLA DE CONTENIDO	i
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE SIGLAS O ABREVIATURAS	v
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO	6
1.2. OBJETIVO GENERAL	6
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
2. MATERIALES Y MÉTODOS	7
2.1. Descripción de bases de datos analizadas.....	7
2.2. Descripción de los ensayos individuales	8
2.3. Análisis de datos.....	8
2.3.1. Análisis del diferencial de rendimiento	9
2.3.2. Análisis Shukla.....	10
2.3.3. Análisis de índice ambiental linealmente ajustado.....	11
2.3.4. Análisis de componentes principales.....	12
3. RESULTADOS	13
3.1. Variabilidad del rendimiento por campaña.....	13
3.2. Estabilidad de ciclos por ambiente	17
3.3. Adaptabilidad de los genotipos al ambiente	20
3.4. Variables climáticas que afectan al rendimiento	22
4. DISCUSIÓN	26
4.1. Perspectivas a futuro.....	28
5. CONCLUSIONES	29
6. BIBLIOGRAFÍA	30

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Localidades y su correspondiente sub-región, coordenadas geográficas, tipo de suelo, cultivo antecesor, cantidad de campañas analizadas y tamaño de parcelas para cada localidad.....	7
Tabla 2. Medidas de ajuste del modelo lineal general y mixto para evaluación de interacción GxA con su prueba de hipótesis marginal (SC tipo III).....	13
Tabla 3. Estadísticos asociados para cada ciclo y tipo de análisis de adaptabilidad.....	20
Tabla 4. Error estándar (EE), CpMallows, p-valor y R^2 del modelo para cada variable y subregión triguera.	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de interpretación gráfica entre el rendimiento y el coeficiente Shukla según tenga mayor o menor productividad y estabilidad. 10

Figura 2. Esquema de interpretación gráfica del índice ambiental versus rendimiento. La línea continua diagonal representa la línea de isorendimiento, con pendiente igual a 1. La línea con círculos en sus extremos representa una pendiente menor a 1 y la línea con cuadrados en los extremos indica una pendiente mayor a 1. .. 12

Figura 3. Rendimiento del cultivo (kg ha^{-1}) para las localidades de a) Marcos Juárez; b) Oliveros; c) Rafaela; d) Reconquista; e) Venado Tuerto y f) Pergamino, para cada campaña agrícola y ciclo (CC, CI y CL). El punto representa la media para cada ciclo. La línea horizontal que posee cada caja es la mediana. Los límites de la caja señalan el Q1 y Q3. Las líneas verticales delimitan los máximos y mínimos de los datos. Los puntos sin fondo indican valores extremos..... 16

Figura 4. Diferencial de rendimiento porcentual (DRTO, en %) en función del coeficiente de variación (CV, en %) para cada a) ciclo por localidad; b) ciclo por subregión triguera. La línea horizontal indica el DRTO (%) promedio y la línea punteada vertical el CV (%) promedio. CC= ciclo corto; CI= ciclo intermedio; CL= ciclo largo; RA= Rafaela; RE= Reconquista; PE= Pergamino; MJ= Marcos Juárez; VT= Venado Tuerto y OL= Oliveros. Los números de la figura b corresponden a cada subregión triguera. 17

Figura 5. Rendimiento en función del coeficiente Shukla para a) ciclos por localidad; b) localidad; c) ciclos por subregión; d) subregión. La línea punteada horizontal indica el promedio general de rendimiento de todos los ensayos. La línea punteada vertical indica el valor F de Snedecor al 5% de probabilidad. Los números de la figura 'd' corresponden a las subregiones trigueras. CC= ciclo corto; CI= ciclo intermedio; CL= ciclo largo; RA= Rafaela; RE= Reconquista; PE= Pergamino; MJ= Marcos Juárez; VT= Venado Tuerto y OL= Oliveros. 19

Figura 6. Rendimiento en función del índice ambiental para cada: a) localidad y b) subregión. La línea continua diagonal corresponde a la lineal 1:1 o línea de isorendimiento. Los círculos corresponden a ciclos cortos (CC), los cuadrados a los intermedios (CI) y los triángulos a los largos (CL). 21

Figura 7. Análisis de componentes principales para cada ciclo por subregión (a) y localidad (b). Los números de la figura a corresponden a las subregiones trigueras. Donde CC son los ciclos cortos, CI los intermedios y CL los largos, siendo las variables el rendimiento (RTO), precipitaciones (PREC), radiación (RAD), temperaturas medias (T° MED), máximas (T° MÁX) y mínimas (T° MÍN). Las localidades evaluadas fueron Rafaela (RA), Reconquista (RE), Oliveros (OL), Venado Tuerto (VT), Marcos Juárez (MJ) y Pergamino (PE)..... 23

LISTA DE SIGLAS O ABREVIATURAS

A: Ambiente.

AMMI: Efectos principales aditivos e interacción multiplicativa.

ANOVA: Análisis de varianza.

CC: Ciclo corto.

CI: Ciclo intermedio.

CL: Ciclo largo.

cm: Centímetros.

CO₂: Dióxido de carbono.

CP: Componentes principales.

CP1: Componente principal uno.

CP2: Componente principal dos.

CV: Coeficiente de variación.

DMS: Diferencia mínima significativa promedio.

DRTO: Diferencial de rendimiento porcentual.

F: Floración.

F-MF: Floración-Madurez fisiológica.

G: Genotipo.

GxA: Genotipo por ambiente.

ha: Hectárea.

hs: Horas.

IA: Índice ambiental.

INASE: Instituto Nacional de Semillas.

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

kg ha⁻¹: Kilogramos por hectárea.

m: Metros.

PG: Peso de granos.

PH: Peso hectolítrico.

Q1: Primer cuartil.

Q3: Tercer cuartil.

RET: Red Nacional de Evaluación de cultivares de Trigo.

S: Siembra.

SC tipo I: Suma de cuadrados tipo uno.

SC tipo III: Suma de cuadrados tipo tres.

SC: Suma de cuadrados.

S-F: Siembra-Floración.

SIGA: Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica.

t: Toneladas.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de granos a nivel mundial es un tema de gran importancia a la hora de pensar en el futuro alimenticio de la sociedad. Desde hace décadas, siguiendo los conceptos de la teoría malthusiana, la preocupación se centró en que la población crecía en forma exponencial, mientras que la producción de alimentos lo hace aritméticamente, pudiendo generar conflictos, hambre y enfermedades (Malthus, 1966). La demanda global de productos agrícolas continuará aumentando debido al crecimiento poblacional, al incremento de la calidad de la dieta y a los requerimientos de biocombustibles y biomateriales (Alexandratos y Bruinsma, 2012; Andrade, 2016). Esto lleva a que se discutan en el mundo estrategias para poder aumentar los rendimientos de los cultivos como el trigo (Miralles y González, 2010).

Se estima que Argentina tiene la capacidad de producir alimentos para unos 400 millones de personas (Andrade *et al.*, 2017), lo cual indica que es lo suficientemente productivo para abastecer al país y conseguir un excedente exportable. La producción agrícola del país se ha incrementado en gran medida durante los últimos años, aumentando la producción de los principales granos (soja, maíz, trigo y girasol) de 34 a 143 millones de toneladas entre 1990 y 2019 (De Abelleira *et al.*, 2019). El trigo es el tercer cultivo más importante en superficie cultivada del país, detrás de soja y maíz (MAGyP, 2023). No obstante, su superficie y/o producción cambia entre campañas ya que es afectada por variables climáticas, legislativas (buenas prácticas agrícolas, leyes de aplicación de fitosanitarios), de mercado (aperturas y cierres de exportaciones), impositivas (retenciones) y técnicas (de manejo) (Argentrigo, 2014).

La inclusión del trigo en rotaciones agrícolas es una opción muy interesante en términos de sustentabilidad ambiental y productiva, además de brindar a la empresa un ingreso financiero a la salida de la primavera (Brach y Zuil, 2018). Asimismo, esta gramínea aporta un rastrojo de buena calidad y de lenta descomposición, que otorga beneficios al suelo como: mayor cobertura, balance de materia orgánica y mejora su estructura (Gerster y Bacigaluppo, 2007). Además, favorece a los acopios y molinos locales, quienes le agregan valor en origen al cereal mediante la producción de otros subproductos (Abbate y Brach., 2020).

Las prácticas de manejo (por ejemplo, fecha de siembra, elección del cultivar, momentos de aplicaciones de plaguicidas y fertilizantes) e insumos (herbicidas, fungicidas, fertilizantes, entre otros) que se utilicen durante el ciclo del cultivo definen la producción del mismo. El rendimiento, entonces, es el resultado del genotipo (G), el ambiente (A) (clima, suelo y prácticas de manejo) y su interacción (GxA). Por lo tanto, es posible que los genotipos puedan variar su rendimiento de acuerdo al ambiente donde se desarrollen (Enrico *et al.*, 2013). Esa interacción genotipo-ambiente es una de las principales causas de las diferencias entre los genotipos, y está asociada al comportamiento diferencial que presentan los mismos bajo diversas condiciones de desarrollo y años de evaluación (Perez-Ruiz *et al.*, 2015), siendo variedades que poseen otra capacidad de captación y uso de radiación, tolerancia a estrés hídrico o térmico, diferente tasa de crecimiento, plasticidad reproductiva, o combinaciones de componentes ecofisiológicos particulares que permitan su mejor desarrollo en distintos ambientes, campañas y prácticas de manejo.

Muchos estudios se han realizado para explorar los efectos de la interacción GxA, no solo para comprobar la adaptación y estabilidad de los cultivares en cada ambiente, sino también por la importancia que tiene en los programas de mejoramiento vegetal. Por lo tanto y de acuerdo con el análisis que realizó Cantarero (2018), conocer las causas de la interacción GxA puede ser usada para establecer objetivos de mejoramiento, métodos de selección basados sobre caracteres destacados y formular recomendaciones de manejo para áreas de adaptación de un cultivar.

Según Brach y Zuil (2018), entre el 8 y el 21% de la variabilidad de los resultados de una campaña de trigo es explicada por la combinación de variedad, fecha de siembra, espaciamiento entre hileras y densidad, en conjunto con el correcto manejo de los factores bióticos y abióticos que también tienen efecto en la productividad. Entonces, conocer la productividad media (adaptación) y probables variaciones de las diferentes variedades (estabilidad), es importante para reducir el error al seleccionar las variedades (Zuil, 2017). De esta manera, cuando el ambiente es bueno, es decir que no presenta limitaciones (nutricionales, por ejemplo), se buscará hacer un máximo aprovechamiento a través de la selección de variedades de alto potencial que expresen un mayor rendimiento en esos ambientes. Asimismo, para condiciones de producción

restrictivas (por ejemplo, factores abióticos estresantes), se deberían considerar variedades estables y adaptables a ambientes de bajo potencial (Brach y Zuil, 2018).

