

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO  
FACULTAD DE AGRONOMIA Y VETERINARIA**

Trabajo final para optar al grado de Ingeniero Agrónomo

**CALIBRACIÓN Y EVALUACIÓN DEL MODELO DE  
SIMULACIÓN SOIL WATER BALANCE PARA MAÍZ, EN RÍO  
CUARTO (CÓRDOBA).**

Alumno: Gabriel Martínez Bologna  
DNI: 34104599

Director: Dr. Gabriel Pablo Espósito

Co-Director: Ing. Agr. Guillermo Balboa

Río Cuarto - Córdoba  
Diciembre/2016

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN**

Titulo del Trabajo Final: CALIBRACIÓN Y EVALUACIÓN DEL  
MODELO DE SIMULACIÓN SOIL WATER BALANCE PARA MAÍZ,  
EN RÍO CUARTO (CÓRDOBA).

Autor: Martínez Bologna, Gabriel  
DNI: 34.104.599

Director: Espósito, Gabriel Pablo  
Co-Director: Balboa, Guillermo

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del Jurado Evaluador:

Giayeto, Oscar \_\_\_\_\_

Plevich, Omar \_\_\_\_\_

Espósito, Gabriel \_\_\_\_\_

Fecha de Presentación: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

-----  
Secretario Académico

## ÍNDICE

Índice general.....	III
Índice de tablas .....	IV
Índice de figuras.....	V
Resumen.....	VI
Summary .....	VII
I. Introducción.....	1
II. Objetivo .....	3
III. Materiales y métodos .....	3
IV. Resultados y discusión.....	17
IV. 1. Descripción climática de la campaña 2012/2013.....	17
IV. 2. Fenología y parámetros responsables del desarrollo .....	18
IV. 3. Radiación interceptada y parámetro eficiencia de conversión de la radiación solar en biomasa (e).....	20
IV. 4. Transpiración normalizada y parámetro coeficiente de transpiración-biomasa (k)...	22
IV. 5. Producción de biomasa y rendimiento en grano .....	23
IV. 6. Parámetro Coeficiente de extinción medio de la canopía para la radiación solar (K)24	
IV. 7. Parámetro Área foliar específica (SLA). .....	26
IV. 8. Parámetro Coeficiente de partición hoja – tallo (lsp) .....	27
IV. 9. Resumen de parámetros.....	29
IV. 10. Resultados de la simulación y evaluación del desempeño del modelo.....	29
V. Conclusiones .....	32
VI. Bibliografía.....	38
VII. Anexo .....	38
VII. 1. Análisis de la varianza.....	38

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Fecha de ocurrencia de los estadios fenológicos en estudio y tiempo desde la siembra hasta el comienzo de cada estadio.....	19
<b>Tabla 2.</b> Parámetros fenológicos del modelo determinados experimentalmente.....	20
<b>Tabla 3.</b> Radiación fotosintéticamente activa interceptada y parámetro eficiencia de conversión de la radiación solar en biomasa. ....	21
<b>Tabla 4.</b> Parámetro eficiencia de conversión de radiación solar en biomasa en la temperatura óptima de crecimiento.....	22
<b>Tabla 5.</b> Transpiración normalizada y parámetro coeficiente de transpiración - biomasa.....	22
<b>Tabla 6.</b> Biomasa acumulada en madurez fisiológica y rendimiento en grano.....	24
<b>Tabla 7.</b> Parámetro coeficiente de extinción para la radiación solar.....	25
<b>Tabla 8.</b> Parámetro área foliar específica.....	26
<b>Tabla 9.</b> Parámetro coeficiente de partición hoja – tallo.....	28
<b>Tabla 10.</b> Parámetros determinados experimentalmente y utilizados en la simulación.....	29
<b>Tabla 11.</b> Índices estadísticos de comparación entre valores observados y simulados para las variables de salida de interés.....	31

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Magnitud y distribución mensual de la radiación incidente (izquierda) y las precipitaciones ocurridas (derecha) desde Octubre de 2012 hasta Abril de 2013 y sus valores promedios de la serie 1974/2013 .....	17
<b>Figura 2.</b> Duración de cada etapa estudiada (días) y su momento de ocurrencia con respecto al momento de implantación de la fecha de siembra temprana .....	19
<b>Figura 3.</b> Producción de biomasa total en función de la radiación interceptada. Las curvas muestran el resultado de la regresión obtenida con la ecuación [11] y su pendiente el parámetro en estudio .....	21
<b>Figura 4.</b> Producción de biomasa total en función de la transpiración normalizada. Las curvas muestran el resultado de la regresión obtenida con la ecuación [18] y su pendiente el parámetro en estudio.....	23
<b>Figura 5.</b> Eficiencia de intercepción de la radiación como función del índice de área foliar. Las curvas muestran el resultado de la regresión obtenida con la ecuación [12] .....	25
<b>Figura 6.</b> Índice de área foliar en función de la biomasa foliar. Las curvas muestran el resultado de la regresión obtenida con la ecuación [13], siendo su pendiente el parámetro SLA.....	27
<b>Figura 7.</b> Partición a hojas del crecimiento diario (fleaf) como función de la biomasa del cultivo.....	28
<b>Figura 8.</b> Comparación entre valores observados y simulados para las variables de salida de interés en este estudio. ....	31

## RESUMEN

El maíz es uno de los cultivos con mayor respuesta en rendimiento a la aplicación de tecnología y manejo adecuado. Los modelos de simulación de cultivos son herramientas que permiten planificar adecuadamente el manejo agronómico y el nivel de tecnología a utilizar. Es por ello que el objetivo de este estudio fue calibrar y evaluar el desempeño del modelo de simulación Soil Water Balance en distintas fechas de siembra y utilizando híbridos de maíz de distinto ciclo ontogénico, en la localidad de Río Cuarto (Cba). Para ello, durante la campaña 2012/2013 se realizaron en el campo experimental de la Universidad Nacional de Río Cuarto, dos ensayos de maíz; uno perteneciente a una siembra temprana de fines de octubre y el otro a una siembra tardía de primeros días de diciembre. En ambos experimentos se utilizaron dos híbridos de distinto ciclo de crecimiento, Pioneer 2058 YR de ciclo intermedio largo y Dekalb 670 de ciclo intermedio corto. El diseño experimental utilizado fue en bloques completos aleatorizados, con cuatro repeticiones por tratamiento. Se calibraron a campo nueve parámetros de cultivo, los cuales influyen en el desarrollo, crecimiento y partición del crecimiento a distintos órganos de la planta. En distintos estadios de desarrollo del cultivo se cuantificó índice de área foliar, eficiencia de interceptación de la radiación solar, transpiración y biomasa total, mientras que pasada la madurez fisiológica se midió el rendimiento en grano. Luego se ingresaron los parámetros obtenidos al modelo y se realizaron cuatro simulaciones (una para cada tratamiento con sus parámetros correspondientes), en las cuales se registró como salida las variables mencionadas anteriormente, a los fines de evaluar el desempeño del modelo mediante diferentes índices estadísticos que se calculan a partir de la comparación entre valores simulados y observados. Los resultados indicaron que algunos parámetros de cultivo presentaron diferencias entre híbridos y/o fecha de siembra, mientras que otros permanecieron constantes frente a las variables mencionadas. Por otro lado, el modelo simuló de manera adecuada solo la transpiración, siendo incapaz de predecir adecuadamente el resto de las variables en estudio.

**Palabras claves: Maíz – Modelos de simulación – Fecha de siembra.**

## SUMMARY

*Zea mays* L. (maize) is one of the crops with better yield response to the application of appropriate technology. Crops simulation models are useful tools to plan the agronomical management and determinate the technology level to use. It is therefore that the aim of this work was to calibrate and evaluate the Soil Water Balance model performance at different sowing dates and using maize hybrids with varied ontogenetic cycle, in Rio Cuarto, Córdoba. For that, field experiments were conducted at University of Rio Cuarto during 2012/2013 agricultural harvest. It was realized two maize essays: an early sowing in October last days and a late sowing at December beginning. Two hybrids with different growing cycle were used in both essays; Pioneer 2058 YR, a full-season hybrid; and Dekalb 670, a short-season hybrid. The experimental design was to use random complete blocks with four replications. Nine crop parameters that have influence in development, growing and partition to different plant organs were calibrated. It was quantified at several phenophases of crop the leaf area index, interception of solar radiation efficiency, perspiration and total biomass. After physiological maturity it was measured the grain yield. Then the obtained parameters were used to realize four simulations (one for each replication with the correspondent parameters) using the Soil Water Balance model, in which was registered the mentioned outputs to evaluate the model performance by different statistical indices. These indices are calculated from the comparison between the simulated values and the measured values. The results showed that some crop parameters present differences between hybrids and sowing date, while others parameters remains constant against the mentioned factors. On the other hand, only perspiration was simulated correctly. The simulation model is unable to predict adequately the others factors on study.

**Key words: Maize – Simulation models – sowing date.**



## I. INTRODUCCION

La demanda de productos agrícolas continúa creciendo a causa del aumento de la población mundial, la mejora en la calidad de la dieta de muchos habitantes y los crecientes requerimientos de biocombustibles y biomateriales (Andrade, 2011). Para satisfacer esta demanda será necesario un aumento sostenido en la producción agrícola, la cual se puede dar por incrementos en la superficie cultivada, por una mayor cantidad de cultivos realizados por año o por aumentos en los rendimientos de los mismos (Evans, 1997). A pesar de ello, sólo los dos últimos parecen ser los caminos posibles para dicho incremento, ya que el área que resta incorporar bajo cultivo es escasa y poco productiva (Bruinsma, 2009).

El maíz (*Zea mays* L.) es el tercer cultivo en importancia en el mundo después del trigo y el arroz en cuanto al volumen de producción (Andrade *et al.*, 1996). En el territorio argentino es uno de los principales cereales cultivados (Umarán, 2005) y dentro de la provincia de Córdoba, en el sector centro - oeste se encuentra localizada la mayor superficie maicera (Videla Mensegue *et al.*, 2007).

Según el Sistema Integrado de Información Agronómica (SIIA, 2012), en la provincia de Córdoba, durante el período comprendido entre las campañas agrícolas 2000/2001 – 2014/2015, la superficie anual promedio cosechada con maíz fué de 1.027.342 has, con un rendimiento medio de 6.968 Kg ha<sup>-1</sup>.

Su rendimiento en grano es el resultado final de un juego de interacciones de procesos acoplados entre sí y modulados por factores genéticos, climáticos, edáficos y de manejo (Guevara, 2007). En este sentido la predicción del rendimiento es un proceso complicado que genera la necesidad de aplicar un enfoque sistémico al tema, analizando e integrando la mayor cantidad posible de variables, de manera tal de describir el sistema como una unidad que actúe en forma conjunta (Sau *et al.*, 2010).

En este sentido, un modelo de simulación agronómica es un conjunto de ecuaciones que describe matemáticamente la respuesta de un sistema de cultivo a su entorno (Campbell y Stockle, 1994).

El desarrollo de modelos para sistemas físicos, como por ejemplo en ingeniería espacial, favoreció la idea de que también podrían ser simulados los sistemas biofísicos. La modelización comenzó a tener importancia en agronomía y en otras áreas biológicas dada su capacidad de suministrar información en forma integral de todo el sistema biológico, o de una parte como es el sistema de producción agrícola (Guevara, 2007).

Los avances en el conocimiento de las interacciones dentro del ecosistema, expandió la potencialidad de esta herramienta como ayuda para la toma de decisiones. Los importantes avances en el campo de la informática que se dieron en la década del 90 posibilitaron el

desarrollo de modelos de simulación agronómica cada vez más complejos y precisos (Barrett y Nearing, 1998).

Algunos de los beneficios que ofrecen los modelos de simulación agronómica son:

- Brindar información adecuada para adelantarse en la toma de decisiones, como ser fecha de siembra, elección del genotipo, densidad y marco de plantación, dosificación y momentos de fertilización, estrategias de riego, etc. (Meira y Guevara, 2003).
- Evaluar tratamientos experimentales cuando por determinadas razones, como elevados costos o escaso espacio físico resulta imposible recurrir a los ensayos a campo.
- Son herramientas útiles al momento de comparar la respuesta de los cultivos a diversas variables edafoclimáticas de distintas localidades e, incluso, de diferentes unidades homogéneas de tierras dentro de una misma localidad.

Algunos de los modelos disponibles para el cultivo de maíz son:

Generic CERES V 3.5 (Ritchie et al., 1998), CORNF (Stapper y Arkin., 1980), Cropsyst (Stockle y Nelson., 1998) y Soil Water Balance (Marcos y Campbell., 2002). Este último (SWB) simula el flujo de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera y está acoplado con un simulador de crecimiento y desarrollo de cultivos. Trabaja en forma diaria y requiere datos y parámetros de entrada de clima, suelo y cultivos e información inicial de la condición hídrica del suelo. Una vez calibrado, puede ser usado para la evaluación de la dinámica de agua en el suelo y la producción de cultivos (Marcos y Campbell., 2002).

La calibración es el proceso mediante el cual se le asignan valores numéricos a los parámetros del modelo, con el objetivo de que los resultados sean una aproximación satisfactoria del sistema en estudio.

