

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

**EFFECTOS DE LA FECHA DE SIEMBRA, DISPONIBILIDAD
HÍDRICA Y DENSIDAD DE SIEMBRA SOBRE LA
DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD DE MAÍZ
PISINGALLO (ZEA MAYS L. VAR. EVERTA).**

FEDERICO JAVIER GOMEZ ACUÑA

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

Córdoba - 2018

Efectos de la Fecha de siembra, disponibilidad hídrica y densidad de siembra sobre la determinación del rendimiento y la calidad de maíz pisingallo (*Zea mays* L. var. everta).

Ing. Agr. Federico Javier Gómez Acuña

Director: Ing. Agr. (Dr.) Claudio Jesús Razquin

**Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del Tribunal
Evaluador**

Ing. Agr. Dr. Alan Severini

.....

Ing. Agr. M. Sc. Maria C. Nazar

.....

Ing. Agr. M. Sc. Marcelo G. Cantarero

.....

Presentación Formal Académica

14 de diciembre de 2018

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Córdoba

Este trabajo se lo dedico a mi familia.

AGRADECIMIENTOS

A mi Tutor Ing. Agr., Dr. Claudio J. Razquin, por su tiempo, dedicación y aportes al trabajo final.

A EPCE y en especial a la Dra. Claudia Vega por generar, estimular y apoyar esta instancia de aprendizaje.

A mis hijos Alvaro y Celestina y esposa quienes me supieron entender y brindarme su tiempo para poder elaborar y finalizar este trabajo.

A la comisión revisora por su tarea y por los aportes realizados en la corrección del presente trabajo: Ing. Agr., Dr. Alan Severini, Ing. Agr., M. Sc. Maria C. Nazar y Ing. Agr., M. Sc. Marcelo G. Cantarero.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS E HIPOTESIS	5
2.1. Objetivo general	5
2.2. Objetivos específicos	5
2.3. Hipótesis	5
3. MATERIALES Y MÉTODOS	6
3.1. Lugar de experimentación y características edafoclimáticas	6
3.2. Diseño experimental y descripción del ensayo	6
3.3. Determinaciones	9
3.3.1. Fenología del cultivo, duración de etapas y caracterización climática	9
3.3.2. Rendimiento y sus componentes numéricos	10
3.3.3. Parámetros de calidad industrial	10
3.4. Análisis de datos	12
4. RESULTADOS	13
4.1. Caracterización climática y duración de etapas	13
4.2. Rendimiento en granos y sus componentes numéricos	18
4.3. Efectos de los tratamientos sobre los parámetros de calidad industrial	20
4.4. Relación entre componentes del rendimiento y calidad industrial con variables climáticas y entre el volumen de expansión con el peso individual y tamaño de grano	22
4.5. Frecuencias acumuladas de temperaturas extremas y precipitaciones históricas	26
5. DISCUSIÓN	28
5.1. Causas de las variaciones del rendimiento en granos	28
5.2. Calidad industrial y relación entre componentes	31
5.3. Implicancias agronómicas	33
6. CONCLUSIONES	35
7. BIBLIOGRAFÍA	37

LISTA DE TABLAS

- Tabla 1: Lámina de agua aplicada para generar el tratamiento de nivel hídrico riego (NHR)..... **8**
- Tabla 2: Datos análisis químico del suelo entre los 0 - 20 cm de profundidad previo a la siembra del tratamiento de fecha de siembra del 22/09/2011. **8**
- Tabla 3: Precipitaciones mensuales para la campaña agrícola 2011-2012 e históricas (1910-2010) correspondientes a Pergamino. **13**
- Tabla 4: Días con temperaturas máximas $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ($\text{DET}_{>35}$), déficit de presión de vapor (DPV; kPa), cociente foto-termal ($\text{Mj } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ m}^{-2}$) durante el período crítico de determinación del número de granos (PC) y durante el llenado efectivo de los granos (LLG) y precipitaciones (Pp; mm) acumuladas desde la emergencia hasta PC y el ciclo del cultivo para tratamientos regados (NHR) y en secano (NHS) y cuatro fechas de siembra SET, OCT, NOV y DIC. Cada punto representa el promedio de dos densidades de plantas y tres repeticiones. **16**
- Tabla 5: Duración en días y grados días ($^{\circ}\text{Cd}$) de la etapa emergencia a floración (E-R1) y asincronía floral (ASI) para el híbrido Basso 5802 cultivado en dos niveles hídricos (NH), regados (NHR) y en secano (NHS), fechas de siembra SET, OCT, NOV y DIC y densidad de plantas (6 y 8 pl m^2). **17**
- Tabla 6: ANOVA del Rendimiento en granos (kg ha^{-1} ; 14% humedad) y sus componentes numéricos número de granos por unidad de superficie (m^2) (NG) y peso individual de granos (PG mg grano^{-1} ; 0% de humedad) para el híbrido Basso 5802 cultivado en dos niveles hídricos (NH), regados (NHR) y en secano (NHS), fechas de siembra SET, OCT, NOV y DIC y densidad de plantas (6 y 8 pl m^2). Error! Bookmark not defined.
- Tabla 7: ANOVA de la capacidad de expansión de grano en el popeado (V_{EXP} ; $\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$), cantidad de granos en 10 gramos (K10), porcentaje de granos sobre zaranda de 6 mm (SS 6 mm) y porcentaje de granos debajo de zaranda de 4.5 mm de tamaño de orificios para el híbrido Basso 5802 cultivado en dos niveles hídricos (NH), regados (NHR) y en secano (NHS), fechas de siembra SET, OCT, NOV y DIC y densidad de plantas (6 y 8 pl m^2). Error! Bookmark not defined.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Imagen satelital del sitio donde se realizó el ensayo. 6
- Figura 2: Evolución de la reserva de agua útil en el suelo (% capacidad de agua útil total) en la Región Pampeana entre septiembre 2011 y marzo 2012. La estrella indica el lugar donde se realizó el experimento. Fuente: Instituto clima y suelo Inta Castelar y Servicio Meteorológico Nacional 14
- Figura 3: Precipitaciones acumuladas de la campaña 2011-12. Las flechas indican los momentos de la floración femenina (R1) de las sucesivas fechas de siembra evaluadas, 25/12 (SET), 1/1 (OCT), 15/1 (NOV) y 6/2 (DIC). 15
- Figura 4: Evolución de la temperatura máxima (símbolos rojos), media (símbolos verdes) y mínima (símbolos azules) durante la campaña 2011-2012. Las flechas indican los momentos de ocurrencia de la floración femenina (R1) de las sucesivas fechas de siembras, 25/12 (SET), 1/1 (OCT), 15/1 (NOV) y 6/2 (DIC). 16
- Figura 5: Relación entre el número de granos por unidad de superficie (NG) y el peso individual de los granos (mg grano^{-1}) e isóneas de rendimiento (en Tn ha^{-1}) para el híbrido Basso 5802 cultivado en dos niveles hídricos (NH), regados (NHR) y en secano (NHS), fechas de siembra SET, OCT, NOV y DIC y densidad de plantas (6 y 8 pl m^2). Las barras verticales y horizontales indican el desvío estándar de la media y cada punto representa el promedio de tres repeticiones. 20
- Figura 6: Relación entre el rendimiento en granos y A) la cantidad de días con temperaturas superiores a 35°C ($\text{DET}_{>35}$ PC) y B) déficit de presión de vapor (DPV) durante el periodo crítico de determinación del número de granos (PC) y entre la capacidad de expansión en el popeado (V_{EXP}) y C) el $\text{DET}_{>35}$ y D) DPV durante el llenado efectivo de los granos (LLG) para tratamientos regados (NHR) y en secano (NHS), fechas de siembra de SET, OCT, NOV y DIC y densidad de plantas (6 y 8 pl m^2) para el híbrido Basso 5802. Las líneas llenas representan la relación lineal $\text{RTO} = a + b \cdot X$ en A y B y lineal-plateau $V_{\text{EXP}} = a + b \cdot X$ cuando $X \leq c$ y $V_{\text{EXP}} = a + b \cdot c$ cuando $X > c$ 24
- Figura 7: Relación entre la capacidad de expansión en el popeado (V_{EXP} ; $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$) y A) el peso individual del grano (PG; mg grano^{-1}) y B) la proporción (%) de granos de la muestra retenidos en una zaranda con orificios circulares de 6 mm (SS 6 mm) para distintas fechas de siembra, disponibilidad hídrica, y densidad de plantas. Símbolos como en la Figura 6. La línea continua representa el ajuste de la función bi-lineal $V_{\text{EXP}} = a + b \cdot X$ cuando $X \leq c$ y $a + b \cdot c + d \cdot (X - c)$ cuando $X > c$. Los valores $\pm \text{s.e.}$ de cada parámetro son: en A) $a = 31.6 \pm 8.1$, $b = 0.09 \pm 0.06$, $c = 150.3 \pm 4.01$ y $d = -0.1 \pm 0.01$; $r^2 = 66\%$; $p < 0.0001$. En B) $a = 41 \pm 1.8$, $b = 0.06 \pm 0.03$, $c = 73.9 \pm 2.7$ y $d = -0.19 \pm 0.02$; $r^2 = 71\%$; $p < 0.0001$ 25

Figura 8: Frecuencia acumulada de días con temperaturas $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ($\text{DET}_{>35}$) durante el período crítico de fijación (-15 días y + 250 $^{\circ}\text{C d}$; temperatura base 0°C de R1) y llenado de granos (682.5 $^{\circ}\text{C d}$ [temperatura base 0°C] acumulados a partir de finalizado el PC) para fechas de siembra del 22/09/2011 (SET), 17/10/2011 (OCT), 11/11/2011 (NOV) y 06/12/2011 (DIC) en una serie climática desde 1945 hasta 2017..... **27**

Figura 9: Imágenes de espigas a cosecha de los distintos tratamientos. **30**

LISTA DE SIGLAS O ABREVIATURAS

AU: Agua útil disponible.

D: Densidad de plantas

DET_{>35°}: Cantidad de días con temperaturas superiores a 35°C.

DIC: Tratamiento de fecha de siembra del 06 de diciembre.

DPV: Déficit de presión de vapor.

DS 4,5mm: Proporción de granos debajo de zaranda 4,5 mm.

E-R1: Etapa de emergencia a floración femenina.

FS: Fecha de siembra.

GDD: Grados días de crecimiento.

K10: Cantidad de granos contenidos en 10 g de muestra.

LLG: Período de llenado de granos.

NG: Número de granos por unidad de superficie

NH: Nivel hídrico.

NHR: Nivel hídrico riego.

NHS: Nivel hídrico seco.

NH*D: Interacción nivel hídrico por densidad de plantas.

NH*FS: Interacción nivel hídrico por fecha de siembra.

NOV: Tratamiento de fecha de siembra del 11 de noviembre.

OCT: Tratamiento de fecha del 17 de octubre.

PC: Período crítico de fijación de granos.

PG: Peso individual de granos.

R1: Estadio fenológico de emergencia de estigmas.

SET: Tratamiento de fecha de siembra del 22 de septiembre.

SS 6mm: Proporción de granos sobre zaranda de 6 mm.

TT: Tiempo térmico.

TT_{>35°}: Tiempo térmico superior a 35°C de temperatura máxima.

UE. Unidad experimental.

VEG: Período vegetativo.

V_{EXP}: Capacidad de expansión expresada como volumen de expansión.

RESUMEN

El maíz pisingallo (*Zea mays* L. var. everta) es un producto diferenciado con valor agregado y constituye una alternativa válida de diversificación en los sistemas de producción agrícola donde Argentina posee un rol preponderante en el comercio mundial dado el volumen de producción anual y sus estándares de calidad. Sin embargo, es escasa la información sobre la incidencia de estrategias de manejo y su impacto sobre el rendimiento y calidad industrial. El objetivo del presente trabajo fue evaluar en condiciones de campo el impacto de la disponibilidad hídrica (riego y secano; NHR y NHS, respectivamente), cuatro fechas de siembra (FS), 22/09, 17/10, 11/11 y 06/12 (SET, OCT, NOV y DIC, respectivamente) y dos densidades de siembra (6 y 8 pl m⁻²) sobre el rendimiento en granos y sus componentes numéricos, número (NG; m²) y peso individual de granos (PG) y la calidad industrial del grano en maíz pisingallo. El híbrido utilizado fue Basso 5802. El ensayo se condujo en la campaña 2011-2012 en Pergamino, provincia de Buenos Aires y los tratamientos se dispusieron bajo un diseño de parcelas sub subdivididas con tres repeticiones. La campaña agrícola evaluada se caracterizó por fuertes escenarios de estrés térmico (golpes de calor) e hídrico principalmente exacerbados durante el período crítico de fijación de granos (PC) de las FS de OCT y NOV y durante el llenado de granos (LLG) de las FS de SET y OCT. En consecuencia, el NH y la FS fueron los factores que explicaron el 81% de la varianza total del rendimiento en granos. En este sentido, el rendimiento se redujo un 45% en el NHS respecto del NHR y la FS de NOV generó los rendimientos más bajos y la de DIC, los más altos (10 tn ha⁻¹), valor que se encuentra cercano al potencial del cultivo en la región. La interacción NH*FS detectada indicó que el NH no generó efectos sobre el rendimiento solo en la FS de DIC, aunque el NHR amortiguó el efecto de los golpes de calor durante PC y LLG de las FS de SET, OCT y NOV. La densidad de siembra de 8 pl m⁻² incrementó el rendimiento un 10% respecto de la de 6 pl m⁻². Las variaciones del rendimiento fueron explicadas por el NG ($r^2= 93\%$, $p<0,0001$) y en menor medida por el PG ($r^2= 19\%$; $p<0,002$). El atraso de la fecha de siembra incrementó el PG y la proporción de granos retenidos en una zaranda con orificios de 6 mm (SS 6 mm) y redujo la capacidad de expansión (V_{EXP}) en el popeado y calibre de los granos (K10). Debido a la importancia del PG en la determinación del V_{EXP} y K10, se encontró que V_{EXP} presentó un PG y SS 6 mm óptimo por encima del cual V_{EXP} disminuye. En consecuencia, se detectó una asociación negativa entre V_{EXP} y rendimiento por encima

de los 3952 kg ha⁻¹, que en general, fue promovida por menores V_{EXP} registrados en la FS de NOV y DIC en ambos NH. Por consiguiente, aquellos factores de manejo agronómico que permitan maximizar el PG siempre tenderán a generar menor V_{EXP}. No obstante, los menores V_{EXP} alcanzados en la FS de DIC estuvieron por encima de los límites establecidos por el mercado de esta especialidad. De esta manera, FS tardías de DIC permiten maximizar el rendimiento en granos con parámetros de calidad normales para la industria. Por último, la probabilidad de que los escenarios climáticos adversos (golpes de calor) registrados en la campaña 2011-2012 ocurran fue baja (3 a 5% de 72 años). No obstante, los resultados de este estudio resultan de importancia para regiones extra pampeanas ya que se prevé que tales escenarios aumenten en frecuencia en el futuro por efectos del cambio climático global y para regiones del mundo donde la probabilidad de estreses térmicos e hídricos es frecuente.