Dentro de los factores que afectan al cultivo de trigo se encuentran las variables climáticas, entre las cuales se destacan las precipitaciones, temperaturas, humedad relativa, radiación solar y heliofanía. Todas estas presentan, en mayor o menor medida, diferencias entre localidades o regiones, por lo cual es importante tenerlas en cuenta a la hora de analizar la estabilidad y adaptabilidad de los cultivares en cada sitio. Para el centro sur de Santa Fe, Natali *et al.* (2004) analizaron 6 campañas y concluyeron que las variables climáticas son las que más afectan al rendimiento del trigo y que en conjunto con las variables de suelo y manejo explican hasta un 70% en su variabilidad. Asimismo, estos autores afirmaron que la heliofanía fue un factor de gran impacto, representando un aumento de 397 kg ha⁻¹ por cada incremento de hora de luz diaria durante septiembre-octubre (fecha coincidente con el PC del cultivo), seguido por la humedad relativa durante estos meses, la cual provocó una disminución del rendimiento en 75 kg ha⁻¹ por cada punto de humedad. Por otro lado, Zilio *et al.* (2014) analizó el efecto de algunos factores climáticos en zonas semiáridas de la provincia de Buenos Aires y reportó que las variables que mejor explicaron la variación de los rendimientos del trigo fueron la precipitación durante el ciclo, la temperatura mínima media y la radiación solar acumulada durante el período crítico del cultivo, en orden de importancia.

Para el análisis de los cultivares y su interacción con el ambiente existen numerosas metodologías de acuerdo a las características de cada evaluación, entre las cuales se pueden mencionar: i) Procedimiento de variación de estabilidad de Shukla (1972), ii) Medida de rendimiento del cultivar de Lin y Binns (1988), iii) Análisis de regresión y coeficiente de Finlay y Wilkinson (1963), iv) Desviación de la regresión de Eberhart y Russel (1966), v) Ecovalencia de Wricke (1965) y vi) modelo AMMI de Gauch (1988). Purchase *et al.* (1997), comparó las metodologías mencionadas para cultivares de trigo en algunas regiones de Sudáfrica, recomendando el modelo AMMI para este tipo de evaluaciones. Con el mismo modelo, Rodríguez-González *et al.* (2011) analizaron la interacción GxA para evaluar la estabilidad de rendimiento de trigo en Mexicali (Baja California, México), ya que según Crossa *et al.* (1990) les permitía no solo estimar la estabilidad, sino también contrastar localidades y clasificar ambientes.

Estos también sugieren el modelo AMMI para analizar cereales de grano pequeño como el trigo, al considerar que con este se interpreta mejor la interacción GxA debido a la identificación del comportamiento mediante gráficos de tipo biplot, aunque encontraron la necesidad de recurrir a otros modelos para evaluar rendimiento en grano, sus componentes y fuerza de gluten.

De esta manera, las metodologías y procedimientos mencionadas se pueden llevar a cabo para analizar la estabilidad y/o adaptabilidad de diferentes variedades, ya sea de manera particular o agrupándolos por características en común. Di Salvo *et al.* (2021) realizaron un análisis multiambiental de maíz para tres estados de Estados Unidos, donde los genotipos fueron agrupados de acuerdo a la madurez relativa de los mismos, para luego generar distintos grupos cada tres unidades y promediar el rendimiento entre los híbridos dentro de cada grupo. Por otro lado, Natali *et al.* (2004), analizaron factores climáticos, de suelo y de manejo que afectan el rendimiento en cultivares de trigo para el centro sur de Santa Fe, destacando que el ciclo de los mismos no mostró diferencias significativas en el rendimiento y que las variables climáticas fueron las más asociadas con el rendimiento del trigo.

A nivel nacional se realiza cada año la evaluación de cultivares comerciales de trigo, por medio de la Red de ensayos comparativos de variedades de trigo pan (RET), coordinada por el Instituto Nacional de Semillas (INASE) y realizada por INTA. Dicha red posee actualmente 26 localidades, entre las cuales se encuentran Rafaela y Oliveros en la región 2, Venado Tuerto y Marcos Juárez en la 7, Reconquista en la 17 y Pergamino integra la 3 (Abbate *et al.*, 2021). La RET tiene como objetivos evaluar el comportamiento agronómico de las variedades de diferente largo de ciclo, su sanidad y rendimiento en grano para determinar la adaptabilidad y potencial productivo de los cultivares para cada zona (Rosetti *et al.*, 2020a). Las fortalezas de esta red que mencionan Lanzillotta y Terrile (2018) son: i) continuidad en la generación de información, ii) protocolización de los ensayos, iii) auditorías de seguimiento por parte del INASE, iv) gratuidad para los obtentores de las variedades y v) de libre acceso a la web.

Diversos trabajos y conclusiones se realizaron a partir de los resultados de la RET en las diferentes regiones del país. Estas investigaciones se basan en el análisis por localidad, campaña, variedades comerciales o la conjunción de algunos de estos. Brach

y Zuil (2018), analizaron cultivares de ciclo corto para la zona de Reconquista mediante el método de regresión lineal adaptado de Finlay & Wilkinson (1963) para estimar adaptabilidad y posteriormente utilizaron el rendimiento versus el coeficiente de variación (CV) (Abbate *et al.*, 2010) para conocer la estabilidad de las variedades. Rosetti *et al.* (2020b), en Rafaela, realizaron análisis de estabilidad y productividad para fechas de siembra óptima y tardía en 5 campañas (2014-2019), también a través del rendimiento relativo y el CV. Con estos análisis pudieron detectar diferentes cultivares de buen comportamiento productivo, ya sea para ambientes de baja o de alta productividad. En Santiago Del Estero, Romani *et al.* (2020) analizaron el rendimiento y estabilidad de 9 cultivares comerciales durante 7 campañas con el modelo Shukla (1972). Con este análisis resaltaron el rendimiento y la buena estabilidad de dos cultivares de CC y otros dos de CL más inestables.

Si bien es conocido que los cultivares tienen adaptaciones sitio-específicas a los distintos ambientes de producción, falta información para conocer la estabilidad y adaptabilidad de trigo de diferentes ciclos en el centro del país. Así, el objetivo del presente trabajo es realizar un análisis multiambiental del cultivo de trigo pan (*Triticum aestivum* L.) en la región central de Argentina desde la campaña 2005/06-2019/20, para evaluar la estabilidad y adaptabilidad del cultivo en cada ambiente según al largo del ciclo de los cultivares, en conjunto con un análisis de las variables ambientales de las localidades en estudio. Los resultados podrían ser utilizados como una herramienta que contribuiría a mejorar la toma de decisión del cultivar a seleccionar en relación al ambiente en el que se va a producir para potenciar, de esta manera, el aprovechamiento de recursos de cada sitio productivo.

1.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO

- a. En la región central de Argentina, los cultivares de ciclo largo son más estables que los más cortos debido a que pueden aprovechar mejor las precipitaciones durante el ciclo.
- b. La estabilidad y adaptabilidad de las variedades dependen de las características climáticas de cada región triguera.

OBJETIVOS

1.2. OBJETIVO GENERAL

Evaluar, para la región central de Argentina, la productividad del trigo pan, su estabilidad y adaptabilidad a cada ambiente de acuerdo al ciclo de los cultivares, durante las campañas 2005/06 hasta 2019/20, considerando también las variables climáticas de cada localidad.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer modelos de análisis de estabilidad y adaptabilidad para el cultivo de trigo en esta región.
- Identificar qué variable tiene mayor influencia en la discriminación del rendimiento a través de una caracterización climática de cada ambiente de evaluación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. DESCRIPCIÓN DE BASES DE DATOS ANALIZADAS

Se utilizó la base de datos de la Red Nacional de ensayos comparativos de rendimiento de cultivares de Trigo Pan (RET) disponible en la página oficial del Instituto Nacional de Semillas (INASE). Se seleccionaron seis localidades, entre las latitudes 29°08' S y 33°53' S de Argentina, correspondientes a las nuevas subregiones trigueras 2, 3, 7 y 17 (Abbate *et al.*, 2021), con la finalidad de generar un ambiente para cada localidad y año. Para ello, se realizó el análisis de 38 campañas distribuidas en estas localidades participantes de la RET (Tabla 1).

Tabla 1. Localidades y su correspondiente sub-región, coordenadas geográficas, tipo de suelo, cultivo antecesor, cantidad de campañas analizadas y tamaño de parcelas para cada localidad.

Localidad	Sub-región	Coordenadas geográficas	Tipo de suelo	Antecesor	Campañas	Tamaño de parcelas (m)
Reconquista	17	29°08'40"S 59°38'38"O	Argiudol acuértico	Girasol/ Maíz	3	1,4 x 6
Rafaela	2	31°16'00"S 61°29'00"O	Argiudol típico	Soja	6	1,4 x 5
Marcos Juárez	7	32°42'00"S 62°06'00"O	Argiudol típico	Soja	9	1,4 x 5
Pergamino	3	33°53'01"S 60°34'01"O	Argiudol típico	Soja/Girasol	12	1,4 x 5,5
Venado Tuerto	7	33°45'00"S 61°58'00"O	Argiudol acuértico	Barbecho/ Girasol	7	1,4 x 5,5
Oliveros	2	32°34'00"S 60°51'00"O	Argiudol típico	Soja	1	1,4 x 6,5

La base de datos climática se confeccionó a partir de registros históricos extraídos de estaciones agrometeorológicas de INTA, correspondientes a las localidades evaluadas, disponible en la plataforma online del Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica (SIGA). Los datos diarios obtenidos fueron temperatura mínima y máxima, precipitaciones y radiación global. Más allá de la importancia que tiene la heliofanía en este cultivo, no se utilizó esta variable por ausencia de datos en las bases de las estaciones agrometeorológicas. En la localidad de Venado Tuerto se utilizó la

estación meteorológica completa más cercana correspondiente a Villa Cañas, ubicada a 51 km del sitio, debido a que esta localidad no posee estación propia. Se buscó la información de temperatura, precipitaciones y radiación acumulados en el tiempo a partir del año 2005 para acotar la base de datos de la RET.