Espósito (2002), con el objetivo de evaluar la dinámica del agua para el cultivo de maíz en distintos sistemas de labranzas, ajustó algunos de los parámetros de cultivo del modelo SWB para la zona sur de Córdoba, los cuales fueron determinados por prueba y error hasta lograr una adecuada coincidencia entre valores observados y simulados.

Videla Mensegue *et al.* (2007), con el fin de cuantificar la asimilación potencial de biomasa en maíz para la localidad de Río Cuarto, utilizaron el modelo con algunos parámetros extraídos de la bibliografía y otros determinados experimentalmente con información recabada en el sur de la provincia de Córdoba.

A partir de los parámetros determinados por los autores nombrados en los dos párrafos anteriores, se evaluó la conveniencia de anticipar o atrasar la siembra de maíz en función de

la variabilidad del régimen hídrico interanual de la localidad de Río Cuarto <sup>1</sup>(G. Espósito, comunicación personal). Sin embargo, Espósito (2002) hace referencia en que sería necesaria una mayor experimentación en la calibración del modelo a nivel local.

No obstante, para mejorar el desempeño de los modelos de simulación, la calibración requiere de la determinación de los parámetros de manera experimental.

Por esta razón, Savini (2014) calibró ciertos parámetros de cultivo a partir de información recolectada de un ensayo experimental donde se utilizaron 5 materiales genéticos. Como síntesis de su trabajo, concluyó que algunos parámetros varían en función del híbrido y otros permanecen constante, lo que estaría indicando que los parámetros cuantificados sólo se deberían utilizar para la simulación de un material genético en particular. Otra conclusión a la que llegó este autor es que el modelo no fue capaz de simular adecuadamente el rendimiento de en grano ni la producción de biomasa.

Para futuras investigaciones en las cuales se requiera hacer uso del modelo SWB será necesario disponer de parámetros calibrados en forma experimental y en amplia variabilidad de condiciones, tanto genéticas como ambientales. De esta manera se define la finalidad del presente estudio.

## **II. OBJETIVO**

Calibrar el modelo de simulación SWB y evaluar su desempeño, en distintas fechas de siembra y utilizando híbridos de maíz de distinto ciclo ontogénico en la localidad de Río Cuarto (Córdoba).

## **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **III.1. Descripción climática del área en estudio**

De acuerdo con la magnitud y distribución de las temperaturas y precipitaciones, el departamento Río Cuarto se clasifica climáticamente como perteneciente a un ambiente templado subhúmedo con invierno seco. Ello se debe a que el régimen de precipitaciones presenta una distribución anual de tipo monzónico, con más del 80% de las lluvias concentradas en el semestre cálido, siendo la precipitación media anual de 801,2 mm con valores que suelen exceder la evapotranspiración en los meses de primavera y otoño y con déficit puntuales en verano e invierno. Por otro lado, el régimen térmico es mesotermal, siendo la temperatura media del mes más cálido (enero) de 23°C con una máxima absoluta de 39,5°C. La temperatura media del mes más frío (julio) es de 9,1°C con una mínima absoluta de -11,5°C. La amplitud térmica media anual es de 13,9°C. La fecha media de la primera helada

---

<sup>1</sup> Comunicación personal: Espósito G., Depto de producción vegetal, FAV-UNRC.

es el 25 de mayo y la de última es el 12 de septiembre, siendo el período libre de heladas 255 días en promedio (Seiler et al., 1995).

### **III.2. Descripción general del ensayo experimental**

Durante la campaña 2012/2013 se realizaron en el campo experimental de la Universidad Nacional de Río Cuarto, ubicado sobre la Ruta Nacional N° 36, Km 601, Córdoba, (33° 07' Latitud Sur, 64° 14' Longitud Oeste, 421 msnm), dos ensayos de maíz; uno perteneciente a una siembra temprana del 26/10/2012 (TE), y el otro a una siembra tardía del 12/12/2012 (TA). En ambos experimentos se utilizaron dos híbridos de distinto ciclo de crecimiento, Pioneer 2058 YR de ciclo intermedio-largo (CIL) y Dekalb 670 de ciclo intermedio-corto (CIC). Los tratamientos fueron CIL y CIC y se evaluaron en ambos ensayos. El diseño experimental utilizado fue en bloques completos aleatorizados, con cuatro repeticiones por tratamiento. Cada unidad experimental consistió en 9 surcos espaciados a 0,525 m con una longitud de 45 m. Durante la siembra se dosificaron 80.000 semillas ha<sup>-1</sup> mediante una sembradora neumática.

La selección de estos materiales genéticos y de las fechas de siembra responde a la necesidad de contar con diferentes condiciones genético-ambientales que expresen diferencias productivas y que permitan cuantificar los parámetros de cultivo requeridos por el modelo.

Para la correcta obtención de los parámetros del modelo, los ensayos fueron apartados de cualquier tipo de estrés biótico o abiótico. Para ello, mediante un equipo de riego por aspersión de avance frontal, se mantuvo el contenido hídrico del suelo por encima del 80% del valor de capacidad máxima de retención de agua. El manejo nutricional fue planteado en base a un rendimiento objetivo de 20.000 kg ha<sup>-1</sup>, según requerimientos de Nitrógeno, Fósforo, Azufre y Zinc de acuerdo con García (2005). El estrés biótico se manejó mediante control químico de malezas, plagas y enfermedades, utilizando sólo aquellos productos legalmente permitidos por la ley de agroquímicos de la provincia de Córdoba, y según ubicación geográfica del campus experimental de la universidad.

### **III.3. Descripción de los parámetros a calibrar**

El modelo posee parámetros de suelo y cultivo de los cuales sólo se calibraron a campo los siguientes parámetros de cultivo:

- **TT S-E** (°C día): Tiempo térmico requerido para la fenofase comprendida entre siembra y emergencia.
- **TT S-R<sub>1</sub>** (°C día): Tiempo térmico requerido para la fenofase comprendida entre siembra y floración femenina.

- **TT S-R<sub>3</sub>** (°C día): Tiempo térmico requerido para la fenofase comprendida entre siembra y comienzo de llenado del grano.
- **TT S-R<sub>6</sub>** (°C día): Tiempo térmico requerido para la fenofase comprendida entre siembra y madurez fisiológica.
- **e T<sub>OP</sub>** (g MJ<sup>-1</sup>): Eficiencia de conversión de radiación solar en biomasa a la temperatura óptima de crecimiento.
- **K**: Coeficiente de extinción medio de la radiación solar por el dosel del cultivo.
- **SLA** (m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>): Área específica de la hoja.
- **lsp** (m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>): Coeficiente de partición hoja-tallo.
- **k** (g kPa m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>): Coeficiente de transpiración-biomasa.

Los parámetros de suelo fueron tomados de Rivetti (2004), mientras que los parámetros de cultivos restantes fueron obtenidos de una extensa revisión bibliográfica realizada por los autores del modelo <sup>2</sup>(Javier Marcos, comunicación personal).

Por otro lado, para comprender el rol ecofisiológico de los parámetros seleccionados, TT S-E, TT E-R<sub>1</sub> y TT R<sub>1</sub>-R<sub>6</sub> se relacionan con el desarrollo del cultivo, mientras que los restantes parámetros cumplen funciones relacionadas con el crecimiento y partición del mismo.

De estos últimos, K, e T<sub>OP</sub> y k están involucrados en la determinación del crecimiento diario del cultivo (g m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>), regulándolo según el factor más limitante (ya sea por disponibilidad hídrica o de radiación). Posteriormente, mediante el parámetro lsp, dicha biomasa es particionada a crecimiento diario de hojas (g m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>) y, finalmente, esta biomasa es expresada en términos de superficie foliar a través del parámetro SLA, para luego repetir el ciclo al día siguiente.

Marcos (2000) y Marcos y Campbell (2002) realizan una explicación más detallada del funcionamiento del modelo y el rol de cada parámetro.

La estimación de estos parámetros demandó realizar las siguientes mediciones y determinaciones:

### **III.4. Mediciones y determinaciones durante el ciclo del cultivo**

**III.4.1. Fenología del cultivo:** Se identificó la fecha de ocurrencia de los estadios fenológicos E, V<sub>8</sub>, V<sub>13</sub>, R<sub>1</sub>, R<sub>3</sub> y R<sub>6</sub>, según Ritchie y Hanway (1997). Posteriormente, se calculó el tiempo térmico acumulado durante cada etapa comprendida entre los estadios nombrados mediante la ecuación [1]:

---

<sup>2</sup> Comunicación personal: Marcos, J., Autor del modelo Soil Water Balance.

$$TT = \int_f^i (Tm - Tb) dt \quad [1]$$

Dónde:

TT: tiempo térmico acumulado desde inicios hasta finales del periodo fenológico en cuestión (°C día).

i: Inicio del periodo fenológico en cuestión.

f: Fin del periodo fenológico en cuestión.

Tm: Temperatura media diaria (°C).

Tb: Temperatura base para el desarrollo (°C), que para los materiales genéticos usados en este estudio es de 8 °C.

t: Tiempo (día).

**III.4.2. Humedad edáfica:** Se determinó el contenido hídrico del suelo hasta 1 metro de profundidad en los estados fenológicos siembra, V<sub>8</sub>, V<sub>13</sub>, R<sub>3</sub> y R<sub>6</sub> (Ritchie y Hanway, 1997), y en los siguientes estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm. Con ello se calculó la *Humedad gravimétrica* (HG) en base seca, a partir de una muestra compuesta por tres submuestras por cada estrato y parcela (ecuación [2]).

$$HG = \frac{Ph - Ps}{Ps - t} \quad [2]$$

Dónde:

HG: Humedad gravimétrica (g g<sup>-1</sup>).

Ph: Peso de la muestra húmeda recién extraída incluyendo el peso del recipiente (g).

Ps: Peso de la muestra seca (en estufa con circulación de aire forzado a 105 °C) incluyendo el peso del recipiente (g).

t: Peso del recipiente (g).

Luego se determinó el *Peso específico aparente* (PEA) tomando cinco muestras en cada capa para todo el sitio experimental. Este método consistió en extraer una muestra del suelo con el extractor de *Soil Moisture Equipment Corp* y luego se determinó el peso seco en estufa con circulación de aire forzado a 105 °C hasta peso constante. Con el *peso seco* y el *volumen del cilindro* se calculó el peso específico aparente usando la ecuación [3]:

$$PEA = \frac{PS}{V} \quad [3]$$

Dónde:

PEA: Peso específico aparente ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

PS: Peso seco de la muestra extraída con el cilindro (kg).

V: Volumen del cilindro ( $\text{m}^3$ ).

Luego, se procedió a calcular la *Lámina de agua almacenada* (L) según ecuación [4] (Forsythe, 1980):

$$L = HG PEA E \quad [4]$$

Dónde:

L: Lámina de agua almacenada (mm).

HG: Humedad gravimétrica ( $\text{g g}^{-1}$ ).

PEA: Peso específico aparente ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

E: Espesor de la capa de suelo (m).

La lámina total de agua del perfil del suelo hasta 1 m de profundidad fue obtenida de la suma de láminas de cada capa del perfil.

**III.4.3. Eficiencia de intercepción de la radiación solar:** Esta variable se midió en diferentes estadios fenológicos ( $V_8$ ,  $V_{13}$ ,  $R_3$  y  $R_6$ ) con el sensor lineal LI. 191 SA Pauntun Lincoln. NE-USA. En cada tratamiento y sus repeticiones se realizaron cuatro mediciones, una a cielo abierto ( $I_0$ ) y las tres restantes debajo del dosel del cultivo en forma transversal a las líneas de siembra (I). La Eficiencia de intercepción de la radiación solar ( $ei$ ) fue calculada mediante la ecuación [5]:

$$ei = 1 - \frac{I}{I_0} \quad [5]$$

Dónde:

$ei$ : Eficiencia de intercepción de la radiación solar.

I: Flujo cuántico de radiación medida a nivel del suelo ( $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ ).

I0: Flujo cuántico de radiación medida a cielo abierto ( $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ ).

**III.4.4. Biomasa total y particionada a hojas:** Las mismas se evaluaron en los estadios fenológicos  $V_8$ ,  $V_{13}$ ,  $R_3$  y  $R_6$ , sobre un total de tres plantas por parcela que se encontraban en condiciones de competencia perfecta, las cuales fueron cortadas a nivel del suelo y llevadas a estufa a una temperatura de alrededor de  $80^\circ\text{C}$  hasta peso constante, luego se pesaron en balanza de precisión y sus pesos se expresaron en términos de peso seco por unidad de superficie de acuerdo a la ecuación de biomasa total o particionada a hojas [6]:

$$B = PS \frac{D}{PM} \quad [6]$$

Dónde:

B: Biomasa total o particionada a hojas ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

PS: Peso seco de la muestra (kg).

PM: Cantidad de plantas muestreadas (en este estudio 3 plantas).

D: Densidad final ( $\text{pl ha}^{-1}$ ).

