

EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES NIVELES DE LLUVIA Y CONTENIDOS HÍDRICOS EN EL SUELO SOBRE EL RENDIMIENTO Y ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA DE UN CULTIVO DE MAÍZ.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años los biocombustibles han adquirido una importancia económica estratégica formando parte de la política de EE.UU, Brasil y la Unión Europea. Para la Argentina, como otros países de Latinoamérica, el contexto internacional es favorable, mostrando los mejores términos de intercambio de los últimos 80 años. Según estudios recientes los biocombustibles son una oportunidad exportadora de América Latina hacia economías centrales pero también para su uso propio, para movilizar su economía, con ventajas relativas (Muñoz, 2007). En la actualidad está tomando importancia el uso de maíz para la producción de Bioetanol, que es un alcohol producido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en maíz y otros cultivos energéticos, que mezclado con la gasolina produce un biocombustible de alto poder energético con características muy similares a la gasolina pero con una importante reducción de las emisiones contaminantes en los motores tradicionales de combustión (Muñoz, 2007).

Por otra parte, la población mundial ha aumentado entre 1995 y 2005 en 25,8 % y se prevé que alcance los 7.320 millones de habitantes para el año 2015 (United Nations, 2006) aumentando así la presión sobre la disponibilidad de alimentos. El maíz ocupa también un lugar muy importante en ese contexto.

Los granos de este cereal son materia prima para la producción de harinas, aceites, alimentos para animales, y como fuente de un gran número de productos industriales. Los maíces con alto contenido de aceite y menor proporción de carbohidratos hacen un mayor aporte energético a la dieta de animales. Su empleo en la alimentación de bovinos y porcinos, con altos requerimientos calóricos, evita el agregado de aceite en la ración y permite una mayor eficiencia en el uso de hormonas de crecimiento. El maíz tiene una posición privilegiada en este escenario para la elaboración de etanol con una creciente y sostenida demanda, como así también para la elaboración de alimentos.

Producción y Consumo

A nivel *mundial*, el maíz es el tercer cultivo en importancia después del trigo y del arroz en cuanto a volumen de producción. En la campaña 2009/2010 se sembraron 155,9 millones de ha, produciéndose en total 811 millones de toneladas (t) de maíz, lo que representa un 1,63 % más que lo producido en la campaña anterior (USDA, 2010). En la Tabla N° 1 se puede apreciar cuáles son los principales países productores de maíz a nivel

mundial y en la Tabla N° 2 la evolución del rendimiento y de la producción mundial de este cereal en los últimos 10 años. En el plano internacional China seguirá siendo uno de los principales jugadores en el mercado mundial de commodities, debido al enorme tamaño de su mercado. China es uno de los principales países productores y consumidores de arroz, trigo, maíz, soja, etc., pero deberá seguir importando alimentos para satisfacer el crecimiento de la demanda de una población que se acerca a los 1500 millones de habitantes, que además aumentará la participación de su población urbana (SAGPyA, 2006).

Tabla N° 1: Principales países productores de maíz

País	Producción	
	Millones de t	%
Estados Unidos	333,0	41,0
China	155	19,1
UE – 27	56,5	7,0
Brasil	56,1	6,9
Argentina	22,5	2,8
México	21,3	2,6
India	16,7	2,0
Sudáfrica	14,5	1,8
Ucrania	10,5	1,3
Canadá	9,6	1,2
Otros	115,9	14,3
Total Mundial	811	100

Fuente: USDA. Grain World Market & Trade. Campaña 2009/2010.

Tabla N° 2: Evolución del rendimiento y producción mundial de maíz para el período 2000/2001 – 2009/2010.

Año	Producción (millones de t)	Rendimiento (t.ha ⁻¹)
2000/01	591,5	4,3
2001/02	601,4	4,4
2002/03	603,4	4,4
2003/04	627,3	4,4
2004/05	715,5	4,9
2005/06	699,4	4,8
2006/07	713,5	4,8
2007/08	793,6	4,9
2008/09	797,8	5
2009/10	811	5,2

Fuente: USDA. Grain World Market & Trade. Agosto 2010.

En el contexto *MERCOSUR*, la producción maicera de los dos principales países productores (Argentina y Brasil) durante la campaña 2009/10 fue de 78.600.000 t, lo cual representa un 9,6 % de la producción mundial. De los países mencionados, Brasil es el mayor productor, con 56,1 millones de t (71,3 %), y Argentina ocupa el segundo lugar, con una producción de 22,5 millones de t (28,7 %) (USDA, 2010).

En nuestro país en los últimos años el maíz ha aumentando su producción. Como se puede apreciar en los registros de la campaña 1993/94 los rindes promedio nacionales fueron de 4,2 tn.ha⁻¹ en tanto en la campaña 2009/10 ascienden a 5,2 tn.ha⁻¹ en promedio. Así mismo, los rendimientos a través de los años han sido cada vez mayores ayudado por las mejoras genéticas, mayor fertilización, siembra directa, etc. La superficie sembrada con maíz en la campaña 2009/10 fue de 3,36 millones de ha. (24,9 % más que en la campaña anterior Tabla N° 3), y una producción total de 22,5 millones de toneladas posicionando a la Argentina como el quinto país productor de maíz a nivel mundial (Tabla 1). Dicha producción se destina principalmente al mercado externo, ya que Argentina (con 9 mill. tn) es el tercer país exportador de dicho cereal antecedido por EE.UU. (con 48,3 mill. tn) y Brasil (con 10 millones de tn) (USDA, 2010). En cuanto al consumo interno, más de un 80% se destina a la alimentación animal bajo las formas de balanceado, silaje de maíz, derivados de la molienda, o directamente grano entero, partido y/o molido, siendo el consumo en chacra y la molienda en su conjunto los principales demandantes del maíz internamente. La producción de maíz en Argentina se caracteriza por su derivación temprana en la etapa primaria con un elevado coeficiente de exportación (dos tercios de la producción se derivan externamente como grano). Teniendo en cuenta que en nuestro país, existe un bajo coeficiente de industrialización, la producción de maíz se caracteriza por una importante diversificación de subproductos, y a medida que se avanza en sus encadenamientos, presenta una fuerte potencialidad en términos de articulaciones tecnológicas y productivas futuras (Lavarello, 2003). La producción y distribución de este cereal es muy importante en gran parte del territorio nacional, se produce desde Salta hasta el sur bonaerense (Tabla N°4). La zona núcleo de producción está conformada por las provincias de Córdoba, Buenos Aires, Santa Fe, La Pampa y Entre Ríos con una superficie destinada en la campaña 2008/2009 de 3.053.300 hectáreas, lo que representa el 87,4 % del área total cultivada con maíz del país, por lo tanto este es un cultivo de gran importancia para dichas economías regionales.

En el plano *provincial*, Córdoba con un 32,8% del área total sembrada con maíz a nivel nacional (ver Tabla N° 4), se ubicó en el primer lugar, desplazando al segundo lugar a la provincia de Buenos Aires con el 29,8 % del área sembrada nacional (SAGPyA, 2010). En el Dpto. Río Cuarto la superficie sembrada y cosechada en la campaña 2008/2009 fue de 167.000 hectáreas, obteniéndose una producción total en dicho departamento de 993.280 toneladas con un rendimiento medio de 5.948 Kg.ha⁻¹, (SAGPyA, 2010).

Tabla N° 3: Área sembrada y toneladas producidas de maíz a nivel nacional.

	2008/09	2009/10	Variación (%)
Millones de ha	3,49	4,36	24,9
Millones de t	14,5	22,5	55,1

Fuente: SAGPyA 2010

Tabla N° 4: Área sembrada con maíz a nivel nacional. Campaña 2008/09

	Área sembrada	
	Ha	%
Región Pampeana	3.053.300	87,4
Córdoba	1.146.200	32,8
Buenos Aires	1.041.200	29,8
Santa Fe	365.300	10,5
La Pampa	336.000	9,6
Entre Ríos	164.600	4,7
Región Extra Pampeana	440.985	12,6
Santiago del Estero	104.640	3
Chaco	95.300	2,7
San Luis	86.200	2,4
Salta	46.600	1,3
Tucumán	39.170	1,1
Misiones	32.100	0,9
Corrientes	12.000	0,3
Formosa	10.355	0,3
Catamarca	10.000	0,3
Jujuy	4.620	0,14
Total país	3.494.285	100

Fuente: Dirección de Coordinación de Delegaciones. Consultado SAGPyA 2010.

Aspectos relacionados a la sustentabilidad y ecofisiología del cultivo

El maíz es de gran importancia como integrante de secuencias de cultivos que contemplan un uso sustentable de los recursos, esto se debe a que otorga estabilidad al sistema productivo y mejora el balance físico de los suelos entre otros beneficios. Está demostrado que la disminución en el contenido de materia orgánica del suelo es mayor en las rotaciones con predominio de cultivos de verano, especialmente de soja (Sarlangue, 2002).

El cultivo de maíz surge como un componente que integrado a otros tiene una contribución sustancial al funcionamiento y mantenimiento de la calidad de los recursos y potencial productivo de nuestros suelos, sobre todo, en el sistema de agricultura continua, por su alta producción de rastrojo que permite incrementar los tenores de materia orgánica con las ventajas que de este parámetro se derivan (Satorre *et al.*, 2003).

La sustentabilidad del sistema productivo también se ve acrecentada gracias a la siembra directa que no solo le da estabilidad al sistema sino que además proporciona una mayor eficiencia en el uso del agua, pues se produce una mayor infiltración, menores pérdidas por escurrimiento y un mejor control de la erosión por agua y viento. El maíz es un cultivo que se adapta muy bien a esta práctica (Agricultura Certificada, 2011).

En nuestra región, los rendimientos de maíz sufren variaciones interanuales principalmente determinadas por la disponibilidad hídrica en el período crítico del cultivo. En el mes de enero si bien los aportes de agua por las precipitaciones son considerables, el balance hidrológico suele ser muy negativo, por lo tanto el período crítico es conveniente que no se produzca en dicho mes, por lo menos no en su totalidad. En sistemas productivos característicos como los de la región sur de Córdoba generalmente de secano, las siembras de primavera a menudo se ven afectadas por la escasez de precipitaciones que determinan el adecuado establecimiento del cultivo. Al mismo tiempo, el maíz demuestra diferente sensibilidad a la sequía según en la etapa del ciclo en que esta se presente. Si la sequía ocurre alrededor de la floración, se producen mermas importantes en el rendimiento en grano (Robelin, 1987; Shaw, 1988). La floración es considerada el período más crítico para la determinación del rendimiento de maíz. En esta etapa fenológica se fija el número de granos por unidad de superficie; por ello el rendimiento en grano se torna altamente dependiente de la disponibilidad hídrica en un período que se extiende desde 15 días antes hasta 21 días después de la floración (Claasen y Shaw, 1970).

La planta de maíz es muy eficiente en la producción de biomasa. De una semilla que pesa alrededor de 300 mg se obtiene, en un lapso de 2,5 meses, una planta de más de 2 metros de altura y de alrededor de 70 dm² de área foliar. A los 4,5 meses la planta puede alcanzar, en condiciones de cultivo, un peso seco mil veces superior al de la semilla que le dio origen. Alrededor de la mitad de ese peso corresponde a órganos reproductivos, lo que lo

transforma en uno de los cultivos de mayor rendimiento en grano por unidad de superficie (Lorenzatti, 2001).

En cultivos de crecimiento determinado como el maíz, el rendimiento final suele relacionarse fuertemente con el IAF (índice de área foliar) en floración (Sobrado, 1990). Cuanto mayor es la radiación solar incidente diaria durante el ciclo del cultivo, mayor es el crecimiento y, por lo tanto, el rendimiento (Muchow *et al.*, 1990). El rendimiento en grano se correlaciona positivamente con la radiación incidente media diaria y con la amplitud térmica, y negativamente con la temperatura media (Andrade, 1992). Los rendimientos máximos de maíz corresponden a zonas con elevado nivel de radiación, temperaturas medias bajas y altas amplitudes térmicas. Entre siembra y cosecha se desarrollan distintas fases que van concretando el crecimiento y el desarrollo de la planta adulta (Andrade *et al.* 1996; Villalobos, 1998). Estos procesos se relacionan linealmente con la temperatura, por lo tanto, para cumplir con las distintas fases fenológicas y completar el ciclo, el cultivo responde a un rango térmico que va desde una temperatura base mínima ($T_b = 8^\circ \text{C}$) por debajo de la cual la velocidad de desarrollo es nula (Jones y Kiniry, 1986; Kiniry y Bonhomme, 1991), y una óptima ($T_o = 34^\circ \text{C}$), donde alcanza la máxima velocidad de desarrollo. Por encima de ésta el desarrollo se reduce progresivamente hasta detenerse al alcanzar una temperatura máxima ($T_M = 44^\circ \text{C}$) (Blacklow, 1972; Kiniry y Bonhomme, 1991). La suma térmica puede ser útil como criterio para predecir la madurez fisiológica (Andrade, 1992). Durante el período crítico antes señalado, la tasa de crecimiento por planta es indicativa de la condición fisiológica de las mismas y por lo tanto, de su capacidad para fijar granos (Andrade *et al.*, 1999). La tasa de crecimiento por planta depende de numerosos factores, como la densidad de siembra, la temperatura, los niveles de radiación, la disponibilidad de agua y nutrientes y el genotipo (Andrade *et al.*, 2002; Otegui y Andrade, 2000). Sin deficiencias hídricas y/o nutricionales, el número de granos fijado por planta se relaciona con la tasa de crecimiento por planta en el período próximo a la floración.

El estrés hídrico durante la floración del maíz reduce las eficiencias de intercepción de la radiación (por aceleración de la senescencia de las hojas), de conversión de la radiación interceptada y de partición de materia seca a espigas. Como consecuencia, aumenta el aborto de estructuras reproductivas y disminuye la producción final de grano. La magnitud de las pérdidas depende de la oportunidad, intensidad y duración del estrés y se manifiesta a través de la disminución de la cantidad de espigas por planta y de un menor número de granos en la espiga (Hall *et al.*, 1981). Si el cultivo sufre un estrés hídrico en floración muy severo y el cultivar utilizado es sensible al déficit hídrico, se puede llegar a la esterilidad de plantas. El rendimiento en grano se ve proporcionalmente más afectado que la producción de materia seca aérea total, disminuyendo sensiblemente el índice de cosecha (Sinclair *et al.*, 1990).