2.2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS INDIVIDUALES

El diseño experimental utilizado en los experimentos correspondió al mencionado en el protocolo de la RET. En resumen, se trató de bloques completos al azar divididos en 3 repeticiones. Las unidades experimentales fueron microparcels con un tamaño de 1,4 m (7 surcos a 0,2 m entre líneas) y entre 5 y 6,5 m de largo según la localidad (Tabla 1). Se utilizó la escala Zadoks *et al.* (1974) para registrar las fechas de los eventos fenológicos más importantes, como fecha de espigazón (Zadoks 5.5), anthesis (Zadoks 6.0) y madurez fisiológica (Zadoks 8.6).

Todos los ensayos se mantuvieron libres de insectos y malezas mediante su monitoreo y en caso de ser necesario control químico. También fueron fertilizados a la siembra y en macollaje según los requerimientos de cada ambiente, de manera que las variedades evaluadas no tuvieron limitantes nutricionales y pudieran expresar su potencial de rendimiento de acuerdo a las condiciones ambientales del año. Se calculó el promedio de rendimiento para cada variedad, considerando solamente los sitios sin fungicida.

2.3. ANÁLISIS DE DATOS

Se confeccionó una planilla general con la información proveniente de la página oficial del INASE, incluyendo a todas las localidades y subdividiéndolas de acuerdo a la subregión triguera correspondiente. Se realizó un análisis de dispersión de la información para detectar datos extremos y erróneos (outliers) los cuales se omitieron del análisis (no identificados como comportamientos diferenciales sino errores de tipeo o carga).

Se separó la base de datos de acuerdo al ciclo de los cultivares en CL, CC y CI. La cantidad promedio de variedades por ciclo fueron 441, 327 y 964, respectivamente.

La caracterización de cada cultivar se obtuvo en base al registro de cultivares del INASE. Aquellos cultivares mencionados en INASE como intermedios-largos e intermedios-cortos, se consideraron como intermedios.

Para el caso de las precipitaciones se tomó el valor acumulado durante el ciclo del cultivo. Estos valores se calcularon para el período de días promedio desde la siembra a madurez fisiológica de cada ciclo por localidad. Para Venado Tuerto, el largo total del ciclo se tomó como los días promedio de siembra a floración más 40 días, ya que no hubo registro de días a madurez fisiológica (F-MF).

Se estudió la variabilidad del rendimiento para cada localidad y ciclo, sus máximos, mínimos y promedios a través de diagramas de cajas tipo *Box-Plot*, en el cual se graficó el rendimiento (kg ha^{-1}) para cada la campaña agrícola, donde cada caja representa un ciclo diferente.

Siguiendo la metodología propuesta por Di Salvo *et al.* (2021) se analizaron estadísticamente los datos utilizando modelos lineales generales y mixtos. Se utilizó como variable respuesta el rendimiento de granos (kg ha^{-1}), mientras que el ambiente, ciclo y cultivar se tomaron como criterios de clasificación. Los efectos fijos fueron el ciclo, ambiente y su interacción, mientras que los cultivares y las repeticiones se colocaron como efectos aleatorios. Se realizaron comparaciones de medias de los efectos fijos, la raíz cuadrada de la varianza promedio para la diferencia de medias y la diferencia mínima significativa promedio (DMS, $p < 0.05$).

2.3.1. Análisis del diferencial de rendimiento

Para evaluar estabilidad en base a Abbate *et al.* (2020), se analizó el diferencial de rendimiento porcentual (DRTO, Ec. 1) con el coeficiente de variación (CV, Ec. 2).

$$\text{Ec. [1]: } DRTO_{ij} = (RTO_{ij} - RTO_j) / RTO_j * 100$$

Donde $DRTO_{ij}$ es el diferencial de rendimiento porcentual del ciclo i en el ensayo j , RTO_{ij} es el rendimiento del ciclo i y RTO_j es el rendimiento promedio del ensayo.

$$\text{Ec. [2]: } CV (\%) = (\sigma / \bar{x}) * 100$$

Donde CV es el coeficiente de variación, σ la desviación estándar y \bar{x} la media del conjunto de datos, medida en porcentaje.

Se calculó el DRTO (%) con los datos de rendimiento promedio en base a dos criterios i) por año y localidad y, ii) por año y subregión triguera (Abbate *et al.* 2020). De esta manera, se realizaron gráficos de dispersión donde se puede apreciar cómo se comportaron los ciclos de acuerdo a la media de cada ambiente, así como la estabilidad que presentan en cada uno de acuerdo a su CV.

2.3.2. Análisis Shukla

Para el análisis de estabilidad se utilizó el coeficiente Shukla (1972). Se calculó el coeficiente Shukla mediante la Ec. 3.

$$Ec. [3]: Shu = (([s]*v)-CM \text{ interacción}) * r / ((v-2) * CME \text{ amalgamado})$$

Donde Shu es el coeficiente Shukla, s la varianza, v el número de variedades, r el número de repeticiones de los ensayos individuales, CM interacción cuadrado medio del error del ANOVA y CME amalgamado el cuadrado medio del error promedio de los cuadrados medios del error individuales.

De estos análisis se realizaron gráficos de dispersión para evaluar visualmente la estabilidad (Figura 1), confeccionando 4 figuras de relación entre rendimiento de cada: i) ciclo por localidad; ii) ciclo por subregión; iii) localidad y iv) subregión.

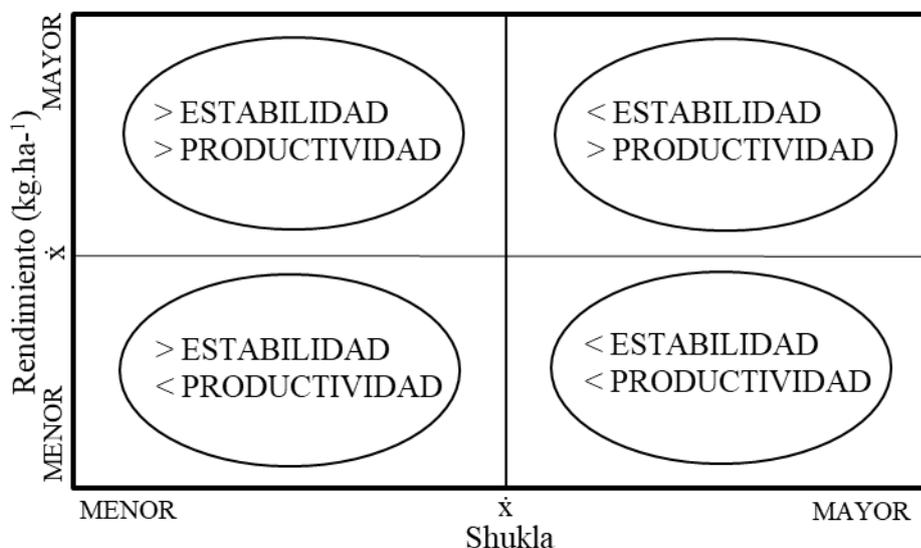


Figura 1. Esquema de interpretación gráfica entre el rendimiento y el coeficiente Shukla según tenga mayor o menor productividad y estabilidad.

Los genotipos ubicados en el cuadrante superior izquierdo son los que presentan una mayor estabilidad y alcanzan rendimientos superiores al promedio del ambiente, con menor variación durante todas las campañas evaluadas. Aquellos que se ubican en el sector inferior derecho tienen rendimientos por debajo del promedio del ambiente, con baja estabilidad debido a la gran variación que presentan entre campañas. Los ciclos ubicados en el cuadrante superior derecho son los que tienen rendimientos superiores a la media del ambiente, pero con una mayor variabilidad entre campañas, mientras que aquellos ciclos presentes en el inferior izquierdo poseen mayor estabilidad entre campañas, pero rendimientos menores al promedio.

2.3.3. Análisis de índice ambiental linealmente ajustado

Los análisis de estabilidad por sí solos no brindan mucha información si no son acompañados por un análisis de adaptabilidad, el cual indica si el ciclo expresa o no su potencial a determinados ambientes. Para ello se recurrió a un Análisis de Índice Ambiental Linealmente Ajustado siguiendo la metodología de Finlay y Wilkinson (1963), donde se calcularon los índices ambientales (IA) para cada ambiente y ciclo. Se establecieron regresiones lineales entre el rendimiento promedio de cada repetición y el IA correspondiente (Figura 2). De manera similar a los análisis anteriores, primero se realizaron regresiones por localidad y luego por subregión.

Siguiendo la línea de isorendimiento, un valor de pendiente igual a 1, indica que el rendimiento del ciclo es igual al del ambiente, cuando es menor a 1, el ciclo rinde más que el promedio en sitios de menor calidad, pero menos en ambientes de alta productividad. Contrariamente, si alcanza valores mayores a 1, indica que el ciclo explora rendimientos superiores al promedio en ambientes de alto potencial y una productividad menor al promedio en sitios de bajo potencial.

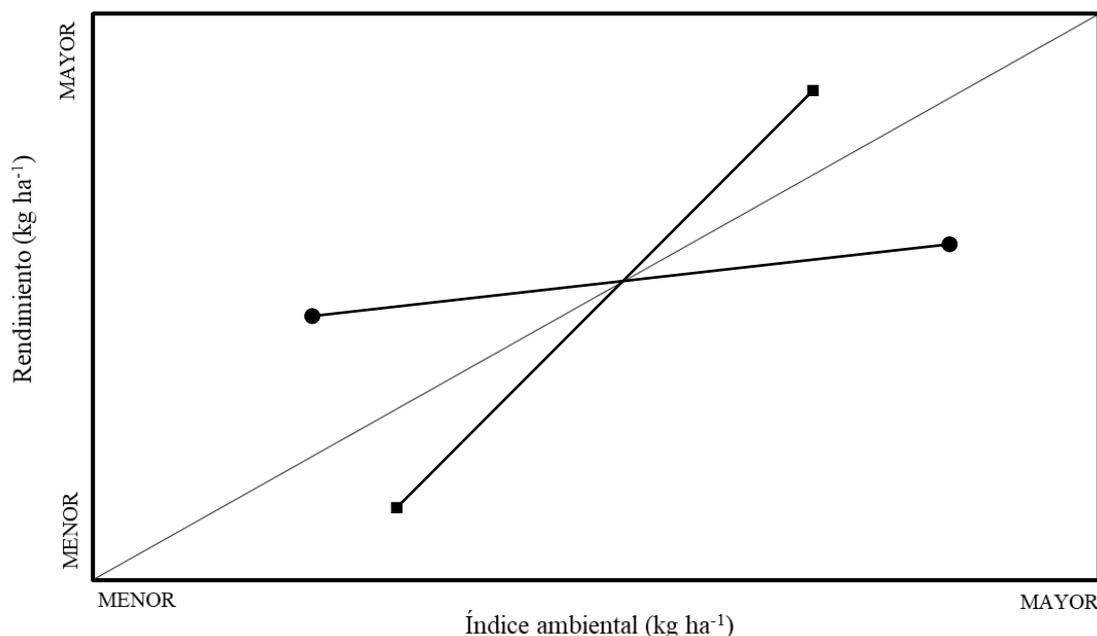


Figura 2. Esquema de interpretación gráfica del índice ambiental versus rendimiento. La línea continua diagonal representa la línea de isorendimiento, con pendiente igual a 1. La línea con círculos en sus extremos representa una pendiente menor a 1 y la línea con cuadrados en los extremos indica una pendiente mayor a 1.