**III.4.5. Índice de área foliar:** para su determinación se utilizaron todas aquellas hojas con tejido verde, de 3 plantas que se encontraban en competencia perfecta (las mismas que se emplearon para la medición de biomasa) en los estadios fenológicos  $V_8$ ,  $V_{13}$  y  $R_3$  y  $R_6$ , según Ritchie y Hanway (1997). Luego se tomó una fotografía digital en fresco sobre una superficie blanca. Esta imagen se utilizó para medir la superficie cubierta con tejido foliar verde, procesando la imagen con el software SisCob. El *Índice de área foliar* (IAF) fue expresado en términos de área foliar por unidad de área de suelo mediante la ecuación [7]:

$$IAF = A \frac{D}{PM} \quad [7]$$

Dónde:

IAF: Índice de área foliar ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ).

A: Área foliar total determinada por el software SisCob ( $\text{m}^2$ ).

PM: Cantidad de plantas muestreadas (en este estudio 3 plantas).

D: Densidad final ( $\text{pl m}^{-2}$ ).

**III.4.6. Rendimiento en grano:** Luego del estadio fenológico  $R_6$  y cuando la humedad del grano resultó adecuada se procedió a cosechar manualmente cada parcela. Para ello se marcó

una distancia de 3 m lineales sobre un surco donde las plantas se encontraban en competencia perfecta y se recolectaron manualmente sus correspondientes espigas. Este procedimiento se repitió hasta obtener 10 sub muestras por parcela. En cada sub muestra se registró el número de plantas con el fin de establecer la densidad a cosecha de acuerdo con ecuación [8]:

$$D = 6349.2 NP \quad [8]$$

Dónde:

D: Densidad a cosecha (pl ha<sup>-1</sup>).

NP: Número de plantas registradas (pl).

6349.2: Coeficiente de conversión a pl ha<sup>-1</sup> para la distancia entre hileras 0,525 m y la longitud utilizada de 3 m (ha<sup>-1</sup>).

Los granos fueron separados de las espigas mediante una desgranadora mecánica y luego se pesaron en balanza de precisión. Se cuantificó su humedad mediante un higrómetro y se corrigió el peso al 13,5% de humedad de comercialización. Por último, mediante la ecuación [9] se estableció el rendimiento en grano por unidad de superficie:

$$R = 6349.2 PGCH \quad [9]$$

Dónde:

R: Rendimiento en grano (kg ha<sup>-1</sup>).

PGCH: Peso de los granos corregido a 13,5% de humedad (kg)

6349.2: Coeficiente de conversión a kg ha<sup>-1</sup> para la distancia entre hileras 0,525 m y la longitud utilizada de 3 m (ha<sup>-1</sup>).

### **III.5. Determinación de los parámetros a calibrar.**

#### **III.5.1. Eficiencia de conversión de radiación solar en biomasa a temperatura óptima de crecimiento.**

En primer lugar se calculó la *Radiación solar fotosintéticamente activa interceptada acumulada* (RFAint) de acuerdo con la ecuación [10]:

$$RFAint = 0.48 Rinc ei + RFAint. ant \quad [10]$$

Dónde:

RFAint: Radiación solar fotosintéticamente activa interceptada acumulada al finalizar el periodo fenológico en cuestión (Mj m<sup>-2</sup>).

Rinc: Radiación solar incidente durante el período fenológico en cuestión (Mj m<sup>-2</sup>).

0,48: Proporción de la radiación solar incidente aprovechable por los tejidos fotosintéticos.  
e<sub>i</sub>: Eficiencia de intercepción de la radiación solar expresada como promedio de los valores al inicio y fin del período fenológico en cuestión.  
RFA<sub>int.ant</sub>: Radiación solar fotosintéticamente activa interceptada desde inicios de cultivo hasta el comienzo del período fenológico en cuestión (Mj m<sup>-2</sup>).

Con la *Biomasa total* (B) y la *Radiación solar fotosintéticamente activa interceptada acumulada* (RFA<sub>int</sub>) se procedió a calcular la *eficiencia de conversión de radiación solar en biomasa* (e) según la ecuación [11]:

$$BT = RFA_{int} e \quad [11]$$

Dónde:

e: Eficiencia de conversión de radiación solar en biomasa (g Mj<sup>-1</sup>).

BT: Biomasa total acumulada (g m<sup>-2</sup>).

RFA<sub>int</sub>: Radiación solar fotosintéticamente activa interceptada acumulada (Mj m<sup>-2</sup>).

El modelo toma como referencia la eficiencia de conversión de la radiación solar en biomasa a la temperatura óptima de crecimiento (30 °C en este estudio) y durante la simulación la corrige porcentualmente en función de la temperatura media diaria mediante la ecuación [12]<sup>3</sup>(Javier Marcos, comunicación personal):

$$e_{rel} = a T + b \quad [12]$$

Dónde:

e<sub>rel</sub>: Eficiencia de conversión relativa de la radiación solar en biomasa.

T: Temperatura media diaria (°C).

a y b: Parámetros de la ecuación.

En este estudio se utilizó una temperatura óptima para el crecimiento de 30 °C y una temperatura base para el crecimiento de 8 °C. Las temperaturas elegidas hacen que los parámetros a y b tomen valores de 0,4545 °C<sup>-1</sup> y -0,364 respectivamente.

---

<sup>3</sup> Comunicación personal: Marcos, J., Autor del modelo Soil Water Balance.

Debido al procedimiento de corrección que utiliza el modelo, se ingresó a la ecuación [12] la temperatura media desde emergencia a  $R_6$  y con ello se obtuvo el valor de  $e$  y  $rel$  (proporción de  $e$   $T_{OP}$ ).

Finalmente, el parámetro  $e$   $T_{OP}$  se calculó mediante la ecuación [13]:

$$e T_{OP} = \frac{e}{e rel} \quad [13]$$

Dónde:

$e$   $T_{OP}$ : Eficiencia de conversión de la radiación solar en biomasa a la temperatura óptima de crecimiento ( $g$   $Mj^{-1}$ ).

$e$ : Eficiencia de conversión de radiación solar en biomasa ( $g$   $Mj^{-1}$ ).

$rel$ : Eficiencia de conversión relativa de la radiación solar en biomasa.

**III.5.2. Coeficiente de extinción medio de la radiación solar por parte del dosel del cultivo**: Con la *Eficiencia de intercepción* ( $ei$ ) y el *Índice de área foliar* (IAF) se determinó el parámetro  $K$  de acuerdo con la ecuación [14] propuesta por Jones y Kiniry (1986).

$$ei = 1 - e^{-K IAF} \quad [14]$$

Dónde:

$K$ : Coeficiente de extinción medio de la radiación solar por el dosel del cultivo.

IAF: Índice de área foliar ( $m^2$   $m^{-2}$ ).

$ei$ : Eficiencia de intercepción de la radiación solar.

$e$ : Número de Euler o constante de Napier (su valor aproximado es 2,71828182).

**III.5.3. Área específica de la hoja**: A partir del *Índice de área foliar* (IAF) y la *Biomasa de hojas* ( $Bh$ ), se calculó el parámetro SLA de acuerdo con la ecuación [15]:

$$IAF = SLA Bh \quad [15]$$

Dónde:

SLA: Área específica de la hoja ( $m^2$   $kg^{-1}$ ).

IAF: Índice de área foliar ( $m^2$   $m^{-2}$ ).

$Bh$ : Biomasa de hojas ( $kg$   $m^{-2}$ ).

**III.5.4. Coeficiente de partición hoja-tallo:** en primer lugar se procedió a calcular la *fracción de biomasa particionada a hojas* (fleaf) según ecuación [16]:

$$fleaf = \frac{\Delta Bh}{\Delta BT} \quad [16]$$

Dónde:

fleaf: Fracción de biomasa particionada a hojas durante el período fenológico en cuestión.

$\Delta BT$ : Diferencia entre biomasa total medida al final e inicio del período fenológico en cuestión ( $\text{kg m}^{-2}$ ).

$\Delta Bh$ : Diferencia entre biomasa de hojas medida al final e inicio del período fenológico en cuestión ( $\text{kg m}^{-2}$ ).

Una vez obtenido fleaf se determinó el parámetro lsp de acuerdo con Marcos y Campbell (2002), ecuación [17]:

$$fleaf = \frac{1}{(1 + lsp BT)^2} \quad [17]$$

Dónde:

fleaf: Fracción de biomasa particionada a hojas durante el período en cuestión.

lsp: Coeficiente de partición hoja-tallo ( $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ ).

BT: Biomasa total ( $\text{kg m}^{-2}$ ).

**III.5.5. Coeficiente de transpiración-biomasa:** Para la determinación de este parámetro fue necesario calcular la *Evapotranspiración* (ET), para cada período, en base al método del balance hídrico planteado por Marcos (2000), según la ecuación [18]:

$$ET = PP + R - Esc - D \pm \Delta H \quad [18]$$

Dónde:

ET: Evapotranspiración durante el período fenológico en cuestión (mm).

PP: Precipitaciones ocurridas durante el período fenológico en cuestión (mm).

R: Lamina de riego aplicada durante el período fenológico en cuestión (mm).

Esc: Lamina de escorrentía durante el período fenológico en cuestión calculada a partir del método de la *Curva Número del U.S. Soil Conservation Service* (mm).

D: Drenaje o percolación profunda durante el período fenológico en cuestión (mm). De acuerdo con Espósito (2002) este componente se despreciará.

$\Delta H$ : Diferencia entre las láminas de agua almacenadas al final e inicio del período fenológico en cuestión (mm).

Una vez obtenida ET se fraccionó en *Transpiración* (T) y *Evaporación* (E) haciendo uso de la *Eficiencia de interceptación de la radiación solar* ( $e_i$ ) (Marcos y Campbell, 2002), según ecuación [19]:

$$T = ET e_i \quad [19]$$

Dónde:

T: Transpiración durante período fenológico en cuestión (mm).

ET: Evapotranspiración durante el período fenológico en cuestión (mm).

$e_i$ : Eficiencia de interceptación de la radiación solar promedio entre los valores calculados al inicio y fin del período fenológico en cuestión.

Ello responde al hecho de que la fuerza motriz que posibilita el proceso de transpiración es la radiación interceptada por las hojas.

Posteriormente se normalizó la *Transpiración* mediante el *Déficit de presión de vapor* (DPV), y de acuerdo con ecuación [20]:

$$T_n = \frac{T}{DPV} \quad [20]$$

Dónde:

$T_n$ : Transpiración normalizada durante el período fenológico en cuestión ( $\text{mm kPa}^{-1}$ ).

T: Transpiración durante el período fenológico en cuestión (mm).

DPV: Déficit de presión de vapor (kPa).

Una vez calculada la *Transpiración normalizada*, se sumaron sus valores parciales para obtener la *Transpiración normalizada acumulada* al final de cada etapa fenológica.

Finalmente con los valores de *Biomasa total* (B) y *Transpiración normalizada acumulada* (T), se calculó el parámetro *Coficiente de transpiración-biomasa* (k) de acuerdo a lo planteado por Tanner y Sinclair (1983), según ecuación [21]:

$$BT = k Tn \quad [21]$$

Dónde:

BT: Biomasa total acumulada ( $\text{g m}^{-2}$ ).

k: Coeficiente de transpiración-biomasa ( $\text{g kPa m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ ).

T: Transpiración normalizada acumulada ( $\text{mm kPa}^{-1}$ ).

Sabiendo que el modelo SWB trabaja con parámetros constantes a lo largo de la ontogenia del cultivo, y en este trabajo las mediciones se realizaron en distintos momentos del ciclo, es esperable que se cometan errores al promediar las determinaciones de cada etapa, ya que los intervalos de tiempo entre mediciones no son los mismos. Por tal motivo en las ecuaciones [11], [14], [15], [17] y [21] se realizó una interpolación optimizada mediante la función SOLVER de Microsoft Excel. Este método permite descifrar el verdadero valor del parámetro en estudio.

Una vez calibrado el modelo, se realizó una simulación para cada tratamiento, con los parámetros de cada híbrido y para cada fecha de siembra, empleando para ello el archivo climático correspondiente a la campaña 2012/2013.

Por último se registraron las siguientes salidas de la simulación: índice de área foliar, eficiencia de intercepción de la radiación solar, transpiración, producción de biomasa y rendimiento en grano, con el propósito de compararlas con los valores observados a campo y de esta manera evaluar el desempeño del modelo.

### **III.6. Análisis de los datos**

En cada experimento, las variables radiación interceptada total, transpiración total, producción total de biomasa y rendimiento en grano, al igual que los parámetros obtenidos, fueron analizadas y comparadas entre híbridos mediante ANAVA y test de comparación de medias DGC con el paquete estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2011). Es oportuno aclarar que este análisis no fue de primordial importancia en este estudio, sino que su propósito fue corroborar la variabilidad genética que se buscó con la elección de distintos materiales genéticos.

La validación del modelo se realizó mediante la comparación de valores observados y simulados por el modelo (calibrado previamente con los parámetros determinados experimentalmente en este estudio) para las variables: índice de área foliar, eficiencia de intercepción de la radiación solar, transpiración, producción de biomasa y rendimiento en

grano, usando para ello la eficiencia del modelo (E, ecuación [25]), el índice de coincidencia (D, ecuación [22]), la raíz cuadrada media del error (RSME, ecuación [23]) y su relación porcentual con el promedio observado (%RSME, ecuación [24]). Estos indicadores permiten establecer en qué medida los valores observados se aproximan a los simulados (Willmott, 1982).