Palabras claves: Pisingallo, fechas de siembra, estrés hídrico y térmico, densidad, rendimiento, calidad.

ABSTRACT

Popcorn maize (*Zea mays* L. var. *everta*) is a specialty with added value and constitutes a valid diversification alternative in agricultural production systems where Argentina has a preponderant role in world trade given the volume of annual production and its quality standards. However, there is little information on the incidence of management strategies and their impact on grain yield and industrial quality parameters. The objective of the present work was to evaluate the impact of water availability (irrigation and rainfed, NHR and NHS, respectively) in field conditions, four sowing dates, 22/09, 17/10, 11/11 and 06/12 (SET, OCT, NOV, and DIC, respectively) and two plant densities (6 and 8 pl m⁻²) on the grain yield and their numerical components, number (NG; m²) and individual grain weight (PG) and the grain quality of the Popcorn maize. The experiment was conducted during the 2011-2012 season at Pergamino (33°56'S y 60°34'O), province of Buenos Aires and the treatments were distributed under a split-split-plot design with three replications. The 2011-2012 season was characterized by strong scenarios of heat stress (days with temperatures >35 °C) and water stress mainly exacerbated during the critical period of grain determination (PC) of the FS of OCT and NOV and during the effective grain filling (LLG) of the FS of SET and OCT. Consequently, NH and FS were the factors that explained 81% of the total variance of grain yield. In this sense, yield was reduced by 45% in the NHS with respect to NHR and the FS of NOV generated the lowest yields and the DIC, the highest (10 tn ha⁻¹), value that is close to the potential of the crop in the region. The NH*FS interaction detected indicated that NH did not generate effects on yield only in the FS of DIC, although the NHR reduced the effect of heat stress during PC and LLG of the FS of SET, OCT and NOV. Plant density of 8 pl m⁻² increased yield by 10% compared to 6 pl m⁻². The variations of the yield were explained by the NG ($r^2 = 93\%$, $p < 0,0001$) and to a lesser extent by the PG ($r^2 = 19\%$; $p < 0,002$). The delay of the sowing date increased the PG and the proportion of grains retained in a sieve with holes of 6 mm; SS 6 mm) but reduced the popping volume (V_{EXP}) and caliber of the grains (K10). Due to the importance of PG in the determination of V_{EXP} and K10, it was found that V_{EXP} presented an optimal PG and SS 6 mm above which V_{EXP} decreases. Consequently, a negative association between V_{EXP} and yield above 3952 kg ha⁻¹ was detected, which was generally promoted by lower V_{EXP} recorded in the FS of NOV and DIC in both NH. Therefore, those factors of agronomic management that allow maximize the PG will

always tend to generate lower V_{EXP} . However, the low V_{EXP} in the FS of DIC was above the threshold established by the market of this specialty. Hence, late sowing of DIC allows maximizing the grain yield with optimum grain quality. Although the probability that the climatic constraint scenarios of the 2011-2012 season occur are low (3 to 5% of 72 year climate records), our result is of the importance for temperate Rolling Pampas due to those scenarios are expected to increase in frequency in the future due to the effects of global climate change and for regions of the world where the probability of heat and water stresses are actually frequent.

Keywords: Popcorn, sowing dates, water and heat stress, density, yield, quality.

1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays*, L.) es uno de los cereales más cultivados en el mundo. Existen varios tipos de maíces, que difieren en tipo de grano, usos, calidad y difusión. A nivel mundial, Argentina ocupa el quinto lugar en la producción de maíz común (i.e., amarillo dentado), luego de Estados Unidos, China, Unión Europea, Brasil y México y el segundo lugar como exportador, luego de los EEUU (FAO, 2016). Actualmente, Argentina también se posiciona como el primer exportador de muchos de los maíces especiales como colorados (flint), de alto valor (MAV), y pisingallo (popcorn). En particular, el maíz pisingallo tuvo un desarrollo sostenido durante la última década ubicando al país como el primer exportador mundial por más de 10 años (De Bernardi, 2017). El volumen de exportación es de 220000 a 250000 toneladas anuales sobre una demanda mundial de 450000 (De Bernardi, 2017). En este contexto, el maíz pisingallo se ha consolidado como una alternativa de diversificación dentro de los cultivos tradicionales en los actuales sistemas de producción. La superficie de siembra destinada a maíz pisingallo oscila anualmente entre 45000 a 60000 hectáreas con un rendimiento promedio de 4 toneladas por hectárea.. Actualmente, la producción de esta especialidad está centralizada en el noroeste argentino, provincia de Córdoba, norte y sureste de Buenos Aires y sur de Santa Fe. La producción total de maíz pisingallo es destinada al consumo humano en forma de pochoclos (palomitas de maíz) y el 95% de la producción nacional se exporta a 144 países siendo los más destacados Europa, Brasil, Venezuela, México y países de medio Oriente (Cámara Argentina de Exportadores de Maíz Pisingallo, 2017).

Desde el punto de vista comercial, la principal diferencia entre maíz pisingallo y los tradicionales commodities (i.e., maíces convencionales o dentados) radica en que las operaciones de mercado se realizan bajo contratos de producción, en los cuales el productor recibe un determinado precio por tonelada y premios o rebajas relacionados con la calidad obtenida (MAIZAR, 2007). Es por esto que, en maíces como pisingallo, toman la misma importancia tanto el rendimiento del cultivo como la calidad del grano cosechado. La variable industrial de mayor importancia que define la calidad del maíz pisingallo es la capacidad de expansión en el popeado (i.e., cociente entre el volumen ocupado por las rosetas o copos y el peso de granos que le dio origen; V_{EXP}). Valores de

V_{EXP} de $40 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ son considerados como límite inferior para la comercialización del producto mientras que valores más altos representan un beneficio para la industria ya que el precio de las rosetas es definido por unidad de volumen. El tipo de roseta o copo que se forma puede ser de tipo butterfly o moshroom y depende del híbrido. Las rosetas butterfly son esponjosas con alas que se proyectan del centro a la periferia y su principal destino es el consumo directo, mientras que las de tipo moshroom son compactas y redondeadas, ideal para la industria del popcorn saborizado. Otro parámetro de importancia es el tamaño o calibre del grano, comúnmente denominado como K10, que es definido por el peso del grano. Estos indicadores de calidad comercial definen el mercado de destino como así también su valor FOB pagándose mejor precio por los calibres o tamaños grandes con bajos valores de K10.

El rendimiento en granos en el cultivo de maíz depende de factores genotípicos, climáticos y de manejo que influyen sobre la condición fisiológica del cultivo durante las etapas críticas de determinación del número y peso de granos. En este sentido, la elección de la fecha de siembra es un factor de manejo importante, debido a que determina la oferta foto-térmica e hídrica durante las etapas más críticas del cultivo (Otegui et al., 1995). En los últimos 15 años, asociado con la mejora genética por tolerancia y/o resistencia a insectos (i.e. lepidópteros) en maíces convencionales (dentados), se ha implementado con frecuencia la utilización de fechas de siembra hacia finales de la primavera (i.e. diciembre) como medida de escape a estreses hídricos durante el período crítico de fijación de granos (i.e. enero), con muy buenos resultados (Maddonni, 2012). Sin embargo, en ambientes de alta productividad de maíz como en la pampa húmeda, atrasos en la fecha de siembra disminuyen el rendimiento potencial (Cirilo y Andrade, 1994) pero incrementa el rendimiento alcanzable (i.e., rendimiento limitado por agua) y su estabilidad a través de los años (Maddonni, 2012). El maíz pisingallo no presenta resistencia a insectos ya que el mercado no permite la comercialización de organismos genéticamente modificados, por lo que el éxito del cultivo en fechas tardías depende de un adecuado monitoreo y control de insectos.

La adopción de fechas de siembra tempranas o tardías que permiten ubicar el PC en etapas con menor probabilidad de temperaturas extremas y déficit hídricos, exponen a la etapa de llenado de granos en condiciones de alto DPV y golpes de calor en fechas tempranas (i.e., Enero) y caídas en la radiación fotosintéticamente activa incidente y

temperatura en fechas de siembras tardías o de segunda. Estudios recientes han explorado las bases ecofisiológicas de maíces pisingallos conjuntamente con otros tipos de maíces (templados, tropicales y la combinación de ambos) y la respuesta del cultivo a estreses térmicos durante el llenado de granos (Mayer, 2015) y manipulaciones de la tasa de crecimiento por grano alrededor del PC y LLG (Severini, 2011). Los estudios mencionados han demostrado que el V_{EXP} depende de la tasa de crecimiento por planta por grano durante el llenado efectivo de los mismos y en menor medida con dicha tasa en torno a floración (Severini, 2011). Los golpes de calor durante el llenado de granos acortan la duración del LLG reduciendo el PG e incrementando la proporción de granos pequeños que son rechazados por la industria (Mayer, 2015). Desde otra perspectiva, diferentes estudios han determinado que V_{EXP} depende del contenido de humedad y la integridad del pericarpio (Mohamed et al., 1993), y en orden de importancia está determinado por i) el peso del grano, ii) el tamaño del grano y iii) el contenido de proteínas (Soylu y Tekkanat, 2007). Sin embargo, existen evidencias que indican que la relación entre el V_{EXP} y el tamaño o nivel de proteínas en granos es sensible a la condición fisiológica del cultivo y la oferta ambiental sobre determinadas etapas del ciclo del mismo (Severini, 2011, Borrás et al., 2006; Satorre et al., 1998; Mayer, 2015). No obstante, tales estudios fueron conducidos para evaluar el efecto de temperaturas extremas sin limitantes hídricas ni nutricionales, por lo que el impacto de la combinación de estrés térmico e hídrico modulados por la fecha de siembra no ha sido documentado para maíz pisingallo.

Otro factor de manejo importante es la elección de la densidad de plantas. El concepto de densidad óptima (i.e. aquella que maximice el rendimiento) involucra alcanzar altos niveles de captura de radiación incidente durante el período crítico (i.e., \pm 15 días de la floración femenina) que permita obtener altas tasas de crecimiento por planta durante dicho momento. En este sentido, se debe tener en cuenta que los maíces pisingallo son comúnmente cultivados en densidades más altas que los maíces convencionales (i.e. dentados) debido a que los primeros presentan una menor altura final, diámetro de tallo basal y área foliar por planta que los convencionales (Severini, 2011). No obstante, incrementos de la densidad poblacional podrían generar un efecto negativo sobre el rendimiento y la calidad industrial cuando los períodos críticos de fijación y llenado de granos son expuestos a altos DPV y temperaturas extremas.

Por consiguiente, es preciso profundizar tales aspectos en maíz pisingallo para mejorar el conocimiento sobre i) como prácticas de manejo agronómicas pueden contribuir a optimizar el rendimiento y la calidad industrial del cultivo, ii) la asociación entre V_{EXP} y peso y tamaño de granos y iii) el impacto de escenarios climáticos extremos que ocurren durante el PC y LLG sobre la estabilidad de la calidad industrial bajo situaciones con disponibilidad hídrica contrastantes.

2. OBJETIVOS E HIPOTESIS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto de la fecha de siembra, disponibilidad hídrica y densidad de plantas sobre la determinación del rendimiento en granos y la calidad industrial de maíz pisingallo

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterizar escenarios ambientales contrastantes en términos de oferta hídrica, radiativa y térmica durante la etapa de fijación y de llenado de granos.
- ✓ Cuantificar el efecto de cambios en la fecha de siembra, disponibilidad hídrica, densidad de plantas y sus interacciones sobre la determinación del rendimiento en granos, sus componentes numéricos, número y peso de cada grano y la calidad industrial de maíz pisingallo.
- ✓ Evaluar la relación entre la capacidad de expansión con i) el peso de mil granos y ii) la proporción de granos de mayor tamaño.
- ✓ Establecer relaciones que permitan identificar y valorar el efecto de temperaturas extremas y déficit de presión de vapor sobre el rendimiento y volumen de expansión.
- ✓ Cuantificar la probabilidad de ocurrencia de eventos climáticos adversos (estreses hídricos y térmicos) en una serie climática de 72 años.

2.3. HIPÓTESIS

Hipótesis 1: El atraso en la fecha de siembra en el cultivo de maíz pisingallo i) disminuye el rendimiento y ii) afecta la calidad del grano a través de incrementos en el calibre (K10) y reducciones de la capacidad de expansión.

Hipótesis 2: El peso del grano presenta una relación de tipo óptima con la capacidad de expansión.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de experimentación y características edafoclimáticas

El ensayo se realizó durante la campaña 2011-2012 en el campo experimental de la empresa Basso S.A. localizado en Pergamino, provincia de Buenos Aires, Argentina (33°55'40,39" S y 60°33'36,74" O, con una elevación sobre el nivel del mar de 65 m).

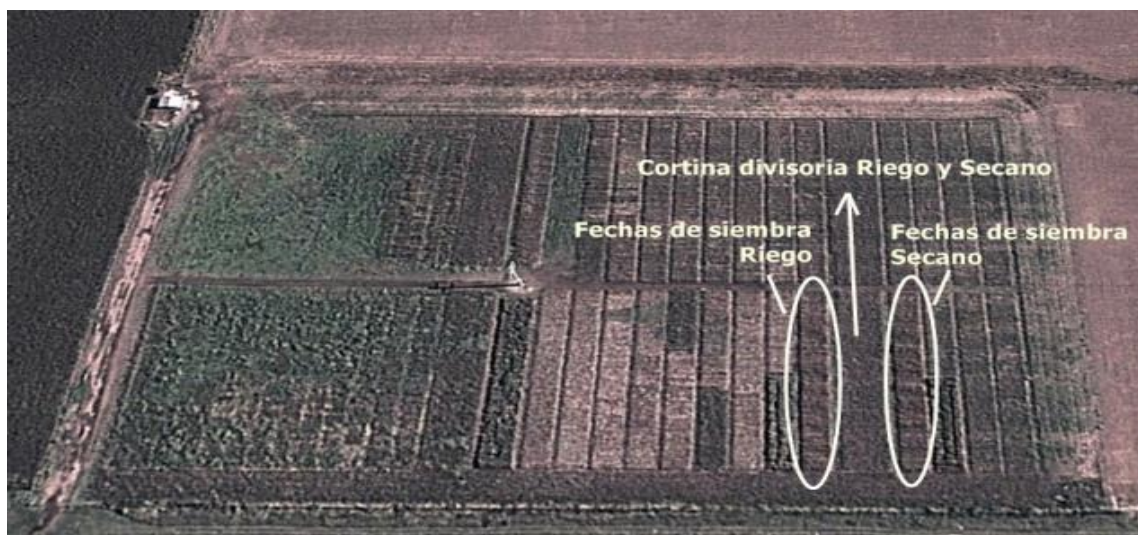


Figura 1: Imagen satelital del sitio donde se realizó el ensayo.