La etapa pre “silking”¹ del período crítico determina el número de espigas fértiles por planta (i.e. aquellas que expondrán sus estigmas y podrán dar granos cosechables), mientras que en la etapa post “silking” se define el número final de granos (Otegui y Bonhomme, 1998). En general, los materiales tienen buen comportamiento con precipitaciones de hasta 700 mm; por debajo de ello, conviene realizar riego complementario. En términos generales, requiere a lo largo de su ciclo, entre 600 y 800 mm de precipitación efectiva. Doorenbos y Pruitt (1977), mencionan que el maíz evapotranspira entre 400 y 700 mm en su ciclo, según condiciones ecológicas.

En maíz, el rendimiento está más relacionado al número final de granos logrados que al peso de los mismos, como lo demuestran la alta correlación que se encuentran entre el número de granos y el rendimiento (Otegui, 1995; Otegui y Andrade, 2000). De las condiciones determinantes del número de granos, no obstante, la formación de estructuras capaces de dar origen a un grano no sería un factor determinante del número final que alcanza la madurez. Diversos autores (Otegui, 1997; Otegui y Andrade, 2000; Otegui y Bonhomme, 1998) han señalado que para lograr aumentos de rendimiento es más primordial aumentar la supervivencia de dichas estructuras que el número potencial de granos. Por lo tanto, la consideración de estos factores determinantes del aborto de estructuras potencialmente aptas para generar un grano viable cobra gran importancia en esta especie.

Una de las causas más importante de la reducción en el número de granos por planta es el fenómeno de protandria (anticipación de la anthesis respecto de la aparición de estigmas), la que provoca la falta de polen cuando aparecen los estigmas correspondientes a las espiguillas ubicadas en la punta de la espiga. El aumento en la protandria es un síntoma del déficit hídrico y no la causa directa del menor número de granos por planta (Westgate y Boyer, 1986). Cuando el estrés se produce en etapas vegetativas o en el llenado de granos, las consecuencias sobre el rendimiento son sensiblemente menores, sin embargo el peso del grano puede disminuir frente a sequías que tengan lugar durante el período de llenado de los mismos (Fischer y Palmer, 1984).

El aborto de ovarios fertilizados tardíamente es un importante origen de reducción del número de granos en maíz. La disponibilidad de asimilados por espiguilla fértil no es el único factor que controla el establecimiento de granos cuando el agua y los nutrientes no son limitantes (Cárcova *et al.*, 2000). Un atraso de unos días en la polinización de los primeros estigmas que emergen permite que los ovarios pertenecientes a los estigmas del tercio superior de la espiga alcancen su potencial para fijar granos. El número de granos puede aumentar significativamente (8 a 31 %) cuando se sincroniza la polinización de estigmas, tanto entre espigas como dentro de una misma espiga. Esto sugiere que la dinámica de

¹ Silking es sinónimo de floración femenina (R1). Consiste en la emergencia de los estigmas por fuera de la envoltura de las chalas de la espiga.

emisión de estigmas, que en definitiva afecta la dinámica de polinización (Uribelarrea *et al.*, 2002) y fecundación, podría explicar, al menos en parte las diferencias observadas en el número final de granos entre genotipos que crecen sin limitaciones bajo condiciones ambientales similares (i.e. con riego y fertilización).

En las localidades de Tandil y Marcos Juárez, se demostró que la disponibilidad hídrica en las etapas cercanas a la floración del maíz es la variable que más afecta el rendimiento en grano, cuando se la compara con las variables profundidad de suelo y prácticas de manejo (Calviño *et al.*, 2003).

Modelos de simulación de cultivos

Para un análisis sistémico de los procesos biológicos se han desarrollado herramientas conceptuales y computacionales, denominadas genéricamente modelos de simulación de crecimiento, desarrollo y rendimiento de cultivos. Estos integran un conjunto de variables de clima, suelo, cultivo y manejo funcionando en conjunto y que permite realizar simulaciones sobre el comportamiento de los cultivos bajo condiciones cambiantes. Estos modelos de la realidad comienzan con la definición del *modelo conceptual*, es decir la diagramación teórica de cuáles son los componentes y las interacciones que definen al sistema, en este caso clima-suelo-planta-hombre o fitósfera (Grenon y Pilatti, 1994). Luego se establecen las *relaciones funcionales* en términos físicos-matemáticos o estadísticos que explican esas interacciones. Por último dichas relaciones se integran con herramientas de *cálculo computacional* que permiten hacer funcionar el conjunto de procesos en forma simultánea, mejorando nuestra capacidad de explicación y de predicción de los fenómenos productivos. Los modelos de simulación de cultivos son herramientas válidas para evaluar riesgos y respuestas de cultivos en determinadas combinaciones de suelo-clima (e.g. Mearns *et al.*, 1992, 1996, 1997; Vinocur *et al.*, 2000, a, b). Cuando los modelos han sido calibrados y validados para una región, se convierten en poderosas herramientas para reemplazar los ensayos experimentales de prueba y error, para reducir costos en la experimentación y así también reducir los tiempos para la obtención de resultados. De esta forma proveen información a los técnicos, agricultores y a los que determinan las políticas productivas, etc., asistiéndolos en la toma de decisiones para alcanzar las metas propuestas y para disminuir el riesgo productivo (Ritchie, 1991).

Basándose en la importancia del cultivo de maíz para la economía regional, el mantenimiento de los sistemas agrícolas, el uso sustentable de los recursos y la aptitud demostrada por los modelos de simulación en la evaluación de los efectos de la variabilidad climática, se plantean la siguiente hipótesis y objetivo de este trabajo:

HIPÓTESIS

La ocurrencia de un déficit hídrico, principalmente en torno a la etapa reproductiva, afecta en forma desfavorable la acumulación de materia seca y el rendimiento en grano.

OBJETIVO

Determinar el nivel de disminución de las precipitaciones y del contenido hídrico del suelo durante el período crítico del maíz que afecte el rendimiento y la acumulación de materia seca en condiciones de secano, utilizando un modelo de simulación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del clima de la región

El estudio fue realizado en la ciudad de Río Cuarto, situada en la latitud 33° 07' S, longitud 64° 14' W, y a 421 m de altitud s.n.m., comprendida en un área sub-húmeda seca. Las condiciones térmicas caracterizan una zona de clima templado (Fabricius y Rotondo, 1993), que presenta una temperatura media normal anual de 16,3 °C; una temperatura media normal del mes más cálido (enero) de 22,8 °C, y una temperatura media normal de los meses más fríos (junio y julio) de 9,9 °C, determinando una amplitud térmica media anual de 12,9 °C (Serie 1977-2006). El período libre de heladas² en promedio es de 255 días, siendo la fecha media de primeras heladas el 25 de mayo ± 20,8 días y la fecha extrema de primeras heladas el 17 de abril. Asimismo los registros indican como fecha media de últimas heladas el 12 de septiembre, con una desviación típica de ± 18,3 días, y fecha extrema de últimas heladas el 04 de noviembre (Seiler comunicación personal).

El promedio normal anual de precipitaciones es 805,1 mm, siendo enero el mes más lluvioso, con un valor medio de 137,7 mm y agosto el de menores precipitaciones, con 12,3 mm (Serie 1977-2006). Las lluvias se concentran en mayor cantidad y frecuencia durante el período más cálido del año (desde octubre a marzo), determinando un régimen de precipitaciones de tipo monzónico (Figura N° 1).

La mayor velocidad media del viento se registra a fines de agosto y durante el mes de septiembre y octubre, prevaleciendo las direcciones N y NE (Fabricius y Rotondo, 1993).

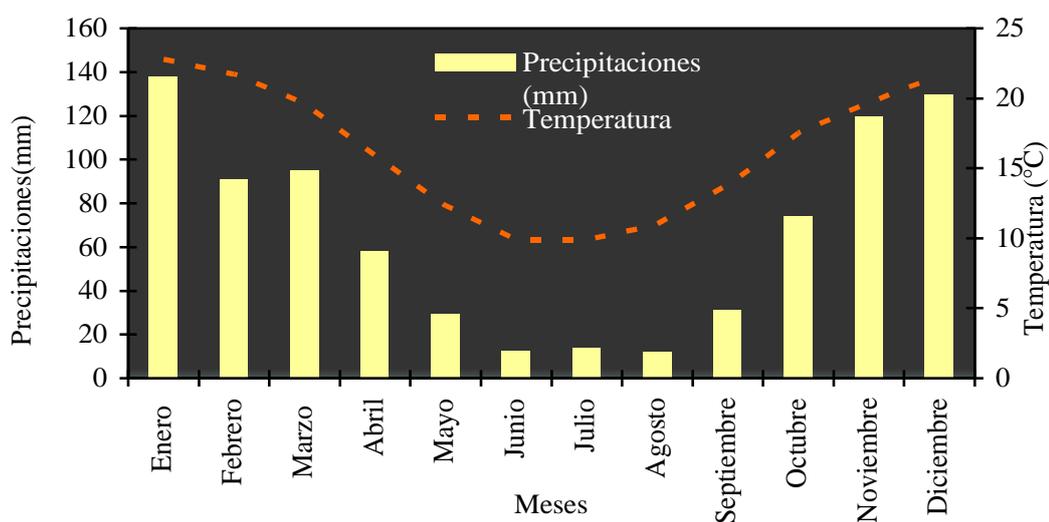


Figura N° 1: Valores medios normales de precipitación y temperatura período 1977 – 2006.

² Temperaturas iguales o menores a 0°C registradas en abrigo meteorológico a 1,5 m sobre el nivel del suelo.

Análisis de los valores térmicos y precipitaciones correspondientes a la campaña 2007/08

2007/08

La Figura N° 2 muestra que en la 3° década de diciembre y en la 1° de enero de la campaña 2007/08, las lluvias superaron aproximadamente en 40 mm a las cuantías normales de precipitación, mientras que en la 3° década de enero y en la 3° marzo dichos incrementos fueron de alrededor de 30 mm y en la 2° de febrero superó los 15 mm. Por otro lado, desde la 1° década de noviembre hasta la 2° de diciembre, en la 3° de febrero y en la 2° de marzo llovieron en promedio entre 20 y 30 mm menos que los valores normales.

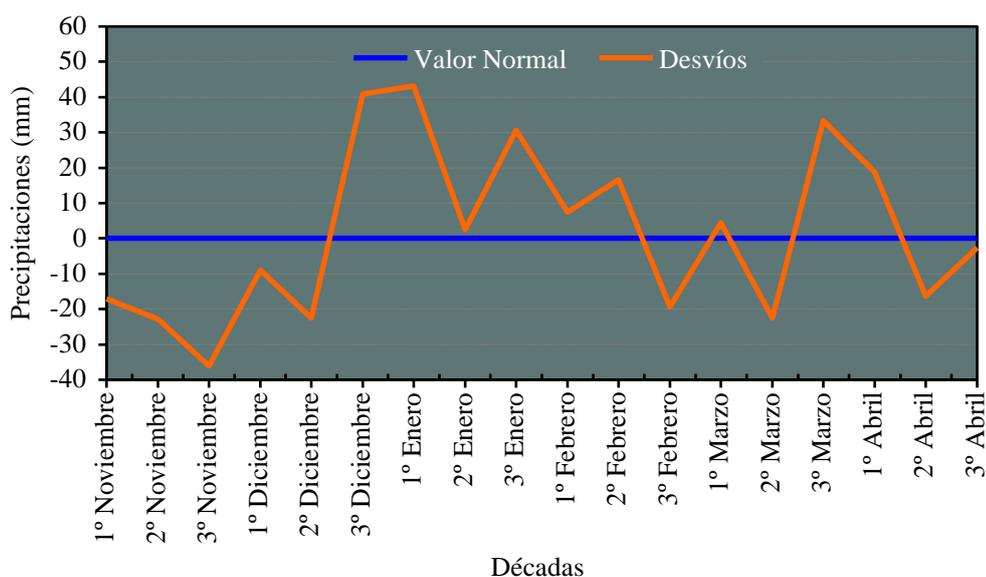


Figura N° 2: Desvíos de las precipitaciones durante la campaña 2007/08 con respecto a los valores normales.

Como puede observarse en la Figura N° 3, las temperaturas máximas fueron acentuadamente superiores a la media normal durante gran parte de la campaña 2007/08, excepto en la 3° década de enero y 2° de marzo, en donde éstas presentaron valores entre 1 y 2°C inferiores a los valores esperados.

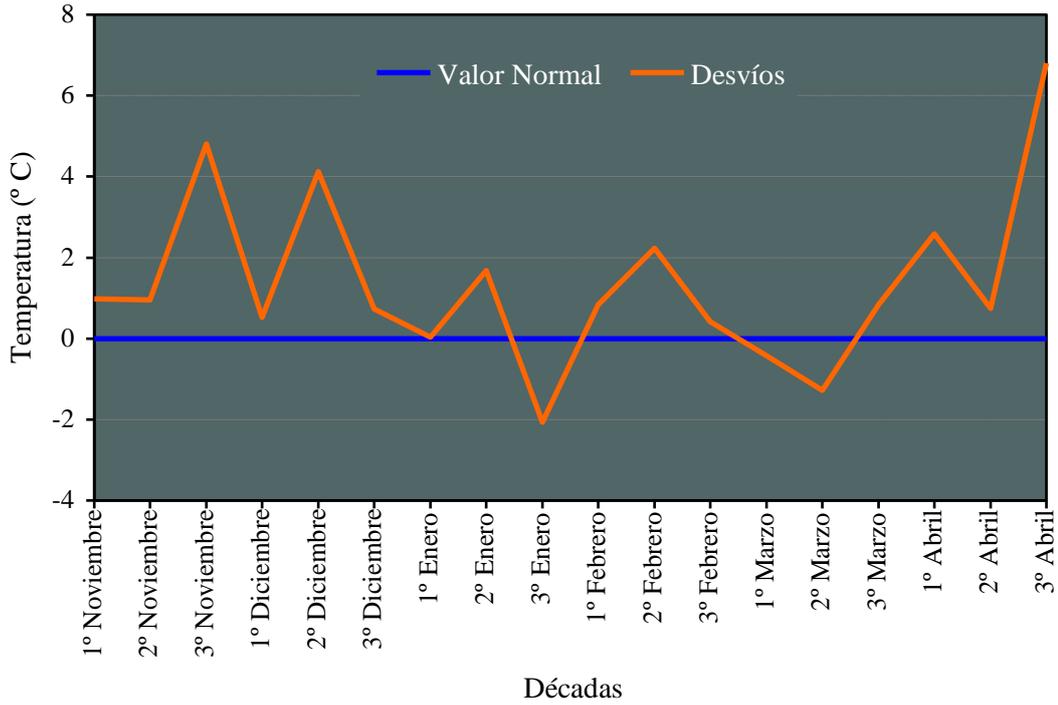


Figura N° 3: Desvíos de las temperaturas máximas durante la campaña 2007/08 con respecto a los valores normales.