La elección de estas variables de salida responde a la necesidad de identificar cuál a cuáles son los procesos ecofisiológicos para los cuales el modelo presenta debilidad en la simulación. Por ejemplo, en el caso de un bajo desempeño del modelo en la predicción del rendimiento, se podría determinar si este es el resultado de un error en la simulación de la producción de biomasa o en su partición al grano. En caso que el bajo desempeño se debiera a errores en la simulación de biomasa, se podría identificar si fue debido a una inadecuada simulación de la eficiencia de interceptación o de la transpiración.

Por otro lado, se eligieron estos estadísticos de desempeño, debido a que Fox (1981) sugiere que la correlación entre el modelo de simulación y los datos observados, comúnmente descrito por el coeficiente de correlación de Pearson producto-momento ( $r$ ) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), son a menudo una medida insuficiente y engañosa de precisión. Willmott y Wicks (1980) observaron que los valores "altos" o estadísticamente significativos de  $r$  y  $R^2$  no siempre son una medida certera, ya que a menudo no se relacionan con el tamaño de las diferencias entre lo observado (O) y lo simulado (P). Fox (1981) sugiere que la RMSE se encuentra entre las mejores medidas generales del funcionamiento del modelo, ya que indica la diferencia promedio en las unidades observadas y simuladas.

$$D = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right] \quad [22]$$

Dónde:

D: Índice de coincidencia.

n: Número de casos.

P<sub>i</sub>: Datos simulados.

O<sub>i</sub>: Datos observados.

P'<sub>i</sub>: Siendo P<sub>i</sub> -  $\bar{O}$ .

O'<sub>i</sub>: Siendo O<sub>i</sub> -  $\bar{O}$ .

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad [23]$$

Dónde:

RMSE: Raíz cuadrada media del error.

n: Número de casos.

Pi: Datos simulados.

Oi: Datos observados.

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{P} 100 \quad [24]$$

Dónde:

%RMSE: Porcentaje raíz cuadrada media del error.

RMSE: Raíz cuadrada media del error.

P: Promedio de los valores simulados.

$$E = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2} \right] \quad [25]$$

Dónde:

E: Eficiencia del modelo.

n: Número de casos.

Pi: Datos simulados.

Oi: Datos observados.

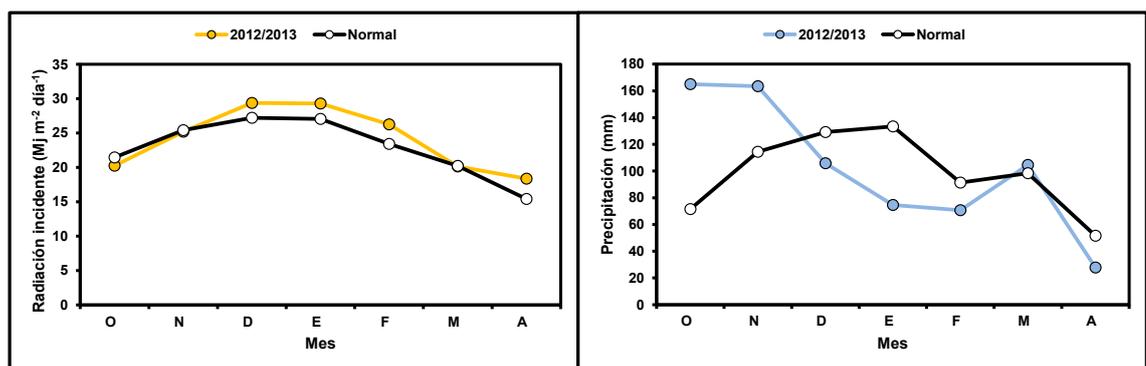
$\bar{O}$ i: Promedio de datos observados.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSION

### IV. 1. Descripción climática de la campaña 2012/2013.

En la figura 1 se observan los valores medios mensuales de radiación solar incidente y precipitaciones ocurridas durante la campaña 2012/2013 y los valores promedios de la serie 1974/2013. Esta información corresponde al período Octubre – Abril, ya que este lapso de tiempo fue el correspondiente a la estación de crecimiento de ambas fechas de siembra.

Se puede apreciar que la radiación incidente acumulada desde Octubre de 2012 hasta Marzo de 2013 ( $5067 \text{ Mj m}^{-2}$ ) fue muy similar a los valores normales ( $4806 \text{ Mj m}^{-2}$ ), al igual que su distribución. Algo semejante ocurrió con las precipitaciones, ya que durante la estación de crecimiento del cultivo se registró un valor acumulado del 3,2 % superior al normal. No obstante, su distribución no coincidió con la distribución promedio, siendo la primavera más húmeda y el verano más seco con respecto a las precipitaciones normales, mientras que el otoño fue bastante similar al año promedio (figura 1).



**Figura 1.** Magnitud y distribución mensual de la radiación incidente (izquierda) y las precipitaciones ocurridas (derecha) desde Octubre de 2012 hasta Abril de 2013 y sus valores promedios de la serie 1974/2013.

En cuanto al efecto del clima sobre el rendimiento del maíz, es necesario analizar los valores de las variables mencionadas desde 15 días previos a 15 días posteriores a la floración femenina, momentos coincidentes con  $V_{12-13}$  y  $R_3$ . El motivo de este análisis es la elevada sensibilidad del rendimiento del maíz a las condiciones ambientales durante este lapso de tiempo, denominado como periodo crítico para la determinación del rendimiento (Fischer y Palmer, 1984; Andrade, 1995).

En términos generales, los maíces sembrados en fechas tempranas (con 75 a 85 días desde siembra a  $R_1$ ) ubican su periodo crítico durante el mes de diciembre y primeros días de enero, mientras que los maíces tardíos (con 65 a 75 días desde siembra a  $R_1$ ) florecen en el mes de febrero.

En la región sur oeste de Córdoba las diferencias de rendimiento entre ambas fechas de siembra en secano, son fuertemente explicadas por las variaciones intraanuales de las precipitaciones durante el periodo crítico <sup>4</sup>(G. Espósito, comunicación personal). Mientras que esta diferencia en maíces bajo riego, es explicada principalmente por los niveles de radiación incidente durante dicho lapso de tiempo (Esposito *et al.* 2015).

Por estos motivos y justificándose en la distribución de las precipitaciones de la figura 1, es de esperar que en condiciones de secano los rendimientos promedios de la región sean inferiores a los valores promedios para la siembra temprana, mientras que para la siembra tardía sean similares o algo inferiores a lo normal.

Por otro lado, en maíces bajo riego, como los de este estudio, los valores de radiación incidente durante la floración indicarían que el rendimiento para cada fecha de siembra sea muy similar a los rendimientos normales bajo estas condiciones hídricas. No obstante es de esperar que la siembra temprana logre una producción algo superior a la siembra tardía, debido a los mayores niveles de radiación en el periodo crítico.

El análisis realizado en los cinco párrafos anteriores pretende explicar de manera generalizada los niveles de rendimiento obtenidos en este estudio. Por otra parte, estos valores de rendimiento se detallan en el inciso VI.5.

#### **IV. 2. Fenología y parámetros responsables del desarrollo.**

En la tabla 1 se detalla la fecha de ocurrencia de los estadios fenológicos de importancia registrados en este estudio, y el tiempo acumulado desde la siembra hasta el comienzo de cada etapa; por su parte, en la figura 2 se puede observar el tiempo entre estadios.

En la siembra temprana, ambos cultivares (CIC y CIL) cumplieron la etapa S-R<sub>6</sub> en 137 días, mientras que este valor en la siembra tardía fue de 138 días. Es de esperar, como han demostrado numerosos autores (Cirilo, 1994), que los mayores niveles de temperatura media que se experimentan en siembras tardías, aceleren el desarrollo y por lo tanto acorten la duración del ciclo. Estos resultados no coinciden con lo planteado anteriormente, posiblemente debido a que una fecha de siembra temprana en el sur de Córdoba, es aquella que se realiza hacia fines de septiembre, y en este estudio, por cuestiones operativas, se sembró hacia fines de Octubre. Ello se tradujo en una diferencia de temperatura media durante todo el ciclo de tan sólo 1,07 °C entre ambas fechas de siembra, lo que estaría explicando que los dos experimentos cumplieron su ciclo en aproximadamente el mismo tiempo.

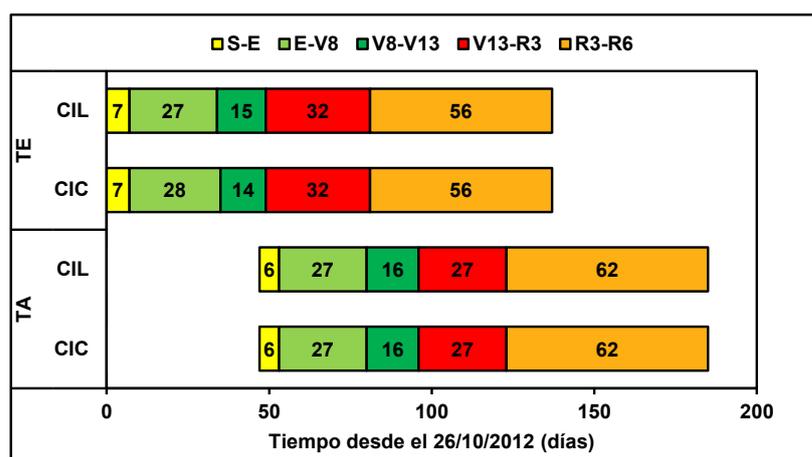
---

<sup>4</sup> Comunicación personal: Esposito G., Depto de producción vegetal, FAV-UNRC.

**Tabla 1.** Fecha de ocurrencia de los estadios fenológicos evaluados y tiempo desde la siembra hasta el comienzo de cada estadio.

Estadio fenológico	Fecha de ocurrencia				Tiempo desde siembra (días)			
	TE		TA		TE		TA	
	CIC	CIL	CIC	CIL	CIC	CIL	CIC	CIL
Siembra	26/10/2012	26/10/2012	12/12/2012	12/12/2012	0	0	0	0
Emergencia	02/11/2012	02/11/2012	18/12/2012	18/12/2012	7	7	6	6
V <sub>8</sub>	30/11/2012	29/11/2012	14/01/2013	14/01/2013	35	34	33	33
V <sub>13</sub>	14/12/2012	14/12/2012	30/01/2013	30/01/2013	49	49	49	49
R <sub>1</sub>	28/12/2012	31/12/2012	8/02/2013	10/02/2013	63	66	58	60
R <sub>3</sub>	15/01/2013	15/01/2013	26/02/2013	26/02/2013	81	81	76	76
R <sub>6</sub>	12/03/2013	12/03/2013	29/04/2013	29/04/2013	137	137	138	138

TE: Fecha de siembra temprana, TA: Fecha de siembra tardía, CIC: Ciclo intermedio corto, CIL: Ciclo intermedio largo.



**Figura 2.** Duración de cada etapa (días) y momento de su respectiva ocurrencia respecto a la fecha de siembra temprana (26/10/2012). TE: Fecha de siembra temprana, TA: Fecha de siembra tardía, CIC: Ciclo intermedio corto, CIL: Ciclo intermedio largo.

En la tabla 2 se presentan los parámetros responsables del desarrollo del cultivo determinados experimentalmente.

**Tabla 2.** Parámetros fenológicos del modelo determinados experimentalmente.

Parámetro	TE		TA	
	CIC	CIL	CIC	CIL
TT S-E (°C día)	85,3	85,3	84,9	84,9
TT S-R <sub>1</sub> (°C día)	839	882	872	903
TT S-R <sub>3</sub> (°C día)	1114	1114	1095	1095
TT S-R <sub>6</sub> (°C día)	1885	1885	1732	1732

TE: Fecha de siembra temprana, TA: Fecha de siembra tardía, CIC: Ciclo intermedio corto, CIL: Ciclo intermedio largo.

### **IV. 3. Radiación interceptada y parámetro eficiencia de conversión de la radiación solar en biomasa (e)**

En la tabla 3 se observa la comparación entre híbridos para radiación interceptada acumulada en madurez fisiológica y eficiencia de conversión de la radiación solar en biomasa, de manera separada para cada fecha de siembra. Estos valores de eficiencia de conversión son similares a aquellos encontrados por Andrade *et al.* (1996) que van desde 2,27 a 3,17 g MJ<sup>-1</sup>, mientras que son bastante inferiores a los medidos por Savini (2014), quien menciona valores desde 5,25 a 5,48 g MJ<sup>-1</sup> para la etapa V<sub>T</sub> – R<sub>6</sub> (Ritchie y Hanway, 1997). No obstante, observando los datos de este último autor, se puede ver claramente cómo la pendiente de la relación entre la radiación fotosintéticamente activa interceptada y la biomasa total, es inferior para la etapa entre emergencia y V<sub>T</sub>, la cual no fue incluida en los cálculos. En este sentido, si este autor hubiera tenido en cuenta todo el ciclo del cultivo, es probable que hubiera obtenido valores medios de eficiencia de conversión similares a los encontrados en este estudio.