El tipo de suelo es Argiudol típico, fina, illítica, térmica (USDA-Soil Taxonomy 2006) con capacidad de uso I-1/2 perteneciente a la serie Pergamino. Este tipo de suelo se caracteriza por ser oscuro, muy profundo y bien drenado formado sobre sedimentos loésicos franco limosos gruesos. Se encuentra en un paisaje de lomas y pendientes con gradiente de 0 a 1 % en la Región Pampa Ondulada. El índice de productividad según la región climática es 85,50 (A) (INTA, 2012). El clima es subhúmedo con una temperatura media anual de 16°C y la media de precipitaciones anual es de 900 mm.

3.2. Diseño experimental y descripción del ensayo

Los tratamientos consistieron de la combinación de dos niveles hídricos (NH), secano (NHS) y riego (NHR), cuatro fechas de siembra (FS), 22/09/2011, 17/10/2011, 11/11/2011 y 06/12/2011, que en adelante serán expresados como SET, OCT, NOV y DIC, respectivamente y dos densidades de plantas, 60000 y 80000 pl ha⁻¹. El diseño experimental fue en parcelas sub sub-divididas con tres repeticiones con arreglo de bloques completos al azar. La parcela principal fue el NH, la sub-parcela, la FS y la sub-

subparcela, la densidad de plantas. Cada unidad experimental (UE) estuvo compuesta por 4 surcos distanciados a 0,525 m de ancho y 7,15 m de largo.

El híbrido de maíz pisingallo utilizado fue BAS-5802 del criadero Basso S.A. El híbrido BAS-5802 presenta alto potencial de rendimiento, ciclo intermedio y con una madurez relativa de 108. La estructura de planta es de tipo foliosa con tallos fuertes y altos. Sus espigas son gruesas, con 16 a 18 hileras de granos grandes y presenta una moderada susceptibilidad a roya de la hoja.

La siembra se realizó manualmente ubicando dos semillas por golpe. Durante el estadio fenológico de V2-V3 (Ritchie y Hanway, 1982) se procedió al raleo manual dejando una semilla por sitio, logrando de este modo las densidades de siembra objetivo. El NHR fue logrado a través de riegos periódicos (Tabla 1) utilizando cintas de polipropileno ubicadas al costado del surco. El cálculo de la lámina de riego aplicada en cada momento se realizó de la siguiente manera. Al momento de la siembra de la FS de SET se determinó el contenido del agua en el suelo hasta los 200 cm de profundidad mediante el método gravimétrico. En este momento, el agua útil inicial fue del 65% de la capacidad total del suelo de la serie Pergamino que representó 210 mm. A partir de la determinación del contenido de agua a la siembra se inició un balance hídrico para el seguimiento diario y la determinación de los momentos y láminas de riego. Para ello se utilizó el software BAHICU versión 1.01 (Andriani, 2012). Las mediciones por gravimetría para correcciones se realizaron durante el ciclo del cultivo, con una frecuencia de entre 10 y 15 días. Se midió cada 20 cm de espesor de suelo, hasta los 200 cm de profundidad. El umbral para la aplicación de riego correspondió al 50% del agua útil del perfil de suelo explorado por las raíces. La disponibilidad hídrica en el NHS derivó del agua acumulada a la siembra más las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo, a excepción de ciertos momentos críticos donde se aplicaron láminas de agua de 24 mm a todo el bloque de NHS para lograr establecer un stand de plantas homogéneo y que permitiera alcanzar las densidades de plantas objetivo en cada FS.

Tabla 1: Lámina de agua aplicada para generar el tratamiento de nivel hídrico riego (NHR).

Tratamiento NHR		Tratamiento NHS	
Fecha	Lámina de agua (mm)	Fecha	Lámina de agua (mm)
22-sep	24	22-sep	24
01-oct	24	01-oct	24
07-nov	18		
18-nov	12		
29-nov	24		
08-dic	36		
12-dic	36		
18-dic	48		
29-dic	36	29-dic	36
04-ene	48	02-ene	36
18-ene	36		
TOTAL	342	TOTAL	120

Previo a la siembra de la FS de SET se realizó un análisis de suelo cuyos resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Datos análisis químico del suelo entre los 0 - 20 cm de profundidad previo a la siembra del tratamiento de fecha de siembra del 22/09/2011.

Materia orgánica	%	2,34
pH		6,26
Carbono orgánico	%	1,36
Fósforo asimilable	Ppm	9,93
Sulfatos (SO ₄)	Ppm	11,49
Nitratos (NO ₃ ⁻)	Ppm	12,88
Nitrógeno de nitratos	Ppm	2,91
N disponible a la siembra ^Ψ	kg ha ⁻¹	7,5

^Ψ la disponibilidad de N fue calculada utilizando el peso del suelo entre 0-0,2 m de profundidad utilizando una densidad aparente de 1,3 g cm⁻³.

El criterio de fertilización se definió en base a los resultados del análisis de suelo para que no existan limitantes de nutrientes. Para esto, la demanda de nutrientes se estimó en base a los requerimientos de un cultivo de maíz semidentado con un rendimiento objetivo de 20 tn ha⁻¹. En pre-siembra se realizó una fertilización con una mezcla física (8,8%N, 41,6%P, 3,7%S y 4,82%Ca) a razón de 330 kg ha⁻¹. La dosis aplicada de cada elemento fue de 29 kg N ha⁻¹, 137 kg ha⁻¹ P₂O₅, 12 kg ha⁻¹ S y 16 kg ha⁻¹ Ca. Entre el estadio de V4–V6 (Ritchie y Hanway, 1982) se fertilizó con Ureasul (40%N, 6%S) a razón de 400 kg ha⁻¹. La dosis aplicada de cada elemento fue de 160 kg N ha⁻¹ y de 24 kg S ha⁻¹. Finalmente, se controlaron malezas, insectos y enfermedades durante todo el ciclo del cultivo.

3.3. Determinaciones

3.3.1. Fenología del cultivo, duración de etapas y caracterización climática

Se determinó la fecha de ocurrencia de los estadios de antesis (liberación de polen) y aparición de estigmas por fuera de las envolturas de la chala de la espiga (R1) en 5 plantas de cada UE y ambos se establecieron cuando el 50% de las mismas presentaron dicho estadio. El intervalo antesis silking (ASI) fue cuantificado como la diferencia en días entre la fecha de antesis y silking. Por otro lado, se cuantificó la duración en días y grados días de la etapa emergencia a R1. La fecha de emergencia fue estimada utilizando una duración en tiempo térmico (TT) de 90 °C d (temperatura base de 10°C) acumulados a partir de la fecha de siembra (Maddonni, 2012). Adicionalmente, se cuantificaron variables climáticas como temperatura media y máxima, la cantidad de días ($DET_{>35}$) y suma térmica ($TT_{>35}$) con temperaturas máximas por encima de 35°C que han sido documentadas por producir estrés térmico (Maddonni, 2012), radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAi), déficit de presión de vapor (DPV en kPa) (según la metodología propuesta por Allen et al., 1998), cociente foto-termal ($MJ\ ^\circ C^{-1}\ m^{-2}$) (Fischer, 1985) y precipitaciones. Dichas variables climáticas fueron evaluadas para las fases de emergencia y 15 días previos a R1 (etapa vegetativa; VEG), período crítico de fijación de granos (PC) cuantificado entre los 15 días previos a R1 y 250 °C d (temperatura base 0°C) posteriores a R1 y llenado efectivo de granos (LLG) cuantificado como una duración de 682,5 °C d (temperatura base 0°C) acumulados a partir de finalizado el PC. El tiempo térmico utilizado para la cuantificación de la duración entre R1 y postfloración (fase lag) y LLG corresponde al promedio de dos genotipos de maíz pisingallo cultivados en situaciones control de estudios de Severini (2011) en la misma localidad. Dicha información se utilizó para cuantificar la duración del LLG ya que no se registró la fecha de madurez fisiológica de cada tratamiento. El método de cuantificación puede presentar errores en la duración del LLG en particular, entre NH en FS que expusieron dicho período en ambientes con alto déficit hídrico y/o térmico, no obstante, sólo fue utilizado para cuantificar variables climáticas.

Para analizar la probabilidad de ocurrencia de eventos climáticos extremos temperaturas extremas y poder caracterizar la campaña agrícola en que se realizó el

presente estudio se analizó una serie climática de 40 años donde se evaluó la probabilidad acumulada de $DET_{>35}$ durante el PC y LLG para las cuatro FS evaluadas en este estudio. Los datos históricos fueron facilitados por el grupo de agrometeorología del Inta Pergamino y datos de la página web de Inta (<http://siga2.inta.gov.ar/>).

3.3.2. Rendimiento y sus componentes numéricos

La variable rendimiento se determinó pesando los granos de espigas cosechadas manualmente una vez que cada una de las UE alcanzó la madurez de cosecha. En general, las FS de SET, OCT y NOV se cosecharon con ca. ~12,9% de humedad y la de DIC con ca. ~16,7% en ambos NH. Las espigas se cosecharon de los 2 surcos centrales descartando los 2 surcos laterales como así también 1 m de cada extremo de los 2 surcos centrales para evitar el efecto bordura. El tamaño final de cada UE cosechada fue de 5,4 m². El rendimiento final por parcela se obtuvo pesando los granos cosechados, corrigiendo (por tabla de curva higroscópica para maíz pisingallo) para uniformizar el porcentaje de humedad al 14%. El rendimiento se expresó en kg ha⁻¹ considerando la densidad de plantas de cada tratamiento. Posteriormente, se contabilizaron 1000 granos en cada UE y se pesaron para la determinación del peso individual del grano (g grano⁻¹), el cual fue corregido al 0% de humedad. El peso de los granos se realizó con una balanza de precisión Ohaus Modelo Scout Pro202. El número de granos por unidad de superficie (m²; NG) de cada UE fue estimado a partir de las mediciones del rendimiento (en base seca) y peso de mil granos.

3.3.3. Parámetros de calidad industrial

Una vez registrados el rendimiento en granos y sus componentes numéricos se tomaron alícuotas de granos de cada UE para la determinación de los parámetros de calidad industrial: capacidad de expansión (V_{EXP}), calibre (K10) y categorías de tamaño de granos. El V_{EXP} se calculó a partir de una muestra de granos previamente tamizada y retenidas en una zaranda de orificios circulares de 4,5 mm, la cual fue guardada en bolsas de red o cartón permeable y colocadas en una cámara de estabilización de humedad, con humedad y temperatura ambiente controlada (Ziegler, 2001). El objetivo de ubicar los granos en esta cámara fue el de homogeneizar la concentración de humedad del grano y de todos los granos de las muestras en torno al 14%, debido a la importancia de la humedad del grano sobre la optimización del V_{EXP} (Song y Eckhoff,

1994; Gökmen, 2004). Para lograr esto la atmosfera de la cámara fue regulada a una condición constante de 20° C y humedad relativa de 70%. Las muestras permanecieron en dicha cámara por el lapso de 6 semanas (Hallauer, 2001). Posteriormente, se procedió a determinar el V_{EXP} , para lo cual se extrajo una cantidad de 250 gramos de cada muestra y se colocó en una maquina homologada y estandarizada a tal fin (Cretors, Valley Popcorn Co., Neenah, WI) para valorar la expansión. Cuando la maquina alcanzó ca. 250°C, se colocaron las muestras de granos mezcladas con 100 ml de aceite de coco. El tiempo de cocción de cada muestra en la maquina Cretors no fue constante, y fue determinado una vez lograda la expansión de la mayoría de los granos, cuando transcurrieron unos cuatro segundos entre reventones de dos granos sucesivos (Ziegler, 2001). A medida que reventaba el maíz este empujaba la tapa de la maquina hasta abrirla permitiendo que el maíz se descargue de la olla y se colecte en una probeta graduada para medir el volumen de expansión de la muestra. Sobre esta probeta se determinó la capacidad de expansión expresada como el volumen ocupado por las rosetas promediando el nivel al que llegaban las rosetas de la capa superior de la muestra. Luego el V_{EXP} se calculó como el cociente entre el volumen de rosetas y los 250 gramos de maíz de la muestra (unidades en $cm^3 g^{-1}$).

El K10 expresa la cantidad de granos contenidos en una muestra de 10 g. En primer lugar se procedió a homogeneizar la muestra y considerar los granos retenidos sobre zaranda de 4,5 mm de diámetro. Sobre dicha muestra tamizada se tomaron 10 g y se cuantificó la cantidad de granos contenidos en cada muestra.

Las categorías de tamaño de granos fueron determinadas en base a la proporción de granos en la muestra que quedaron retenidos en zarandas con orificios circulares de 6 mm y 4,5 mm de diámetro. Para esto, la muestra se sometió a vibración y movimientos rotatorios durante 1 minuto para que atravesen las dos zarandas metálicas mencionadas. Posteriormente, los granos que quedaron retenidos por el tamiz de 6 mm (en adelante SS 6 m) y los que no quedaron retenidos en el tamiz de 4,5 (en adelante DS 4,5 mm) - que son considerados como descarte en la industria - fueron pesados para el cálculo de la proporción de granos de cada categoría en función del peso total de la muestra tamizada.

3.4. Análisis de datos

Los datos se analizaron estadísticamente mediante los programas Statview (Abacus Concepts, 1992) e InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2017). Se ajustaron regresiones entre variables de interés con el software TableCurve 2D (Jandel, 2000). Los efectos de los tratamientos e interacciones sobre las variables de rendimiento y calidad industrial se evaluaron utilizando análisis GLS (generalized least squares, en sus siglas en inglés) de la librería nlme de R version 2.2.11 (R Development Core Team, 2010) para el ajuste de modelos lineales y mixtos con el programa estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2010). El modelo lineal siempre contempló al NH, FS, densidad y sus interacciones como efectos fijos, mientras que la repetición fue considerada como un efecto aleatorio. La comparación de medias fue realizada a través del test LSD de Fisher con un alfa de 0,05. Se evaluaron los supuestos de ANOVA, y se realizaron ajustes de heterocedasticidad de varianzas en el caso de que los supuestos no se cumplieran. Finalmente, se determinó el porcentaje de la varianza explicada por cada factor y/o interacción como el cociente entre la suma de cuadrados del factor y la suma de cuadrados total de modelo lineal.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización climática y duración de etapas

La campaña agrícola 2011-2012 transcurrió con evento La Niña con una intensidad de la señal de tipo leve correspondiente al fenómeno “El Niño Oscilación el Sur” (ENOS) (Wyrski, 1975). La campaña se caracterizó por una elevada heterogeneidad de las principales variables climáticas (lluvias y temperaturas) en relación con las medias históricas que caracterizan a la región donde se llevó a cabo el experimento. En la Figura 2 se muestra la evolución de la reserva de agua útil del suelo (AU) y en la Figura 3 y Tabla 3 las precipitaciones mensuales y acumuladas durante el ciclo del cultivo e históricas. La reserva de AU fue del 59% del AU total el 6 de octubre y las precipitaciones acumuladas fueron de 74 mm durante dicho mes. A partir de noviembre, las precipitaciones fueron muy escasas con valores inferiores a las históricas (período 1910-2010) (Tabla 3) reduciendo las reservas de AU a valores del 30 a 40% del AU total, especialmente en diciembre donde apenas llovieron 13 mm y el AU llegó al 0% el 20 de diciembre del 2011 (Figura 2). Esta condición de estrés hídrico se prolongó hasta el 11 de enero de 2012, pasada la floración femenina (R1) de las tres primeras FS, donde comenzaron a registrarse precipitaciones normales y la reserva de AU se incrementó en un 10% para el 20 de enero de 2012. Recién en febrero ocurrieron las lluvias más abundantes restableciendo la reserva de AU a valores del 70%. En el mes de marzo dichas reservas llegaron al 100% (Figura 2).