2.3.4. Análisis de componentes principales

Los datos que se utilizaron para asociar y relacionar las variables climáticas con el rendimiento fueron la temperatura (media, máxima y mínima), precipitaciones y radiación solar durante el ciclo del cultivo y por localidad o subregión. No se incluyó la localidad de Venado Tuerto debido al gran desbalance de datos. La metodología que se utilizó fue el análisis de componentes principales. Estos son combinaciones lineales de las variables que pueden interpretarse como índices con máxima varianza, constituyendo nuevos ejes de representación de la variabilidad. Se usaron gráficos de tipo biplots para la representación gráfica de las correlaciones, ya sea para el análisis por subregión como por localidad. En estas figuras bidimensionales se muestran tantos puntos como ambientes en estudio hay y tantos vectores como variables, donde las variables que forman un ángulo de 90° o 180° entre ellas no poseen correlación. Contrariamente, si forman un ángulo agudo (menos de 90°) u obtuso (más de 90°) tienen correlación positiva o negativa, respectivamente. Por otro lado, la distancia al punto central indica el

aporte de la variable a la dispersión de los datos, donde aquellos ubicados a mayor distancia aportan más a la variabilidad. Los vértices del contorno indican cuál es el ciclo que tuvo mejor comportamiento para cada región.

Se colocó como variable al rendimiento, temperaturas, precipitación y radiación, siendo el ciclo y la subregión los criterios de clasificación. A su vez, se realizaron regresiones lineales por subregión para evaluar cuál fue la variable climática que afectó al rendimiento en mayor medida para cada sitio.

Todos los análisis estadísticos de ANOVA y regresiones lineales se realizaron con el software Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2020) y R, la comparación de medias se llevó a cabo mediante LSD Fisher con un nivel de significancia de $p < 0,05$.

3. RESULTADOS

3.1. VARIABILIDAD DEL RENDIMIENTO POR CAMPAÑA

El rango total de rendimiento estuvo comprendido entre 463 y 9083 kg ha⁻¹. En Oliveros sólo hubo una campaña analizada, pero se compensó con las otras localidades debido a que forma parte de la misma subregión.

Al analizar los datos de rendimiento por unidad de superficie se encontró una interacción significativa entre el ciclo de los cultivares y el ambiente ($p < 0,05$), con un R^2 de 0,72, el cual es un valor confiable para continuar con los análisis de estabilidad y adaptabilidad (Tabla 2). La presencia de una interacción significativa indica estadísticamente que los ciclos tienen diferentes rendimientos según el ambiente donde se desarrollen.

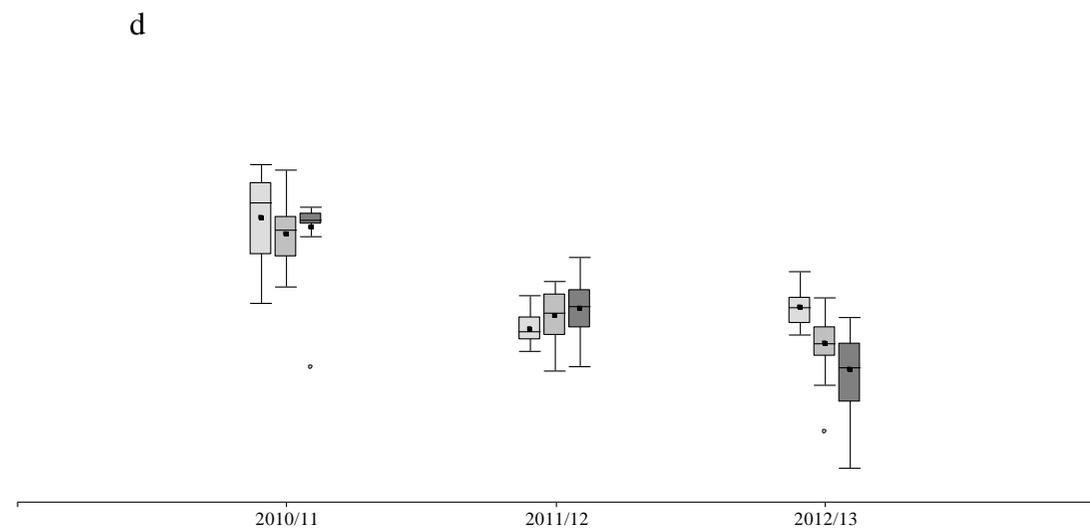
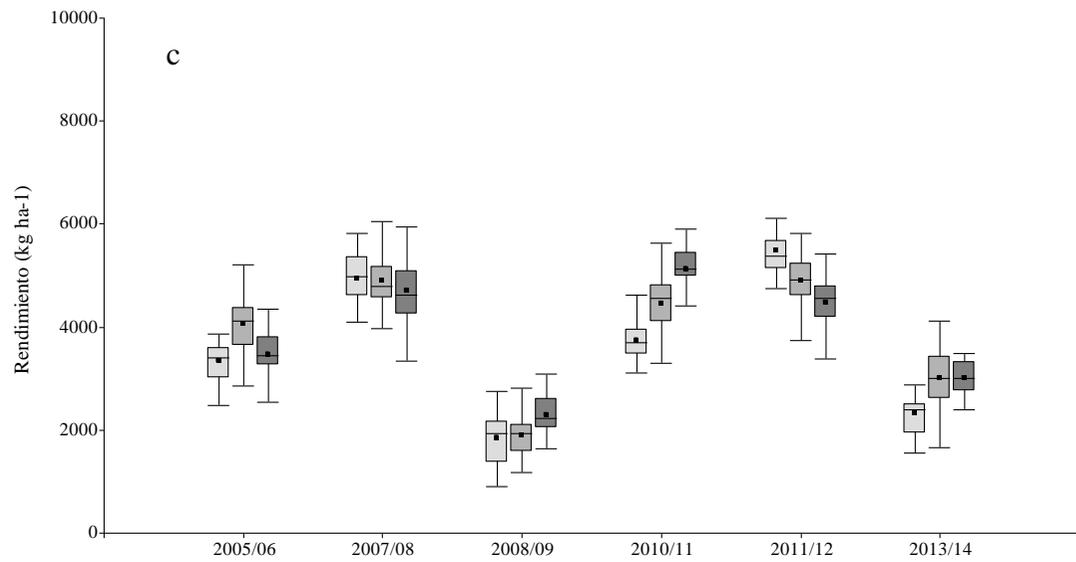
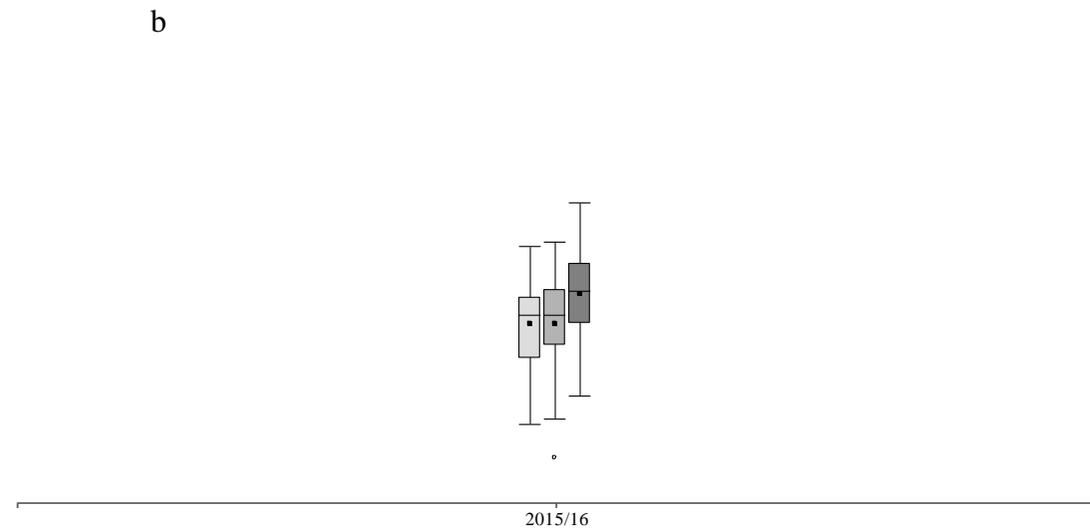
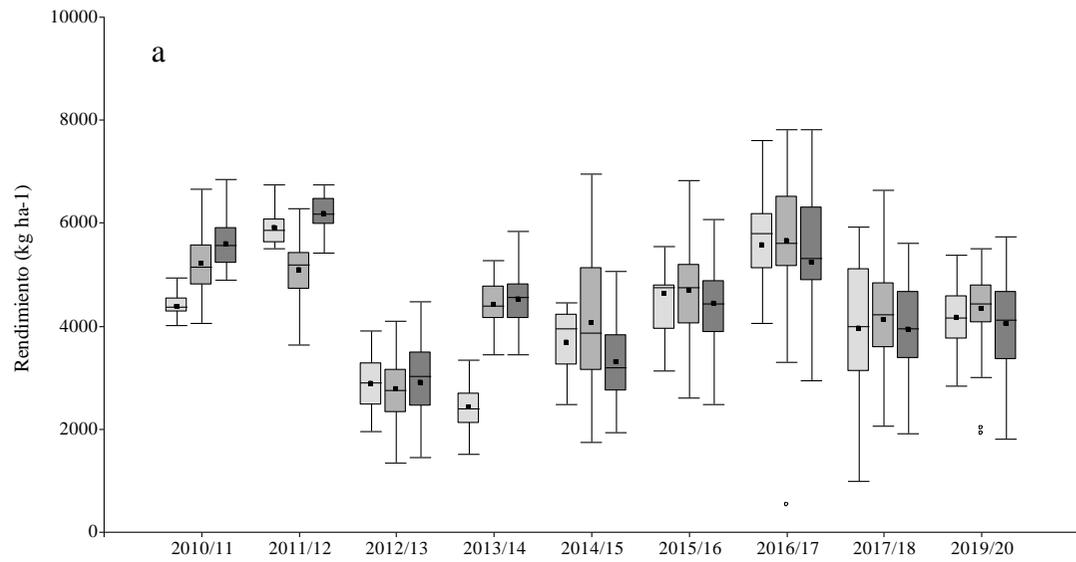
Tabla 2. Medidas de ajuste del modelo lineal general y mixto para evaluación de interacción GxA con su prueba de hipótesis marginal (SC tipo III).