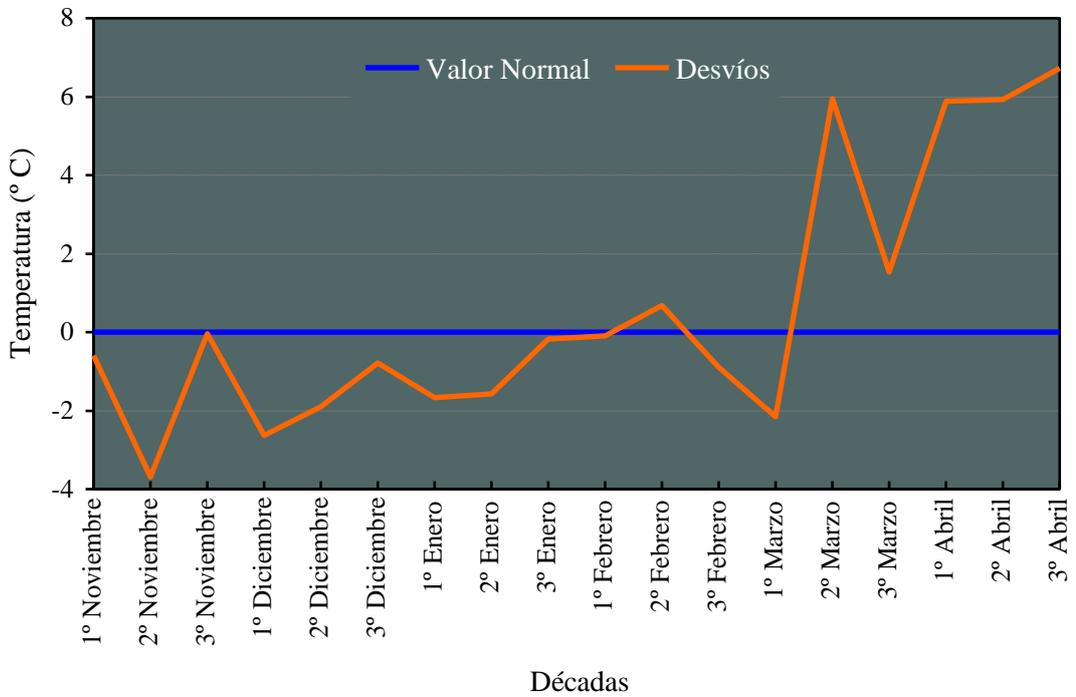


Figura N° 4: Desvíos de las temperaturas mínimas durante la campaña 2007/08 con respecto a los valores normales.

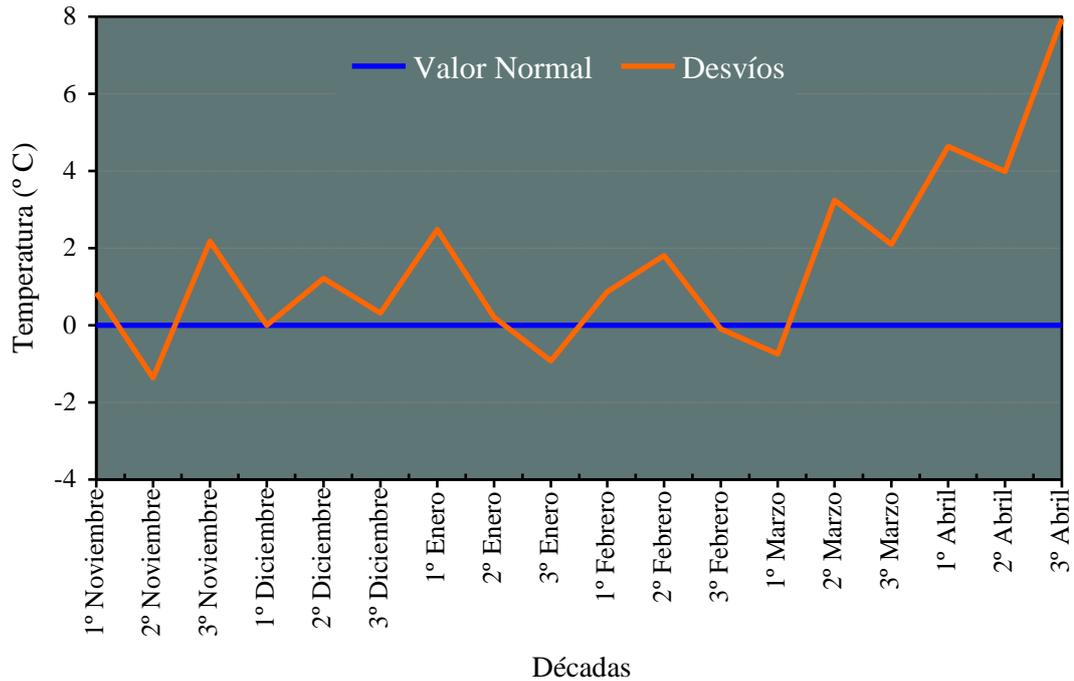


Figura N° 5: Desvíos de las temperaturas medias durante la campaña 2007/08 con respecto a los valores normales.

Con respecto a las temperaturas mínimas, como muestra la Figura N° 4, durante la campaña 2007/08 prevalecieron temperaturas inferiores a la media, con excepción del período comprendido entre la 2° década de marzo y la 3° década de abril en los cuales la temperatura superó hasta en 6 °C a los valores mínimos normales.

Como resultado de la variabilidad de las temperaturas máximas y mínimas, las temperaturas medias correspondientes a la campaña 2007/08 mostraron alternancia alrededor de la media predominando los desvíos positivos. A partir de la segunda década de marzo, las temperaturas medias mostraron valores superiores a los valores normales en todas las décadas (Figura N° 5).

Caracterización del suelo del ensayo

El área de estudio pertenece a la unidad catastral N° 22, comprendiendo el sector circundante a la ciudad de Río Cuarto. El relieve es normal, ondulado a muy suavemente ondulado, con pendientes medias y largas con distinto grado de complejidad y gradientes entre 1 y 3 % (Cantero *et al.*, 1986). El suelo en el que se llevó a cabo el ensayo es un Hapludol típico, con textura franco arenosa (46% de limo, 42 % de arena y 12 % de arcilla), 2% de materia orgánica y un pH de 6,5. El funcionalismo de estos suelos no manifiesta impedimentos estructurales para el desarrollo radicular ni problemas de aireación y

temperatura; son algo excesivamente drenados, y su capacidad de retención hídrica es media a baja³.

En la parcela destinada al ensayo se realizó un análisis físico del suelo a los fines de establecer los parámetros edáficos y los relacionados con el agua del suelo. A través de una calicata (Figura N° 6) se pudieron diferenciar 8 horizontes detallados a continuación (Tabla N°5).



Figura N° 6: Calicata donde se observan los diferentes horizontes en el perfil del suelo.

Tabla N° 5: Características del perfil del suelo (Datos de la calicata).

Horizontes	Profundidad	Límites	Estructura
Ap1	0 - 5 cm	Abrupto, suave	Bloques subangulares, finos, moderados
Ap2	5 - 14 cm	Abrupto, suave	Bloques subangulares, gruesos, moderados a fuertes
Ad	14 - 22 cm	Abrupto, suave	Bloques angulares, medios, moderados
Bw1	22 - 35 cm	Claro, suave	Bloques subangulares, medios, moderados
Bw2	35 - 49 cm	Claro, suave	Bloques subangulares, medios a finos, moderados a débiles
BC	49 - 66 cm	Claro, suave	Bloques subangulares, finos, moderados a débiles
C	66 - 82 cm	Gradual, suave	Bloques subangulares, finos, débiles
Ck	82 cm a más	Difuso, ondulado	Masivo

En las Tablas N° 6 y 7 se presentan las características físicas y químicas del suelo en el cual se realizó el ensayo.

³ Ing. Agr. Eugenio R. Hampp, comunicación personal

Tabla N° 6: Propiedades físicas del suelo

Horizontes	PEA (g.cm ⁻³)	Humedad en Wc (g.g ⁻¹)	Humedad en Wm (g.g ⁻¹)	Lámina de agua en Wc (mm)	Lámina de agua en Wm (mm)
Ap1	1,3	21,53	9,33	13,99	6,06
Ap2	1,32	20,23	8,97	24,03	10,66
Ad	1,4	19,05	9,15	21,34	10,25
Bw1	1,39	19,7	9,14	35,60	16,52
Bw2	1,28	18,15	9,09	32,54	16,29
BC	1,3	16,77	8,21	37,06	18,14
C	1,29	16,52	7,42	34,10	15,31
Ck	1,3	16,65	7,48	38,96	17,50

AU (Agua útil)=126,9 mm

Nota: PEA: Peso Específico Aparente, Wc: Capacidad de Campo, Wm: Punto de Marchitez Permanente

Tabla N° 7: Propiedades químicas del suelo (fecha de análisis 26/11/2007)

Horizonte	Prof. cm	P ppm	N-NO ₃ ⁻ ppm	NO ₃ ⁻ ppm	H° %	M.O. %	pH	CIC Cmol/Kg
Ap1	0-5	48,00	25,10	111,19	25,54	2,90	6,54	22,6
Ap2	5-14	31,00	13,36	59,18	26,12	1,97	6,13	19,50
Ad	14-22	26,25	12,97	57,46	24,79	1,96	6,17	17,80
Bw1	22-35	25,00	10,21	45,23	21,61	1,75	6,29	21,00
Bw2	35-49	25,10	10,65	47,18	18,40	0,98	6,86	16,50
BC	49-66	14,00*	7,88	34,91	15,90	0,65	7,81	14,80
C	66-82	10,00*	5,43	24,05	13,12	0,49	7,77	10,80
Ck	82-100	7,60*	4,32	19,14	13,50	0,38	8,09	10,20

Nota: Prof: profundidad, P: fósforo extractable, N-NO₃⁻: nitrógeno de nitratos, NO₃⁻: nitratos, H°: humedad, M.O: materia orgánica, CIC: capacidad de intercambio cationico.

Para la realización de los cálculos se ha tomado como valor general de densidad aparente 1,3 g/cm³.

Los métodos utilizados en la determinación de aspectos químicos del suelo fueron:

pH: - Potenciometría 1:2,5

CIC: -Ac Amonio

N: - Extracción: Sulfato de Calcio

- Método Analítico: Reducción del Cadmio

P: - Extracción: Extractante Kurtz y Bray 1 - *Olsen

- Método Analítico: Reducción del Ácido Ascórbico

Materia Orgánica: - Método Walkley - Black

Ensayos de campo

Para poder utilizar un modelo de simulación de cultivos como herramienta de decisión para una región en particular, es necesario ajustar el mismo para las condiciones edafoclimáticas de esa región. El ajuste se logra con una calibración y una posterior validación del modelo. Para ello es necesario tener un conjunto mínimo de datos de ensayos experimentales realizados siguiendo lineamientos específicos, los que serán comparados con las salidas del modelo.

Para la calibración y validación del modelo se utilizaron datos de ensayos experimentales realizados en el Campo Experimental de la Universidad Nacional de Río Cuarto durante la campaña agrícola 2007/08. Los cultivos antecesores fueron avena en el invierno de 2006, soja en la primavera-verano 2006/07 y avena guacha en el invierno 2007.

En cuanto a las labores previas a la siembra, se realizó una aplicación de glifosato el 5 de septiembre con una dosis de 4 l.ha⁻¹ para controlar principalmente la avena guacha.

Se utilizó un híbrido simple de maíz de última generación (Nidera AX 884), en una sola época de siembra, bajo condiciones de riego y de secano. La siembra fue realizada el 7 de diciembre de 2007⁴ con la densidad de siembra recomendada para la zona en estudio (95.000 semillas/ha), lográndose una implantación de 85.000 plantas/ha. El diseño experimental fue de franjas en bloques con dos factores: (Figura N° 7).

- Factor 1: Riego con 5 niveles.
- Factor 2: Fertilización con 2 niveles.

Se realizaron 5 repeticiones bloques (B).

Las unidades experimentales (UE) tenían una dimensión de 15 m por 10 m.

⁴ El retraso de la fecha de siembra prevista para los primeros días de Octubre se debió a problemas técnicos existentes en el equipo de riego

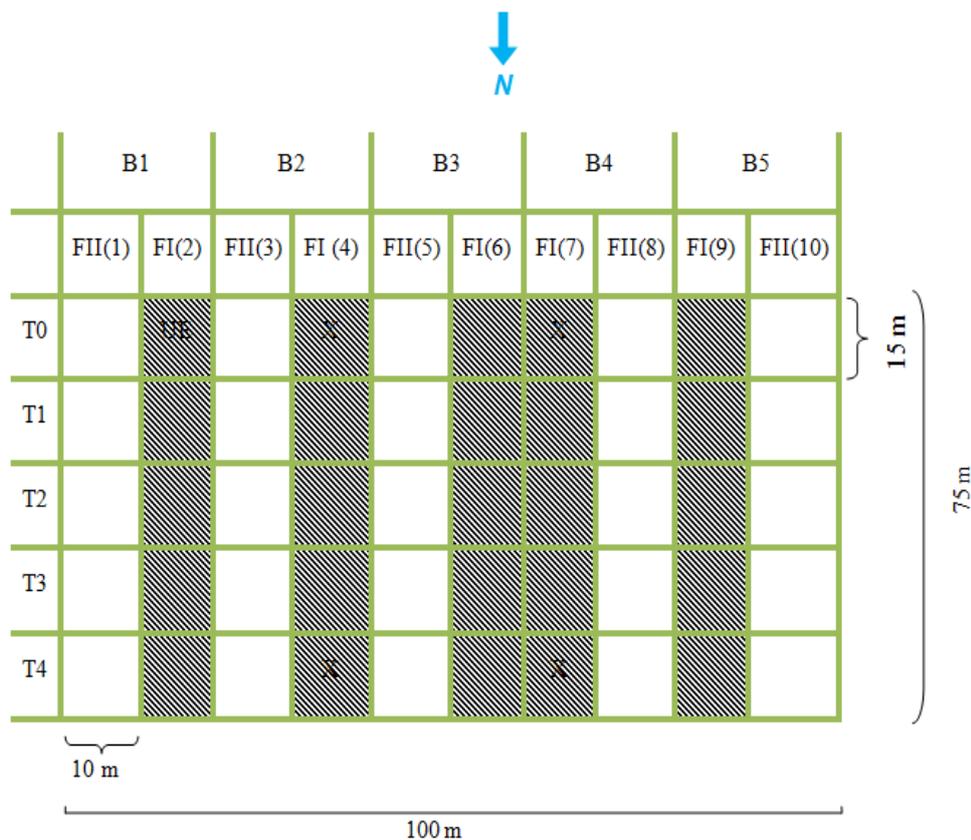


Figura N° 8: Diseño de ensayo experimental

B: Bloque, UE: Unidad experimental, X: lugar de muestreo del contenido de agua en el suelo, FI: Fertilización completa (300 kg ha^{-1}) en 6 hojas, FII: Fertilización repartida entre siembra (100 kg ha^{-1}) y en 6 hojas (V6) (200 kg ha^{-1}), T: tratamientos de riegos.