Tabla 3: Precipitaciones mensuales para la campaña agrícola 2011-2012 e históricas (1910-2010) correspondientes a pergamino (Agrometeorología INTA Pergamino).

	PRECIPITACIONES MENSUALES							
	Ago-11	Sep-11	Oct-11	Nov-11	Dic-11	Ene-12	Feb-12	Mar-12
Históricas (1910-2010)	40	54	105	100	106	65	75	102
Campaña 2011-2012	2	42	74	52	13	82	273	127

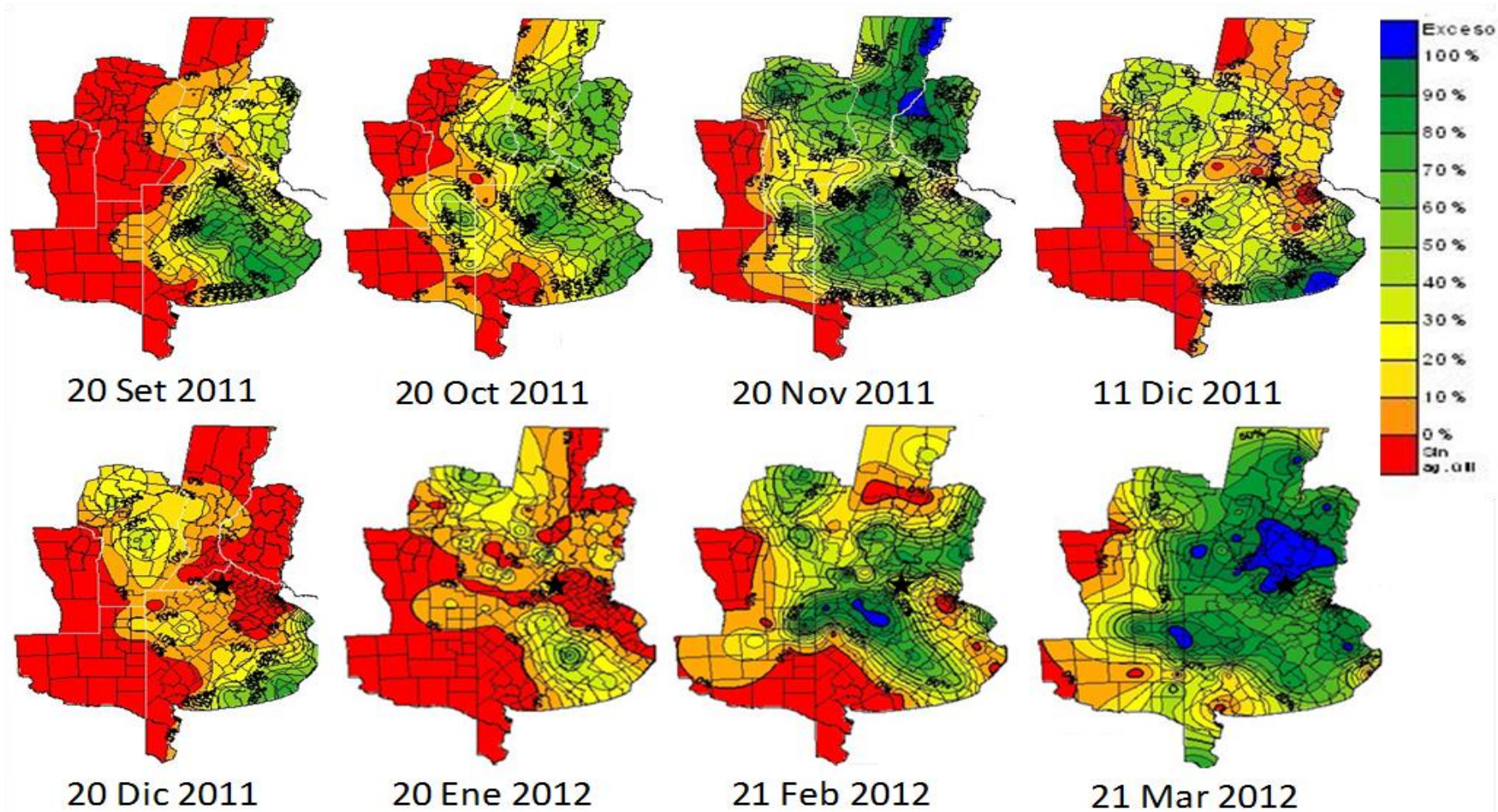


Figura 2: Evolución de la reserva de agua útil en el suelo (% capacidad de agua útil total) en la Región Pampeana entre septiembre 2011 y marzo 2012. La estrella indica el lugar donde se realizó el experimento. Fuente: Instituto clima y suelo Inta Castelar y Servicio Meteorológico Nacional

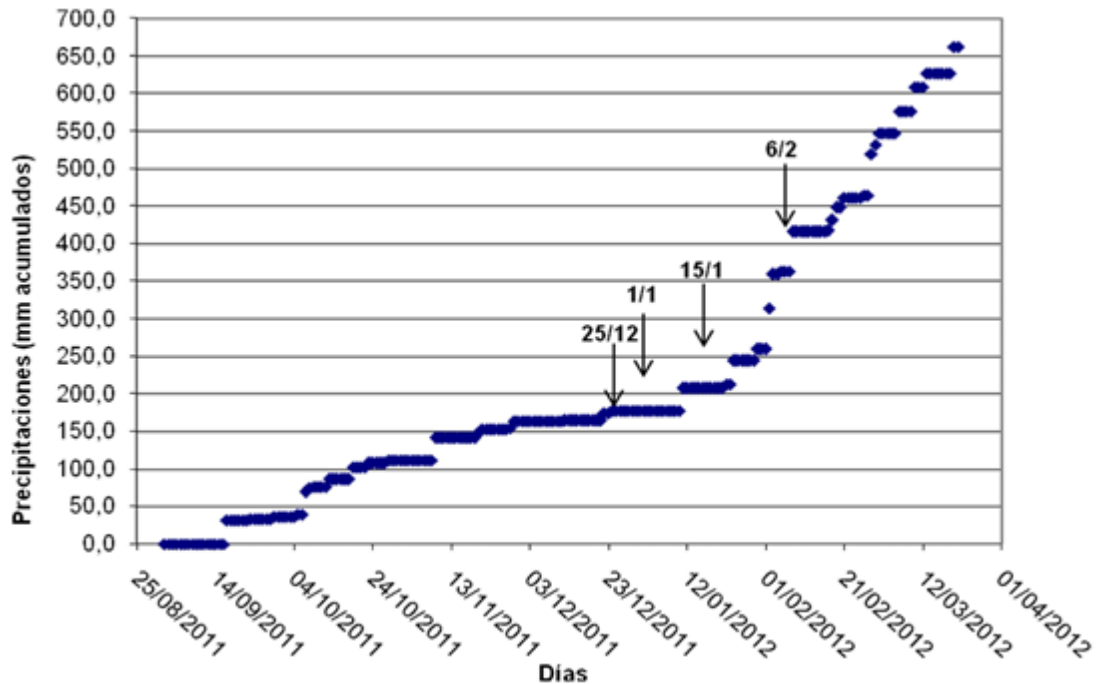


Figura 3: Precipitaciones acumuladas de la campaña 2011-12. Las flechas indican los momentos de la floración femenina (R1) de las sucesivas fechas de siembra evaluadas, 25/12 (SET), 1/1 (OCT), 15/1 (NOV) y 6/2 (DIC).

Las elevadas temperaturas tuvieron un rol determinante como componente del severo estrés especialmente durante el mes de enero (golpes de calor). A partir del mes de diciembre comenzaron a registrarse incrementos de la temperatura con picos de más de 35°C (Figura 4). El mayor estrés se registró a partir del 30 de diciembre al 10 de enero donde el cultivo pasó por un período de 12 días consecutivos con temperaturas máximas por encima de los 32°C siendo, en 7 de esos 12 días, superior a los 35°C. Estos registros térmicos llegaron a valores extremos los días 9 y 10 de enero donde la temperatura máxima fue de 41,9 y 40°C, respectivamente (Figura 4). En los días con temperaturas máximas, el estrés cesó momentáneamente con una lluvia el 11 de enero pero a partir del día 13 comenzaron a incrementarse nuevamente las temperaturas máximas superando los 30°C hasta el día 24 donde ocurrieron precipitaciones. Durante estos otros 11 días de intenso calor, las temperaturas máximas superaron los 35°C en 6 de ellos. La temperatura máxima promedio de todo el mes de diciembre de 2011 fue 1,1 °C mayor que el promedio histórico de los últimos 100 años, mientras que la de enero de 2012 fue 3,3°C superior a la del promedio histórico de 1967-2010 del mismo mes (Fuente: Inta Pergamino).

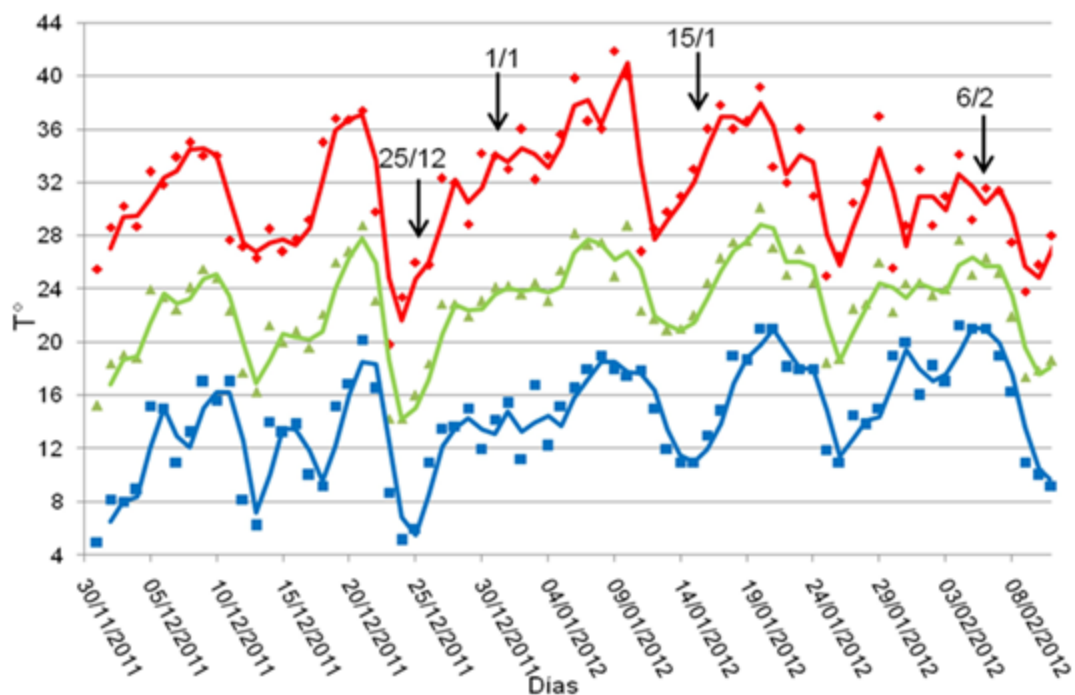


Figura 4: Evolución de la temperatura máxima (símbolos rojos), media (símbolos verdes) y mínima (símbolos azules) durante la campaña 2011-2012. Las flechas indican los momentos de ocurrencia de la floración femenina (R1) de las sucesivas fechas de siembras, 25/12 (SET), 1/1 (OCT), 15/1 (NOV) y 6/2 (DIC).

Tabla 4: Días con temperaturas máximas $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ($\text{DET}_{>35}$), déficit de presión de vapor (DPV; kPa), cociente foto-termal ($\text{MJ } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ m}^{-2}$) durante el período crítico de determinación del número de granos (PC) y durante el llenado efectivo de los granos (LLG) y precipitaciones (Pp; mm) acumuladas desde la emergencia hasta PC y el ciclo del cultivo para tratamientos regados (NHR) y en secano (NHS) y cuatro fechas de siembra SET, OCT, NOV y DIC. Cada valor representa el promedio de dos densidades de plantas y tres repeticiones.

NH	FS	PC				LLG			PV + PC Pp	Ciclo de cultivo Pp Total
		$\text{DET}_{>35}$	$\text{TT}_{>35}$	DPV	Q	$\text{DET}_{>3}$	$\text{TT}_{>35}$	DPV		
5										
NHR	SET	5	7	3,06	0,84	13	33,4	3,48	256	347
	OCT	11	25,1	3,55	0,79	7	15,3	3,05	256	442
	NOV	13	32,5	3,73	0,73	2	3	2,43	323	541
	DIC	3	4	2,64	0,73	0	0	2,04	497	742
NHS	SET	5	6,9	3,05	0,84	13	33,5	3,49	256	338
	OCT	9	23,9	3,41	0,78	7	13,6	2,94	286	495
	NOV	11	28,9	3,41	0,72	1	1	2,23	338	626
	DIC	2	3	2,51	0,69	0	0	2,04	534	749

En resumen, el PC de FS de OCT y NOV presentó un $\text{DET}_{>35}$ de 10 y 12 días y un DPV de 3,48 y 3,57 kPa, respectivamente. En cambio, el PC de las FS de SET y DIC transcurrió con menores $\text{DET}_{>35}$ y DPV ($\text{DET}_{>35}$ 5 y 2 días y DPV de 3,06 y 2,58 kPa, respectivamente). El $\text{DET}_{>35}$ durante el LLG fue de 13 y 7 días en SET y OCT y no se detectó en las FS de NOV y DIC. Por otro lado, el DPV durante el LLG varió de 2,04 a

3,48 kPa y se redujo 0,02 kPa por cada día de retraso en la FS, presentando la FS de SET los mayores DPV. Las precipitaciones acumuladas durante VEG más PC (promedio entre NHS y NHR) fueron menores en SET, OCT y NOV (ca 256, 271 y 330 mm, respectivamente) y mayores en DIC (ca. 515 mm) y las precipitaciones acumuladas durante todo el ciclo del cultivo de 342, 468, 583 y 745 mm, para SET, OCT, NOV y DIC, respectivamente. El cociente foto-termal en PC varió de 0,68 a 0,84 $\text{Mj } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-2}$ con los máximos en la FS de SET y menores en DIC (Tabla 4).