Medidas de ajuste del modelo				
N	AIC	BIC	R2 0	R2 1
3994	62589,62	63316,20	0,62	0,72

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)			
	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	14386,21	<0,0001
Ciclos	2	25,07	<0,0001
Ambientes	37	155,83	<0,0001
Ciclos*Ambientes	74	10,94	<0,0001

En los resultados que se muestran en la Figura 3, las localidades Pergamino y Marcos Juárez tuvieron una mayor cantidad de campañas analizadas (12 y 9, respectivamente). Por el contrario, en Oliveros quedó una sola campaña que se analizó, la cual tuvo alta variabilidad en sus datos de rendimiento (rango desde 862 a 5769 kg ha⁻¹).



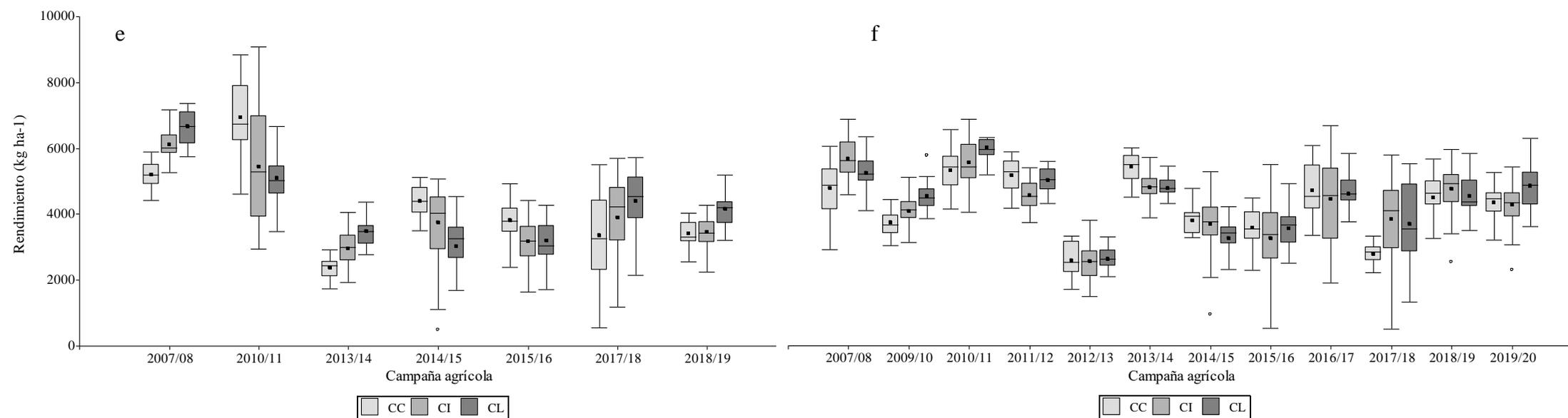


Figura 3. Rendimiento del cultivo (kg ha^{-1}) para las localidades de a) Marcos Juárez; b) Oliveros; c) Rafaela; d) Reconquista; e) Venado Tuerto y f) Pergamino, para cada campaña agrícola y ciclo (CC, CI y CL). El punto representa la media para cada ciclo. La línea horizontal que posee cada caja es la mediana. Los límites de la caja señalan el Q1 y Q3. Las líneas verticales delimitan los máximos y mínimos de los datos. Los puntos sin fondo indican valores extremos.

3.2. ESTABILIDAD DE CICLOS POR AMBIENTE

En cuanto al análisis de la estabilidad (Figura 4), en la localidad de Rafaela, los cultivares de CI y CL se comportaron mejor que los de CC ya que alcanzaron mayores rendimientos y estabilidad. Por el contrario, en Reconquista, los ciclos más estables y de más rendimiento fueron los CC, mientras que para Pergamino y Marcos Juárez los CL y CI, respectivamente.

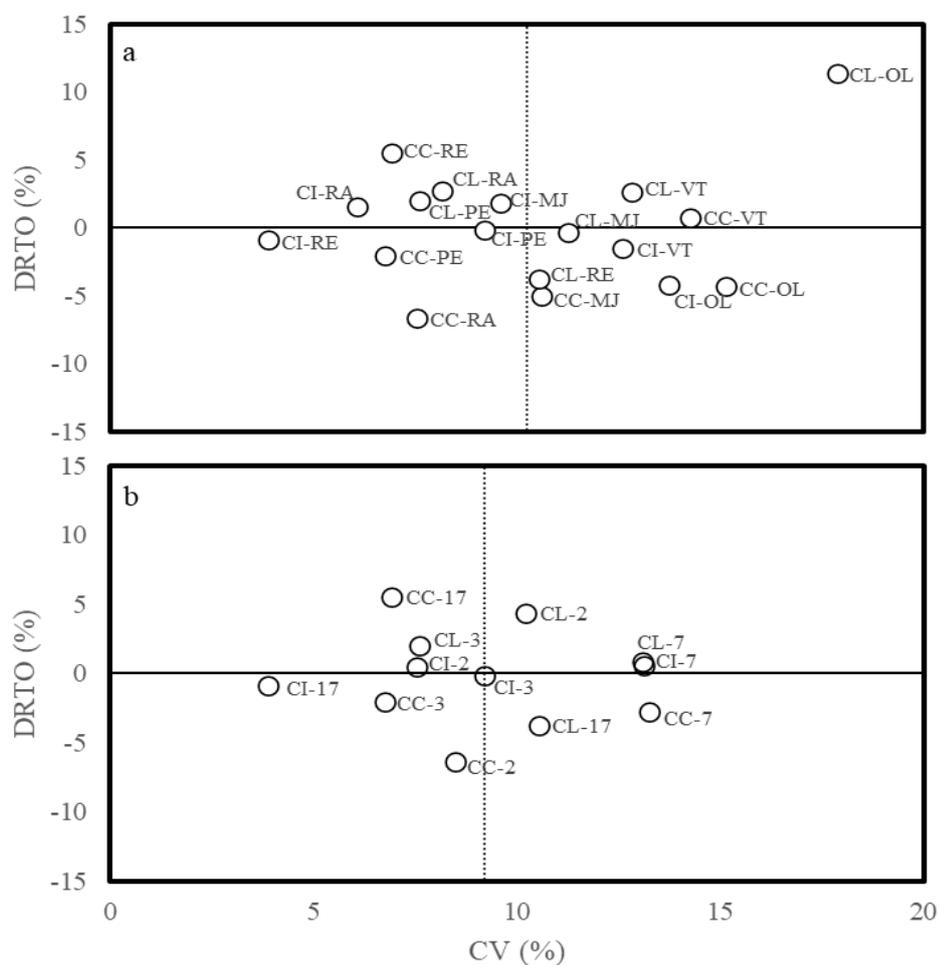


Figura 4. Diferencial de rendimiento porcentual (DRTO, en %) en función del coeficiente de variación (CV, en %) para cada a) ciclo por localidad; b) ciclo por subregión triguera. La línea horizontal indica el DRTO (%) promedio y la línea punteada vertical el CV (%) promedio. CC= ciclo corto; CI= ciclo intermedio; CL= ciclo largo; RA= Rafaela; RE= Reconquista; PE= Pergamino; MJ= Marcos Juárez; VT= Venado Tuerto y OL= Oliveros. Los números de la figura b corresponden a cada subregión triguera.

En Oliveros y Venado Tuerto todos los ciclos se comportaron de manera inestable, siendo los CL aquellos que presentaron mayores rendimientos, factibles de utilizar en ambientes de alto potencial productivo. Los CI en Reconquista, Rafaela y Oliveros podrían ubicarse en lotes de menor potencial productivo, donde el objetivo principal sea obtener producciones estables entre las campañas.

Al analizar los ciclos por subregión el comportamiento es similar al que se vio por localidad, donde Oliveros, al agruparse con Rafaela en la subregión 2, mostró mayor estabilidad. Contrariamente, Marcos Juárez mostró menor estabilidad al incluir a Venado Tuerto en la subregión 7.

En el análisis de Shukla (Figura 5), los valores resultaron elevados debido a que se analizaron 15 años de datos distribuidos en 6 localidades con sus respectivas fechas de siembra. Así, los ciclos, localidades o subregiones que poseen menor coeficiente Shukla son los que presentan mayor estabilidad, siendo aquellos que se encuentran por encima de la línea punteada horizontal los que tuvieron rendimientos superiores a la media general.

En estos gráficos se pudo conocer que los CL son los que alcanzan un mayor rendimiento, independientemente del análisis, pero los CI poseen más estabilidad. En general, los CC son los de menor rendimiento y más inestables. Al analizar por localidades se observó que las más productivas fueron Marcos Juárez y Pergamino, superando el promedio general, mientras que Oliveros fue la de menor rendimiento, considerando que en esta última se analizó una sola campaña. Resulta interesante destacar como la localidad de Reconquista poseyó mayor productividad y estabilidad que Rafaela y Oliveros, seguramente debido a el set de datos analizados en cada localidad, siendo mayor para Rafaela. Esto se puede deber a que, más allá del mayor potencial productivo que tienen Oliveros y Rafaela, las tres campañas utilizadas en este trabajo para Reconquista tuvieron buenos acumulados hídricos a lo largo del ciclo del cultivo. En el análisis por subregión el comportamiento es similar al realizado por localidad, donde Oliveros se agrupa con Rafaela en la subregión 2 y Venado Tuerto con Marcos Juárez en la subregión 7.