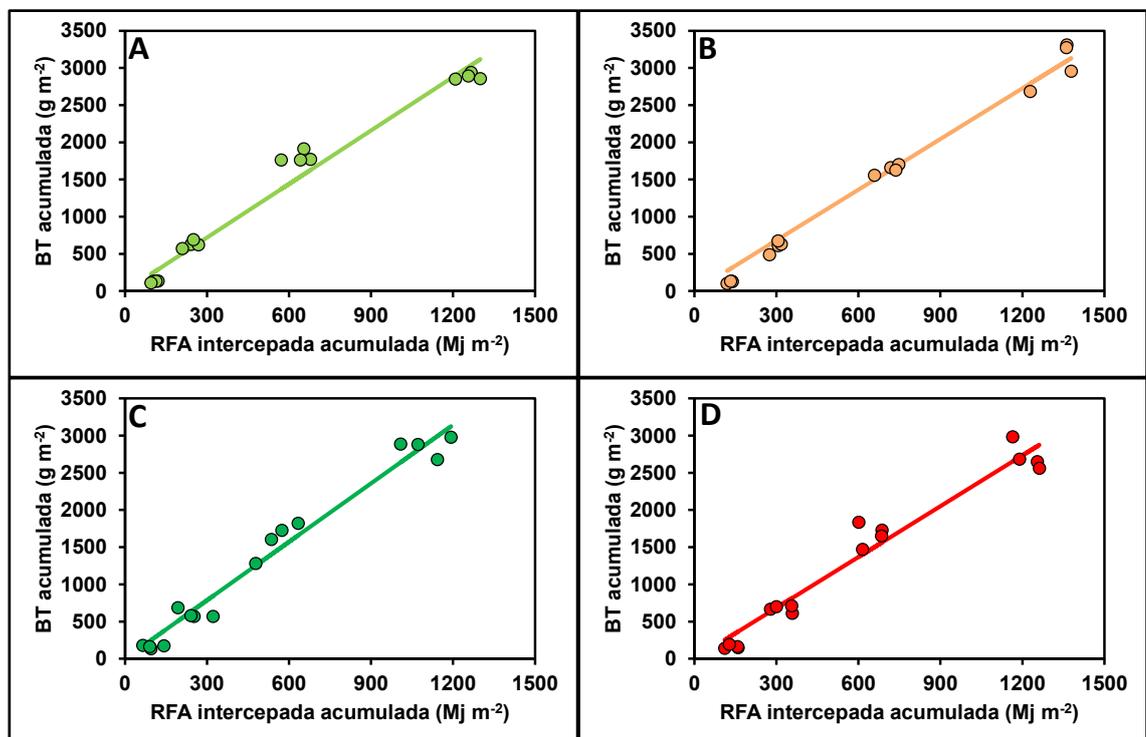
Por otro lado la comparación entre híbridos permite observar una diferencia en la eficiencia de conversión para la siembra temprana (p<0,05), lo que estaría justificando que este parámetro del modelo debe ser determinado para cada híbrido por separado, algo no coincidente con Savini (2014).

**Tabla 3.** Radiación fotosintéticamente activa interceptada y parámetro eficiencia de conversión de la radiación solar en biomasa.

			RFA int acumulada (Mj m <sup>-2</sup> )	e (g MJ <sup>-1</sup> )
TE	Ciclo	CIC	1258 A	2,40 A
		CIL	1333 A	2,27 B
	<i>Valor p</i>		0,138	0,013
	<i>CV</i>		4,08	1,53
TA	Ciclo	CIC	1104 A	2,64 A
		CIL	1218 A	2,30 A
	<i>Valor p</i>		0,109	0,17
	<i>CV</i>		6,14	11,11

TE: Fecha de siembra temprana, TA: Fecha de siembra tardía, CIC: Ciclo intermedio corto, CIL: Ciclo intermedio largo, Valor p: Valor de probabilidad de la prueba de Fischer, CV: Coeficiente de variación, letras distintas dentro de una misma columna y fecha de siembra indican diferencias significativas al 5% entre ciclos de madurez.

En la figura 3 se muestra la producción de biomasa total en función de la radiación interceptada, siendo la pendiente de esa relación la eficiencia de conversión de la radiación solar en biomasa.



**Figura 3.** Producción de biomasa total en función de la radiación interceptada. Las líneas muestran el resultado de la regresión obtenida con la ecuación [11] y su pendiente el parámetro en estudio. A: Ciclo intermedio corto en fecha de siembra temprana. B: Ciclo intermedio largo en fecha de siembra temprana. C: Ciclo intermedio corto en fecha de siembra tardía y D: Ciclo intermedio largo en fecha de siembra tardía. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0,975 en A, 0,986 en B, 0,972 en C y 0,975 en D.

En la Tabla 4 se muestra el parámetro  $e$  con su correspondiente corrección por temperatura (eficiencia de conversión de radiación solar en biomasa a la temperatura óptima de crecimiento) el cual resultado bastante superior al medido a campo, debido a las diferencias de temperaturas medidas a campo con la temperatura óptima de crecimiento.

**Tabla 4.** Parámetro eficiencia de conversión de radiación solar en biomasa en la temperatura óptima de crecimiento.

FS	Ciclo	Temperatura media (°C)	$e$ rel	$e$ (g MJ <sup>-1</sup> )	$e$ Top (g MJ <sup>-1</sup> )
TE	CIC	21,83	0,628	2,40	3,82
	CIL	21,83	0,628	2,27	3,61
TA	CIC	20,48	0,567	2,62	4,62
	CIL	20,48	0,567	2,28	4,02

TE: Fecha de siembra temprana, TA: Fecha de siembra tardía, CIC: Ciclo intermedio corto, CIL: Ciclo intermedio largo.

#### **IV. 4. Transpiración normalizada y parámetro coeficiente de transpiración-biomasa (k)**

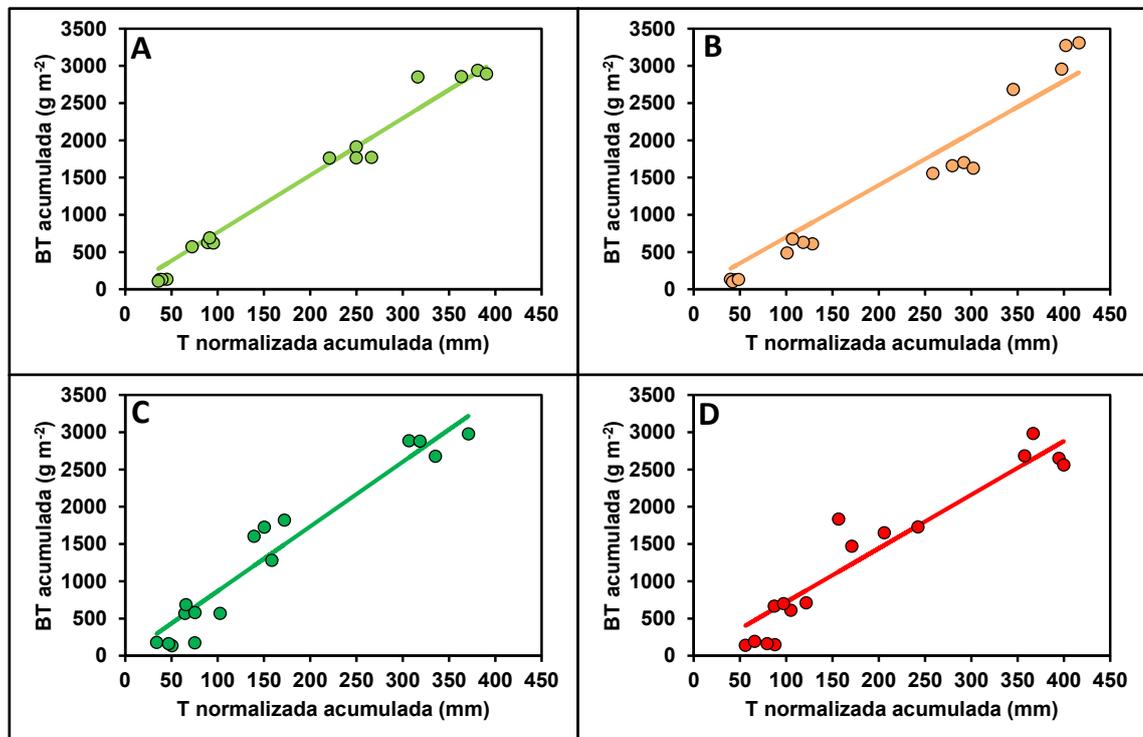
Como se observa en la tabla 5, la transpiración normalizada acumulada en madurez fisiológica no fue modificada por el ciclo del híbrido, posiblemente porque el ciclo de ambos materiales genéticos no varió y por ende tampoco el tiempo durante el cual se produjo el fenómeno de transpiración. Por otro lado, el coeficiente de transpiración – biomasa o también llamado eficiencia de uso del agua, tampoco fue afectado por el genotipo, resultado que coincide con Savini (2014). No obstante, este autor reporta valores de  $k$  de entre 15 y 16 g kPa m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>, mientras que en este estudio los datos estuvieron centrados entre 7 y 9 g kPa m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup> aproximadamente. La explicación de estas diferencias es similar a lo ocurrido con el parámetro  $e$ , ya que para  $k$  las mediciones de biomasa comenzaron a partir de  $V_{13}$ .

**Tabla 5.** Transpiración normalizada y parámetro coeficiente de transpiración - biomasa.

		T normalizada total (mm kPa <sup>-1</sup> )		$k$ (g kPa m <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )	
TE	Ciclo	CIC	362 A	7,73 A	
		CIL	390 A	6,99 A	
	<i>Valor p</i>	0,38	0,07		
	<i>CV</i>	10,17	5,2		
TA	Ciclo	CIC	333 A	8,75 A	
		CIL	380 A	7,31 A	
	<i>Valor p</i>	0,057	0,078		
	<i>CV</i>	6,2	9,67		

TE: Fecha de siembra temprana, TA: Fecha de siembra tardía, CIC: Ciclo intermedio corto, CIL: Ciclo intermedio largo, Valor p: Valor de probabilidad de la prueba de Fischer, CV: Coeficiente de variación, letras distintas dentro de una misma columna y fecha de siembra indican diferencias significativas al 5% entre ciclos de madurez.

En la figura 4 se muestra la producción de biomasa total en función de la Transpiración normalizada, siendo la pendiente de dicho ajuste el coeficiente de transpiración - biomasa.



**Figura 4.** Producción de biomasa total en función de la transpiración normalizada. Las curvas muestran el resultado de la regresión obtenida con la ecuación [18] y su pendiente el parámetro en estudio. A: Ciclo intermedio corto en fecha de siembra temprana. B: Ciclo intermedio largo en fecha de siembra temprana. C: Ciclo intermedio corto en fecha de siembra tardía y D: Ciclo intermedio largo en fecha de siembra tardía. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0,976 en A, 0,937 en B, 0,934 en C y 0,907 en D.

#### **IV. 5. Producción de biomasa y rendimiento en grano**

En ambas fechas de siembra, tanto la biomasa acumulada en madurez fisiológica como el rendimiento en grano, no presentaron diferencias significativas entre híbridos (tabla 6). Por otra parte, los niveles de rendimiento logrados fueron inferiores a los alcanzados bajo condiciones potenciales, ya que Espósito *et al.* (2014) reportaron rendimientos cercanos a los 20000 kg ha<sup>-1</sup> para la siembra temprana, mientras que en la siembra tardía estos valores descendían a 17000 kg ha<sup>-1</sup> aproximadamente. La causa de esta brecha de rendimiento posiblemente se deba a las limitantes impuestas por la densidad de siembra utilizada en este estudio, ya que a cosecha se registraron 80000 pl ha<sup>-1</sup> con un rendimiento individual de 194 g pl<sup>-1</sup> y una prolificidad de 1 espiga pl<sup>-1</sup>. El autor de este trabajo, encuentra en varios estudios de densidad de siembra propios (datos no publicados) que cuando las espigas de maíz poseen

pesos elevados (superiores a 120-130 g) la densidad de plantas es bastante inferior a la densidad que maximiza el rendimiento. Por otro lado los valores de rendimiento alcanzados por Espósito *et al.* (2014) se lograron con densidades de aproximadamente 120000 pl ha<sup>-1</sup>.

**Tabla 6.** Biomasa acumulada en madurez fisiológica y rendimiento en grano.

			BT R <sub>6</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )
TE	Ciclo	CIC	28850 A	16458 A
		CIL	30550 A	15589 A
	<i>Valor p</i>		0,325	0,27
	<i>CV</i>		6,910	5,78
TA	Ciclo	CIC	28550 A	15183 A
		CIL	27200 A	14802 A
	<i>Valor p</i>		0,43	0,06
	<i>CV</i>		7,61	1,25

TE: Fecha de siembra temprana, TA: Fecha de siembra tardía, CIC: Ciclo intermedio corto, CIL: Ciclo intermedio largo, Valor p: Valor de probabilidad de la prueba de Fischer, CV: Coeficiente de variación, letras distintas dentro de una misma columna y fecha de siembra indican diferencias significativas al 5% entre ciclos de madurez.