La duración de la etapa E-R1 tanto en días como en tiempo térmico y la asincronía floral mostraron un rango de variación de 55 a 76 días, 812 a 962 $^\circ\text{C d}$ y de 0 a 4,67 días, respectivamente. Ambas variables fueron estadísticamente significativas ($p < 0.001$) por los efectos principales de NH y FS y la interacción NH*FS (Tabla 5).

Tabla 5: Duración en días y grados días ($^\circ\text{Cd}$) de la etapa emergencia a floración (E-R1) y asincronía floral (ASI) para el híbrido Basso 5802 cultivado en dos niveles hídricos (NH), regados (NHR) y en secano (NHS), fechas de siembra SET, OCT, NOV y DIC y densidad de plantas (6 y 8 pl m^2).

NH	FS	D	Duración días	E-R1 $^\circ\text{C d}$	ASI (días)	
NHR	SET	6	76	896	0	
		8	76	892	0	
	OCT	6	60	812	0,67	
		8	60	812	0	
	NOV	6	58	846	0,67	
		8	57	835	0,33	
	DIC	6	55	871	0	
		8	55	871	0	
	NHS	SET	6	76	892	0
			8	76	892	0
		OCT	6	63	866	0,33
			8	64	882	1
NOV		6	64	956	4,67	
		8	64	962	3,33	
DIC		6	59	920	0,33	
		8	59	925	0,67	
Efectos principales e interacciones						
NH			***	***	***	
FS			***	***	***	
D			ns	ns	ns	
NH*FS			*** [0,93] ^Ψ	*** [12,61]	*** [0,67]	
NH*D			ns	ns	ns	
FS*D			ns	ns	ns	
NH*FS*D			ns	ns	*	

ns, *, **, *** indican un nivel de significancia de $p > 0,05$, $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$

^Ψ valores entre corchetes representan diferencias mínimas significativas

En NHS, la duración de la etapa E-R1 se incrementó 3,46 días respecto del NHR (ca. 5,3%). La interacción NH*FS mostró mayor duración de la etapa E-R1 por efecto del nivel hídrico seco en NOV (6 días) y en menor medida OCT y DIC (4 días) sin diferencias entre NH en SET (Tabla 5). Respecto de la asincronía floral, la interacción NH*FS indicó que los mayores valores de ASI ocurrieron en la FS de NOV en el NHS (ca. 5 días en la densidad de 6 pl m⁻² y 3 días en la de 8 pl m⁻²) mientras que para la misma FS en NHR fue solo de 1 día. Para los casos restantes, no existieron diferencias entre la floración femenina y masculina (Tabla 5).

4.2. Rendimiento en granos y sus componentes numéricos

El rendimiento en granos varió de 700 a 9544 kg ha⁻¹ debido al efecto de los tratamientos. Tanto el NH, FS, D y la interacción NH*FS afectaron significativamente ($p < 0,001$) la determinación del rendimiento en granos, de los cuales, el NH y la FS fueron los factores que explicaron la mayor proporción de la varianza total (43 y 38%, respectivamente) (Tabla 6). En este sentido, el rendimiento se redujo un 45% en NHS con respecto NHR y el ranking de rendimiento debido a la FS fue DIC > SET > OCT > NOV. No obstante, la interacción NH*FS indicó que reducciones del rendimiento debido al NH fueron significativamente de mayor magnitud en NOV (ca. 89%) y menores (ca. ~46%) en SET y OCT mientras que no existieron efectos del NH en DIC (Tabla 6). Por otro lado, aumentos en la densidad de plantas de 6 a 8 pl m⁻² aumentaron ($p < 0,01$) el rendimiento un 10% (Tabla 6).

Las variaciones del rendimiento mencionadas fueron mejor explicadas por el NG ($r^2 = 0,93$; $p < 0,002$) que por el PG ($r^2 = 0,19$; $p < 0,0001$) y no se encontró relación entre el NG y PG (Figura 5).

Cambios en el NH, FS e interacción NH*FS afectaron significativamente al NG y el PG (Tabla 6). La interacción NH*FS demostró que las reducciones en el NG debido al NH fueron estadísticamente significativas y de mayor magnitud en NOV (ca. 87%) respecto de SET (37%), OCT (41%) y nulas en DIC. No obstante, el factor NH y FS de siembra explicaron alrededor del 81% de la varianza total. Además, cambios en la densidad de plantas de 6 a 8 plantas m⁻² generaron un incremento en el NG en el orden del 9%.

Tabla 6: ANOVA del Rendimiento en granos (kg ha⁻¹; 14% humedad) y sus componentes numéricos número de granos por unidad de superficie (m²) (NG) y peso individual de granos (PG mg grano⁻¹; 0% de humedad) para el híbrido Basso 5802 cultivado en dos niveles hídricos (NH), regados (NHR) y en secano (NHS), fechas de siembra SET, OCT, NOV y DIC y densidad de plantas (6 y 8 pl m²).

NH	FS	Densidad	RTO	NG	PG	
NHR	SET	6	7783,5	4716	165,3	
		8	8618,7	5446	158,8	
	OCT	6	7359,2	4465	164,8	
		8	8121,6	4956	164,1	
	NOV	6	6973	3765	185,2	
		8	7592,2	4076	186,3	
	DIC	6	8722,2	4754	183,3	
		8	9544	5090	187,5	
	NHS	SET	6	4162,2	3060	135,8
			8	4754	3479	137,1
		OCT	6	4151,3	2841	146,6
			8	4004,5	2701	148,6
NOV		6	700,2	412	166,6	
		8	904,3	588	181,9	
DIC		6	8067,8	4222	191,3	
		8	9005,4	4768	188,9	
			8089,3 a	4658 a	174,4 a	
			4468,7 b	2759 b	161,2 b	
SET			6329,6 b	4175 b	149,3 b	
OCT			5909,2 b	3741 b	156,0 b	
NOV			4042,4 c	2210 c	179,8 a	
DIC			8834,9 a	4708 a	187,7 a	
			6	5989,9 b	3529 b	
			8	6568,1 a	3888 a	
Efectos principales e interacciones						
NH			*** (43%)	*** (41%)	*** (11%)	
FS			*** (38%)	*** (40%)	*** (67%)	
D			** (1%)	** (1%)	ns	
NH*FS			*** (14%) [916,6] ^Ψ	*** (13%) [591,2]	* (8%) [14,1]	
NH*D			ns	ns	ns	
FS*D			ns	ns	ns	
NH*FS*D			ns	ns	ns	

ns, *, **, *** indican un nivel de significancia de p>0,05, p<0,05, p<0,01, p<0,001. ^Ψ valores entre corchetes representan diferencias mínimas significativas y valores entre paréntesis la proporción de la varianza total explicada por el factor y/o interacción.

El PG varió de 135,8 a 191,3 mg grano⁻¹ y fue afectado por el NH, FS, y la interacción NH*FS (Tabla 6), siendo la FS, el factor que explicó el 67% de la varianza total, mientras que el NH y la interacción NH*FS representaron un 8 a 11% de la varianza total. En general, la FS de NOV y DIC presentaron un mayor ($p<0,001$) PG ca. ~186 que la FS de SET y OCT ca. ~152,6 mg grano⁻¹. El PG fue influenciado por el NH en todas las FS con la excepción de la FS de DIC. En este sentido, la menor disponibilidad hídrica generó una mayor reducción del PG en la FS de SET del 16% (162,17 vs 136,33 g para NH_R y NH_S, respectivamente) que en octubre y noviembre (ca. ~9%).

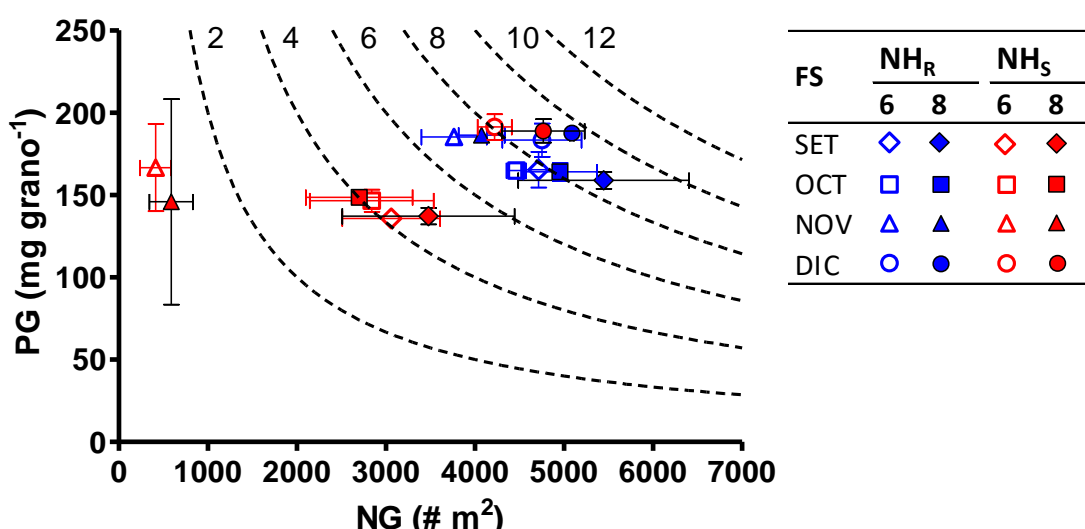


Figura 5: Relación entre el número de granos por unidad de superficie (NG) y el peso individual de los granos (mg grano⁻¹) e isólinas de rendimiento (en tn ha⁻¹) para el híbrido Basso 5802 cultivado en dos niveles hídricos (NH), regados (NHR) y en secano (NHS), fechas de siembra SET, OCT, NOV y DIC y densidad de plantas (6 y 8 pl m²). Las barras verticales y horizontales indican el desvío estándar de la media y cada punto representa el promedio de tres repeticiones.

4.3. Efectos de los tratamientos sobre los parámetros de calidad industrial

El parámetro V_{EXP} varió significativamente debido a la FS, NH*FS y FS*D ($p<0,05$) donde la FS explicó la mayor proporción de la varianza total (ca. 74%) (Tabla 7). En este sentido, V_{EXP} fue mayor en la FS de SET y OCT (ca. ~44,8 cm³ g⁻¹) y más bajo en NOV (ca. 42,9 cm³ g⁻¹) y DIC (ca. 41,5 cm³ g⁻¹). Por otro lado, V_{EXP} disminuyó en NHS con respecto NHR solo en la FS de DIC (ca. 40,8 vs 42,1 cm³ g⁻¹ para NHS y NHR, respectivamente; interacción NH*FS $p<0,001$) mientras que se encontraron

aumentos de V_{EXP} de ca. 3% ante el aumento en la densidad solo en la FS de OCT (interacción FS*D; $p < 0,05$) (Tabla 7).

Tabla 7: ANOVA de capacidad de expansión de grano en el popeado (V_{EXP} ; $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$), cantidad de granos en 10 gramos (K10), porcentaje de granos sobre zaranda de 6 mm (SS 6 mm) y porcentaje de granos debajo de zaranda de 4.5 mm de tamaño de orificios para el híbrido Basso 5802 cultivado en dos niveles hídricos (NH), regados (NHR) y en seco (NHS), fechas de siembra SET, OCT, NOV y DIC y densidad de plantas (6 y 8 pl m^2).

NH	FS	Densidad	V_{EXP}	K10	SS6 mm (%)	DS 4.5 mm (%)	
NHR	SET	6	45,2	60,7	75,9	0,20	
		8	44,8	63	76,8	0,20	
	OCT	6	43,8	60,7	83,9	0,10	
		8	44,4	61	83,3	0,17	
	NOV	6	42,7	54	92,1	0,10	
		8	42,9	53,7	93,9	0,13	
	DIC	6	42,7	54,7	91,7	0,10	
		8	41,5	53,3	92,3	0,17	
	NHS	SET	6	44,5	73,7	51	0,33
			8	44,3	73	48,9	0,20
		OCT	6	44,9	68,3	68,5	0,27
			8	46,6	67,3	73,3	0,17
NOV		6	43,5	56	97	0,40	
		8	43	55	95,6	0,30	
DIC		6	40,7	52,3	95,5	0,10	
		8	41	53	93,9	0,10	
NHR			43,5	57,6 b	86,2	0,15	
NHS			43,6	63,3 a	75,3	0,21	
SET			44,7 a	67,6 a	63,1	0,23	
OCT			44,9 a	64,3 b	77,3	0,18	
NOV			42,9 b	54,3 c	94,0	0,19	
DIC			41,5 c	53,3 c	93,4	0,12	
			6	43,5	60,4	80,6	
			8	43,6	60,1	81,7	
Efectos principales e interacciones							
NH			ns	*** (15%)	*** (13%)	*** (14%)	
FS			*** (74%) [¶]	*** (69%)	*** (68%)	*** (22%)	
D			ns	ns	ns	ns	
NH*FS			*** (11%) [0,96] ^ψ	*** (12%) [2,6]	*** (17%) [5,3]	** (17%) [0,09]	
NH*D			ns	ns	ns	** (11%) [0,06]	
FS*D			* (3%)	ns	ns	ns	
NH*FS*D			ns	ns	ns	ns	

ns, *, **, *** indican un nivel de significancia de $p > 0,05$, $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$. ^ψ valores entre corchetes representan diferencias mínimas significativas y [¶] valores entre paréntesis, la proporción de la varianza total explicada por el factor y/o interacción.

El rango de K10 fue mayor en NHS (ca. 52,3 a 73,7) que en NHR (ca. 53,3 a 63) a través de FS y densidades y fue afectado significativamente por los efectos principales del NH, FS y la interacción NH*FS (Tabla 7). La FS representó el 69% y el NH y NH*FS entre el 12 a 15% de la varianza total. El K10 fue mayor (ca. ~9%) en NHS que en NHR y se redujo en promedio 0,21 puntos por cada día de retraso en la FS ($r^2= 0,66$; $p<0,001$). El efecto del NH sobre K10 fue observado solo en las FS de SET y OCT (interacción NH*FS $p<0,001$) donde el K10 aumentó ante reducciones en la disponibilidad hídrica ca. 19 y 12% para SET y OCT, respectivamente. De hecho, NHS generó valores de K10 de 73,7 en SET y 68 granos 10 g^{-1} en OCT que superaron o estuvieron próximos, respectivamente al límite máximo de mercado (i.e., 70 granos 10 g^{-1}). El parámetro SS 6 mm fue mayor en NOV y DIC que en SET y OCT ($p<0,001$) y se redujo en NHS con respecto a NHR solo en las FS de SET y OCT ca. 35 y 15%, respectivamente (interacción NH*FS; $p<0,001$). El patrón opuesto a SS6 mm fue detectado para DS 4,5 mm, aunque los valores máximos fueron bajos ca. 0,4% considerando las exigencias de la industria (Tabla 7).

4.4. Relación entre componentes del rendimiento y calidad industrial con variables climáticas y entre el volumen de expansión con el peso individual y tamaño de grano

La figura 6 muestra la relación entre i) el rendimiento en granos con $DET_{>35}$ y DPV durante el PC y ii) V_{EXP} con $DET_{>35}$ y DPV durante el PC y LLG. Interesantemente, se encontraron asociaciones robustas ($47\% > r^2 < 81\%$) para todos los casos evaluados. Adicionalmente, se analizó un segundo indicador de los efectos de golpes de calor (i.e., $TT_{>35}$) durante PC y LLG, aunque este generó un menor coeficiente de determinación de la relación considerando al rendimiento y V_{EXP} que el obtenido cuando se utilizó $DET_{>35}$ (datos no mostrados).

La relación lineal y negativa entre el rendimiento con $DET_{>35}$ y DPV varió en función del NH, donde el rendimiento en granos se redujo $724,5\text{ kg ha}^{-1}$ en NHS y 162 kg ha^{-1} en NHR por cada día de incremento en $DET_{>35}$ (Figura 6A) y 6623 y 1578 kg ha^{-1} para NHS y NHR, respectivamente por cada punto de aumento en el DPV durante el PC (Figura 6B). En cambio, la relación entre V_{EXP} con $DET_{>35}$ y DPV fue única a través

de todos los tratamientos, y de tipo cuadrática para PC y lineales-plateau para el LLG. En general, se encontró que V_{EXP} aumenta hasta $DET_{>35}$ de 8 días (Figura 6C) y DPV de 3,23 kPa (Figura 6D) en PC y hasta $DET_{>35}$ de 4,5 días (Figura 6E) y 2,92 kPa (Figura 6F) en LLG, y a partir de los cuales, V_{EXP} disminuye en PC o es máximo en LLG.

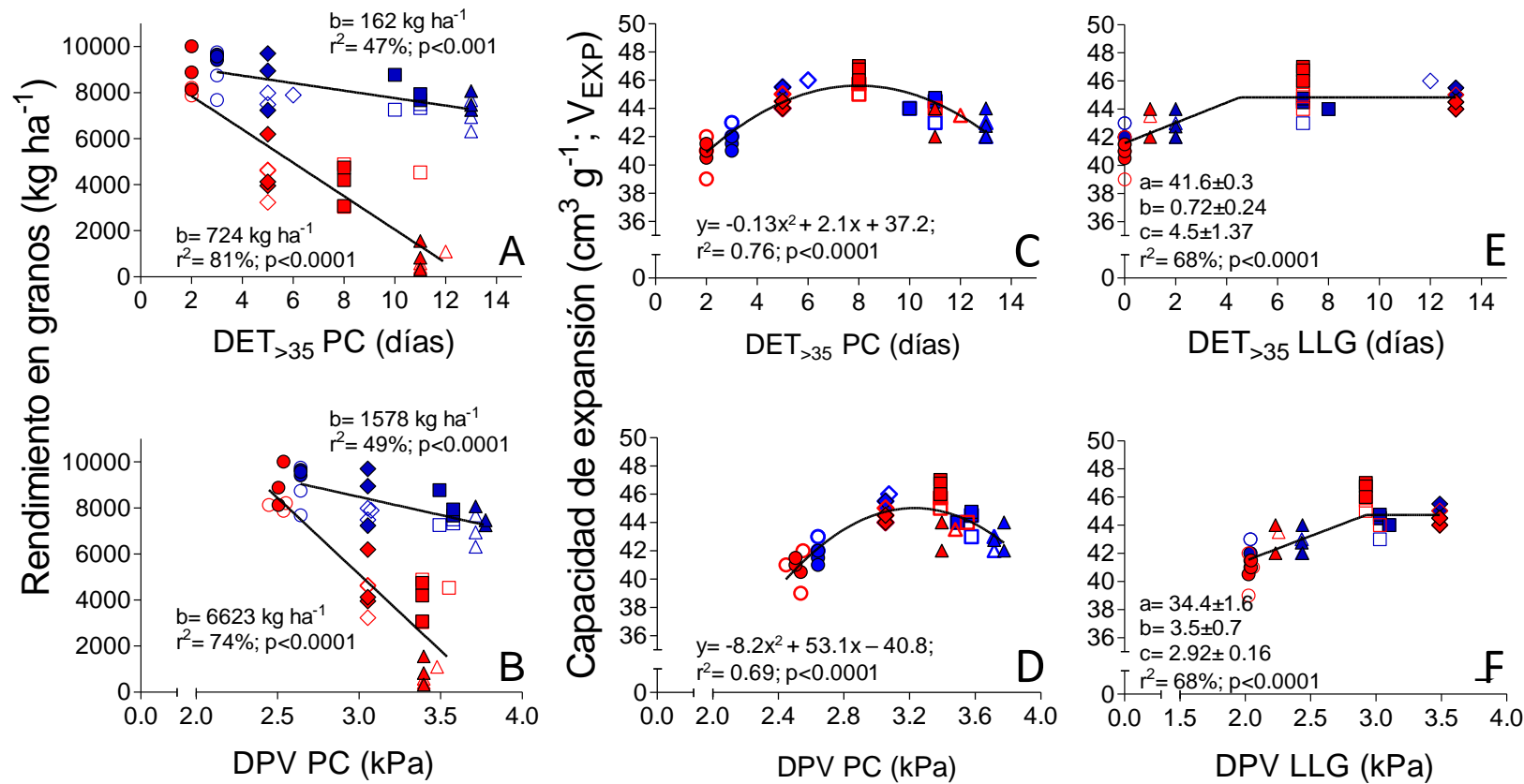


Figura 6: Relación entre el rendimiento en granos y A) la cantidad de días con temperaturas superiores a 35°C ($\text{DET}_{>35}$ PC) y B) déficit de presión de vapor (DPV) durante el periodo crítico de determinación del número de granos (PC) y entre la capacidad de expansión en el popeado (V_{EXP}) y C) el $\text{DET}_{>35}$ D) DPV durante el período crítico (PC) y E) el $\text{DET}_{>35}$ y F) DPV durante el llenado efectivo de los granos (LLG) para tratamientos regados (NHR) y en seco (NHS), fechas de siembra de SET, OCT, NOV y DIC y densidad de plantas (6 y 8 pl m^2) para el híbrido Basso 5802. Las líneas llenas representan la relación lineal $\text{RTO} = a + b \cdot X$ en A y B y lineal-plateau $V_{\text{EXP}} = a + b \cdot X$ cuando $X \leq c$ y $V_{\text{EXP}} = a + b \cdot c$ cuando $X > c$.

La figura 7 muestra la relación entre V_{EXP} con el rendimiento en granos (A), el PG (B) y SS 6 mm (C).

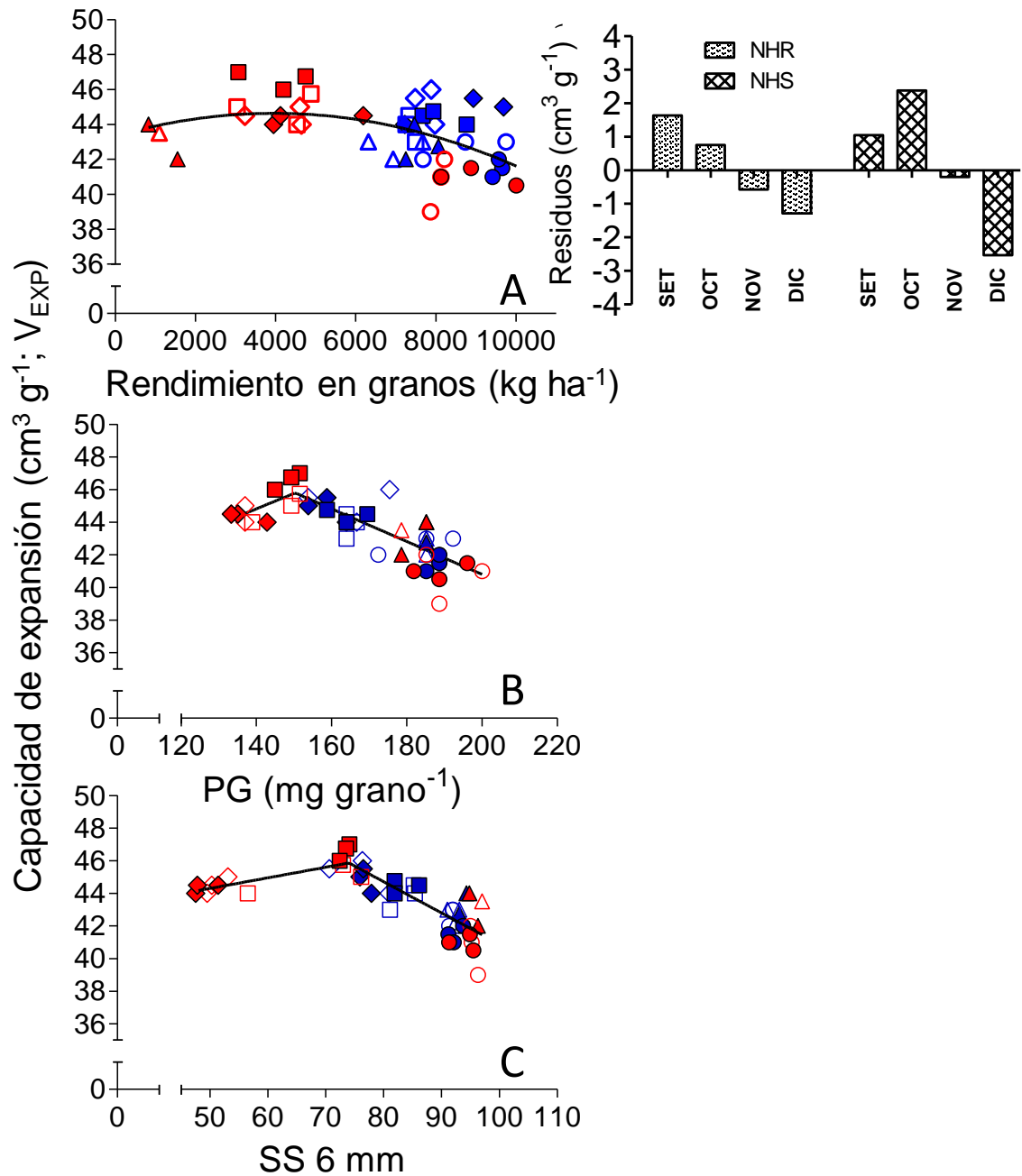


Figura 7: Relación entre la capacidad de expansión en el popeado (V_{EXP} ; cm³g⁻¹) con el rendimiento en granos (A), el peso individual del grano (PG) (B) la proporción (%) de granos de la muestra retenidos en una zaranda con orificios circulares de 6 mm (SS 6 mm) (C) para distintas fechas de siembra, disponibilidad hídrica, y densidad de plantas. Símbolos como en la Figura 6. El inserto en A muestra los residuos del modelo para cada fecha de siembra y nivel hídrico. En A, la línea continua representa el ajuste de la función cuadrática $y = 43.3 + 0.00064x - 0.000000083x^2$; $r^2=25\%$; $p<0.01$. En B y C, la línea continua representa el ajuste de la función bi-lineal $V_{EXP} = a + b \cdot X$ cuando $X \leq c$ y $a + b \cdot c + d \cdot (X - c)$ cuando $X > c$. Los valores \pm s.e. de cada parámetro son: en B) $a = 31.6 \pm 8.1$, $b = 0.09 \pm 0.06$, $c = 150.3 \pm 4.01$ y $d = -0.1 \pm 0.01$; $r^2 = 66\%$; $p < 0.0001$ y en C) $a = 41 \pm 1.8$, $b = 0.06 \pm 0.03$, $c = 73.9 \pm 2.7$ y $d = -0.19 \pm 0.02$; $r^2 = 71\%$; $p < 0.0001$.

La relación cuadrática detectada entre V_{EXP} y rendimiento ($r^2= 25\%$; $p<0.01$) indicó que existe una relación negativa entre ambas variables cuando el rendimiento del cultivo superó los 3952 kg ha^{-1} , que en general, fue promovida por los menores valores del V_{EXP} registrados en la FS de NOV y DIC en ambos NH (inserto de la Figura A), aun cuando el rendimiento en granos fuera similar entre fechas de siembra en el NHR.

Respecto de la relación entre V_{EXP} con el PG y con la proporción de granos de la muestra SS 6 mm se encontraron asociaciones de tipo bilineales en ambos indicando que el máximo V_{EXP} se produce con un PG (Figura 7B) y SS 6 mm (Figura 7C) óptimo, siendo tales valores de ca. $150 \text{ mg grano}^{-1}$ y $73,9\%$. Por encima de dichos umbrales, V_{EXP} decrece a una tasa de $0,1$ y $0,19 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ por cada aumento en el PG y SS 6 mm, respectivamente.

4.5. Frecuencias acumuladas de temperaturas extremas históricas.

En la figura 8 se muestra la probabilidad de ocurrencia de $DET_{>35}$ durante PC y LLG para las distintas FS evaluadas en una serie climática de 72 años (desde 1945 hasta 2017). Como era de esperar, la FS de DIC reduce considerablemente la probabilidad de ocurrencia de $DET_{>35}$ con respecto a las FS restantes, siendo estas diferencias menos acentuadas en PC (Figura 8A) que en LLG (Figura 8B). Por ejemplo, la probabilidad de ocurrencia de $DET_{>35} \geq 4$ días en PC es de un 25% de los años para SET, OCT y NOV mientras que para la FS de DIC es de un 15% de los años. Para el LLG, $DET_{>35}$ de ≥ 4 días sucede en 17% de los años para SET, OCT y NOV y 5% de los años para DIC.

No obstante, la probabilidad de ocurrencia de mayores $DET_{>35}$ como los registrados en la campaña agrícola 2011-2012 evaluada, - ca. 10 a 12 días en PC para OCT y NOV y de 13 y 7 días en LLG para SET y OCT - se observa en solo un 4 y 6% de los años de las FS mencionadas para el PC y LLG, respectivamente.