Los tratamientos de **riego** fueron los siguientes:

T0: Testigo; partiendo de capacidad de campo, se regó durante todo el ciclo, efectuándose la reposición cuando se consumieron 25 mm.

T1: Partiendo desde capacidad de campo, se regó durante todo el ciclo, aplicando la lámina necesaria para llevar la humedad del suelo a capacidad de campo cuando se consumían 25 mm, siempre y cuando el pronóstico extendido de 72 horas brindado por el Servicio Meteorológico Nacional no indicara lluvias. En caso de no ocurrencia se aplicó la lámina correspondiente.

T2: Partiendo desde capacidad de campo, se regó durante todo el ciclo con una lámina de 25 mm, cada vez que se alcanzó el umbral de riego correspondiente. Salvo que el pronóstico anunciara precipitaciones.

T3: El riego se realizó considerando tres fases, Fase 1: desde siembra hasta 12 hojas, Fase 2: desde 12 hojas hasta principio de grano lechoso y Fase 3: desde grano lechoso hasta madurez fisiológica. En la fase 1 y 3 se contempló un umbral de riego considerando un coeficiente de estrés K_s de 0,60, en la etapa 2, sin estrés ($K_s = 1$). Al alcanzar el umbral establecido para cada fase se aplicó una lámina de 25 mm.

T4: El riego se realizó considerando un coeficiente de estrés K_s de 0,60, en todo el ciclo. Cada vez que se alcanzaba el umbral establecido se aplicó una lámina de riego de 25 mm.

El umbral de riego a considerar fue cuando se producía el agotamiento del agua realmente disponible, que es una proporción (p) del agua totalmente disponible, de acuerdo a la metodología brindada por FAO (Allen *et al.*, 1998).

Para maíz:

$$p=0,55 + 0,04 (5 - ETc)$$

Donde:

ETc = evapotranspiración del cultivo

Los nutrientes disponibles en el suelo limitan la producción de maíz, por lo cual es necesario conocer los requerimientos del cultivo y la oferta del suelo para determinar las necesidades de fertilización. Considerando el nitrógeno y el fósforo como los dos macronutrientes más limitantes para la producción maicera, y en función de los análisis químicos correspondientes (Tabla N° 7), se fertilizó al voleo en forma manual con Urea (46% de N), fertilizante que se caracteriza por ser muy soluble, de alta higroscopicidad, facilidad de manejo y con pérdidas importantes por volatilización.

Los tratamientos de **fertilización** nitrogenada fueron los siguientes:

FI: Fertilización nitrogenada completa (300 kg ha^{-1}) en el estadio fenológico de 6 hojas (V6).

FI: Fertilización nitrogenada repartida entre siembra (100 kg ha^{-1}) y estadio fenológico de 6 hojas (V6) (200 kg ha^{-1}).

En lo que respecta a fósforo, no fue necesario su aplicación ya que los análisis arrojaron valores muy superiores a los requeridos por el cultivo.

Para este trabajo solo se utilizó el tratamiento de fertilización **FI** y los tratamientos de riego **T0** y **T4** de los cuales se obtuvieron los datos que se muestran a continuación.

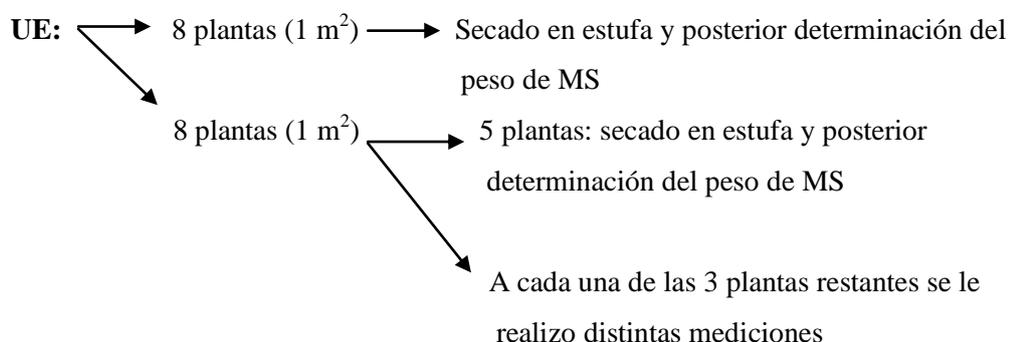
Las observaciones fenológicas siguieron los estadios de desarrollo determinados por Ritchie y Hanway (1997). Los estadios de desarrollo vegetativo del cultivo fueron observados semanalmente durante el ciclo, mientras que los estadios reproductivos, al ser más importantes en la asignación de materia seca, fueron observados con mayor frecuencia, aproximadamente cada 2 o 3 días. Las observaciones se realizaron sobre 10 plantas seleccionadas en cada una de las UE al inicio del cultivo (Tabla N° 8)

Tabla N° 8: Fenología del cultivo de maíz.

Fecha	T0	T4
	Estadio	Estadio
07/12/2007	S	S
13/12/2007	Ve	Ve
27/12/2007	V4	V3
09/01/2008	V6	V6
06/02/2008	V17	V17
09/02/2008	R1	R1
15/03/2008	R4	R4
11/04/2008	R6	R6

Nota: S: siembra, Ve: emergencia del cultivo, V6: seis hojas desplegadas, R1: emergencia de los estigmas, R4: grano pastoso, R6: madurez fisiológica.

La producción de materia seca fue determinada en 4 momentos del desarrollo del cultivo: V6, R1, R4 y R6, tomándose dos muestras de 1 m² (8 plantas) en cada UE (ver Figura N° 7). El procedimiento fue el siguiente:



De la misma manera se procedió en todas las UE.

Como se detalla a continuación, las muestras para rendimiento final fueron extraídas cuando el cultivo se encontraba en R6 [50% de las plantas con capa negra (capa de abscisión en la base de cada grano), madurez fisiológica] y fueron procesadas siguiendo la metodología propuesta por Ogoshi *et al.*, (1999).

A cada una de las 3 plantas representativas de la muestra de 1 m² se le determinó:

- En V6: el área de láminas fotosintéticamente activas (LF), y los pesos secos de las LF, láminas no fotosintéticas (LNF) y vainas. Además, con la suma de los pesos secos de las 3 plantas enteras, se obtuvo el valor de la materia seca total (MST).
- En R1: el área de las LF, y los pesos secos de las LF, LNF, tallos (T), chalas (CH), marlo (M) y MST.

- En R4 y R6: el área de las LF, y los pesos secos de las LF, LNF, T, CH, M y MST. Para la espiga se determinó su peso, el número de hileras, número de granos/hilera, granos/espiga y peso del M.
- En R6: Además, de cada UE se extrajeron todas las espigas que se encontraban en una superficie de 10 m². A estas espigas se las contabilizó, y se las separó en M y granos. Con el peso de los granos encontrados en 10 m², se estimó el rendimiento en grano (kg ha⁻¹).

En todos los casos el área foliar se determinó usando un medidor electrónico LICOR (LI-3000A Portable Area Meter). Además, con el promedio del peso de dos muestras de 100 granos tomadas al azar se determinó el peso seco (PS) medio de los 100 granos.

Las muestras del material cosechado fueron secadas en estufas a 70 °C hasta lograr peso constante para determinar el peso de la materia seca total y el de cada uno de los componentes mencionados.

Por otra parte, se realizó un seguimiento de la evolución del contenido de agua en el suelo mediante determinaciones semanales de humedad por el método gravimétrico. Las mismas se realizaron en cuatro zonas de cada UE: B2FI(4)T0, B4FI(7)T0, B2FI(4)T4 y B4FI(7)T4 (ver Figura N° 7-identificados con una X), tomándose muestras en cada horizonte del perfil del suelo hasta 1 m de profundidad. Las muestras de suelo se pesaron en húmedo y luego se colocaron en estufa a 105 °C hasta lograr peso constante.

En las UE regadas se utilizó un equipo de riego por aspersión de avance lateral, compuesto por dos torres de 43,8 metros cada una, con un voladizo de 10 metros (Figura N° 8).



Figura N° 8: Equipo de riego del Campo Experimental de la UNRC.

Se suministró agua de buena calidad, clasificada por el U.S. Salinity Laboratory como categoría C2-S1, de acuerdo al análisis realizado por el Departamento de Geología de

la UNRC (1996). El agua fue provista por una electrobomba sumergible (caudal: 65.000 l/h) y conducida por una tubería enterrada hasta los hidrantes, la cual se conecta al equipo por medio de una tubería flexible.

La determinación del momento de riego se realizó mediante un balance del agua en el suelo, regando cuando el mismo indicaba el nivel de agotamiento permisible, aportándose la cantidad de agua establecida para cada uno de los distintos tratamientos.

Para estimar las precipitaciones efectivas se utilizó el Método del “Bureau of Reclamations” de los EE.UU para su uso en las zonas áridas y semiáridas. Se utilizan como base las precipitaciones estacionales medias de los años consecutivos más secos, y la efectividad de los incrementos de las lluvias mensuales que oscila entre un 90 % para los 25 primeros mm y un 0 % en las precipitaciones de más de 150 mm, o sea:

-incremento mensual (mm)	25	50	75	100	125	150	>150
-lluvia efectiva %	90	85	75	50	30	10	0

Fuente: FAO. Las necesidades de agua de los cultivos 1977.

En la Tabla N° 9 se presentan las fechas en que tuvieron lugar los riegos, y las láminas aplicadas.

Tabla N° 9: Riegos aplicados

Semanas del ciclo	Precip. Efec. (mm)	T0		T1		T2		T3		T4	
		ETc	R	ETc	R	ETc	R	ETc	R	ETc	R
1	0	23,14	6	23,14		23,14		23,14		23,14	6
2	20	22,10		22,10		22,10		22,10		22,10	
3	61,9	15,24		15,24		15,24		15,24		15,24	
4	22,5	21,83		21,83		21,83		21,83		21,83	
5	53	21,29	25	24,45		24,45		21,23		19,78	
6	1	25,81		29,37		29,37		29,37		17,63	
7	66,9	25,60		28,57		28,57		28,57		28,57	
8	89,1	22,24		24,07		24,07		24,07		24,07	
9	32,6	34,79		37,86		36,72		37,86		37,86	
10	4	38,00	25	38,45	25	38,00		38,45		38,45	
11	43,7	34,51		34,51		34,51		34,51		34,51	
12	7	27,43	25	27,43	25	27,43	25	27,43	25	27,43	25
13		30,94	25	30,94	25	30,94	25	23,52	25	18,55	
14	32,6	24,30		24,30		24,30		24,30		16,45	
15	7	27,09	25	26,44	25	27,09		26,44		26,44	
16	36,7	21,79		20,36		21,79		20,36		20,36	
17	54,6	14,66		13,62		14,66		13,62		13,62	
18	7	17,30		15,92		17,30		15,92		15,92	
19		10,25		9,33		10,25		9,33		9,33	
20		7,61		6,86		7,61		6,86		6,86	
Total	539,6	465,92	131	474,79	100	479,37	50	464,15	50	438,14	31

Riegos aplicados (R), Precipitación efectiva y Evapotranspiración del cultivo (ETc).

Fuente: Alzugaray, 2008

Modelo de cultivo

En este trabajo se utilizó el modelo de cultivos CERES V3.5 desarrollado para trigo, maíz, arroz, cebada, sorgo y mijo. CERES V3.5 es un modelo orientado a procesos que simula el desarrollo del cultivo, el balance de agua y de nitrógeno del suelo y el balance de carbono y de nitrógeno del cultivo. Una descripción detallada de la estructura del modelo, procesos, interacciones con los elementos climáticos, etc., es presentada por Jones y Kiniry (1986), Kiniry (1991) y Ritchie *et al.*, (1998). El modelo utiliza un código Fortran común para todas las especies mencionadas mientras que la información sobre características

específicas de cada una de ellas se encuentra en archivos de especies, ecotipos y cultivares. Las variables climáticas de entrada requeridas por el modelo son la radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), temperaturas máximas y mínimas del aire ($^{\circ}\text{C}$) y precipitación (mm). Otros datos de entrada necesarios son las características del suelo y del cultivar como así también el manejo aplicado (e.g., densidad de siembra, espacio entre plantas en la hilera y distancia entre hileras, dosis y momento de aplicación de riego y fertilizantes, etc.). Los datos diarios de las variables climáticas necesarias para el estudio [temperaturas máximas y mínimas del aire ($^{\circ}\text{C}$), precipitaciones (mm) y radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)] fueron tomados de la Estación Agrometeorológica de la UNRC ubicada en el mismo campo experimental y en la vecindad de la parcela experimental.

El modelo CERES V3.5 requiere para su funcionamiento de información organizada en archivos de entrada específicos:

- Archivos de datos climáticos (UNRC7701.WTH): Contiene los datos diarios que deben estar disponibles durante la estación de crecimiento, comenzando el día de la siembra y terminando con la madurez del cultivo.
- Archivo de datos del suelo SOIL.SOL (IBMZ950016): Contiene datos sobre las propiedades del perfil del suelo, obtenidos en el lugar específico del experimento. Éstos son: tasa de drenaje (fracción/día), curva número de escurrimiento, profundidad de cada horizonte, contenido de agua en W_m , W_c y saturación (cm^3/cm^3), PEA (g/cm^3), etc.
- Archivos del experimento:
 - UNRC7701.MZX: Documenta las características del experimento que va a ser simulado, por ej: densidad de siembra, fecha de emergencia, aplicación de agua de riego, fertilización, etc.
 - UNRC7701.MZA: Contiene datos de observaciones a campo. Estos datos son: fecha de floración, fecha de madurez fisiológica, componentes del rendimiento, IAF máximo, etc.
 - UNRC7701.MZT: Almacena información de IAF, agua extraíble (mm), peso seco de tallos (kg ha^{-1}), peso seco de granos (kg ha^{-1}), peso seco de las hojas (kg ha^{-1}), peso de toda la parte aérea de la planta (kg ha^{-1}) e índice de cosecha observada durante el ciclo del cultivo.
- Archivos de datos del genotipo (MZCER980.SPE; MZCER980.ECO y MZCER980.CUL): Proveen coeficientes genéticos que explican cómo responde el cultivo al ambiente. Incluye coeficientes fenológicos y otros. Describen el crecimiento del grano, los días fototérmicos que transcurren entre emergencia y floración, entre R1 y R6, la duración del periodo de llenado de granos en condiciones de crecimiento estándar, etc.