## **VI. 6. Parámetro Coeficiente de extinción medio de la canopia para la radiación solar (K)**

En la siembra temprana el coeficiente de extinción difirió entre híbridos ( $p < 0.05$ ), siendo superior para el material de ciclo más largo (Tabla 7). Estas diferencias poseen cierta lógica, ya que el parámetro K depende principalmente del ángulo de inserción de las hojas con respecto a la vertical (Andrade *et al.*, 2000) y a campo se pudo observar que el material genético de ciclo intermedio largo posee una canopia de tipo más planófila con respecto al ciclo intermedio corto.

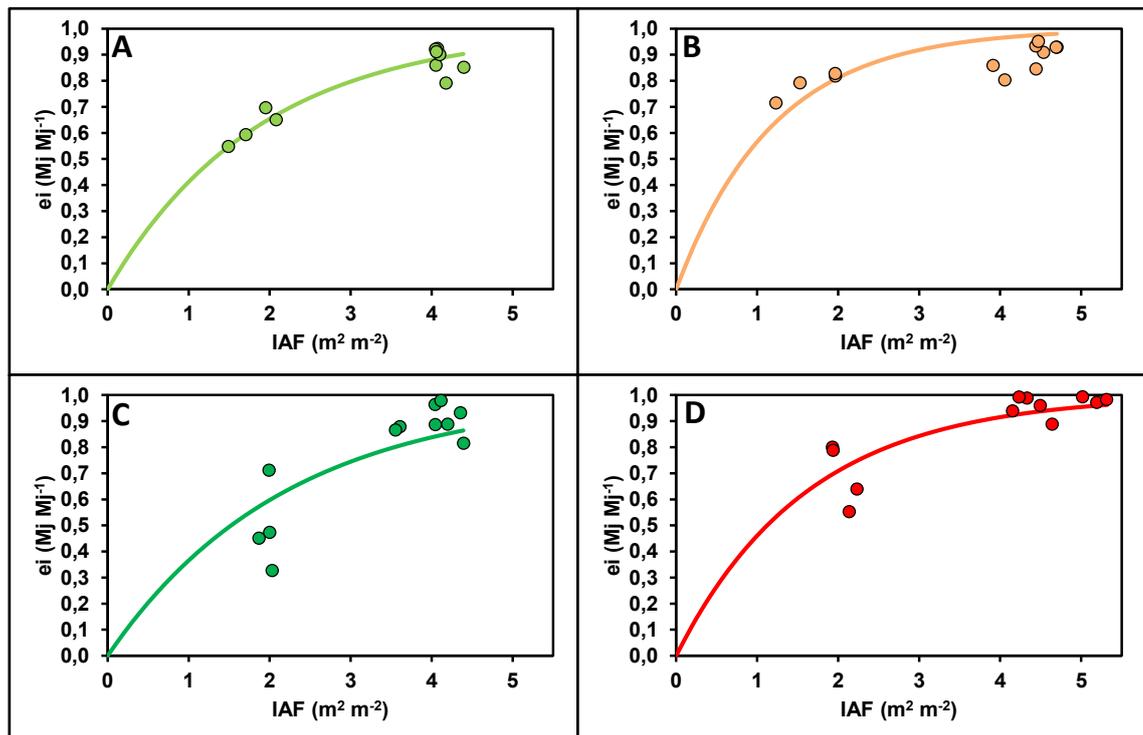
Por otra parte en la siembra tardía no se detectaron diferencias significativas sobre el parámetro en estudio. En cuanto a las magnitudes obtenidas en el ciclo intermedio corto, son similares a los valores encontrados por Andrade *et al.* (2000), mientras que en el ciclo intermedio largo, el coeficiente de extinción coincidió más con lo cuantificado por Madonni *et al.* (2001) y Penning de Vries *et al.* (1989).

**Tabla 7.** Parámetro coeficiente de extinción para la radiación solar.

			K
TE	Ciclo	CIC	0,51 A
		CIL	0,83 B
	Valor p	0,02	
	CV	15,19	
TA	Ciclo	CIC	0,47 A
		CIL	0,66 A
	Valor p	0,15	
	CV	24,21	

TE: Fecha de siembra temprana, TA: Fecha de siembra tardía, CIC: Ciclo intermedio corto, CIL: Ciclo intermedio largo, Valor p: Valor de probabilidad de la prueba de Fischer, CV: Coeficiente de variación, letras distintas dentro de una misma columna y fecha de siembra indican diferencias significativas al 5% entre ciclos de madurez.

En la figura 5 se observa la relación entre el índice de área foliar y la eficiencia de intercepción de la radiación solar. Del ajuste entre estas variables se obtuvo el parámetro K.



**Figura 5.** Eficiencia de intercepción de la radiación como función del índice de área foliar. Las curvas muestran el resultado de la regresión obtenida con la ecuación [12]. A: Ciclo intermedio corto en fecha de siembra temprana. B: Ciclo intermedio largo en fecha de siembra temprana. C: Ciclo intermedio corto en fecha de siembra tardía y D: Ciclo intermedio largo en fecha de siembra tardía. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0,898 en A, -0,345 en B, 0,696 en C y 0,689 en D.

#### **IV. 7. Parámetro Área foliar específica (SLA)**

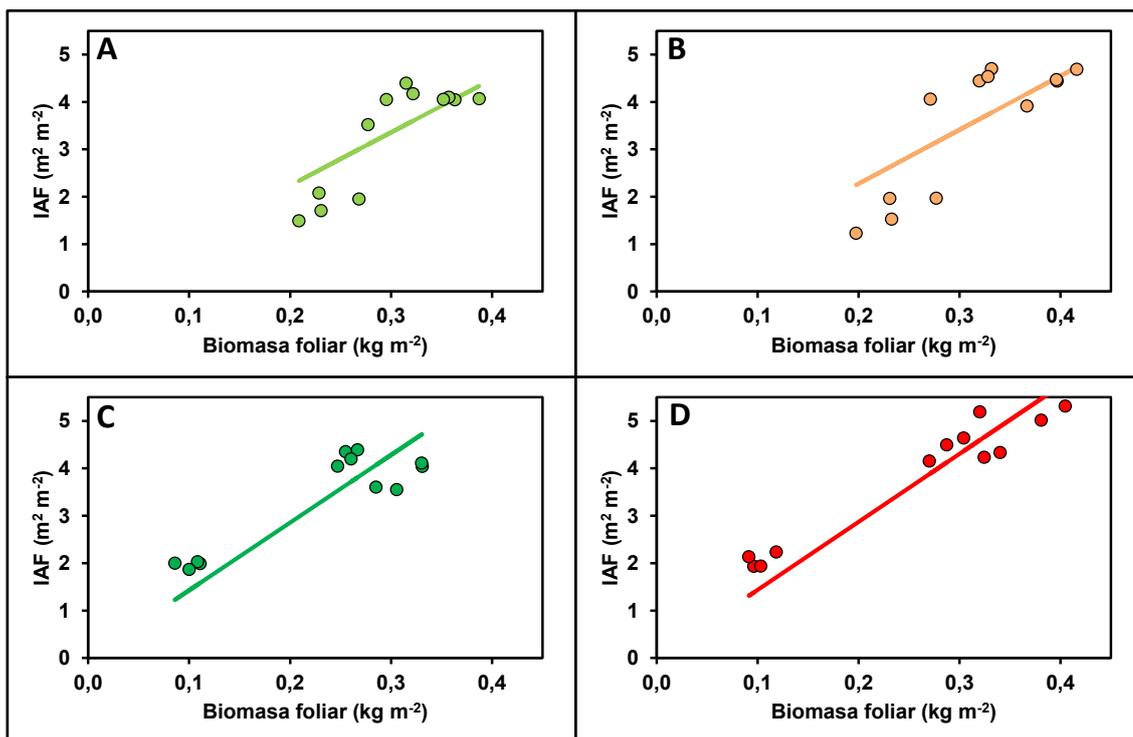
El parámetro área foliar específica no presentó diferencias genéticas en ninguna de las fechas de siembra evaluadas (Tabla 8). Ello no coincide con Savini (2014) quien encuentra dependencia del híbrido en el valor de SLA.

**Tabla 8.** Parámetro área foliar específica

			SLA (m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )
TE	Ciclo	CIC	11,19 A
		CIL	11,36 A
	<i>Valor p</i>		0,449
	<i>CV</i>		2,49
TA	Ciclo	CIC	14,36 A
		CIL	14,28 A
	<i>Valor p</i>		0,75
	<i>CV</i>		2,2

TE: Fecha de siembra temprana, TA: Fecha de siembra tardía, CIC: Ciclo intermedio corto, CIL: Ciclo intermedio largo, Valor p: Valor de probabilidad de la prueba de Fischer, CV: Coeficiente de variación, letras distintas dentro de una misma columna y fecha de siembra indican diferencias significativas al 5% entre ciclos de madurez.

En la figura 6 se muestra la relación entre biomasa foliar y área foliar, siendo su pendiente el parámetro SLA. Es oportuno mencionar que podría ser que el SLA varía dentro de la estación de crecimiento del cultivo (similar a lo ocurrido con los parámetros e y k), y el sentido de esta variación cambia según la fecha de siembra. Este efecto se puede observar en la comparación de las figuras 6 B con 6 D, donde para la fecha temprana, el conjunto de datos correspondiente a los primeros estadios de desarrollo caen por debajo de la recta de regresión, mientras que en la siembra tardía se ubican por encima. Esta hipótesis debería evaluarse en futuros estudios que intenten generar un rango de datos más amplio a los efectos de verificarla o rechazarla.



**Figura 6.** Índice de área foliar en función de la biomasa foliar. Las curvas muestran el resultado de la regresión obtenida con la ecuación [13], siendo su pendiente el parámetro SLA. A: Ciclo intermedio corto en fecha de siembra temprana. B: Ciclo intermedio largo en fecha de siembra temprana. C: Ciclo intermedio corto en fecha de siembra tardía y D: Ciclo intermedio largo en fecha de siembra tardía. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0,664 en A, 0,65 en B, 0,649 en C y 0,845 en D.

#### **IV. 8. Parámetro Coeficiente de partición hoja – tallo (lsp)**

Este parámetro presentó diferencias genéticas en ambas fechas de siembra (Tabla 9), siendo mayor para el híbrido de ciclo intermedio corto. Un alto valor de este coeficiente indica que la partición del crecimiento diario hacia las hojas es alto comparado con un material que posee bajos valores de lsp.

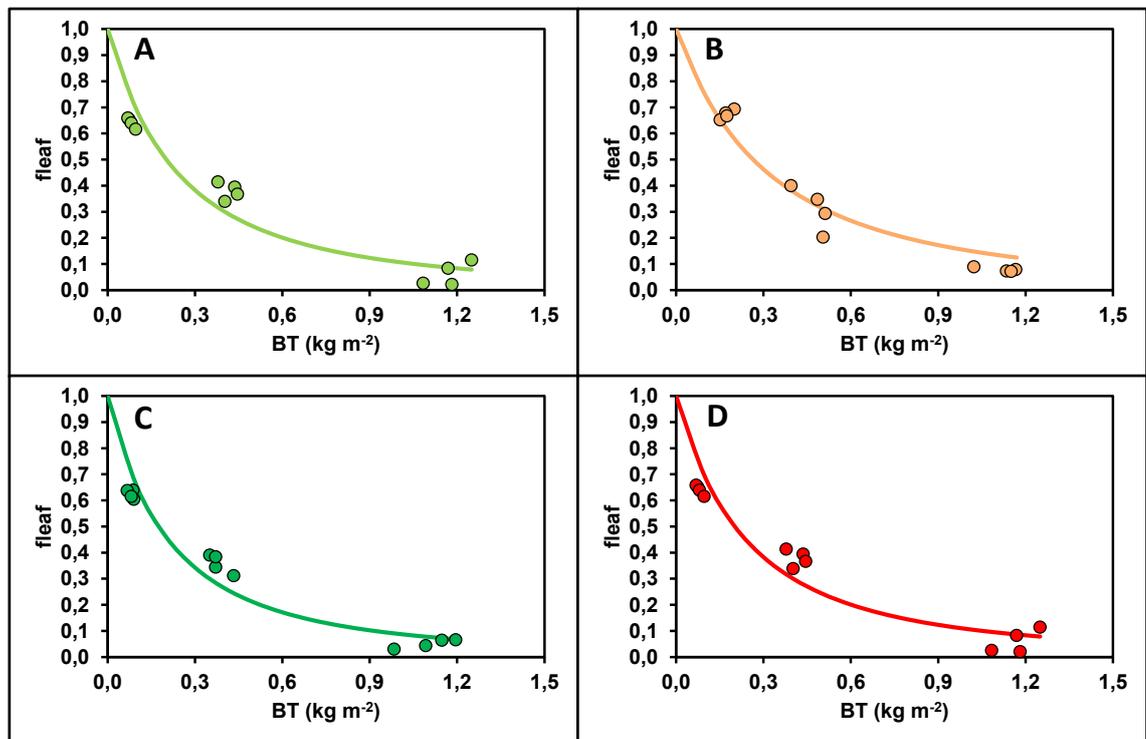
Los valores encontrados son similares a los mencionados por Stockle *et al.* (1997) y Ferrer *et al.* (2000), e inferiores a los citados por Marcos (2000) y Sibma (1987).

En la figura 6 se muestra la variación de la partición del crecimiento diario hacia las hojas en función de la biomasa acumulada como indicador del estado de desarrollo del cultivo y sus respectivas curvas de ajuste.