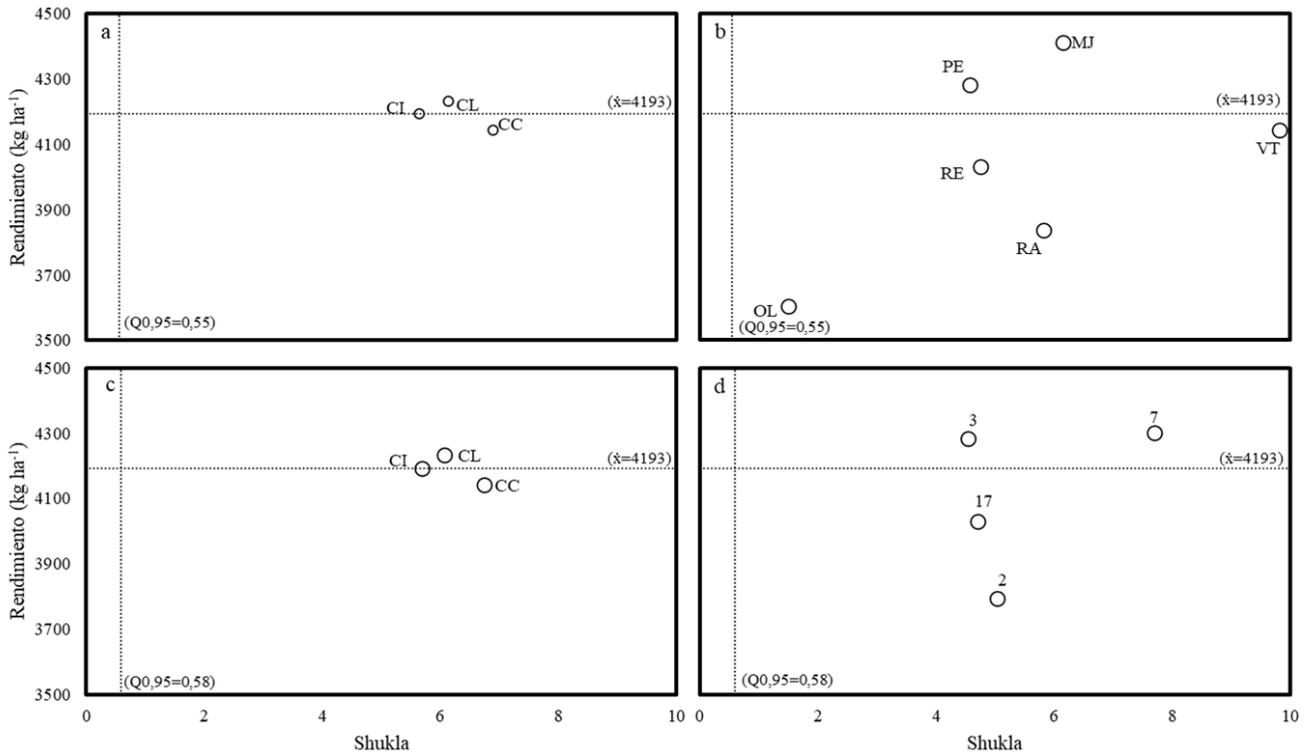


Figura 5. Rendimiento en función del coeficiente Shukla para a) ciclos por localidad; b) localidad; c) ciclos por subregión; d) subregión. La línea punteada horizontal indica el promedio general de rendimiento de todos los ensayos. La línea punteada vertical indica el valor F de Snedecor al 5% de probabilidad. Los números de la figura 'd' corresponden a las subregiones trigueras. CC= ciclo corto; CI= ciclo intermedio; CL= ciclo largo; RA= Rafaela; RE= Reconquista; PE= Pergamino; MJ= Marcos Juárez; VT= Venado Tuerto y OL= Oliveros.

3.3. ADAPTABILIDAD DE LOS GENOTIPOS AL AMBIENTE

Los 3 ciclos siguieron la misma tendencia de mostrar rendimientos similares al índice ambiental (Figura 6), en un análisis donde se explicó más del 78% de la variabilidad de los datos. De acuerdo a los coeficientes de la Tabla 3 se logró conocer que estas localidades se comportan prácticamente igual que la subregión a la cual pertenecen, por lo tanto, no sería necesario analizar cada sitio en particular para evaluar adaptabilidad de cada ciclo. Las pendientes no tuvieron diferencias significativas entre sí, tanto entre ciclos como entre localidad y subregión, lo cual indica que el largo del ciclo no determina la adaptabilidad de los cultivares para cada ambiente. En este análisis se muestra que los CL y los CC tienen podrían adaptarse mejor a ambientes de alto potencial, lo cual está principalmente marcado por el ajuste de ciclos por fecha de siembra, donde se seleccionan CC ante retrasos en la siembra. Por otro lado, la pendiente de los CI indica que estos son los que se adaptarían a ambientes de calidad inferior.

Tabla 3. Estadísticos asociados para cada ciclo y tipo de análisis de adaptabilidad.

Ciclo	Análisis	Pendiente	E.E.	ECM (miles)	R ²	p-valor
Cortos	Localidad	1,04	0,09	294,7	0,78	<0,0001
	Subregión	1,02	0,08	196,2	0,84	<0,0001
Intermedios	Localidad	0,98	0,03	26,7	0,97	<0,0001
	Subregión	0,98	0,03	23,5	0,98	<0,0001
Largos	Localidad	1,01	0,06	144,2	0,87	<0,0001
	Subregión	1,03	0,06	120,3	0,9	<0,0001

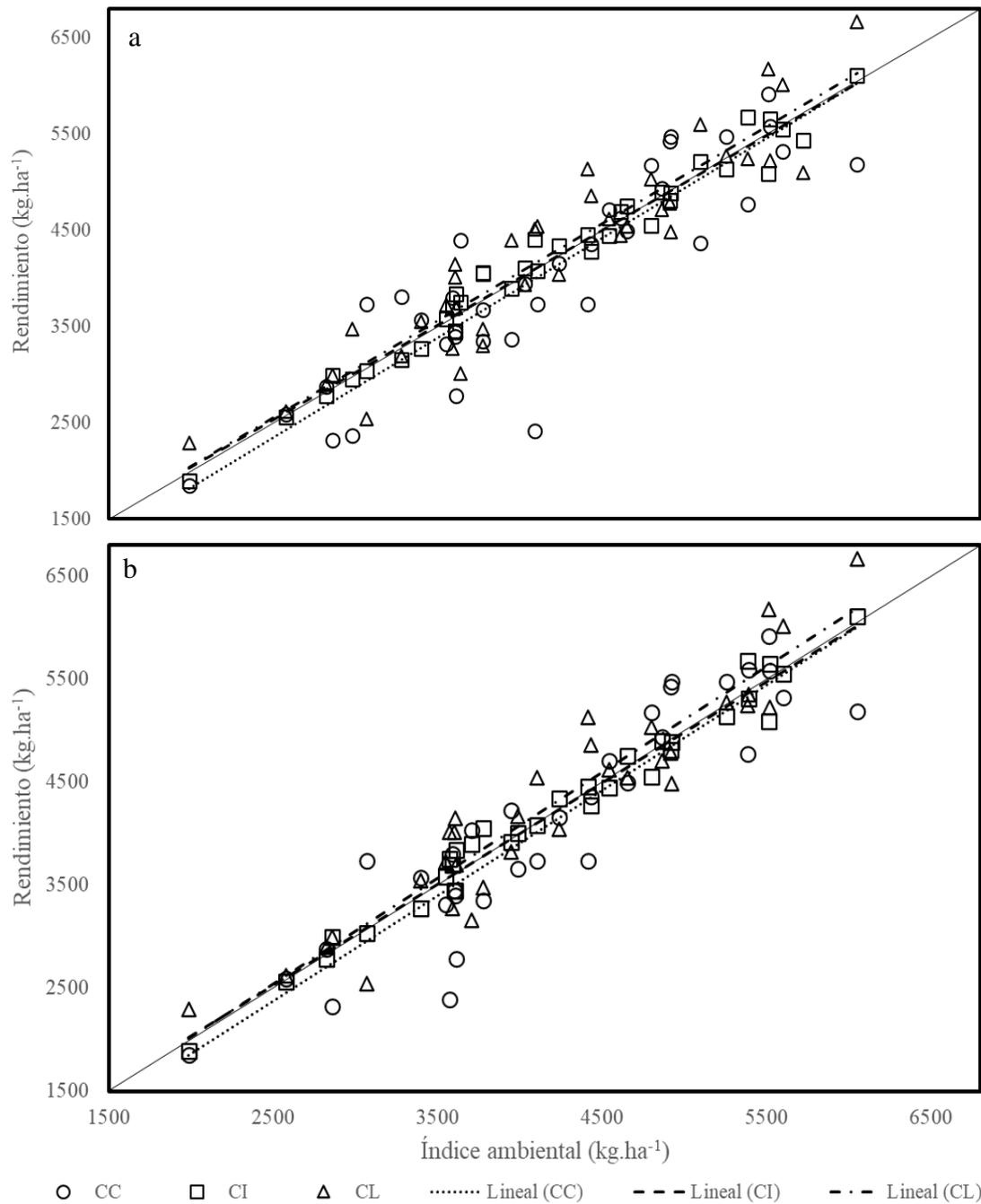


Figura 6. Rendimiento en función del índice ambiental para cada: a) localidad y b) subregión. La línea continúa diagonal corresponde a la línea 1:1 o línea de isorendimiento. Los círculos corresponden a ciclos cortos (CC), los cuadrados a los intermedios (CI) y los triángulos a los largos (CL).

3.4. VARIABLES CLIMÁTICAS QUE AFECTAN AL RENDIMIENTO

En cuanto al análisis de componentes principales por subregiones (Figura 7a), la CP1 separó principalmente las subregiones 3 y 2 de las 7 y 17, la mayor parte de los CL a la izquierda y CC a la derecha, que explicó el 52,6% de la variabilidad de los datos, mientras que la CP2 sectorizó las subregiones 3 y 17 de la 2 y 7, explicando un 21,9% de la dispersión de los datos. Asimismo, para el análisis por localidad, la CP1 agrupó principalmente a los CL, y por otro lado a los CC y CI en su mayoría, sin establecer un patrón definido de separación en cuanto a la localidad, explicando un 51% de la variabilidad de los datos. La CP2 sectorizó por un lado Marcos Juárez, Rafaela y los CC de Reconquista y Pergamino, colocando los restantes en la otra zona, con un 22,6% de explicación de la dispersión de los datos.

En el análisis por subregión se observa una correlación positiva entre el rendimiento y el volumen de precipitaciones acumulado durante el ciclo del cultivo. Asimismo, se detectó una correlación negativa de las temperaturas máximas con el rendimiento. También se puede ver la falta de correlación entre las variables precipitación, radiación y temperaturas, lo cual resulta lógico debido a la naturaleza de cada variable. En líneas generales, de las variables climáticas analizadas, la que más aporta a la variabilidad de los datos son las precipitaciones, indicado en el gráfico por la longitud del vector de esta con respecto al punto central, la cual es mayor que el efecto de las temperaturas y radiación.