El comportamiento del modelo fue evaluado calculando el Error Medio Absoluto (EMA), la Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME) (Willmott, 1982) y la diferencia entre los valores de las variables observadas y simuladas (Dif).

$$EMA = N^{-1} \sum_{i=1}^N |\hat{Y}_i - Y_i|$$

$$RCME = [N^{-1} \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2]^{0.5}$$

Donde \hat{Y}_i es el valor estimado en el i^{th} ensayo y Y_i es el valor observado en el i^{th} ensayo; $i = 1, \dots, N$.

$Dif = \sum [(Cont. Humedad simulado - Cont. Humedad observado) / Cont. Humedad observado] / \text{número de observaciones realizadas.}$

Cálculo del balance de agua en el modelo de cultivo

Según Ritchie (1998) el balance de agua del suelo incluye la infiltración del agua de lluvia o riego, su distribución en el suelo, la escorrentía, el drenaje hacia la zona de las raíces y la incorporación por las mismas, la percolación del agua fuera del alcance del sistema radical y la evapotranspiración.

El cálculo del balance de agua del suelo requiere determinar variables de entrada para establecer la cantidad de agua que puede retener el suelo por capilaridad, la que drenará por gravedad y la que estará disponible para la absorción radical. Los procedimientos de cálculo requieren conocer los contenidos de agua del suelo (fracción volumétrica) para el límite inferior de disponibilidad de agua para las plantas (W_m), para el límite donde las fuerzas de capilaridad son mayores que las fuerzas de gravedad (W_c) y para saturación del suelo. Debido a que los suelos no son homogéneos en todo su perfil, los contenidos de agua son requeridos para todos los horizontes a los que se desee aplicar el balance.

El *escurrimiento* es calculado a partir del método de la curva número del Servicio de Conservación del Suelo del USDA. En el procedimiento se considera la precipitación total de una o más tormentas ocurridas a lo largo de un día, sin tener en cuenta la variable tiempo, ya que se ignora la intensidad de la precipitación.

La *infiltración* se asume como la diferencia entre la precipitación y el escurrimiento, y se considera que la infiltración es posible debido a la presencia de macroporos, ya que no hay otro aspecto físico que limite la infiltración en la superficie del suelo.

Con respecto al *drenaje*, en la redistribución del agua durante la infiltración, ésta se mueve hacia abajo desde el estrato superior del suelo hacia los estratos más profundos aproximándose a una forma de cascada. El drenaje desde un horizonte tiene lugar sólo cuando el contenido hídrico de ese horizonte se encuentra entre saturación y W_c .

El modelo calcula la *Evapotranspiración Potencial* por medio de las fórmulas de Priestley-Taylor o Penman de acuerdo a la disponibilidad de datos meteorológicos. El cálculo de la tasa actual de evaporación del suelo asume dos etapas de dicho proceso: durante la primera etapa, la evaporación está limitada por la energía disponible en la superficie del suelo, y esta etapa continúa hasta que un límite superior (expresado en mm) dependiente del suelo es alcanzado. Luego de alcanzado este límite se ingresa en la segunda etapa, en la cual la evaporación disminuye proporcionalmente al tiempo transcurrido durante esta etapa.

En la *absorción de agua por las raíces*, la resistencia del suelo, la resistencia de las raíces, o la demanda atmosférica dominan la tasa del flujo de agua dentro de las raíces. Esta tasa es calculada asumiendo que el agua se mueve hacia una única raíz y que las raíces están uniformemente distribuidas dentro de un estrato.

Cuando el suelo está húmedo y las raíces tienen abundante cantidad de agua a su disposición, el suministro potencial de agua por el sistema radical excede la tasa potencial de transpiración. A medida que el suelo se seca, su conductividad hidráulica disminuye, y también lo hace la absorción potencial de agua por las raíces. Cuando ésta disminuye hasta un valor inferior al de la tasa potencial de transpiración, la tasa actual de transpiración se reduce debido al cierre parcial de estomas hasta alcanzar la tasa de absorción por las raíces. Cuando esto ocurre, se asume que la tasa potencial de producción de biomasa se reduce en la misma proporción que la transpiración. Las tasas de transpiración potencial y de producción de biomasa son reducidas multiplicando sus tasas potenciales por un factor de déficit hídrico (SWDF1).

Un segundo factor de déficit hídrico (SWFD2) es calculado para explicar los efectos del déficit hídrico en otros procesos fisiológicos de las plantas que son más sensibles que los controlados por la apertura y cierre de estomas (transpiración y producción de biomasa), como la expansión y contracción de las hojas, el crecimiento del tallo, el macollaje, etc.

Variabilidad climática – variación en el contenido hídrico en el suelo

El modelo calibrado y validado con los datos experimentales fue utilizado para analizar el efecto de déficit hídricos generados durante el período crítico del cultivo [desde 15 días antes de la aparición de los estigmas (R1) hasta los 21 días posteriores a esa fecha] sobre el rendimiento y sus componentes. Utilizando una serie de datos meteorológicos

diarios de 25 años (1974-1998) para Río Cuarto, se realizaron ocho series de simulaciones diferentes empleando la opción SEASONAL del modelo:

Contenido hídrico a la siembra 70 % de Wc (T0 a T3)

- Tratamiento 1 (T0): Con riego – Sin déficit hídrico a lo largo de todo el ciclo del cultivo. El riego es aplicado en forma automática cuando el contenido hídrico en los primeros 30 cm del perfil del suelo alcanza el 50% de Wc. La cantidad de agua aplicada es la necesaria para que el suelo alcance Wc.
- Tratamiento 2 (T1): Sin riego – Secano
- Tratamiento 3 (T2): Sin riego y con una disminución del 20% en las lluvias observadas durante el período crítico.
- Tratamiento 4 (T3): Sin riego y con una disminución del 30 % en las lluvias observadas durante el período crítico.

Contenido hídrico a la siembra 50 % de Wc (T4 a T7)

- Tratamiento 5 (T4): Con riego – Sin déficit hídrico a lo largo de todo el ciclo del cultivo. El riego es aplicado en forma automática cuando el contenido hídrico en los primeros 30 cm del perfil del suelo alcanza el 50% de Wc. La cantidad de agua aplicada es la necesaria para que el suelo alcance Wc.
- Tratamiento 6 (T5): Sin riego – Secano
- Tratamiento 7 (T6): Sin riego y con una disminución del 20% en las lluvias observadas durante el período crítico.
- Tratamiento 8 (T7): Sin riego y con una disminución del 30 % en las lluvias observadas durante el período crítico.

Para todas las campañas de la serie se asume la utilización del mismo híbrido de maíz NIDERA 884, sembrado el 15 de septiembre con una densidad de 95.000 semillas/ha, una distancia entre hileras de 0,52 m y sin restricción de nitrógeno a lo largo del ciclo del cultivo mientras que la cantidad de plantas logradas es igual al de las semillas sembradas. Aplicados estos tratamientos, el análisis de los resultados incluyó la media y la desviación estándar (DS) de los rendimientos del cultivo y sus componentes en los distintos casos evaluados. Se realizó un análisis estadístico de comparación de medias para determinar la existencia de diferencias entre los rendimientos de los distintos tratamientos aplicados

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La calibración del modelo se llevó a cabo a partir de la información obtenida del ensayo más regado (**T0**, 6 riegos), ya que el mismo no presentó estrés hídrico a lo largo del ciclo del cultivo. Primero se ajustaron las variables fenológicas del cultivo, seguidas por el balance de agua del suelo, y luego se procedió a la evaluación de las variables fenométricas (rendimiento y sus componentes, biomasa, etc.) siguiendo la metodología propuesta por Boote (1999). Por otra parte, la validación se realizó utilizando los datos correspondientes al ensayo menos regado (**T4**, 2 riegos).

Simulación del balance de agua del suelo realizada por el modelo

El ajuste del balance de agua del suelo, realizado para las parcelas más regadas (T0) y menos regadas (T4), produjo los resultados que se muestran en las Tablas N° 10 y 11. Estos se analizaron mediante la utilización de los valores observados y simulados, obteniéndose así la Dif (%), el EMA y la RCME para cada horizonte del perfil del suelo (cm^3/cm^3) (Tabla N° 10), y para todo el perfil (0-100 cm) (lámina de agua, en mm) (Tabla N° 11).

Los valores observados se obtuvieron del archivo UNRC7701.MZT, y los valores simulados del archivo de salida WATER.OUT.

Tabla N° 10: Comportamiento del modelo para cada uno de los horizontes en los ensayos con riego y sin riego.

H	Prof. (cm)	T0			T4		
		EMA	RCME	Dif.(%)	EMA	RCME	Dif.(%)
1	0-5	0,056	0,073	-16,8	0,066	0,079	-16,4
2	5-14	0,034	0,043	-4,1	0,041	0,052	-7,6
3	14-22	0,041	0,050	-9,4	0,051	0,076	33,4
4	22-35	0,033	0,039	-4,7	0,029	0,038	-6,6
5	35-49	0,023	0,031	0,8	0,032	0,039	-12,2
6	49-66	0,020	0,025	-0,5	0,032	0,039	-14,4
7	66-82	0,014	0,017	-3,8	0,038	0,046	-18,1
8	82-100	0,020	0,023	-9,6	0,040	0,050	-18,9

H= Horizonte; P= Profundidad.

En la Tabla N° 10 se observa que tanto para T0 como para T4 el modelo subestima el contenido hídrico del suelo en todos los horizontes salvo para el 5^{to} horizonte en T0 y el

3^{er} horizonte en T4. Las mayores subestimaciones corresponden al 1^{er} horizonte en T0 y los horizontes 7^{mo} y 8^{vo} en T4. Por otra parte, el 3^{er} horizonte en T4 muestra una muy alta sobreestimación en los valores de contenido hídrico (33,4% de diferencia).

Tabla N° 11: Comportamiento del modelo para los primeros 100 cm del perfil del suelo en los ensayos T0 y T4.

Ensayos	PESW (0-100cm)		
	EMA	RCME	Dif.
T0	19,8	24,7	-7,6
T4	29,3	34,2	-23,1

PESW= Agua del suelo potencialmente extraíble.

En la Tabla N° 11 se muestra que para ambos tratamientos el modelo subestima el contenido hídrico total del suelo en un -7,6% y -23,1% respectivamente, observando un mejor ajuste en T0.

Analizando las dos situaciones simuladas, podemos decir que la RCME equivale a valores de 19,4% y 26,8% de error respecto del promedio de los valores de contenido de agua observados, correspondiendo el valor más bajo a **T0**.

Simulación de la fenología, producción de materia seca, rendimiento y sus componentes

El ajuste del modelo de maíz para cada condiciones **T0** y **T4**, permitió obtener los valores de los coeficientes genéticos del modelo (Tabla N° 12) correspondientes a la mejor relación entre los resultados fenológicos y fenométricos observados o medidos, con respecto a los simulados por el modelo.

Tabla N°12: Coeficientes genéticos para maíz, su descripción en CERES-Maize y los valores correspondientes para el híbrido NIDERA AX 884

Coeficientes	Significado del coeficiente	Valor del coeficiente
P1	Tiempo térmico desde emergencia hasta el fin de la fase juvenil (expresado en grados días sobre la temperatura base para maíz de 8°C), durante el cual la planta no responde a cambios en el fotoperíodo.	270
P2	Alargamiento del día por el cual el desarrollo del maíz se retrasa por cada hora de incremento en el fotoperíodo por encima del fotoperíodo en el cual el desarrollo ocurre a la tasa máxima (12,5 hs)	0
P5	Tiempo térmico desde aparición de los estigmas a madurez fisiológica (expresado en grados días sobre la temperatura base para el maíz de 8 °C)	820
G2	Número potencial de granos por espiga	720
G3	Tasa de llenado del grano durante la fase lineal de llenado y bajo óptimas condiciones	9
PHINT	Filocrono: intervalo en tiempo térmico (grados día) entre la aparición sucesiva de la punta de las hojas	46

Para evaluar el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz se analizaron las siguientes variables fenológicas y fenométricas (Tabla N° 13).

Tabla N° 13. Variables fenológicas y fenométricas

<i>Variables Fenológicas</i>	
Días desde la siembra a aparición de estigmas (R1)	R1
Días desde la siembra a madurez fisiológica (R6)	R6
<i>Variables Fenométricas</i>	
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Rend.
Biomasa total a cosecha (kg ha ⁻¹)	Biom.Tot.
Granos por espiga	NG
Granos por metro cuadrado	gr/m ²
Peso del grano (g)	PG
Índice de Área Foliar Máximo	I.A.F max.

En la Tabla N° 14 se presentan los resultados de la simulación de los estadios fenológicos y de los componentes del rendimiento para maíz en Río Cuarto.

Tabla N° 14: Resultados de la simulación mediante el modelo CERES-Maize y comparación con los valores observados, en condiciones de **T0** y **T4** (sin riego).

<i>Variables fenológicas</i>						
Condición	<i>T0</i>			<i>T4</i>		
	Sim.	Obs.	Dif.(%)	Sim.	Obs.	Dif.(%)
R1	65	65	0	65	65	0
R6	128	126	2	128	126	2
<i>Variables fenométricas</i>						
Condición	<i>T0</i>			<i>T4</i>		
	Sim.	Obs.	Dif.(%)	Sim.	Obs.	Dif.(%)
Rend. (kg ha⁻¹)	14349	11774	21,9	14349	12121	18,4
PG (kg)	0,359	0,330	8,8	0,359	0,354	1,4
NG	499,0	446	11,9	499,0	428	16,6
gr/m²	3992	3568	11,9	3992	3424	16,6
Biom. Tot.	24853	24249	2,5	24853	24422	1,8
I.A.F. Max.	5,03	5,1	-1,4	5,03	5,4	-6,8

Nota: El significado y unidades en que se expresan las variables fenológicas y fenométricas se presenta en la Tabla N° 13; Sim.: Simulado; Obs.: Observado; Dif.: Diferencia = (Sim.-Obs.), en días, para estados R1 y R6; Diferencia = [(Sim.-Obs.)/Obs.]*100, para el resto de las variables.