**Tabla 9.** Parámetro coeficiente de partición hoja – tallo

			lsp (m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )
TE	Ciclo	CIC	2,06 A
		CIL	1,57 B
	Valor p	0,012	
	CV	7,05	
TA	Ciclo	CIC	2,36 A
		CIL	2,06 B
	Valor p	0,043	
	CV	5,76	

TE: Fecha de siembra temprana, TA: Fecha de siembra tardía, CIC: Ciclo intermedio corto, CIL: Ciclo intermedio largo, Valor p: Valor de probabilidad de la prueba de Fischer, CV: Coeficiente de variación, letras distintas dentro de una misma columna y fecha de siembra indican diferencias significativas al 5% entre ciclos de madurez.



**Figura 7.** Partición a hojas del crecimiento diario (fleaf) como función de la biomasa del cultivo. Las curvas muestran el resultado de la regresión obtenida con la ecuación [15]. A: Ciclo intermedio corto en fecha de siembra temprana. B: Ciclo intermedio largo en fecha de siembra temprana. C: Ciclo intermedio corto en fecha de siembra tardía y D: Ciclo intermedio largo en fecha de siembra tardía. El coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) fue de 0,881 en A, 0,941 en B, 0,911 en C y 0,881 en D.

#### **IV. 9. Resumen de parámetros**

En la tabla 10 se presentan los parámetros determinados experimentalmente y utilizados en las distintas simulaciones.

**Tabla 10.** Valores de los parámetros determinados experimentalmente y utilizados en la simulación.

Parámetro	TE		TA	
	CIC	CIL	CIC	CIL
TT S-E (°C día)	85,3	85,3	84,9	84,9
TT S-R <sub>1</sub> (°C día)	839	882	872	903
TT S-R <sub>3</sub> (°C día)	1114	1114	1095	1095
TT S-R <sub>6</sub> (°C día)	1885	1885	1732	1732
e Top (g MJ <sup>-1</sup> )	3,82	3,61	4,62	4,02
k (g kPa m <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )	7,66	6,99	8,68	7,2
K	0,502	0,83	0,45	0,62
lsp (m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )	2,05	1,57	2,36	2,05
SLA (m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )	11,19	11,32	14,27	14,35

TE: Fecha de siembra temprana, TA: Fecha de siembra tardía, CIC: Ciclo intermedio corto, CIL: Ciclo intermedio largo.

#### **IV. 10. Resultados de la simulación y evaluación del desempeño del modelo**

En la figura 8 se observa la relación entre los valores observados y simulados de las variables de interés, incluyendo todos los tratamientos y los momentos fenológicos de manera conjunta. La recta representa la relación 1:1, es decir que aquellos datos que se ubican en cercanías de la misma, son simulados de manera correcta por el modelo. Por otro lado, aquellos puntos que se encuentran debajo de la relación 1:1 son subestimados en la simulación, mientras que son sobreestimados cuando se posicionan por encima de la relación mencionada.

A simple vista se observa que el IAF no fue simulado de manera correcta, ya que la figura 8 muestra una elevada dispersión de datos y la mayoría de los valores se ubican por debajo de la línea 1:1, lo que estaría indicando que esta variable fue subestimada por el modelo. En este sentido, es de esperar que la incapacidad de simular adecuadamente el IAF se traduzca en errores en la estimación del resto de las variables de salida, ya que el ciclo de procesos ecofisiológicos que utiliza el modelo, comienza con la determinación del IAF y al día siguiente se reinicia con el IAF.

Para el caso de la ei sucedió algo muy similar a lo ocurrido con el IAF, observándose una gran dispersión de datos conjuntamente con una subestimación por parte de la simulación.

Por otro lado, el proceso transpiratorio, fue simulado de manera satisfactoria, ya que la dispersión de datos es menor y los puntos se ubican en cercanías a la línea 1:1, con excepción

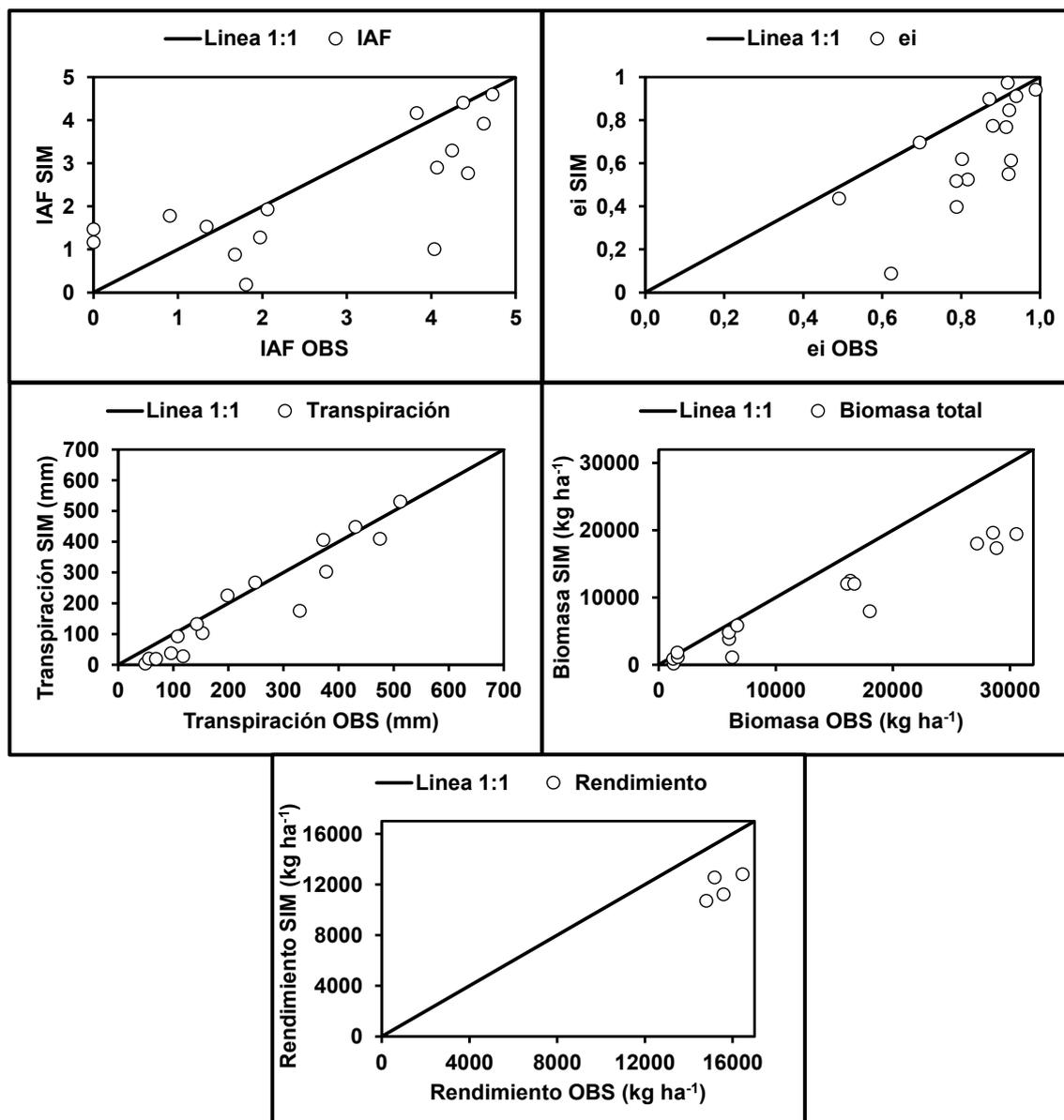
de los datos correspondientes a los primeros estadios de desarrollo, los cuales fueron subestimados.

La acumulación de biomasa, sin bien presentó una baja dispersión de datos, los mismos fueron subestimados de manera importante por el modelo. Algo muy similar ocurrió con el rendimiento en grano.

Esta incapacidad del modelo de simular adecuadamente las variables de interés, con excepción de la transpiración que fue simulada de manera satisfactoria, se reflejó en los índices estadísticos que se utilizaron para evaluar el desempeño del modelo (Tabla 11).

La única variable de salida que obtuvo índices estadísticos satisfactorios fue la transpiración, ya que  $R^2$ , E y D fueron cercanos a 1; mientras que RMSE y RMSE%, tomaron valores más cercanos a 0, lo que indica que existe un alto nivel de similitud entre la transpiración observada y la simulada.

Otro aspecto a mencionar es que para las variables IAF y producción de biomasa, el índice estadístico D resultó bastante satisfactorio (cercano a 1), no obstante el resto de los estadísticos indicó que los valores simulados no coincidieron con los observados.



**Figura 8.** Comparación entre valores observados y simulados para las variables de salida de interés en este estudio. La línea negra representa la relación 1:1.

**Tabla 11.** Índices de comparación estadística entre valores observados y simulados por el modelo para las variables de interés.

Índice	IAF	ei	Transpiración acumulada	Biomasa acumulada	Rendimiento
R <sup>2</sup>	0,226	-0,062	0,876	0,212	-16,861
E	0,471	-2,47	0,853	0,656	-35,9
RMSE	1,2	0,24	59,74	6184	3733
%RMSE	0,513	0,362	0,3	0,715	0,316
D	0,833	0,631	0,966	0,885	0,267

R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación, E: Eficiencia del modelo, RMSE: Raíz cuadrada media del error, %RMSE: Raíz cuadrada media del error porcentual con respecto a la media, D: Índice de coincidencia.

## **V. CONCLUSIONES.**

Algunos de los parámetros del modelo SWB referidos al cultivo difirieron entre materiales genéticos, mientras que otros permanecieron sin cambios importantes. Esto estaría indicando que los resultados de la simulación solo podrían ser utilizados para aquellos híbridos en los cuales se midieron los parámetros de manera experimental.

Ciertos parámetros parecen diferir a lo largo del ciclo del cultivo, en especial el SLA. En este sentido, el modelo debería incluir funciones que permitan variar algunos parámetros en función de la edad del cultivo o de variables climáticas que pueden producir variaciones en los mismos.

El modelo fue incapaz de simular correctamente las variables de salida de interés para este estudio, con excepción de la transpiración, la cual presentó una elevada similitud entre los valores observados y simulados.

La producción de biomasa y el rendimiento en grano fueron subestimados de manera importante por el modelo.

Posiblemente, para mejorar la capacidad predictiva del modelo SWB, sea necesario la calibración a campo de un mayor número de parámetros.

## **VI. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.**

ANDRADE, F. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research*. 41:1, 1-12; 68.

ANDRADE, F.; A. CIRILO, S. UHART, Y M. OTEGUI. 1996. *Ecofisiología del Cultivo de Maíz*. Ed: La Barrosa.

ANDRADE, F.; L. AGUIRREZABAL. Y R. RIZZALLI. 2000. Crecimiento y rendimiento comparados. En: *Bases para el manejo del Maíz, el Girasol y la Soja*. Eds.: Fernando Andrade y Victor Sadras. Ediciones INTA.

ANDRADE F. 2011. *La tecnología y la producción agrícola. El pasado y los actuales desafíos*. Ediciones INTA. 60 pp.

BARRETT J.R. AND M.A. NEARING. 1998. Humanization of Decision Support Using Informations from simulations. pp 1-17 In: Peart R. and R.B. Curry (eds) *Agricultural System Modelling and Simulation*. Marcel Dekker Inc., New York, USA.

BRUINSMA, J. 2009. The Resource Outlook to 2050: By how much do land, water, and crop yields need to increase by 2050? Paper presented at the FAO Expert Meeting, 24-26 June 2009, Rome on "How to Feed the World in 2050".

CAMPBELL, G. S. and C.O. STOCKLE. 1994. *Principies and appucations of cropping systems simulation modeling*. Manual del Curso de Postgrado. Universidad de Lleida. Lleida (España).

CIRILO A. 1994. *Desarrollo, crecimiento y partición de materia seca en cultivos de maíz sembrados en diferentes fechas*. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

DI RIENZO J.A., CASANOVES F., BALZARINI M.G., GONZALEZ L., TABLADA M., ROBLEDO C.W. *InfoStat versión 2011*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

ESPOSITO G. 2002. *Propiedades hidrofísicas del suelo asociadas a diferentes sistemas de labranza en el cultivo de maíz*. Tesis M. Sc Producción Vegetal. FAV-UNRC.

ESPOSITO G.; G. BALBOA; C. CERLIANI Y R. BALBOA. 2015. Rendimiento potencial de maíz. En: El cultivo de maíz en San Luis. Información Técnica 188. EEA San Luis. INTA. Eds: Jorge Alberto Garay y Juan Cruz Colazo. ISSN 0327-425X.

EVANS L. T. 1997. Adapting and improving crops: the endless task. Phil Trans R. Soc. Lond. B. 354: 901-906.

FERRER F.; M. J. VILLAR Y C. O. STOCKLE. 2000. Evaluación del modelo de simulación CropSyst para maíz de regadío en el valle del Ebro. Invest. Agr.: Prot. Veg. 15: 237-251

FISCHER, K. S. Y F. E. PALMER. 1984. Tropical maize. En: The physiology of tropical field crops. Eds: P. R. Goldsworthy y N. M. Fischer. Wiley. New York. Págs. 213-248.