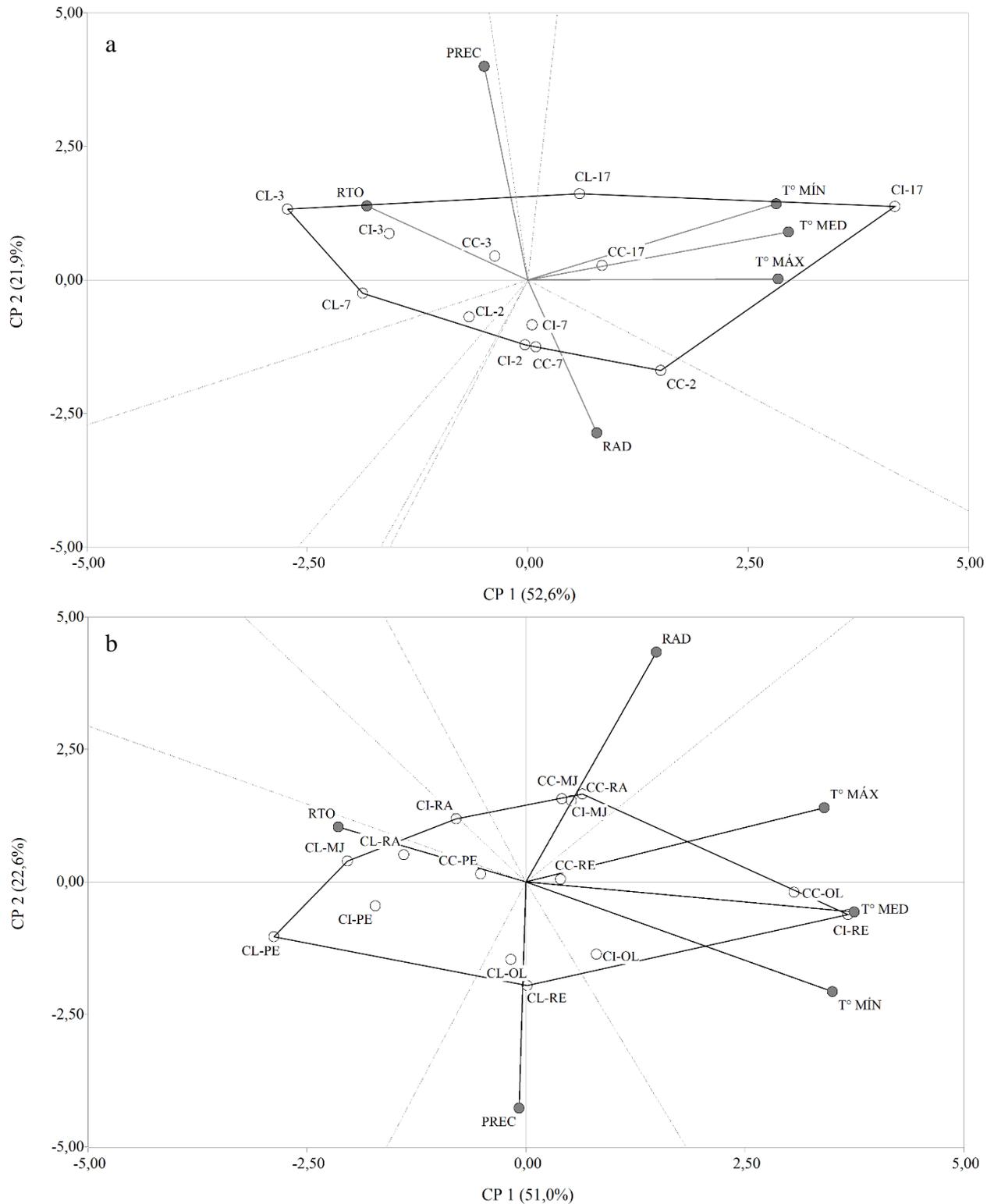


Figura 7. Análisis de componentes principales para cada ciclo por subregión (a) y localidad (b). Los números de la figura a corresponden a las subregiones trigueras. Donde CC son los ciclos cortos, CI los intermedios y CL los largos, siendo las variables el rendimiento (RTO), precipitaciones (PREC), radiación (RAD), temperaturas medias (T° MED), máximas (T° MÁX) y mínimas (T° MÍN). Las localidades evaluadas fueron Rafaela (RA), Reconquista (RE), Oliveros (OL), Venado Tuerto (VT), Marcos Juárez (MJ) y Pergamino (PE).

Para el análisis por localidad los resultados indican que se pierde cierta correlación entre el rendimiento y las precipitaciones, radiación y temperatura mínimas, con una asociación negativa entre el rinde y temperatura máxima. En este caso, al evaluar la distancia de los datos con respecto al centro, la temperatura media es la variable que más aporta a la dispersión de los datos. Observando los vértices que quedan definidos por el contorno se destaca el comportamiento de los CI para Reconquista y Rafaela, de los CL para Pergamino y Marcos Juárez y de los CC para Oliveros.

Al hacer un análisis mediante regresión lineal múltiple se puede conocer cuál de estas variables afecta significativamente al rendimiento y dentro de ellas la que más influye para cada localidad. En la Tabla 4 se muestran las variables significativas, cuyos valores de los estadísticos corresponden a la segunda corrida del modelo. Esto hace que el p-valor y R^2 tengan valores diferentes a los del primer análisis, debido a que el CM de las variables no significativas se suman al CME de las significativas en la segunda corrida del modelo.

Tabla 4. Error estándar (EE), CpMallows, p-valor y R^2 del modelo para cada variable y subregión triguera.

Subregión	Variable	EE	Cp Mallows	P-valor	R^2
2	T° MÁX	342,14	18,69	0,0008	0,67
	RAD	183,27	7,39	0,0329	
3	PREC	0,59	33,18	0,0001	0,68

Para la subregión 2, la variable climática que más explica la variabilidad del set de datos es la temperatura máxima seguida por la radiación, lo cual indicaría la importancia de eventos de golpes de calor, es decir, días con temperaturas superior a 30 - 35 °C, mientras que para la subregión 3 lo son las precipitaciones. Esto se muestra en la Tabla 4 observando los valores de CpMallows de cada variable, ya que mientras más alto sea este, mayor es su aporte a la variabilidad de los datos.

Así, para zonas de gran potencial como Pergamino, el efecto de las precipitaciones tiene efecto significativo, posiblemente por los suelos profundos de esta región que permiten que esta variable tenga un gran aporte al rendimiento. De acuerdo al análisis de regresión lineal múltiple, en localidades como Marcos Juárez, esta variable no tiene efectos significativos en el rendimiento, lo cual es explicado en gran medida por la cercanía de la napa a las raíces y su aporte de agua mediante esta fuente. Rafaela y Oliveros poseen suelos profundos y fechas de siembra más temprana que el sur de las localidades en estudio. Por último, para Reconquista, la variación entre años fue mayor que el efecto puro que se buscó calcular, es decir, la variabilidad de ese ambiente es mayor a la de cada uno de los efectos ambientales. Esto se debe a que se trata de una zona de menor potencial, con muchas limitaciones tanto edáficas como climáticas, lo cual confluente en que ninguna variable analizada tenga efecto significativo en rendimiento.

4. DISCUSIÓN

El análisis multiambiental realizado sobre las bases de datos de la RET para estas localidades resultó efectivo para la evaluación del comportamiento de las variedades de trigo de acuerdo a su ciclo en cada región y localidad. Mediante las metodologías descriptas se pudo conocer el comportamiento de cada ciclo según el ambiente, considerando los efectos que generan sobre estos las variables climáticas en cada sitio. Tanto el análisis de CV (%) versus DRTO (%) como el análisis Shukla fueron efectivos para evaluar la estabilidad de ciclos por ambiente. Se debe tener en cuenta que estos análisis fueron realizados sobre una base de datos donde ciertas decisiones de manejo como la fecha de siembra pueden variar para cada ciclo, ya que en muchos casos la siembra se adaptó a las condiciones hídricas o logísticas de cada año y localidad. Además, en este trabajo no se tuvieron en cuenta las lluvias anteriores a la siembra del ensayo, las cuales pueden condicionar los resultados sabiendo que el agua útil inicial es un parámetro de extrema importancia en trigo, ya que, para estas regiones, su ciclo se desarrolla en los meses donde la oferta hídrica por medio de las precipitaciones es muy inferior a la demanda de los cultivos estivales. Para ello sería interesante tener el dato de agua útil a la siembra o los datos de lluvias durante el mes de abril. Para estos casos se consideraron fechas de siembra promedio de las registradas en la RET para cada ciclo, pero hay que contemplar que un cambio en este manejo puede generar variaciones en los acumulados de los factores climáticos y el ambiente fototermal que exploran. Otro aspecto a considerar es la diferencia en la cantidad de campañas analizadas ya que, para una localidad, al tener mayor cantidad de campañas, el número de ambientes donde se prueban los cultivares aumenta y de la misma manera lo hace la confiabilidad de la estadística. Esto se puede ver comparando localidades como Pergamino, donde hay un set de 12 campañas, mientras que en Oliveros no se logró encontrar más de un ensayo comparativo de rendimiento en la cual se desarrollen los 3 ciclos.

En este trabajo se encontró interacción entre el ciclo del cultivo y el rendimiento, contrario a las conclusiones que obtuvo Natali *et al.* (2004) para el centro sur de Santa Fe, posiblemente porque analizó una menor cantidad de campañas (6) y sitios.

Para Rafaela se pudieron identificar cultivares cuyo ciclo se adapta mejor a ambientes de mayor o menor potencial y de esta manera contribuir a una mejor elección de la variedad para cada lote, al igual que Rosetti *et al.* (2020b), donde logró diferenciar

cultivares de mejor adaptación de acuerdo al ambiente para la misma región, analizando estabilidad y adaptabilidad durante 5 campañas. Por otro lado, se observó que en la localidad ubicada al norte (Reconquista), los cultivares más estables son los de CC y los más inestables los de CL, lo cual permite asociarlo a los resultados obtenidos por Romani *et al.* (2020) para la región de Santiago Del Estero, donde el análisis de estabilidad fue similar al realizado en este trabajo, considerando que este autor evaluó el comportamiento de 9 cultivares durante 7 campañas.

En cuanto a las variables climáticas, se encontró que la variable que mejor explicó la variación de los rendimientos del trigo fue la precipitación durante el ciclo, en concordancia con Zilio *et al.* (2014), los cuales obtuvieron el mismo resultado, considerando que su trabajo se realizó en regiones semiáridas de Buenos Aires donde las precipitaciones podrían tener un papel más importante en la definición del rendimiento del cultivo. En este trabajo también coincide que la radiación tiene efecto significativo en rendimiento, aunque menor al resto de las variables climáticas como precipitación y temperaturas.

4.1. PERSPECTIVAS A FUTURO

Debido a que una de las variables climáticas que tiene efecto significativo en el rendimiento es la temperatura máxima, sería interesante analizar los datos de las últimas campañas, donde se observa un marcado ascenso de las temperaturas en los estadíos más avanzados del cultivo. Podría ser de interés evaluar a futuro el efecto que tiene el cambio en las temperaturas de los últimos años para establecer modelos de impacto frente a cambios en esta variable, principalmente en la etapa de llenado de grano del trigo (Z7.0). Este análisis se podría realizar segregando los datos de acuerdo a las condiciones hídricas de cada campaña según sea año Niño o Niña. Asimismo, sería importante evaluar, para las condiciones del norte de la región triguera central de Argentina, la potencialidad del cultivo de trigo de verano. En esta estrategia de siembra, a diferencia de los invernales, se siembran cultivares sin requerimientos de horas de vernalización en Enero/Febrero para que las altas temperaturas no afecten el llenado de granos. Pero, si bien las condiciones térmicas serían más favorables para un llenado óptimo, los coeficientes fototermales, fotoperiódicos, distribución de precipitaciones, déficit de presión de vapor, entre otros factores se pueden alterar y generar condiciones de crecimiento diferenciales.

Más allá de las discusiones que se generan a partir del análisis de estas bases de datos, se podría evaluar también el impacto de la genética a lo largo de los años a través de un análisis de cultivares antiguos versus modernos, ya que cada año las empresas lanzan variedades nuevas al mercado, con un importante efecto en el mejoramiento varietal de las últimas campañas ya sea por mejoras en rendimiento, calidad, tolerancia a ciertos factores bióticos o herbicidas, así como también la evaluación de estabilidad y adaptabilidad de cultivares y ciclos en años considerados niño, neutro o niña, que pueden tener un efecto significativo en la productividad, estabilidad y adaptabilidad de los mismos.

5. CONCLUSIONES

En la región central de Argentina, los cultivares más estables son los que pertenecen al grupo de los CI, mientras que los genotipos de CC fueron los más inestables y con menor rendimiento alcanzado. Por otro lado, los cultivares de CL son los que mayor rendimiento logran, posiblemente porque exploran un mejor ambiente fototermal durante el ciclo, considerando también que su ciclo es más largo sobre todo en la parte vegetativa y pueden superar con mayor facilidad un estrés climático de corta duración. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis “*En la región central de Argentina, los cultivares de ciclo largo son más estables que los más cortos debido a que pueden aprovechar mejor las precipitaciones durante el ciclo*”.

Las variables climáticas definitivamente tienen efecto significativo en el rendimiento del trigo. Para el análisis por subregión, las precipitaciones durante el ciclo del cultivo fueron las que explicaron en mayor medida la variación del rendimiento, mientras que, en el análisis por localidad, la variable más explicativa fue la temperatura media. Todos los ciclos se mostraron adaptables al índice ambiental, es decir que siguieron el patrón del cambio ambiental. La estabilidad de los diferentes genotipos tuvo variaciones de acuerdo a la localidad y subregión en la cual se desarrolló, lo cual muestra una dependencia de las mismas a las características climáticas de cada sitio. De esta manera, no se rechaza la hipótesis “*La estabilidad y adaptabilidad de las variedades dependen de las características climáticas de cada región triguera*”. Así, se refleja la importancia que tienen estos análisis a la hora de seleccionar las variedades que mejor se adapten a cada ambiente, contribuyendo a disminuir el error a la hora de tomar esta decisión.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abbate, P. E., Gutheim, F., Polidoro, O., Milisich, H. J. y Cuniberti, M. 2010. Fundamentos para la clasificación del trigo argentino por calidad: efectos del cultivar, la localidad, el año y sus interacciones. *Agriscientia* 27 (1): 1-9.
- Abbate, P. E. y Brach, A. M. 2020. Efectos del cambio climático y del mejoramiento genético sobre el rendimiento de trigo en el norte de Santa Fe en las primeras dos décadas del siglo XXI. *Agrotecnia* N° 29: 5-18.
- Abbate, P. E., Miralles, D. J. y Ballesteros, A. H. M. 2021. Nuevo mapa de subregiones trigueras argentinas y de otros cereales invernales 2021. 10.13140/RG.2.2.21236.48000.
- Alexandratos, N. y Bruinsma, J. 2012. World agriculture towards 2030/2050. ESA working paper 12-03. The 2012 revision. FAO. 154 pp.
- Andrade, F. 2016. Ediciones Instituto Internacional de Nutrición Vegeta. Los desafíos de la agricultura. Primera edición. INTA, FCA UNMP, CONICET, IPNI. 136 pp.
- Andrade, F. H., Taboada, M. A., Lema, R. D., Maceira, N. O., Echeverria, H. E., Posse Beaulieu, G. y Mastrangelo, M. E. 2017. Ediciones INTA. Los desafíos de la agricultura argentina: satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental. Primera edición. 124 pp.
- Argent trigo. 2014. Trigo argentino hacia el 2020. 16 pp. Publicación online, disponible en: www.argenttrigo.org.ar/2014/semanadetrigo/Argentinahacia2020.pdf. Fecha de consulta: abril del 2021.
- Brach, A y Zuil, S. 2018. Estabilidad y adaptabilidad: criterios que contribuyen en la elección de variedades de trigo. *Voces y ecos* N° 39: 9-13.
- Cantarero, M. G. 2018. Water deficiency during the ear growth period in wheat and stress tolerance strategies in different cultivars. Doctoral thesis National University of Cordoba. Argentina.
- Crossa, J., Gauch, H. G. y Zobel, R. W. 1990. Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop Science* 30: 493-500.
- De Abelleira, D., Veron, S. R., Banchemo, S., Mosciaro, M. J., Franzoni, A., Boasso, M. A. y Volante, J. N. 2019. National crop map. Season 2018/2019. Version 1 Publication N°. 1. INTA.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. y Robledo C.W. 2020. InfoStat versión 2020. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

- Di Salvo, J. I., Lee, C. y Salmerón, M. 2021. Regional multi-environment analysis of corn productivity and yield stability as impacted by hybrid maturity. *Field Crops Research* 262: 108025.
- Eberhart, S. T. y Russell, W. A. 1966. Stability parameters to compare varieties 1. *Crop Science* 6: 36-40.
- Enrico, J. M., Conde, M. B., Martignone, R. A. y Bodrero, M. L. 2013. Soja: evaluación de la estabilidad del rendimiento según fechas de siembra. Para mejorar la producción 50: 71-78.
- Finlay, K. W. y Wilkinson, G. N. 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding program. *Australian Journal of Agricultural Research* 14 (6): 742-754.
- Gauch, H. G. 1988. Model Selection and Validation for Yield Trials with Interaction. *Biometrics* 88: 705-715.
- Gerster, G. y Bacigaluppo, S. 2007. Aportes del trigo a la sustentabilidad del sistema. Para Mejorar la Producción N° 34: 8-11.
- Lanzillotta, J. J. y Terrile, I. 2018. Evaluación de cultivares de trigo Pan: análisis multiambiente de la campaña 2017. I. Cultivares de ciclo largo e intermedio. Ediciones INTA vol. 10 N° 36: 11-14.
- Lin, C. S. y Binns, M. R. 1988. Una medida de superioridad del rendimiento del cultivar para datos de cultivar x ambiente. *Revista canadiense de ciencia vegetal* 68: 193-198.
- Malthus, T. R., Keynes, J. M., de Azcárate Diz, P. y Vergara, J. Alianza Editorial. 1966. *First essay on population*, vol. 15.
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca de la Nación (MAGyP). 2023. Estimaciones agrícolas. Disponible en: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>. Fecha de consulta: marzo del 2023.
- Miralles, D. J. y González, F. G. 2010. El trigo en Argentina: Perspectivas ecofisiológicas del pasado, presente y futuro para aumentar el rendimiento. XVII Congreso de AAPRESID, La era del Ecoprogreso. Rosario, Santa fe, Argentina: en PDF.
- Natali, C. N., Pacín, F. y Boem, F. G. 2004. Factores que afectan el rendimiento de trigo en el centro sur de Santa Fe. *Informaciones Agronómicas* N° 34: 20-24.
- Perez-Ruiz, J., Zamora-Díaz, M., Mejía-Contreras, J., Hernandez- Livera, A. y Solano Hernandez, S. 2015. Malting barley grain yield stability in Bajío, Mexico. *Chilean J. Agric. Anim. Sci.* 31 (3): 12-19.

- Purchase, J. L. 1997. Parametric analysis to describe genotype x environment interaction and yield stability in winter wheat (Doctoral dissertation, University of the Free State). 84 pp.
- Rodríguez-González, R. E., Ponce-Medina, J. F., Rueda-Puente, E. O., Avendaño Reyes, L., Paz Hernández, J. J., Santillano-Cazares, J. y Cruz-Villegas, M. 2011. Interacción genotipo-ambiente para la estabilidad de rendimiento en trigo en la región de Mexicali, BC, México. *Tropical and subtropical agroecosystems* 14(2): 543-558.
- Romani M., Fraschina J., Gomez D. y Conde B. 2020. Análisis del rendimiento y estabilidad de cultivares de trigo. Campaña 2013 a 2019. Área de Producción Vegetal. INTA Santiago Del Estero.
- Rosetti, L., Zuil, S., Schlie, G. y Lozano Coronel, A. 2020a. Resultados red de ensayos comparativos de rendimiento de trigo pan en EEA INTA Rafaela. Campaña 2019. *Producción Vegetal* 3: 2-17.
- Rosetti, L., Zuil, S. y Lozano Coronel, A. 2020b. Análisis de estabilidad y adaptabilidad como herramienta para una mejor elección de la variedad de trigo a sembrar. *Producción Vegetal* 3: 18-27.
- Shukla, G.K. 1972. Some statistical aspects of partitioning genotype–environmental components of variability. *Heredity* 29: 237–245.
- Wricke, G. 1965. To calculate the ecovalence of spring wheat and oats. *Journal of Plant Breeding* 52: 127-138.
- Zadoks, J.C., Chang T. T. y Zonzak C. F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14: 415-421.
- Zilio, J., Frolla, F. y Krüger, H. 2014. Variabilidad climática, fertilidad edáfica y rendimientos de trigo en la zona semiárida. *Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Argentina: en PDF.*
- Zuil, S. G. 2017. Elección de cultivares de soja en el NEA. *Voces y Ecos* 38: 8-13.