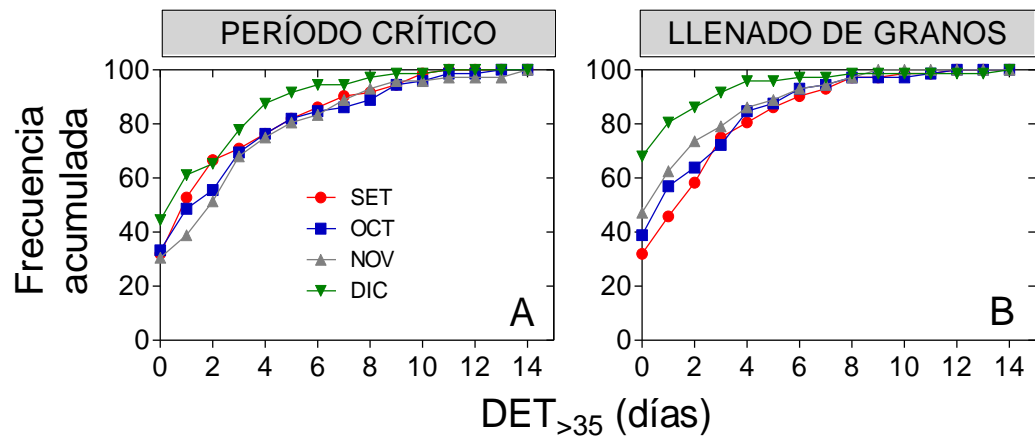


Figura 8: Frecuencia acumulada de días con temperaturas $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ($\text{DET}_{>35}$) durante el período crítico de fijación (-15 días y + 250 $^{\circ}\text{C d}$; temperatura base 0°C de R1) y llenado de granos (682.5 $^{\circ}\text{C d}$ [temperatura base 0°C] acumulados a partir de finalizado el PC) para fechas de siembra del 22/09/2011 (SET), 17/10/2011 (OCT), 11/11/2011 (NOV) y 06/12/2011 (DIC) en una serie climática desde 1945 hasta 2017.

5. DISCUSIÓN

El maíz es cultivado en Argentina bajo la combinación de escenarios climáticos (incrementos de temperatura y restricciones hídricas) que con frecuencia afectan el rendimiento y la calidad industrial (Lobell et al., 2011; Maddonni, 2012). Las prácticas de manejo como la fecha de siembra han permitido mitigar estos efectos a través del posicionamiento de los períodos críticos del cultivo en ambientes con menor demanda atmosférica y menor frecuencia de temperaturas extremas (Otegui et al., 1995; Maddonni, 2012). Tales aspectos explican la mayor superficie de siembra de maíz realizada a fechas tardías de diciembre (PAS, 2015). Hasta el presente, diversos estudios han explorado las bases ecofisiológicas del impacto del estrés sobre el rendimiento y la calidad. No obstante, tales estudios fueron conducidos para estudiar el efecto de temperaturas extremas sin limitantes hídricas ni nutricionales, por lo que el impacto de la combinación de estrés térmico e hídrico modulados por la fecha de siembra no ha sido documentado para maíz pisingallo. En este estudio se evaluaron en condiciones de campo la respuesta del rendimiento y sus componentes, número de granos y peso de granos y calidad del grano de maíz pisingallo bajo un rango amplio de fechas de siembras con dos niveles hídricos contrastantes y dos densidades de plantas en una campaña agrícola que estuvo influenciada por el fenómeno ENSO La Niña (ENOS; Wyrteki, 1975).

5.1. Causas de las variaciones del rendimiento en granos

En este estudio, el híbrido de maíz pisingallo utilizado mostró un amplio rango de variación del rendimiento debido principalmente a la combinación de la disponibilidad hídrica y fechas de siembra, y en menor medida a cambios en la densidad poblacional (Tabla 6). El rendimiento en granos fue maximizado bajo la combinación de la FS de DIC en ambos NH ($\sim 9133 \text{ kg ha}^{-1}$) mientras que los rendimientos más bajos se registraron en la FS de NOV y NHS (802 kg ha^{-1}) siendo las diferencias de rendimiento entre NH de mayor magnitud en esta última FS e intermedios en SET y OCT comparado con DIC. De este modo, cambios en la FS generaron menos variaciones del rendimiento en NHR que en NHS. En este sentido, la pérdida de rendimiento cuantificada por cada $\text{DET}_{>35}$ en PC fue de $724 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ en NHS y $162 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ en NHR. Tales resultados fueron explicados por una combinación de días con temperaturas extremas

(golpe de calor) y déficit hídrico debido a las escasas precipitaciones que fueron exacerbados en la FS de NOV.

La fuerte asociación entre el rendimiento en granos con el $DET_{>35}$ y DPV durante el PC (Figura 6 A y B) pueden ser explicadas a nivel fisiológico a través del cierre estomático causado por altas temperaturas y como respuesta indirecta al efecto del incremento del DPV y al aumento en la concentración interna de CO_2 por elevación de la respiración (Lösch, 1979). Como consecuencia, el cese de la transpiración origina una elevación de la temperatura foliar que según la magnitud puede afectar a los procesos fotosintéticos. Por ejemplo, cultivos regados y expuestos a mayores DPV pueden regular la temperatura foliar por incrementos de la transpiración reduciendo la temperatura foliar hasta $8^{\circ}C$ por debajo de la temperatura del aire (Reynolds et al., 1994). En cambio, cultivos bajo condiciones de déficit hídrico, un alto DPV puede incrementar la temperatura foliar hasta $15^{\circ}C$ por encima de la temperatura del aire (Alschuler, 1982), resultando perjudicial para la funcionalidad del aparato fotosintético.

Debido a que el 93% de las variaciones del rendimiento fueron explicadas por el número de granos por unidad de superficie, la magnitud de los estreses durante el PC de fijación de granos impacto sobre este componente. Por ejemplo, restricciones hídricas generaron, con respecto al NHR, reducciones del número de granos del 87% en NOV, 37% en SET y 41% en OCT.

Las reducciones del NG y en consecuencia, fuertes reducciones del rendimiento debidas a golpes de calor alrededor de floración registradas en este trabajo especialmente en NHS estuvieron asociadas con incrementos del ASI en la FS de NOV (Tabla 5) en coincidencia con estudios de Cicchino et al. (2010) y fallas en el proceso de polinización, principalmente por falta de polen viable (deshidratación) y a procesos de fecundación y cuaje de granos (Barnabás et al. 2008; Rattalino et al., 2013). Lo citado puede observarse claramente en las imágenes de las espigas cosechadas donde se observan claramente las fallas en la polinización y aborto de los granos (Figura 9).

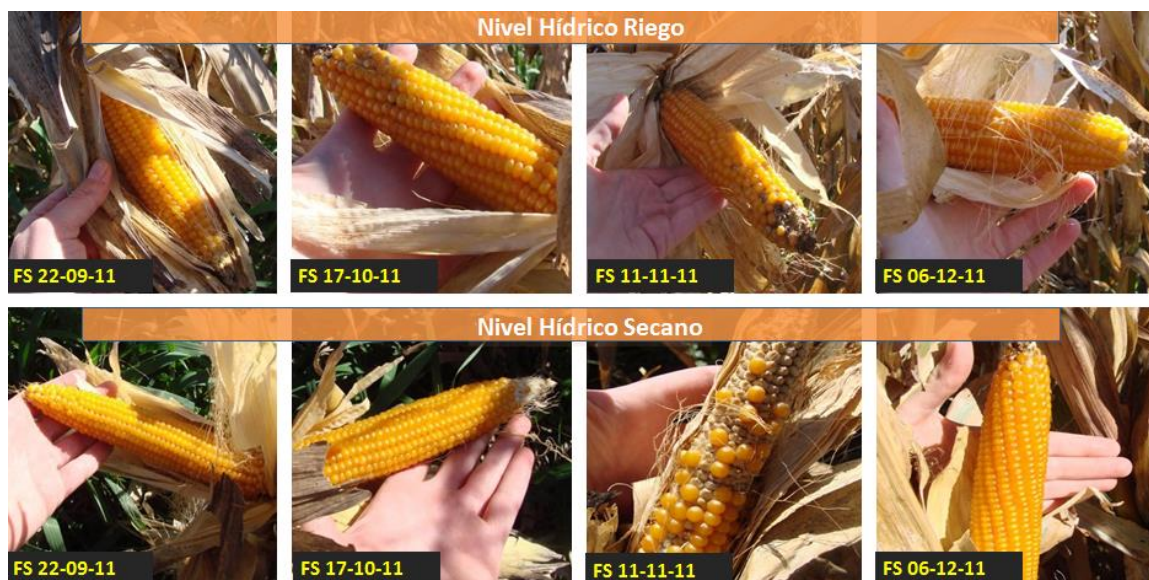


Figura 9: Imágenes de espigas a cosecha de los distintos tratamientos.

El PG también fue un componente de importancia en la determinación del rendimiento en granos. Si bien la variación del rendimiento explicada por el PG fue baja (ca. 19%), este componente permitió maximizar el RTO en la FS de DIC con respecto a SET y OCT en el NHR ya que no se registraron diferencias en el NG entre estas fechas pero si un menor PG en SET y OCT que DIC (Figura 5). Estos resultados explicaron la brecha de rendimiento registrada para FS de SET que históricamente son las que con mayor probabilidad permiten alcanzar los rendimientos potenciales de la región (i.e., 9.5 a 10 tn ha⁻¹ com. personal Benito Fuentes) donde el cultivo habitualmente puede explorar un mejor ambiente foto-termal. A diferencia de la FS de DIC, la FS de SET posicionó el LLG en ambientes con alta demanda atmosférica y mayor frecuencia de días con temperaturas >35 °C que redujeron el PG. Por consiguiente, la primera parte de la hipótesis 1 que estable “El atraso en la fecha de siembra en el cultivo de maíz pisingallo disminuye el rendimiento en granos” no se acepta debido a que la FS de DIC produjo el máximo rendimiento en granos debido a que, comparado con las FS de OCT, NOV, la de DIC ubica los periodos críticos en condiciones de menor ocurrencia de estrés hídrico y térmico. No obstante más estudios son necesarios para evaluar la FS óptima del cultivo debido a la variabilidad interanual del clima.

5.2. Calidad industrial y relación entre componentes

El PG, como un componente importante en la comercialización de maíz pisingallo fue afectado por reducciones del NH en SET y en menor medida en OCT y NOV y aumentó ca. 0,4 y 0,75 mg grano⁻¹ por cada día en que la FS se retrasa para el NHR y NHS, respectivamente. El mayor PG en FS tardías no fue un resultado esperado, principalmente debido a que una alta fijación de granos en FS tardías puede provocar desbalances de la relación fuente destino en postfloración y generar granos más livianos (Vega et al., 2017). No obstante, dos aspectos permitirían explicar estos resultados. Primero, un mayor estrés térmico y DPV durante el llenado de granos redujo el PG en las siembras tempranas. Tales resultados coinciden con los reportados por Mayer (2015) quienes reportaron que el PG se reduce ante eventos de golpes de calor debido a caídas de la RUE que genera un acortamiento de la duración del llenado de granos. En segundo lugar, el maíz pisingallo en comparación con maíces de tipo dentados presenta, ante una misma disponibilidad de asimilados por grano i) un menor PG potencial en torno a floración y ii) una mayor estabilidad ante variaciones en la disponibilidad de asimilados durante el llenado (Severini, 2011).

Los parámetros de calidad industrial, V_{EXP} y K10 presentaron fuertes variaciones debido a efectos de la combinación del NH*FS y a diferencia de lo registrado para el rendimiento en granos y PG, ambos decrecen en forma significativa con posterioridad a la FS de OCT. Estos resultados difieren parcialmente de estudios de Mayer (2015) que demostró que V_{EXP} es un rasgo estable ante variaciones en golpe de calor durante la primera y segunda mitad del llenado de granos en pisingallo. No obstante, V_{EXP} obtenidos en fechas tardías se encuentran por encima del valor mínimo de este parámetro requerido por la industria (i.e., 40 cm³ g⁻¹) (Tabla 7). Además, se encontró que el V_{EXP} se asoció positivamente con incrementos de $DET_{>35}$ y DPV hasta un valor máximo durante el PC y LLG a partir del cual V_{EXP} disminuye en PC o es máximo en LLG (Figura 6 C, D, E y F). Sin embargo, estas relaciones no resultarían de tipo causal, ya que se corresponden con el efecto negativo del estrés sobre el PG y tamaño del grano. En este sentido, V_{EXP} se asoció negativamente con incrementos del PG (Figura 7B) y SS 6 mm (Figura 7C) por encima de un óptimo (Tabla 6 y Figura 7B y C) indicando que una mayor proporción de granos pesados en la muestra (i.e., SS 6 mm) no permite

compensar la menor cantidad de granos registrados en la misma y por ende el volumen de rosetas de la cantidad de granos en la muestra resulta menor de aquellas que presentan un menor PG y mayor cantidad de los mismos. El incremento del PG ante atrasos en la FS explica claramente la reducción del parámetro K10 en las FS de DIC dado el método de cálculo de este último (Tabla 6 y 7). De hecho, NHS generó valores de K10 de 73,7 granos en 10 g en las FS de SET y 68 granos 10 g⁻¹ en OCT que superaron o estuvieron próximos, respectivamente al límite máximo de mercado (i.e., 70 granos 10 g⁻¹). Dada la fuerte asociación que se registró entre el PG con los parámetros de calidad, se encontró que V_{EXP} y el rendimiento en granos se asociaron negativamente cuando el rendimiento del cultivo superó los 3952 kg ha⁻¹ (Figura 7A).

Respecto de la relación entre V_{EXP} y PG, existen opiniones diversas sobre qué tamaño de grano es el que produce mayor V_{EXP}. La mayoría de los autores en línea con los resultados de este estudio, afirman que son los granos de tamaño mediano los que maximizan la expansión (Song et al., 1991; Allred-Coyle et al., 2000; Gökmen, 2004; Ademiluyi y Mepba, 2009) mientras que otros (e.g. Ceylan y Karababa, 2002) reportaron que los granos de menor tamaño son los que más expanden. Otros estudios indicaron que los incrementos observados en la fracción de granos más pequeños (calibre) por efecto de los golpes de calor para el maíz pisingallo implican una pérdida de rentabilidad para la industria elaboradora de pochoclos, debido a que dichos granos son habitualmente descartados por su popeado defectuoso (Eckhoff y Paulsen, 1996). La fuerte asociación entre V_{EXP} y SS6 y/o PG coincide con los reportados por diferentes estudios quienes demuestran que V_{EXP} estuvo asociado a variaciones en el PG (Song et al., 1991; Allred-Coyle et al., 2000; Ceylan y Karababa, 2002; Gökmen, 2004; Ademiluyi y Mepba, 2009) y con lo observado por Soyly y Tekkanat (2007), quienes establecieron un ranking entre distintas características del grano que afectan al V_{EXP} y determinaron que este era más influenciado por el PG, luego por el tamaño del grano y por ultimo por el contenido de proteína. En este estudio no se evaluó el contenido y concentración de proteínas siendo una de las características del grano que incide en el volumen de expansión. Trabajos anteriores refieren a que V_{EXP} está estrechamente a la textura de la matriz endospermática del grano, la cual a su vez está asociada a la cantidad y tipo de proteínas de reserva del endosperma, en particular zeínas (Borrás et al., 2006) y a su vez, tanto V_{EXP} como la concentración y contenido de proteínas del

grano están asociadas con la tasa de crecimiento por planta por grano durante el llenado efectivo (Severini, 2011). Por consiguiente, sería preciso evaluar si los menores V_{EXP} en FS de DIC puedan estar asociados a caídas en la concentración de N en granos ya sea por una baja capacidad del cultivo en capturar N (Melchiori et al., 2014) o una reducida oferta térmica y radiativa en fechas de siembra tardías que afectan la disponibilidad de asimilados por grano. No obstante, la fuerte relación entre V_{EXP} y $SS6$ indica que la caída de V_{EXP} con atrasos en la fecha de siembra se debe exclusivamente a la mayor proporción de granos de mayor peso. Por consiguiente, los resultados de este estudio permiten aceptar parcialmente la segunda parte de la hipótesis 1 que establece “El atraso en la fecha de siembra en el cultivo de maíz pisingallo afecta la calidad del grano a través de incrementos en el calibre (K10) y reducciones de la capacidad de expansión” ya que si bien se detectó, principalmente, una reducción de la capacidad de expansión con el atraso de la FS, la misma se encuentra dentro de los valores normales para la comercialización del maíz pisingallo. Finalmente los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis 2 que establece “El peso del grano presenta una relación de tipo óptima con la capacidad de expansión”.

5.3. Implicancias agronómicas

Tal como lo demuestran los resultados de este estudio, una de las principales estrategias de producción para evitar la coincidencia de los períodos críticos del cultivo con estreses abióticos está basada en el escape a los mismos. No obstante, para diseñar estrategias de manejo es preciso i) conocer las características del estrés y su variación intra e inter-anual, (ii) identificar las etapas del cultivo más sensibles al estrés y iii) predecir la sucesión de la fenología del cultivo en el ambiente objetivo. Por tal motivo, se evaluó la variación intra e interanual de golpes de calor durante el PC y LLG en una serie climática desde 1950 a 2012 correspondiente al lugar donde se llevó a cabo el ensayo. Los análisis revelaron que la campaña agrícola donde se realizó este experimento fue considerada como atípica en base a los valores históricos de la región ya que $DET_{>35}$ iguales o por encima de ca. 7 días presentan una probabilidad de ocurrencia en 3 de 72 años. Estos resultados coinciden con estudios de Rattalino Edreira et al. (2011) quienes sugieren que Buenos Aires constituye la provincia de la región pampeana con menor riesgo térmico debido al efecto moderador del mar. No obstante,

los resultados de este estudio resultan de gran importancia ya que estos escenarios combinados de alto DPV y $DET_{>35}$ probablemente se vean agravados en los próximos años por efectos del cambio climático global (IPCC, 2014) y resultan de mayor impacto para regiones extra-pampeanas donde la probabilidad de estos estreses aumenta considerablemente (Lobell et al., 2011; Maddonni, 2012).

Basados en los resultados de este estudio, la elección de fechas de siembra tardías para el manejo de maíz pisingallo resulta en una excelente estrategia de escape a estreses térmicos además de permitir una mejor condición hídrica y nitrogenada al inicio de la siembra (Caviglia et al., 2014) y alcanzar rendimientos potenciales de la región con calidad industrial dentro de los valores de comercialización establecidos por la industria. Además, el cultivo de maíz pisingallo resulta de una considerable alternativa de producción debido a la estabilidad del PG ante posibles reducciones de la disponibilidad de asimilados por granos durante el llenado de los mismos (Severini, 2011) debido a la caída radiativa y térmica en siembras tardías y un menor riesgo de vuelco por presentar una menor demanda de asimilados para el llenado de los granos. Sin embargo, debe considerarse un manejo agronómico ajustado mediante un correcto monitoreo de plagas, malezas y enfermedades cuya presión es alta en FS tardías y los genotipos de maíz pisingallo no poseen eventos transgénicos de tolerancia y/o resistencia a herbicidas.

6. CONCLUSIONES

La campaña agrícola en que se realizó el presente estudio estuvo caracterizada por fuertes escenarios de estrés térmico (golpes de calor) e hídrico principalmente exacerbados durante el PC de las FS de OCT y NOV y durante el LLG de las FS de SET y OCT. Estos escenarios generaron fuertes variaciones en el rendimiento en granos (329 a 10009 kg ha⁻¹). La situación NHS generó fuertes reducciones del rendimiento, en particular en la FS de NOV, debido a la combinación conjunta de altas temperaturas y DPV. Por el contrario, la situación de NHR permitió amortiguar el efecto de los estreses abióticos mencionados a través de las FS evaluadas. No obstante, la FS de DIC i) generó los mayores rendimientos cercanos al potencial del cultivo en la región debido a que la ocurrencia de estreses abióticos en PC y LLG se redujo considerablemente, aun cuando esta FS posicionó el PC con menor cociente foto-termal y ii) no se encontraron diferencias entre NHR y NHS comparado con las FS de SET, OCT y NOV. Los máximos rendimientos registrados en DIC fueron explicados por una alta fijación de granos y peso individual de los mismos.

Con respecto a la calidad industrial de maíz pisingallo, se encontró que atrasos en la FS generan menores V_{EXP} y K10 pero aumentan la fracción de granos de mayor tamaño. Debido a la importancia del PG en la determinación del V_{EXP} y K10, se encontró que V_{EXP} , la principal variable de la industria de pochoclos, presentó un PG y SS 6 mm óptimo por encima del cual V_{EXP} disminuye. Existe una asociación negativa entre rendimiento y V_{EXP} por consiguiente, aquellos factores de manejo agronómico que permitan maximizar el PG siempre tenderán a generar menor V_{EXP} . Sin embargo, los menores V_{EXP} alcanzados en la FS de DIC estuvieron posicionados por encima de los límites establecidos por el mercado de esta especialidad. De esta manera, FS tardías de DIC permiten maximizar el rendimiento en granos con parámetros de calidad conforme para la industria. Finalmente, los resultados de este estudio resultan novedosos e inéditos ya que no se conocía hasta el momento el efecto de la FS y estrés térmico combinado con hídrico sobre la determinación del rendimiento y la calidad de maíz pisingallo. Tales aspectos resultan de importancia para regiones extra-pampeanas donde la probabilidad de estreses térmicos e hídricos son frecuentes y para regiones pampeanas, que si bien la probabilidad de que los escenarios climáticos adversos de la campaña 2011-.2012 son

casi nulos (3 a 5% de 72 años), se prevé que estos aumenten en frecuencia en el futuro por efectos del cambio climático global.

7. BIBLIOGRAFÍA

Ademiluyi T.F., Mepba H.D. 2009. Effects of engineering properties on the poppability of Nigerian popcorn. *International Journal of Food Engineering* 5(1).

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Reference evapotranspiration (ET₀). In: *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO, Irrigation and Drainage, Rome, Italy, pp. 15–86.

Allred-Coyle T.A., Toma R.B., Reiboldt W., Thakur M. 2000. Effects of moisture content, hybrid variety, kernel size, and microwave wattage on the expansion volume of microwave popcorn. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 51(5),389–394.

Altschuler M.M. 1982. Heat shock proteins and the effect of heat shock in plants. *Plant Molecular Biology*, 1, 103–115.

Andriani J. 2012. Desarrollo y validación del software de balance hídrico de cultivos extensivos “Bahicu”. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Actas del Congreso, Mar del Plata, Argentina.

Barnabás B., Jager K., Feher A. 2008. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant Cell Environ.* 31, 11-38.

Borrás F., Seetharaman K., Yao N., Robutti J.L., Percibaldi N.M., Eyherabide G.H. 2006. Relationship between popcorn composition and expansion volume and discrimination of corn types by using zein properties. *Cereal Chemistry* 83(1), 86–92.

Caviglia, O.P., Melchiori, R.J.M. and Sadras, V.O., 2014. Nitrogen utilization efficiency in maize as affected by hybrid and N rate in late sown crops. *Field Crops Research*, 168:27-37.

Ceylan M., Karababa E. 2002. Comparison of sensory properties of popcorn from various types and sizes of kernel. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82(1), 127–133.

Cicchino M., Rattalino Edreira J.I., Uribelarrea M., Otegui M.E. 2010. Heat Stress in Field-Grown Maize: Response of Physiological Determinants of Grain Yield. *Crop Science* 50, 1438-1448.

Cirilo A.G., Andrade F.H. 1994. Sowing date and maize productivity. II Kernel number determination. *Crop Sci.* 34, 1044-1046.

Concepts, Abacus 1992. "StatView." Abacus Concepts, Inc., Berkeley, CA: 319-332.

De Bernardi Luis A., 2017. Perfil del maíz pisingallo. Ministerio de Agroindustria. Disponible en: https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/ss_mercados_agropecuarios/areas/granos/archivos/000061_Informes/899991_Perfil%20del%20Ma%C3%ADz%20Pisingallo.pdf

Di Rienzo, J.A., Macchiavelli, R. E., Casanoves, F. 2010. Modelos lineales generalizados y mixtos en InfoStat. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Eckhoff S.R., Paulsen M.R. 1996. Maize. En: Henry, R.J., Kettlewell, P.S. (Eds.), *Cereal grain quality*. Chapman and Hall, London, pp. 77-112.

FAO. Estadísticas. Producción y exportación mundial de maíz. <http://apps.fao.org>

Fischer K.S., Palmer A.F.E. 1984. Tropical maize. en: Goldsworthy, P.R., Fisher.

Fischer, R.A., 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Sciences* 105, 447-461.

Gökmen S. 2004. Effects of moisture content and popping method on popping characteristics of popcorn. *Journal of Food Engineering* 65(3), 357–362.

Hallauer Arnel R. 2001 *Specialty Corns* 2da. Edición. 469 pp.

Instituto clima y agua. INTA Castelar y Servicio Meteorológico Nacional. http://sepa.inta.gob.ar/productos/agrometereologia/bh_10d/

INTA. Cartas de suelos de la provincia de Buenos Aires. Disponible en: <https://inta.gob.ar/documentos/carta-de-suelos-de-la-provincia-de-buenos-aires>

IPCC. 2014: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summaries, Frequently Asked Questions, and Cross-Chapter Boxes*. A Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field C.B., V.R. Barros D.J., Dokken K.J., Mach M.D., Mastrandrea

T.E., Bilir M., Chatterjee K.L., Ebi Y.O., Estrada R.C., Genova B., Girma E.S., Kissel A.N., Levy S., MacCracken P.R., Mastrandrea and L.L. White (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 190 pp.

Jandel, S. 2000. TableCurve 2D automated curve fitting and equation discovery, version 5.0. SYSTAT Software San Jose, CA.

Lobell, D.B., Schlenker, W., Costa-Roberts, J., 2011. Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science* 333, 616-620.

Maddonni G. A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina—a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 325–345.

MAIZAR 2007. El maíz pisingallo en Argentina. Disponible en: <http://www.maizar.org.ar/vertext.php?id=176> (Verificado el 12 de Febrero de 2018.)

Mayer L.I. 2015. Estrés térmico y sus efectos sobre el peso y la calidad de los granos en maíces de diferente destino de producción. Tesis doctoral, Escuela para graduados FA- UBA.

Mohamed A.A., Ashman R.B., Kirleis A.W. 1993. Pericarp thickness and other kernel physical characteristics relate to microwave popping quality of popcorn. *Journal of Food Science* 58(2), 342–346.

Otegui M.E., Nicolini M.G., Ruiz R.A., Dodds P. 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron. J.* 87, 29-33.

PAS. Panorama Agrícola Semanal, 2015. Bolsa de Cereales, Argentina. URL <http://www.bolsadecereales.org/>.

R Development Core Team, 2010. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, ISBN 3-900051-07-0.

Rattalino Edreira, J.I., Maddonni, G.A., Otegui, M.E., 2011. Golpe de calor y productividad en maíz: el ambiente y la genética. AAPRESID, pp. 15-20.

Rattalino Edreira J.I., Otegui M.E. 2013. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: A novel approach for assessing sources of kernel loss in field conditions. *Field Crops Research*, 142, 58-67.

Reynolds M.P., Balota M., Delgado M.I.B., Amani I., Fischer R.A. 1994. Physiological and morphological traits associated with spring wheat yield under hot, irrigated conditions. *Australian Journal of Plant Physiology*, 21, 717–730.

Ritchie S.W., Hanway J.J. 1982. How a plant crop develops. Spec. Rep. 48. Iowa State Univ. of Sci. and Technol., Coop. Ext. Serv., Ames, IA.

SAGPyA 2007. Maíz para consumo humano. Publicaciones Agricultura. Disponible en: <http://www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0-0/prensa/publicaciones/maiz/pag35.php>

Satorre E.H., Otegui M.E., Maddonni G.A., Ruiz R.A., Cárcova J., Uribelarrea M., Villalba N. 1998. Modelos de producción de maíz para las zonas norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe de AACREA. Reporte Pioneer-Cargill-AACREA, 44 pp.

Severini A.D., Borrás L., Westgate M.E., Cirilo A.G. 2011. Kernel number and kernel weight determination in dent and popcorn maize. *Field Crops Research* 120, 360–369.

Song A., Eckhoff S.R., Paulsen M., Litchfield J.B. 1991. Effects Of Kernel Size And Genotype On Popcorn Popping Volume And Number Of Unpopped Kernels. *Cereal Chemistry* 68(5), 464–467.

Song A., Eckhoff S. 1994. Optimum popping moisture content for popcorn kernels of different sizes. *Cereal Chemistry* 71, 458–460.

Soylu S., Tekkanat A. 2007. Interactions amongst kernel properties and expansion volumen in various popcorn genotypes. *Journal of Food Engineering* 80(1), 336–341.

USDA Soil Taxonomy 2006. Publicado en internet disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/taxonomy>

Vega, C.R.C., Razquin, C.J., Santillán Hatala, A.C., y Ogando, F.A. 2017. Marco conceptual para la interpretación eco-fisiológica de la respuesta del maíz a la fecha de siembra. In: L. Borrás and S. A. Uhart (Ed). *El mismo maíz, un nuevo desafío: Compendio primer congreso de maíz tardío*. Dow Agrosiences Argentina, San Isidro, AR.

Wyrtki K. 1975. El Niño—The Dynamic Response of the Equatorial Pacific Ocean to Atmospheric Forcing. *Journal of Physical Oceanography* 5, 572–584.

Ziegler K.E. 2001. Popcorn. En: Hallauer AR (Ed.), *Specialty corns*. 2a Ed., CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 199–234.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución - No Comercial - Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.