El modelo presenta una simulación de la fenología (Tabla N° 14) que se corresponde con los valores observados en los ensayos. Se observó que no hubo adelanto en la fecha de floración y un pequeño retraso (2 días) en la fecha de madurez fisiológica en ambos experimentos.

Con respecto a la simulación de las variables fenométricas, en **T0** el modelo sobreestima el Rend., PG, NG, gr/m² y Biom. Tot. Por otra parte, el I.A.F Max. es levemente subestimado -1,4%.

En **T4** el modelo sobreestima el rendimiento, todos sus componentes y la Biom. Tot., siendo PG y Biom. Tot. los que presentan las menores diferencias. El I.A.F Max. es subestimado en mayor proporción que en **T0**.

Considerando los resultados de los indicadores del comportamiento del modelo, se evidencia una adecuada representación de los valores observados por parte del modelo ajustado.

Influencia de las variaciones en el contenido hídrico del suelo sobre el rendimiento y sus componentes

Luego de la calibración y validación del modelo y utilizando la opción SEASONAL del mismo, se simularon 8 tratamientos (T0, T1, T2, T3, T4, T5, T6 y T7), los que han sido explicados con mayor detalle en Materiales y Métodos.

El objetivo de esta simulación fue determinar la influencia del contenido hídrico del suelo a la siembra y durante el período crítico, sobre el rendimiento en grano y sus componentes. Utilizando una serie de 25 años (1974 – 1998) de datos meteorológicos para Río Cuarto, se realizaron en cada tratamiento las corridas para cada campaña, simulándose variables como fecha de R1, de R6, rendimiento, etc.

La corrida N° 19 (año 1992) fue descartada debido a la ocurrencia de una helada (-1,5 °C) el día 4 de Noviembre, cuando el ápice estaba arriba de la superficie del suelo, causando la muerte de las plantas. Con los datos de las 23 campañas restantes se calculó el promedio y el desvío estándar (DS) para cada variable, los que se presentan en la Tabla N° 15.

Tabla N° 15: Resultados de la simulación para una serie de 23 campañas con 4 tratamientos
Contenido hídrico a la siembra 70 % de Wc. (T0 a T3)

Variables	Con Riego (T0)	Secano (T1)	Secano - 20 % (T2)	Secano - 30 % (T3)
Fecha de R1	12/12 ± 5 días	12/12 ± 5 días	12/12 ± 5 días	12/12 ± 5 días
Fecha de R6	06/02 ± 7 días	02/02 ± 11 días	01/02 ± 14 días	31/01 ± 14 días
MS aérea en R6 (kg ha ⁻¹)	25417,2 ± 1579,3	18770,6 ± 6635	17603,1 ± 6867,9	17222,2 ± 6806,6
N° de granos/espiga	397 ± 32	323 ± 92	301 ± 102	296,7 ± 104
N° de granos/m ²	3776 ± 299	3068 ± 890	2855 ± 981	2813,4 ± 998,2
Peso medio del grano (mg/grano)	336,6 ± 21,2	267,0 ± 94	258,7 ± 96,3	250,9 ± 98,9
Rendimiento en grano (kg ha ⁻¹)	12689,4 ± 1123	8823,0 ± 3993,4	8078,4 ± 4081,1	7728 ± 4059,5
mm evapotranspirados	618,1 ± 28,6	474,7 ± 117,9	456 ± 119,5	447 ± 121,9
Agua extraíble en MF (mm)	67,8 ± 26,1	28,1 ± 36	23 ± 33,5	20,3 ± 33,6
IC*	0,50	0,47	0,46	0,44

Los datos se expresan como promedio ± DS (desvío estándar)

* IC = Índice de cosecha promedio de las 23 campañas

Tabla N° 16: Resultados de la simulación para una serie de 23 campañas con 4 tratamientos
Contenido hídrico a la siembra 50 % de Wc. (T4 a T7)

Variables	Con Riego (T4)	Secano (T5)	Secano - 20 % (T6)	Secano - 30 % (T7)
Fecha de R1	12/12 ± 5 días	12/12 ± 5 días	12/12 ± 5 días	12/12 ± 5 días
Fecha de R6	06/02 ± 7 días	06/02 ± 7 días	06/02 ± 7 días	06/02 ± 7 días
MS aérea en R6 (kg ha ⁻¹)	25417,2 ± 1579,3	16638,3 ± 7079	15249,3 ± 7124,5	14469,6 ± 7010,5
N° de granos/espiga	397 ± 32	287 ± 104	260 ± 110	248 ± 112
N° de granos/m ²	3776 ± 299	2718 ± 1001	2468 ± 1067	2345 ± 1087
Peso medio del grano (mg/grano)	336,6 ± 21,2	289,5 ± 57,8	281 ± 59,6	273,7 ± 62,2
Rendimiento en grano (kg ha ⁻¹)	12689,4 ± 1123	8214,1 ± 3727,8	7250,7 ± 3756,8	6692,6 ± 3693,8
mm evapotranspirados	623,5 ± 28,2	450,4 ± 109,5	431,4 ± 110,9	419 ± 111,1
Agua extraíble en MF (mm)	67,7 ± 26,9	31,3 ± 34,5	26,3 ± 33,0	23,6 ± 33,5
IC*	0,50	0,49	0,47	0,46

Los datos se expresan como promedio ± DS (desvío estándar)

* IC = Índice de cosecha promedio de las 23 campañas

Considerando las variables relacionadas con el desarrollo del cultivo, se observa que no hubo diferencias entre los tratamientos en la fecha de R1, pero si las hubo en R6 cuando el contenido hídrico a la siembra fue del 70 % de Wc (**T0** a **T3**). También se distingue que se produjo un adelantamiento de madurez fisiológica (R6), cuando la disponibilidad de agua disminuye, siendo la mayor diferencia entre **T0** y **T3** donde **T3** alcanza R6, 6 días antes con respecto a **T0**. Las diferencias en las fechas de R6 entre **T1**, **T2** y **T3** con respecto a **T0** se deben a que en las simulaciones correspondientes a las campañas 1975-76 y 1977-78, como resultado del estrés hídrico se produce el cierre de los estomas, bajan las tasas de transpiración y producción de biomasa y es afectado el crecimiento. Esto determina que la cantidad de fotoasimilados sean insuficientes para mantener el área foliar ya desarrollada y continuar con la acumulación de materia seca, entonces el modelo simula

la finalización del ciclo en forma anticipada. Esta finalización anticipada del ciclo en esas dos corridas determina que el promedio de la fecha de R6 sea menos que el correspondiente a **T0** (Tabla N°15).

En los tratamientos en donde el contenido de agua a la siembra es del 50% de Wc (**T4 a T7**) no se observan diferencias en la fecha de R6. En estos tratamientos y para la campaña 1975-76, el estrés hídrico causa los mismos efectos que en la situación descrita en el párrafo anterior pero no se alcanza el umbral inferior de acumulación de materia seca, por lo tanto no se produce la finalización anticipada de esa campaña aunque el rendimiento es muy bajo.

Ciertos autores (*e.g.* Andrade *et al.*, 1996), revelan que si la provisión de fotoasimilados durante el período de llenado de granos es baja (puede ser a causa de baja radiación, baja intercepción de radiación, déficit hídrico, etc.) se acorta la duración del período de llenado de grano. Cuando la provisión de asimilados a la espiga disminuye por debajo de un determinado valor umbral, se provoca el cese del crecimiento del grano formándose, luego, una capa negra en la base del mismo. En este momento se alcanza la madurez fisiológica (Andrade *et al.*, 1996).

En relación a la simulación a partir de un contenido de agua a la siembra del 70% de Wc (**T0 a T3**), al comparar **T0** vs. **T1** se observa (Tabla N°15) que la falta del aporte de agua provocó una disminución significativa en el rendimiento (30,5%), y en sus componentes: N° de granos/espiga (18,6%), el N° de granos/m² (18,8%) y peso medio del grano (20,7%) (Tabla N°17). Esta misma tendencia de disminución de rendimiento y sus componentes también se puede apreciar en los otros tratamientos **T2** y **T3**, observando en este último los valores más extremos donde el rendimiento disminuye en forma considerable (39,1%), el N° de granos/espiga en 25,5%, el N° de granos/m² en 25,6% y el peso medio del grano en 25,6%. La producción total de MS en R6 disminuye un 26,2%, 30,8% y 32,3% al comparar **T0** vs. **T1**, **T2** y **T3** respectivamente. Esto reafirma la información hallada en la literatura que indica que ante un estrés hídrico en torno de la floración el rendimiento en grano se afecta proporcionalmente más que la producción de MS, reduciendo el índice de cosecha (Sinclair *et al.*, 1990).

Con respecto a la simulación a partir de un contenido hídrico a la siembra del 50% de Wc (**T4 a T7**), se puede observar al comparar T4 vs. T5 que la falta de riego provocó una disminución del 35,3% en el rendimiento, del 27,7% en el N° de granos/espiga, del 28% en el N° de granos/m² y de un 14% en el peso medio de los granos (Tabla N°17). En cambio, cuando se realiza la misma comparación entre T4 y T6, se advierte que en este último la disminución en el rendimiento fue del 42,9% mientras que el N° de granos/espiga, el N° de granos/m² y el peso de granos disminuyeron un 34,5%, 34,7% y 16,4%, respectivamente. Por último al comparar T4 vs T7 la disminución en el rendimiento fue la más elevada con un

47,3% y una diferencia del 37,6% en el N° de granos/espiga, 37,9% en el N° de granos/m² y 18,7% en el peso medio de los granos (Tabla N°17).

Es importante señalar que la variabilidad de los resultados (DS) que se presentan en las Tablas N° 15 y 16 aumenta con la restricción hídrica. Esto es particularmente preponderante para la variable rendimiento y sus componentes señalando que a medida que disminuye el agua disponible para el cultivo aumenta la variabilidad y por lo tanto el riesgo económico, al incrementarse la probabilidad de obtener rendimientos muy bajos.

Tabla N° 17: Comparación de los distintos tratamientos, en cuanto a: MS aérea en madurez (kg ha⁻¹), N° de granos/espigas, N° de granos/m², Peso medio del grano (mg/gr), Rendimiento en grano (kg ha⁻¹) e Índice de cosecha.

MS aérea en madurez (dif. en %)					MS aérea en madurez (dif. en %)				
	T0	T1	T2	T3		T4	T5	T6	T7
Valores	25417	18771	17603	17222	Valores	25417	16638	15249	14496
	T0	T1	T2			T4	T5	T6	
T1	26,2	-	-		T5	34,5	-	-	
T2	30,7	6,2	-		T6	40,0	8,4	-	
T3	32,2	8,2	2,2		T7	43,1	13,0	5,1	
N° de granos/espiga (dif. en %)					N° de granos/espiga (dif. en %)				
	T0	T1	T2	T3		T4	T5	T6	T7
Valores	397	323	301	296	Valores	397	287	260	248
	T0	T1	T2			T4	T5	T6	
T1	18,6	-	-		T5	27,7	-	-	
T2	24,2	6,8	-		T6	34,5	9,4	-	
T3	25,4	8,4	1,7		T7	37,8	13,9	5,0	
N° de granos/m ² (dif. en %)					N° de granos/m ² (dif. en %)				
	T0	T1	T2	T3		T4	T5	T6	T7
Valores	3776	3068	2855	2813	Valores	3776	2718	2468	2345
	T0	T1	T2			T4	T5	T6	
T1	18,8	-	-		T5	28,0	-	-	
T2	24,4	6,9	-		T6	34,6	9,2	-	
T3	25,5	8,3	1,5		T7	37,9	13,7	5,0	
Peso medio del grano (dif. en %)					Peso medio del grano (dif. en %)				
	T0	T1	T2	T3		T4	T5	T6	T7
Valores	336,6	267	258,5	251	Valores	336,6	289,5	281	273,7
	T0	T1	T2			T4	T5	T6	
T1	20,7	-	-		T5	14,0	-	-	
T2	23,2	3,2	-		T6	16,5	2,9	-	
T3	25,5	6,0	2,9		T7	18,7	5,5	2,6	
Rendimiento en grano (dif. en %)					Rendimiento en grano (dif. en %)				
	T0	T1	T2	T3		T4	T5	T6	T7
Valores	12689	8823	8078	7728	Valores	12689	8214	7250	6692
	T0	T1	T2			T4	T5	T6	
T1	30,5	-	-		T5	35,3	-	-	
T2	36,3	8,4	-		T6	42,9	11,7	-	
T3	39,1	12,4	4,3		T7	47,3	18,5	7,7	
Índice de cosecha (dif. en %)					Índice de cosecha (dif. en %)				
	T0	T1	T2	T3		T4	T5	T6	T7
Valores	0,5	0,47	0,46	0,44	Valores	0,5	0,49	0,47	0,46
	T0	T1	T2			T4	T5	T6	
T1	6,0	-	-		T5	2,0	-	-	
T2	8,0	2,1	-		T6	6,0	4,1	-	
T3	12,0	6,4	4,3		T7	8,0	6,1	2,1	

Nota: Ejemplo de cálculo T0 vs T1: $(T0-T1)*100/T0 \Rightarrow (25417-$

$18771)*100/25417= 26,2\%$ con este procedimiento se obtienen las diferencias en cada caso particular.

Con el objetivo de determinar si las diferencias entre los tratamientos son estadísticamente significativas, se utilizó la prueba *t* de Student. Esta prueba determinó que, para todas las variables, las medias son significativamente diferentes al comparar T0 vs. T1, T2 y T3 ($p < 0,05$); lo mismo sucede cuando se compara T4 vs. T5, T6 y T7. No se encontraron diferencias significativas en ninguna de las variables al comparar los tratamientos en secano y con disminución de las precipitaciones en el período crítico entre sí (T1, T2 y T3; T5, T6 y T7).

Para explicar estos resultados, es necesario considerar un modelo general propuesto por Satorre *et al.* (2003):

- Biomasa = Rinc x Ef.int x EUR
- Rendimiento = Biomasa x IC (o eficiencia de partición)

Donde:

Rinc = Radiación incidente en el cultivo

Ef.int = Eficiencia de intercepción de la radiación por el cultivo

EUR = Eficiencia en el uso de la radiación (o eficiencia de conversión)

IC = Índice de cosecha

De ello se deduce que el efecto del déficit hídrico sobre la producción de los cultivos opera en gran parte a través de la disminución de la expansión foliar o de la aceleración de la senescencia de las hojas y, por lo tanto, se reduce la eficiencia con que el cultivo intercepta la radiación incidente. La eficiencia de conversión de la radiación interceptada en biomasa vegetal también disminuye en condiciones de estrés hídrico, como resultado de caídas en el ritmo fotosintético. En consecuencia, la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) es afectada (Andrade *et al.*, 1996).

Analizando la información obtenida del presente trabajo, la caída significativa observada en el rendimiento y sus componentes en el cultivo de secano, en contraste con el desarrollado bajo riego, puede atribuirse a menores Ef.int y EUR en las situaciones de secano. Estas condiciones impulsaron una reducción en la TCC y, en consecuencia, en la producción de biomasa, y una disminución en la partición de asimilados. Estas variaciones en su conjunto pueden explicar el mayor rendimiento del cultivo observado en T0 y T4 (ambos con riego) en relación a los otros tratamientos (secano).

También debemos considerar que algunos autores indican que el maíz manifiesta una sensibilidad diferencial al estrés hídrico según la etapa del ciclo considerada. Si el estrés ocurre alrededor de la floración, se producen pérdidas importantes en el rendimiento en

grano (Robelin, 1987; Shaw, 1988). Ello se debe a que el desarrollo inicial del grano es altamente dependiente del suministro de asimilados a la espiga durante esa etapa (Schusler y Westgate, 1991). Entonces, cuanto mayor sea la TCC en posfloración, menor será el porcentaje de aborto y, en consecuencia, se incrementará el número final de granos producidos (Cirilo y Andrade, 1994). Es importante recordar que la fuente de variación más importante en el número de granos por planta está dada por el aborto de flores fecundadas (Satorre *et al.*, 2003).

Para contrastar los resultados obtenidos en los tratamientos T0, T1, T2, T3, etc. es necesario considerar que el modelo de simulación funciona con dos coeficientes de estrés hídrico ($WSPD = SWDF1$ y $WSGD = SWDF2$) ya descriptos, cuyos valores oscilan entre 0 y 1 correspondiendo al mínimo y máximo estrés respectivamente. La ausencia de diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento entre los tratamientos en secano para cada contenido de agua inicial puede atribuirse a que la disminución en un 20 % y 30 % de las precipitaciones ocurridas durante el período crítico, no indujo variaciones notables en los coeficientes de estrés en la mayor parte de los años analizados. La relación existente entre rendimiento y el coeficiente de estrés hídrico WSPD se evidencia notoriamente si se analizan los datos obtenidos en las campañas 1994/95 y 1987/88 (Figura N°9).

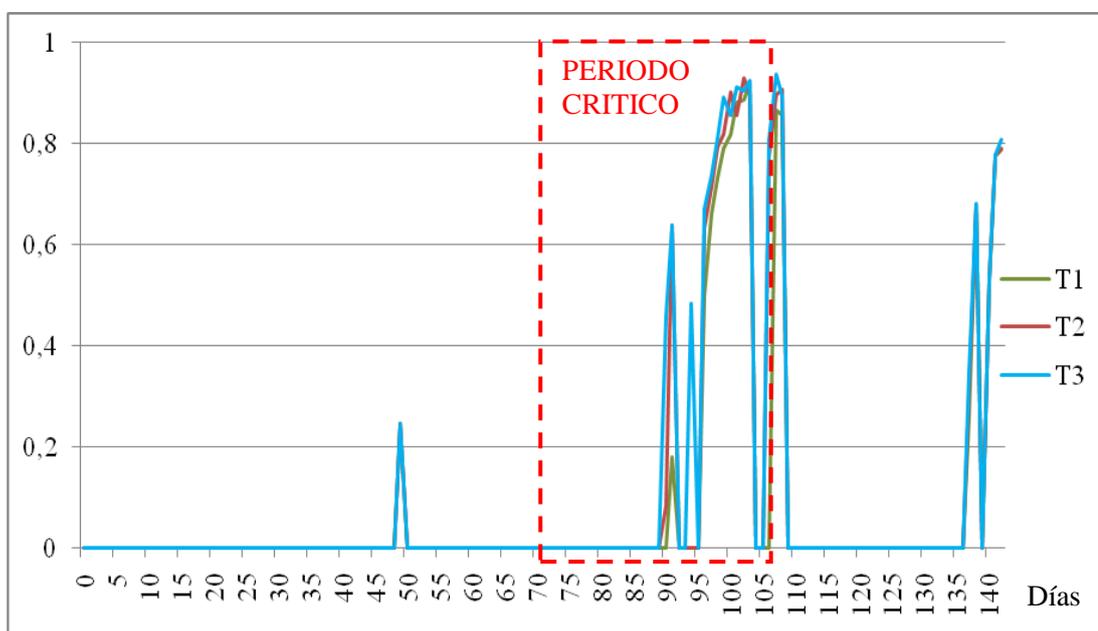


Figura N° 9: Variación de WSPD a lo largo del período crítico de T1, T2 y T3 durante la campaña 1994/95.

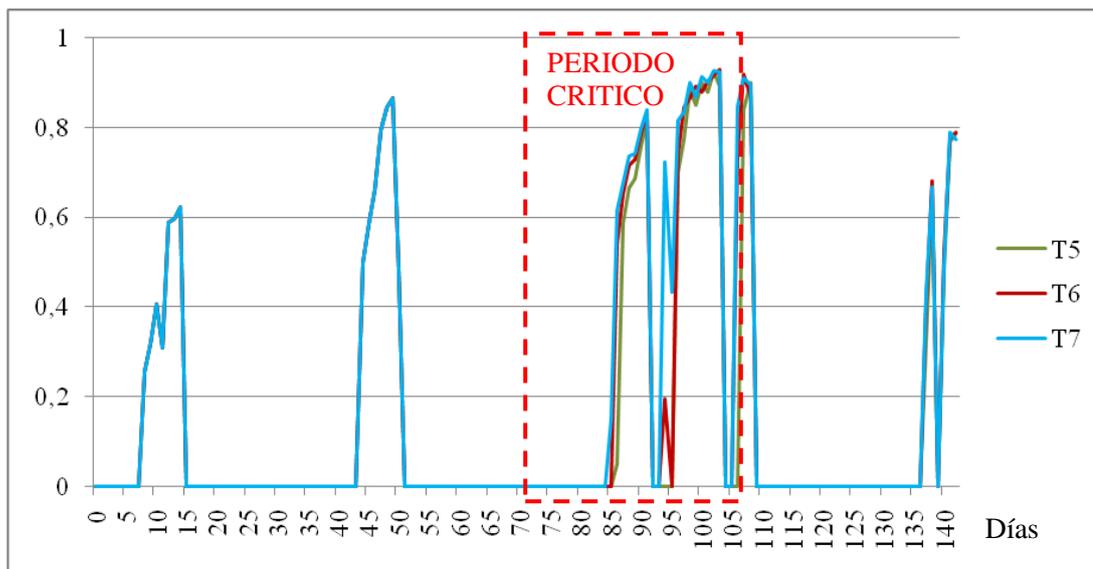


Figura N°10: Variación de WSPD a lo largo del período crítico de T5, T6 y T7 durante la campaña 1994/95.

En la Figura N° 9 correspondiente a la campaña N° 21 (1994/95) para los tratamientos T1, T2 y T3 (contenido hídrico inicial 70% Wc) se observa que el mayor estrés hídrico se produce principalmente durante el período crítico. Por otra parte, en la Figura N°10 se observa que el mayor estrés hídrico también se produce durante el período crítico (principalmente después de la aparición de los estigmas) pero también ocurre estrés en otros dos períodos durante la etapa vegetativa para el tratamiento T7. Estas diferencias se deben principalmente a que los tratamientos representados en la Figura N°10 presentan un contenido inicial de agua inferior (50 % de Wc) al de los tratamientos representados en la Figura N°9.

Al analizar la influencia del contenido hídrico inicial sobre el rendimiento y sus componentes, se observa que para esa campaña en particular (1994-1995) T1 (Wc 70%, secano) presenta un 33% más de rendimiento que T5 (Wc 50%, secano) mientras que para T2 (Wc 70%, -20% de precipitación en el período crítico) se observa que el rendimiento supera al de T6 (Wc 50%, -20% de precipitación en el período crítico) en un 37,1%. En la comparación entre T3 y T7, T3 sobrepasa a T7 en un 47,2%. El análisis de las diferencias en los rendimientos entre los tratamientos más extremos (T0 vs T7 y T4 vs T7) señala que ambos tratamientos con riego (T0 y T4) que no presentan estrés hídrico durante el ciclo, superan a T7 en un 59,8%. Así se aprecia la pérdida de rendimiento que se obtiene si el cultivo en su ciclo se enfrenta con condiciones de estrés hídrico. El componente del rendimiento más afectado en la mayoría de los casos es el número de granos por m².

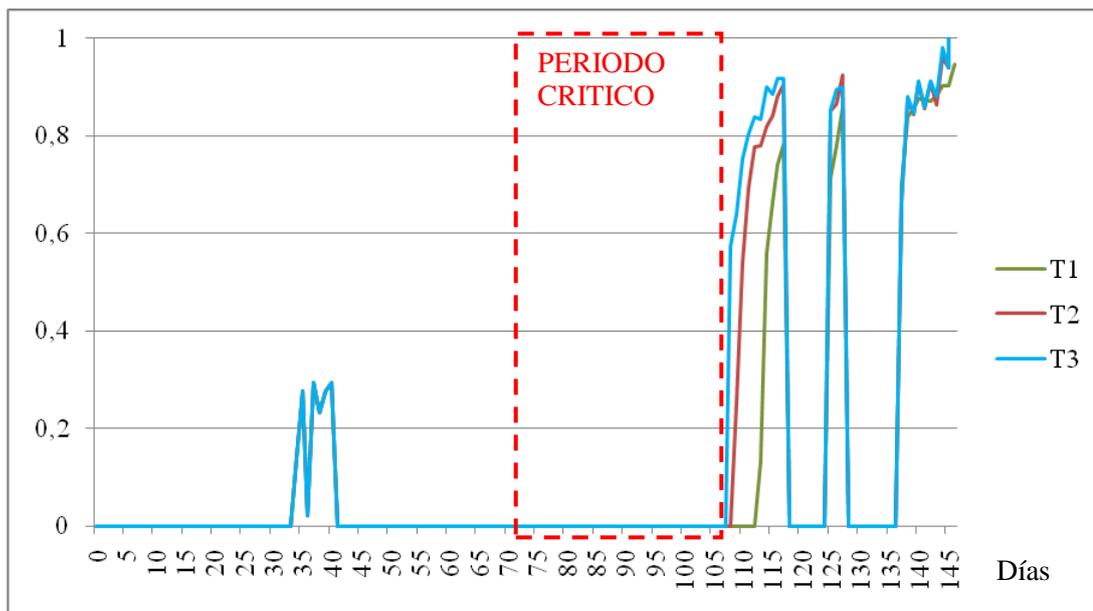


Figura N°11: Variación de WSPD fuera del período crítico de T1, T2 y T3 durante la campaña 1987/88.

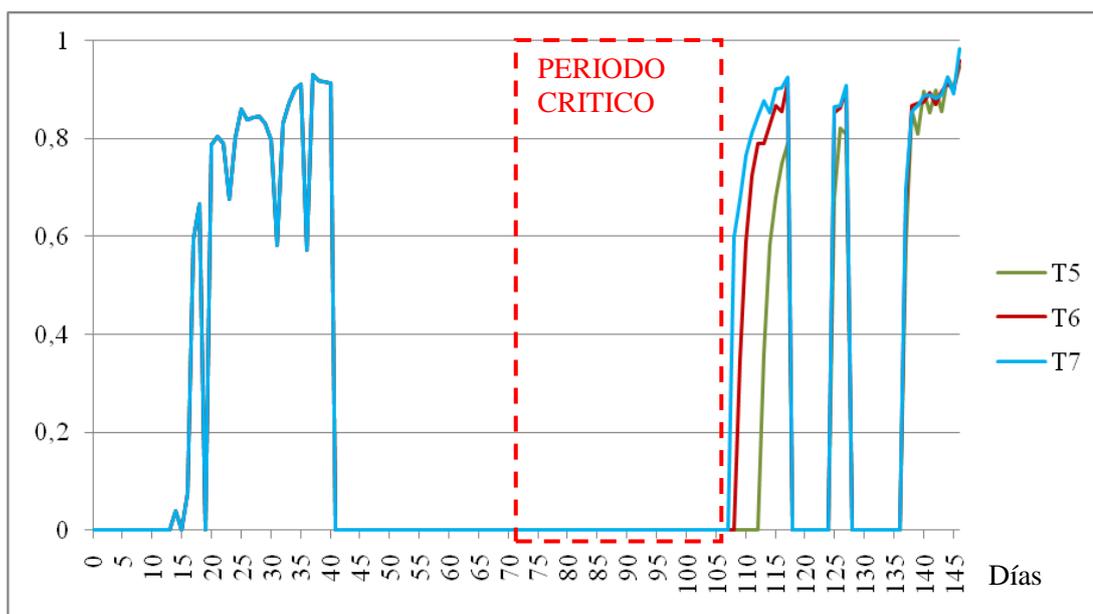


Figura N°12: Variación de WSPD fuera del período crítico de T5, T6 y T7 durante la campaña 1987/88.

En la campaña representada en las Figuras N° 11 y 12 caracterizada por rendimientos elevados, la diferencia en los rendimientos entre tratamientos fue menos relevante que la ocurrida en la campaña 1994/95 (Figuras N°9 y 10). Esto se debe principalmente a que no se observó estrés hídrico durante el período crítico, pero sí fuera del mismo. Al comparar T1 vs T5, T2 vs T6 y T3 vs T7 se observa una disminución muy pequeña del rendimiento que oscila entre el 2 y 2,1%. Esta disminución del rendimiento está

determinada por una disminución en el peso del grano del 5,1% cuando se compara T1 vs T2 y del 3,4% al comparar T2 vs T3 las que pueden atribuirse al estrés hídrico ocurrido durante la etapa de llenado de grano las que redujeron su tamaño potencial (Figuras N°11 y 12). Cuando se analizan las diferencias de los rendimientos entre los tratamientos extremos (T0 vs T7), se observa que la pérdida del rendimiento, a diferencia de lo que ocurría para la campaña 1994-1995, es solo del 21,3% y está determinada por una disminución del peso de grano del 19,5%.

Del análisis de los resultados obtenidos para ambas campañas se infiere que mayores diferencias en el coeficiente de estrés hídrico alrededor de floración se corresponden con mayores diferencias en los rendimientos entre tratamientos.

Es posible, por lo tanto, suponer que si la disminución de las precipitaciones alrededor de la floración hubieran sido mayores al 30 %, la brecha entre los valores del coeficiente WSPD para los tratamientos habría sido más amplia y las diferencias en el rendimiento habrían mostrado valores superiores, tornándose estadísticamente significativas, y avalando la extensa bibliografía (e.g Robelin, 1987; Shaw, 1988; Andrade *et al.*, 1999; Hall *et al.*, 1981; Otegui y Bonhomme, 1998; Otegui, 1995; Otegui y Andrade, 2000; Calviño *et al.* 2003), que corroboran que la disponibilidad hídrica en el período cercano a antesis es el más crítico para la determinación del rendimiento en maíz.

CONCLUSIONES

La producción agropecuaria depende del medio ambiente en donde se desarrolla. La variabilidad climática y la ocurrencia de fenómenos extremos que afectan a dicho ambiente son la causa principal de las fluctuaciones que año a año se producen en los rendimientos de los cultivos, ya que condicionan los procesos de crecimiento y desarrollo de los mismos. Por esta razón, es conveniente determinar aquellos componentes del clima que producen mayor impacto en la producción. A su vez, mediante la aplicación de estrategias adecuadas será posible disminuir sus impactos negativos sobre la producción de los cultivos y las comunidades que de ellos dependen.

Las simulaciones realizadas empleando los datos meteorológicos observados pertenecientes a la serie 1974 – 1998 para Río Cuarto, indicaron que una disminución del 30% en las precipitaciones durante el período crítico del maíz no provocaron variaciones considerables en los coeficientes de estrés hídrico para Río Cuarto, determinando la ausencia de reducciones estadísticamente significativas en el rendimiento en grano para el híbrido considerado entre los tratamientos con estrés (T1, T2, T3 y T5, T6 y T7) y para ambas condiciones iniciales de contenido hídrico en el suelo. Es admisible suponer que si estas disminuciones en las precipitaciones hubieran sido superiores, las diferencias en los rendimientos simulados habrían sido estadísticamente relevantes como lo sustenta la amplia bibliografía consultada. La elección de una correcta fecha de siembra evitaría la disminución de los rendimientos provocada por la ocurrencia de déficit hídrico durante el período crítico del cultivo.

Para finalizar, este trabajo permitió corroborar que el modelo CERES V3.5 ajustado y validado es una herramienta útil para simular el comportamiento del cultivo de maíz en condiciones reales, visualizándose la bondad del mismo para simular situaciones de cultivo históricas o a futuro, permitiendo ahorrar tiempo y recursos obteniendo excelentes resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- AGRICULTURA CERTIFICADA. 2011. Manual de Buenas Prácticas Agrícolas e Indicadores de Gestión. En: <http://www.ac.org.ar/descargas/manual.pdf>. Consultado: 27/09/11.
- ALZUGARAY, E. 2008. Respuesta del cultivo de maíz a diferentes modelos de riego complementario. Trabajo Final para optar al título de Ingeniero Agrónomo, Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto. Río Cuarto. Córdoba. Argentina. 23 pág
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., Y M, SMITH 1998 **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements**. FAO. Irrigation and drainage. Paper 56. Roma. 300pp.
- ANDRADE, F. H. 1992. Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos de maíz. Boletín técnico 106. Estación Experimental Agropecuaria Balcarce (INTA). Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
- ANDRADE, F. H.; A. CIRILO; S. UHART y M. E. OTEGUI. 1996. **Ecofisiología del Cultivo de Maíz** 1ra ed. La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires.
- ANDRADE, F. H.; C. VEGA; S. UHART; A. CIRILO; M. CANTARERO and O. VALENTINUZ. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39:453-459.
- ANDRADE, F. H.; L. ECHARTE; R. RIZZALLI; A. DELLA MAGGIORA and M. CASANOVAS. 2002. Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Sci.* 42:1173-1179.
- ANDRADE, F. H. y V. O. SADRAS. 2002. **Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja** 2da ed. Balcarce, Buenos Aires.
- BLACKLOW, W.M. 1972. Influence of temperature on germination and elongation of the radicle and shoot of corn (*Zea mays* L.). **Crop Science**, 12:647-650.
- BOOTE, K. J. 1999. Concepts for Calibrating Crop Growth Models. En G. Hoogenboom, P.W. Wilkens, and G.Y. Tsuji (eds.). 1999. DSSAT v3, volume 4. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii. Vol. 4.6, cap. 3: 185-192.
- CALVIÑO, P.A., F.H. ANDRADE and V. O. SADRAS. 2003. Maize yield as affected by water availability, soil depth, and crop management. *Agronomy Journal*, 95:275-281.
- CANTERO, G. A., E. BRICCHI, V.H. BECERRA, J.M. CISNEROS y H.A. GIL. 1986. Zonificación y descripción de las tierras del departamento Río Cuarto. UNRC-FAV. 80 págs. 1 carta 1:2.500.000.
- CÁRCOVA, J.; M. URIBELARREA; L. BORRÁS; M.E. OTEGUI and M.E. WESTGATE. 2000. Synchronous pollination within and between ears improves kernel set in maize. *Crop Sci.* 40:1056-1061.

- CIRILO, A. G. and F. H. ANDRADE. 1994. Sowing date and maize productivity: II. Kernel number determination. *Crop Science*, 34:1044-1046.
- CLAASEN, M.M. and R.H. SHAW. 1970. Water deficits effects on corn. II. Grain components. *Agronomy Journal*, 62: 652-655.
- DOORENBOS J. Y W.O. PRUITT. 1977. **Las necesidades de agua de los cultivos**. Serie Riego y Drenaje N° 24. Roma. 194 pp.
- FABRICIUS, R y V. ROTONDO. 1993. Características climáticas del área fruti-hortícola de Río Cuarto, en Diagnóstico y evolución del área frutihortícola de Río Cuarto. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto. Págs. 23-26.
- FISCHER, K.S. and F.E. PALMER. 1984. Tropical maize. En: P.R. Goldsworthy y N.M. Fischer (eds.). *The physiology of tropical field crops*. Wiley. Págs. 213-248.
- GOODMAN, M. M. 1988. The history and evolution of maize CRC. *Critical Review. Plant Science*, 7:197-220.
- GRENON, D. y PILATTI, M.A. 1994. Utilización de modelos de simulación de cultivos con fines agronómicos. 1. Aplicaciones en el proceso administrativo de la empresa agropecuaria. Apuntes del curso de posgrado Modelos de simulación de cultivos. Maestría en Ciencias Agropecuarias, FAV-UNRC.
- HALL, A. J., J. H. LEMCOFF and N. TRÁPANI. 1981. Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. *Maydica*, 26: 19-38.
- JONES, C.A. and J.R. KINIRY. 1986. CERES-Maize: A simulation model for maize growth and development. College Station, Texas A&M Press.
- KINIRY, J.R. 1991. Maize phasic development. In Hanks, J and J.T. Ritchie (eds) *Modeling plant and soil systems*. ASA Agronomy Monographs n°31, Madison, WI, USA.
- KINIRY, J. R. and R. BONHOMME. 1991. **Predicting maize phenology**. En: T. Hodges (ed.) *Predicting crop phenology*. CRC.Press. Boca Raton, Ann Arbor. Boston. Pags. 115-131.
- LAVARELLO, P. 2003. La trama del maíz en Argentina, Buenos Aires, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)/Banco Interamericano de Desarrollo (BID)/Ministerio de Economía.
- LORENZATTI, S. 2001. El Cultivo de maíz en siembra directa. **AAPRESID-publicaciones técnicas**. En: www.acampo.com . Consultado: 30/05/10.
- MEARNS, L.O., C. ROSENZWEIG, and R. GOLDBERG. 1992. The effect of changes in interannual climatic variability on CERES-Wheat yields: sensitivity and 2xCO₂ studies. *J. Agricul. Forest Meteorol.* 62: 159 -189.

- MEARNS, L.O., C. ROSENZWEIG, and R. GOLDBERG. 1996. The effect of changes in daily and inter- annual climatic variability on CERES-Wheat: a sensitivity study. *Clim. Change* 32: 257-292
- MEARNS, L.O., C. ROSENZWEIG, and R. GOLDBERG. 1997. Mean and variance change in climate scenarios: methods, agricultural applications, and measures of uncertainty. *Clim.Change* 35:367-396.
- MUCHOW, R. C., T. R. SINCLAIR and J. M. BENNETT. 1990. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. *Agronomy Journal*, 82: 338-343.
- MUÑOZ, Fernando (2007). “La guerra fría del etanol”. *Diario Página 12*, 12-04-2007.
- OGOSHI, R.M., B.G. CAGAUAN, and G.Y. TSUJI. 1999. Field and Laboratory Methods for the collection of the minimum data set. *En* G. Hoogenboom et al., (eds.) **DSSAT version 3**, Volume 4-8, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- OTEGUI, M.E. 1995. Prolificacy and grain yield components in modern argentinian maize hybrids. *Maydica* 40:371-376.
- OTEGUI, M.E. 1997. Kernel set and flower synchrony within the ear of maize. II- Plant population effects. *Crop Sci.* 37:448-455.
- OTEGUI, M.E. and R. BONHOMME. 1998. Grain yield components in maize. Ear growth and kernel set. *Field crops Res.* 56:247-256.
- OTEGUI, M.E. and F. H. ANDRADE. 2000. New relationships between light interception, ear growth and kernel set in maize (Chapter 6). *En*: M.E. Westgate, and K. Boote (eds), *Physiology and Modeling of Kernel Set in Maize*, *Crop Sci. Soc. of America y Amer. Soc. of Agronomy Special Publication N° 29*. Baltimore, Maryland, EEUU, 2000. pp 89-102.
- RITCHIE, J.T. 1991. Specification of the ideal model for predicting crop yields.p.97-122. *In* R.C. Muchow and J.A. Bellamy (eds.) *Climatic risk in crop production: Models and management for the semi-arid tropics and subtropics*. Proc. Intl. Symposium, St. Lucia, Brisbane, Queensland, Australia. July 2-6, 1990. C.A.B. International, Wallingford, U.K.
- RITCHIE, J.T. 1998. Soil water balance and plant water stress. p. 41-53. *In* G.Y. Tsuji et al., (eds.) *Understanding options for agricultural production, Systems approaches for sustainable agricultural development Volume 7*, Kluwer Academic Publishers, Great Britain.
- RITCHIE, J.T., U. SINGH, D.C. GODWIN, and W.T. BOWEN. 1998. Cereal growth, development and yield.p.79-98. *In* G.Y. Tsuji et al., (eds.) *Understanding options for agricultural production, Systems approaches for sustainable agricultural development Volume 7*, Kluwer Academic Publishers, Great Britain.

- RITCHIE, S.W., and J.J. HANWAY. 1997. How a corn plant develops. **Special Report N° 48**, Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, Ames, Iowa.
- ROBELIN, M. 1987. Desequilibrio hídrico, metabolismo, crecimiento y desarrollo. Le maïs et l'eau. En: AGPM-ITCF (eds.). Colloque, Alimentation Hydrique du Maïs, Tome 1. Agen, 8-9 Decembre, France.
- SAGPYA. 2006. Estimaciones agrícolas – Cereales – Maíz. En: <http://190.220.136.179/index.php/series-por-tema/agricultura>. Consultado: 02/08/2010.
- SAGPYA. 2010. Estimaciones agrícolas – Cereales – Maíz. En: www.sagpya.mecon.gov.ar/estimacionesagricolas.php. Consultado: 08/05/2010.
- SARLANGUE, H. 2002. La importancia del maíz en la rotación de los cultivos. Revista **Visión Rural**, año X, Nro. 46.
- SATORRE, E. H., R.L. BENECH ARNOLD, G.A. SLAFER, E.B. DE LA FUENTE, D.J. MIRALLES, M.E. OTEGUI y R. SAVIN. 2003. **Producción de granos: Bases funcionales para su manejo**. 1ra ed. FAUBA, Buenos Aires.
- SCHUSLER, J.R. and M.E. WESTGATE. 1991. Maize kernel set at low water potential: I. Sensitivity to reduced assimilates during early kernel growth. *Crop Science*, 31: 1189-1195.
- SHAW, R. H. 1988. Climate requirement. En: G.F. Sprague y J.W. Dudley (eds.). *Corn and Corn Improvement* (3° ed.). Series Agronomy N° 18, págs. 609-638. American Society of Agronomy Inc. Publishers. Madison. Wisconsin, USA.
- SINCLAIR, T.R., M. BENNETT and R.C. MUCHOW. 1990. Relative sensitivity of grain yield and biomass accumulation to drought in field-grown maize. *Crop Science*, 30:690-693.
- SOBRADO, M. A. 1990. Drought responses of tropical corn. 1. Leaf area and yield components in the field. *Maydica*, 35:221-226.
- URIBELARREA, M.; J. CÁRCOVA; M.E. OTEGUI and M.E. WESTGATE. 2002. Pollen production, pollination dynamics and kernel set in maize. *Crop Sci.* 42:1910-1919.
- USDA 2010. United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service (FAS). En:<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdreport.aspx?hidReportRetrievalName=BVS&hidReportRetrievalID=459&hidReportRetrievalTemplateID=7>. Consultado: 01/07/2010.
- UNITED NATIONS. 2006. <http://www.un.org/esa/population/publications/wpp2006/Spanish.pdf>
- VILLALOBOS, F. 1998. Crecimiento y desarrollo de los cultivos. Material inédito. **Fitotecnia General**. Universidad de Córdoba. Córdoba. España. 12 pp.
- VINOCUR, M.G., R.A. SEILER and L.O. MEARNES. 2000a. Forecasting the impact of climate variability on peanut crop production in Argentina. p.189-195. *In Proc.*

International Forum on climate prediction, agriculture and development. April 26-28, Palisades, NY. IRI Publication IRI-CW/00/1

VINOCUR, M.G., R. A. SEILER, and L.O. MEARNNS. 2000b. Predicting maize yield responses to climate variability in Córdoba, Argentina. **International Scientific Meeting on Detection and Modelling of Recent Climate Change and its Effects on a Regional Scale:** 137. Tarragona, España.

WESTGATE, M.E. and J.S. BOYER. 1986. Reproduction at low silk and pollen water potentials in maize. **Crop Science**, 26:951-956.

WILLMOTT, C.J. 1982. Some comments on evaluation of model performance. **Bull.Am.Meteorol.Soc.** 63:1309-1313.