FORSYTHE, W. 1980. Física de suelos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Cap. 3.:17-27.

FOX, D. G. 1981: Judging air quality model performance: A summary of the AMS Workshop on Dispersión Model Performance. Bu//. Am. Meteorol. Soc., 61, 599-609.

GARCIA, F. 2005. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. En: [http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/3bc3a0c31c99bad703257040004b8ae6/\\$FILE/FGarcia%20-%20Maiz%202005%20Cordoba.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/3bc3a0c31c99bad703257040004b8ae6/$FILE/FGarcia%20-%20Maiz%202005%20Cordoba.pdf). Consultado: 04-03-2013.

GUEVARA, E. 2005. La simulación del desarrollo, crecimiento y rendimiento en maíz. En: <http://www.fertilizando.com/articulos/SimulacionDesarrolloCrecimientoyRendimientoEnMaiz.pdf>. Consultado: 16-08-2012.

INFOSTAT® Software Estadístico. Actualización 2008. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

JONES, C.A AND J. R. KINIRY. 1986. CERES-Maize: a simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press, College Station, TX.

MADDONNI G. A.; M. E. OTEGUI Y A. C. CIRILO. 2001. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize architecture and light attenuation. *Field Crops Research* 71: 183-193.

MARCOS, J. 2000. Simulation based assessment of alternative crop in the dryland Pacific Northwest. Thesis of Ph. D. in Soils. Washington State University. Department Crop and soils sciences. USA.

MARCOS, J., Y G. S. CAMPBELL. 2002. SWBModel 11. Modelo de simulación de balance hídrico del suelo y crecimiento de cultivos. Río Cuarto, Argentina.

MEIRA, S. Y E. GUEVARA. 2003. Uso de modelos de simulación de cultivos como herramienta para la toma de decisiones en el cultivo de soja. En: [http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/\\$webindex/A082DE1773E4C8B803256A99006300E](http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/$webindex/A082DE1773E4C8B803256A99006300E)  
[A](#). Consultado: 19-08-2012.

PENNING DE VRIES F; D. JANSEN; H. TEN BERGE; Y A. BAKEMA. 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annuals crops. *Simulation Monograph* 29. Pudoc. Wageningen.

RITCHIE J.T, U SHING, D.C. GODWIN AND W.T. BOWEN. 1998. Cereal growth, development and yield. pp 79-98 In: Tsuji G, G Hoogenboom and P. Thornton (eds) *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Neetherlands.

RITCHIE W. and J. HANWAY 1997. How a corn plant develops. Special Reports N° 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames, Iowa.:21 pág.

RIVETTI A. 2004. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. Tesis de la Maestría de Riego y Drenaje de la Universidad Nacional de Cuyo.

SAU F., F. X. LÓPEZ CEDRÓN, A. E. CONFALONES, J. I. LIZASO. 2010. Modelos de simulación del cultivo de maíz: Fundamentos y aplicaciones en España. En: <http://polired.upm.es/index.php/pastos/article/viewFile/1819/1820>. Consultado: 16-08-2012.

SAVINI A. 2014. Calibración del modelo de simulación SWB (Soil Water Balance) para cuatro híbridos de maíz de reciente salida al mercado. Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero Agrónomo. FAV – UNRC.

SEILER, R; R. FABRICIUS; V. ROTONDO y M. VINO CUR. 1995. Agroclimatología de Río Cuarto – 1974 / 1993. Volumen I. UNRC.

SIBMA L. 1987. Ontwikkeling En Groei Van Maïs (zea Mays L.) Onder Nederlandse Omstandigheden. Wageningen: Pudoc.

SISTEMA INTEGRADO DE INFORMACION AGROPECUARIA. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Presidencia de la Nación. En: <http://www.sija.gov.ar>. Consultado: 01-02-2016.

STAPPER M. AND ARKIN G.F. 1980. CORNF. A dynamic growth and development model for maize. Texas Agricultural Experimental Station. Program and model documentation N° 80-2 College Station.

STOCKLE C. O.; M. CABELGUENNE, Y P. DEBAEKE. 1997. Comparison of CropSyst performance for water management in southwestern France using submodels of different levels of complexity. Eur. J. Agronomy 7: 89-98.

STOCKLE C. O y R. L. NELSON. 1998. CropSyst User's Manual. Biological Systems Engineering Dept., Pullman, Washington, USA, Washington State University.

TANNER, C. B., Y T. R. SINCLAIR. 1983. Efficient water use in crop production: research or re-search? In: H. M. Waylor, W. R. Jordan y T. R. Sinclair (eds.), Limitations to efficient water in crop production. Madison, Wisconsin.: American Society of Agronomy.

UMARAN, I. Indicadores del sector maicero. 2005. Dirección de Agricultura. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. Ministerio de Economía. República Argentina. [www.mecon.gov.ar](http://www.mecon.gov.ar).

VIDELA MENEGUE, H., J. MARCOS, G. P. ESPÓSITO, Y A. DEGIOANNI. 2007. Comparación de dos métodos de acumulación potencial de biomasa en ambientes subhúmedos

del centro de Argentina, Actas Workshop Internacional: Eco Fisiología Vegetal Aplicada al Estudio de la Determinación del Rendimiento y la Calidad de los Cultivos de Grano. Mar del Plata, Argentina.

WILLMOTT, C. J. y D. E. WICKS. 1980. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. *Phys. Geogr.* 1, 59-73.

WILLMOTT, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society*. Vol. 63 N°11:1309-1313.

## VII. ANEXO.

### VII. 1. Análisis de la varianza.

#### Fecha de siembra temprana:

##### RFA int R6

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
RFA int R6	8	0,72	0,35	4,08

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	21644,50	4	5411,13	1,93	0,3074
Bloque	10394,50	3	3464,83	1,24	0,4324
Híbrido	11250,00	1	11250,00	4,02	0,1386
Error	8395,00	3	2798,33		
Total	30039,50	7			

#### Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=91,5278

Error: 2798,3333 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.
P	1332,75	4	26,45 A
DK	1257,75	4	26,45 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

##### T R6

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
T R6	8	0,43	0,00	10,17

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	3314,50	4	828,63	0,57	0,7080
Bloque	1774,38	3	591,46	0,40	0,7621
Híbrido	1540,13	1	1540,13	1,05	0,3807
Error	4395,38	3	1465,13		
Total	7709,88	7			

#### Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=66,2279

Error: 1465,1250 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.
P	390,25	4	19,14 A
DK	362,50	4	19,14 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**BT R6**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
BT R6	8	0,61	0,09	6,91

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	196913,00	4	49228,25	1,17	0,4673
Bloque	139113,00	3	46371,00	1,10	0,4691
Híbrido	57800,00	1	57800,00	1,37	0,3258
Error	126221,00	3	42073,67		
Total	323134,00	7			

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=354,9020**

Error: 42073,6667 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.	
P	3055,00	4	102,56	A
DK	2885,00	4	102,56	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )**Rendimiento**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Rendimiento	8	0,67	0,22	5,75

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	5078862,00	4	1269715,50	1,50	0,3856
Bloque	3568540,00	3	1189513,33	1,40	0,3940
Híbrido	1510322,00	1	1510322,00	1,78	0,2744
Error	2545308,00	3	848436,00		
Total	7624170,00	7			

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=1593,7231**

Error: 848436,0000 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.	
DK	16458,00	4	460,55	A
P	15589,00	4	460,55	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )**e**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
e	8	0,96	0,90	1,53

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,09	4	0,02	17,66	0,0201
Bloque	0,06	3	0,02	14,39	0,0276
Híbrido	0,04	1	0,04	27,45	0,0135
Error	3,8E-03	3	1,3E-03		
Total	0,09	7			

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,0619**

Error: 0,0013 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.	
DK	2,40	4	0,02	A
P	2,27	4	0,02	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**K**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
K	8	0,88	0,71	15,19

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,22	4	0,05	5,31	0,1007
Bloque	0,01	3	3,1E-03	0,30	0,8283
Híbrido	0,21	1	0,21	20,36	0,0203
Error	0,03	3	0,01		
Total	0,25	7			

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,1760**

Error: 0,0103 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.	
P	0,83	4	0,05	A
DK	0,51	4	0,05	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**SLA**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
SLA	8	0,59	0,04	2,49

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,34	4	0,09	1,08	0,4959
Bloque	0,28	3	0,09	1,18	0,4465
Híbrido	0,06	1	0,06	0,75	0,4494
Error	0,24	3	0,08		
Total	0,58	7			

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,4865**

Error: 0,0790 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.	
P	11,36	4	0,14	A
DK	11,19	4	0,14	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### lsp

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
lsp	8	0,91	0,79	7,05

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,48	4	0,12	7,41	0,0658
Bloque	3,1E-03	3	1,0E-03	0,06	0,9757
Híbrido	0,48	1	0,48	29,46	0,0123
Error	0,05	3	0,02		
Total	0,53	7			

#### Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,2209

Error: 0,0163 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.	
DK	2,06	4	0,06	A
P	1,57	4	0,06	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### k1

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
k1	8	0,81	0,55	5,20

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1,84	4	0,46	3,13	0,1876
Bloque	0,74	3	0,25	1,69	0,3392
Híbrido	1,10	1	1,10	7,48	0,0717
Error	0,44	3	0,15		
Total	2,28	7			

#### Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,6622

Error: 0,1465 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.	
DK	7,73	4	0,19	A
P	6,99	4	0,19	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### Fecha de siembra tardía:

#### RFA int R6

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
RFA int R6	8	0,71	0,32	6,14

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	37014,50	4	9253,63	1,82	0,3251
Bloque	11136,38	3	3712,13	0,73	0,5989
Híbrido	25878,13	1	25878,13	5,09	0,1093
Error	15252,38	3	5084,13		
Total	52266,88	7			

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=123,3705**

Error: 5084,1250 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.
P	1218,00	4	35,65 A
DK	1104,25	4	35,65 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

#### T R6

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
T R6	8	0,82	0,57	6,20

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	6549,00	4	1637,25	3,35	0,1742
Bloque	2131,00	3	710,33	1,45	0,3832
Híbrido	4418,00	1	4418,00	9,03	0,0574
Error	1467,00	3	489,00		
Total	8016,00	7			

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=38,2611**

Error: 489,0000 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.
P	380,00	4	11,06 A
DK	333,00	4	11,06 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

#### BT R6

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
BT R6	8	0,27	0,00	7,61

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	50333,00	4	12583,25	0,28	0,8749
Bloque	13612,50	3	4537,50	0,10	0,9542
Híbrido	36720,50	1	36720,50	0,82	0,4329
Error	134950,50	3	44983,50		
Total	185283,50	7			

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=366,9695**

Error: 44983,5000 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.
DK	2855,00	4	106,05 A
P	2719,50	4	106,05 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

## Rendimiento

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Rendimiento	8	0,80	0,54	1,25

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	433617,00	4	108404,25	3,08	0,1912
Bloque	142532,50	3	47510,83	1,35	0,4056
Híbrido	291084,50	1	291084,50	8,27	0,0638
Error	105610,50	3	35203,50		
Total	539227,50	7			

### Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=324,6357

Error: 35203,5000 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.
DK	15183,50	4	93,81 A
P	14802,00	4	93,81 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

## e

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
e	8	0,56	0,00	11,11

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,29	4	0,07	0,96	0,5368
Bloque	0,05	3	0,02	0,22	0,8789
Híbrido	0,24	1	0,24	3,17	0,1732
Error	0,23	3	0,08		
Total	0,51	7			

### Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,4743

Error: 0,0752 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.
DK	2,64	4	0,14 A
P	2,30	4	0,14 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

## K

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
K	8	0,73	0,37	24,21

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,15	4	0,04	2,04	0,2918
Bloque	0,08	3	0,03	1,50	0,3743
Híbrido	0,07	1	0,07	3,68	0,1508
Error	0,06	3	0,02		
Total	0,21	7			

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,2375**

Error: 0,0188 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.	
P	0,66	4	0,07	A
DK	0,47	4	0,07	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### SLA

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
SLA	8	0,57	0,00	2,20

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,39	4	0,10	0,98	0,5279
Bloque	0,38	3	0,13	1,27	0,4256
Híbrido	0,01	1	0,01	0,13	0,7468
Error	0,30	3	0,10		
Total	0,69	7			

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,5461**

Error: 0,0996 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.	
P	14,36	4	0,16	A
DK	14,28	4	0,16	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### lsp

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
lsp	8	0,81	0,57	5,76

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,21	4	0,05	3,28	0,1782
Bloque	0,03	3	0,01	0,60	0,6587
Híbrido	0,18	1	0,18	11,33	0,0435
Error	0,05	3	0,02		
Total	0,26	7			

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,2199**

Error: 0,0161 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.	
DK	2,36	4	0,06	A
P	2,06	4	0,06	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**k1**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
k1	8	0,76	0,45	9,67

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	5,83	4	1,46	2,42	0,2469
Bloque	1,69	3	0,56	0,93	0,5220
Híbrido	4,15	1	4,15	6,88	0,0788
Error	1,81	3	0,60		
Total	7,64	7			

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=1,3433**

Error: 0,6028 gl: 3

Híbrido	Medias	n	E.E.	
DK	8,75	4	0,39	A
P	7,31	4	0,39	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )