



# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO**

## **FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

*Trabajo Final Presentado Para  
Optar al Grado de Ingeniero Agrónomo*

“EVALUACIÓN DE DOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE TIEMPO  
TÉRMICO PARA OCURRENCIA FENOLÓGICA EN MAÍZ (*Zea mays*  
*L.*)”

**Batos, Adrián Andrés**

**D.N.I: 29.349.314**

**Director: MSc. Ing. Agr. Espósito, Gabriel**

**Co-Director: MSc. Ing. Agr. Guillermo Cerioni**

**Río Cuarto – Córdoba**

**Septiembre 2012**

## ÍNDICE DE TEXTO

RESUMEN .....	IX
SUMMARY .....	X
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1. HIPÓTESIS .....	7
2. OBJETIVOS GENERALES .....	7
II. MATERIALES Y MÉTODOS .....	8
1. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO .....	8
a. CLIMA .....	8
b. FISIOGRAFÍA .....	9
c. CARACTERIZACIÓN DEL CULTIVO .....	9
2. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	10
3. DETERMINACIONES REALIZADAS .....	11
a. FENOLOGIA DEL CULTIVO .....	11
b. INFORMACIÓN CLIMÁTICA .....	12
c. TEMPERATURA Y PRECIPITACIONES .....	12
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	12
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	16
1. TEMPERATURA .....	16
2. PRECIPITACIONES .....	17
a. RIO CUARTO CAMPAÑAS 2009/2010 Y 2010/2011 .....	17
b. VENADO TUERTO CAMPAÑAS 2006/2007 Y 2007/2008 .....	17
3. FENOLOGIA DEL CULTIVO .....	18
4. PERIODOS EVALUADOS .....	19
a. SIEMBRA-EMERGENCIA .....	19
b. SIEMBRA-R1 .....	22
c. SIEMBRA-R6 .....	24
d. R1-R6 .....	27
IV. CONCLUSIONES .....	30
V. BIBLIOGRAFÍA .....	31
VI. ANEXO .....	40

## ÍNDICE DE ECUACIONES

**Ecuación 1.** Cálculo Simple (13).

**Ecuación 2.** Cálculo Compuesto (13).

**Ecuación 3.** Cálculo Compuesto (13).

**Ecuación 4.** Cálculo Compuesto (13).

**Ecuación 5.** Índice de coincidencia (14).

**Ecuación 6.** Raíz cuadrada media del error (14).

**Ecuación 7.** Porcentaje raíz cuadrada media del error (15).

**Ecuación 8.** Eficiencia del modelo (15).

## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.** Respuesta idealizada a la temperatura de a) duración de una fase fenológica y de b) su inversa, la tasa de desarrollo (40).

**Figura 2.** Temperaturas mínimas mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto (40).

**Figura 3.** Temperaturas máximas mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto (41).

**Figura 4.** Comparación entre precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto (41).

**Figura 5.** Análisis de regresión en el periodo S-E para los valores simulados por el cálculo simple (20).

**Figura 6.** Análisis de regresión en el periodo S-E para los valores simulados por el cálculo compuesto (20).

**Figura 7.** Análisis de regresión en el periodo S-R1 para los valores simulados por el cálculo compuesto (23).

**Figura 8.** Análisis de regresión en el periodo S-R1 para los valores simulados por el cálculo compuesto (23).

**Figura 9.** Análisis de regresión en el periodo S-R6 para los valores simulados por el cálculo simple (25).

**Figura 10.** Análisis de regresión en el periodo S-R6 para los valores simulados por el cálculo compuesto (25).

**Figura 11.** Análisis de regresión en el periodo R1-R6 para los valores simulados por el cálculo simple (27).

**Figura 12.** Análisis de regresión en el periodo R1-R6 para los valores simulados por el cálculo compuesto (28).

## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Valores de TT medios de cada híbrido para los periodos emergencia-floración y floración-madurez fisiológica (11).

**Tabla 2.** Valores medios acumulados en cada periodo fenológico para los datos observado, simulado simple y simulado compuesto (19).

**Tabla 3.** Resultados siembra-emergencia, método de cálculo simple (21).

**Tabla 4.** Resultados siembra-emergencia, método de cálculo compuesto (21).

**Tabla 5.** Precipitaciones mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto (42).

**Tabla 6.** Resultados siembra-R1, método de cálculo simple (24).

**Tabla 7.** Resultados siembra-R1, método de cálculo compuesto (24).

**Tabla 8.** Sumas térmicas y días transcurridos de siembra a floración (R1) para los híbridos utilizados en las cuatro campañas evaluadas (42).

**Tabla 9.** Resultados siembra-R6, método de cálculo simple (26).

**Tabla 10.** Resultados siembra-R6, método de cálculo compuesto (26).

**Tabla 11.** Resultados R1-R6, método de cálculo simple (29).

**Tabla 12.** Resultados R1-R6, método de cálculo compuesto (29).

**Tabla 13.** Temperaturas mínimas mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto (43).

**Tabla 14.** Temperaturas máximas mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto (43).

## ÍNDICE DEL ANEXO

**Figura 1.** Respuesta idealizada a la temperatura de a) duración de una fase fenológica y de b) su inversa, la tasa de desarrollo (41).

**Figura 2.** Temperaturas mínimas mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto (41).

**Figura 3.** Temperaturas máximas mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto (42).

**Figura 4.** Comparación entre precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto (42).

**Tabla 5.** Precipitaciones mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto (43).

**Tabla 8.** Sumas térmicas y días transcurridos de siembra a floración (R1) para los híbridos utilizados en las cuatro campañas evaluadas (43).

**Tabla 11.** Temperaturas mínimas mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto (44).

**Tabla 12.** Temperaturas máximas mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto (44).

## RESUMEN

Fueron evaluados dos métodos de acumulación de tiempo térmico para maíz: el método simple y el método compuesto que utiliza tres fórmulas, dependiendo de la temperatura mínima y máxima que se registran diariamente. Fueron utilizados registros de cuatro años de observaciones con dos fechas de siembra en distintos híbridos de maíz, en las localidades de Río Cuarto (campañas 2009-2010 y 2010-2011) y Venado Tuerto (campañas 2006-2007 y 2007-2008). Los periodos evaluados fueron siembra-emergencia, emergencia-aparición de estigmas, siembra-madurez fisiológica y aparición de estigmas-madurez fisiológica. Se observó una disminución en el ciclo del cultivo a medida que las fechas de siembra se atrasaban. En términos generales el método compuesto presentó mejor valor predictivo en la estimación de eventos fenológicos. Las estimaciones más precisas obtenidas por el método compuesto fueron las referidas a los periodos siembra-emergencia y siembra-R1. El periodo siembra-emergencia arrojó un índice de coincidencia (D) similar para ambos métodos con valores de 84 y 88% para el método simple y compuesto respectivamente, aunque la eficiencia del modelo mostró que el

método simple tuvo una menor eficiencia (E) para predecir el número de días que duró el periodo con respecto al modelo compuesto (0,10 y 0,41 respectivamente). Si se considera el periodo siembra-R1 el índice de coincidencia (D) indica que los datos simulados por el método compuesto son superiores, mostrando la tendencia del segundo método a ser más exacto al momento de predecir dicho periodo, afianzado con una eficiencia (E) del modelo, de 0,81 respecto del 0,64 arrojado por el método simple. En cuanto a los periodos siembra-R6 y R1-R6 los métodos no ajustaron correctamente los valores observados. Los valores de E, fueron negativos en ambos modelos, lo que estaría revelando una ineficiencia de los métodos para la predicción en la duración de la fase, aunque cabe considerar que un estrés en la fase de llenado afectó el desarrollo normal del cultivo y con esto el desempeño de los modelos. Se concluye que el método compuesto es mejor al momento de predecir eventos fenológicos. Aunque debería incorporarse parámetros vinculados al stress ambiental para mejorar el valor predictivo de estos modelos.

Palabras Claves: tiempo térmico – grados días – maíz.

## **II. SUMMARY**

“ Evaluation of two methods of estimating thermal time for occurrence phenological in corn ”

The accumulation of thermal time can be evaluated by two methods: The simple and the complex methods. The complex method uses three formulas depending on the minimum and maximum temperature of day. In this study, days from planting to emergency, emergency to silking, planting to maturity and silking to maturity were analyzed using both methods, the complex and the simple. Data was recorded for different maize hybrids and planting dates across two locations, Rio Cuarto in 2009/10 and 2010/11 and Venado Tuerto in 2006/07 and 2007/08. A reduction in the length of the growing season was observed when planting date was delayed. In general, the complex method denoted the best predictive values to estimate the phenological

stages. The most accurate prediction values were observed from planting to emergency and planting to silking. Similar Coincidence index (D) was detected from planting to emergency between both methods, with values of 84 and 88% for simple and complex method, respectively. However, the efficiency of the model showed that the simple method was less efficient in predicting the number of days of the period than the complex model (0,10 and 0,41 respectively). The analysis of the amount of days from planting to silking demonstrated that the coincidence index (D) was superior for the complex method. Results suggested that this method is more accurate and efficient (E=0.81) than the simple one (E=0.64) to estimate this period. Neither of both methods were accurate to estimate the amount of days from planting to maturity and silking to maturity. Negative values were observed in these two periods suggesting the inefficiency of the method to estimate the length of such period-. However, the filling stage could be affected by a drought during this period that could have an effect on the normal development of the crop and the performance of the models. In conclusion this study suggests that the complex method is better than the simple method in predicting phenological phases. Environmental data should be included to improve the predictive values of these methods.

Keywords: thermal time - degree days - corn.

## I. INTRODUCCIÓN

El maíz es el cereal que más importancia ha tenido en varios sectores de la economía a escala mundial durante el siglo XX y en los inicios del XXI. En los países industrializados, el maíz se utiliza principalmente como forraje, materia prima para la producción de alimentos procesados y, recientemente, para la producción de etanol. Por el contrario, en algunos países de América Latina y cada vez más en países africanos, un gran porcentaje del maíz que se produce o importa se destina al consumo humano. En este sentido, este cultivo ha sido y sigue siendo un factor de sobrevivencia para los campesinos e indígenas que habitan en la mayoría de los países del continente americano (Serratos Hernández, 2009).

El cultivo de maíz en la última década en Argentina ha ocupado una superficie que varió entre 2,5 y 4 millones de hectáreas y la producción varió entre 12 a 19 millones de toneladas (Bragachini *et al.*, 2007).

El rendimiento está determinado principalmente por el número final de granos logrados por unidad de superficie, el cual es función de su tasa de crecimiento alrededor del periodo de floración (Cárcova *et al.*, 2003). Por lo tanto, para alcanzar altos rendimientos, el cultivo debe lograr un óptimo estado fisiológico en floración: cobertura total del suelo y alta eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa.

A lo largo del ciclo se pueden distinguir distintas fase de desarrollo, determinadas por cambios cualitativos en los órganos en formación. Estos pueden o no ser perceptibles macroscópicamente. La sucesión de etapas fenológicas ha sido generalmente ordenada según escalas de diferente complejidad y detalle según el objetivo perseguido. La escala fenológica más utilizada para describir el desarrollo del cultivo de maíz es la de Ritchie y Hanway (1982).

Los primeros trabajos tendientes a interpretar los procesos vitales de los vegetales datan de la primera mitad del siglo XVIII y fueron concebidos, por investigadores europeos, sobre la idea de que una planta alcanza un estado de crecimiento o desarrollo dados cuando ha recibido una cierta cantidad de calor, sin considerar la duración del periodo. Este razonamiento dio origen a la teoría de las “unidades calóricas”, basadas en la sumatoria de las temperaturas diarias del aire entre fases del ciclo vegetal o durante la estación total de crecimiento, con el propósito de

obtener un valor considerado constante para el cultivar, cualquiera fuera la época o lugar de siembra. Esta aproximación al problema considera que las temperaturas del aire representan la energía disponible que las plantas habrán de utilizar para su ciclo evolutivo (Wang, 1960).

En maíz, la temperatura es la principal causa de variación anual en sus períodos de crecimiento y desarrollo. De esa forma, la relación entre temperatura y desarrollo sustentó la elaboración de los modelos para el cálculo del tiempo térmico (a través de funciones de ajustes lineales, exponenciales o mediante ecuaciones más complejas) ampliamente usados para predecir el momento de ocurrencia de distintos sucesos fenológicos en maíz, basados en la acumulación de grados-día (Brown, 1978; Bunting, 1976; Tollenaar *et al.*, 1979; Coelho y Dale, 1980; Lozada y Angelocci, 1999).

La temperatura no afecta directamente la duración de una etapa, sino que afecta la tasa de desarrollo (la velocidad con la que transcurren eventos de desarrollo determinados por una unidad de tiempo calendario) y como consecuencia de este efecto la duración es alterada. Así, a mayor temperatura habrá una tasa de desarrollo proporcionalmente mayor y se requerirán menos días para que transcurra una etapa en particular. Sin embargo, se deben tener en cuenta las temperaturas cardinales de desarrollo (temperatura base y crítica) que por definición corresponden a aquellas temperaturas en las cuales no se registra desarrollo alguno. La mínima duración de una etapa ontogénica, desde el punto de vista de la temperatura, ocurre cuando la planta se expone a temperaturas óptimas, ya que es la temperatura a la cual la tasa de desarrollo presenta su máximo valor (Miralles *et al.*, 2006).

La duración de las etapas puede presentar una gran variabilidad según el genotipo y las condiciones ambientales consideradas. Se conoce que los distintos genotipos sembrados en las mismas fechas o en fechas diferentes varían en el número de días a floración. Estas modificaciones en la fenología y estructura del cultivo se deben a la respuesta del mismo a factores tales como la temperatura y el fotoperiodo, que pueden variar significativamente entre zonas de cultivo en la Argentina (Cirilo y Andrade, 1994).

Dos estados fenológicos delimitan una fase fenológica. Así hablamos, por ejemplo, de la fase siembra-emergencia, anthesis-madurez o siembra-madurez. La

duración de los estadios fenológicos o fase fenológica medida en días depende de la temperatura. Normalmente, la relación entre duración de una fase y temperatura no es lineal (Figura 1a. ANEXO). Por este motivo, se prefiere caracterizar la duración de una fase a través de su inversa (Figura 1b. ANEXO). Esta función inversa de la duración se llama tasa de desarrollo y su unidad es  $\text{día}^{-1}$ . La linealización que surge de usar la tasa de desarrollo permite definir tres temperaturas cardinales (Figura 1b. ANEXO). La temperatura base ( $T_b$ ) es la temperatura a la que la tasa de desarrollo es cero (Ritchie y NeSmith, 1991); para que haya desarrollo la temperatura debe ser mayor a la  $T_b$ . La tasa de desarrollo aumenta linealmente con temperaturas entre  $T_b$  y  $T_o$  (temperatura óptima) y vuelve a declinar más o menos linealmente en el rango entre  $T_o$  y la temperatura máxima,  $T_m$ . (Figuras 1a y 1b. ANEXO). Si la temperatura ambiente es inferior a  $T_b$  o superior a  $T_m$ , el desarrollo prácticamente se detiene y la duración de la fase tiende a ser infinita. Las diferentes fases fenológicas pueden tener diferentes temperaturas cardinales (Summerfield *et al.*, 1989; Grimm *et al.*, 1994).

Si bien se han referido valores de temperatura base de desarrollo para las distintas etapas ontogénicas en maíz entre  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Derieux y Bonhomme, 1986) y  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Tollenaar *et al.*, 1979) según distintos genotipos, los modelos de desarrollo de más amplia difusión suponen una temperatura base cercana a los  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para la mayoría de los procesos considerados (Kiniry y Bonhomme, 1991; Kiniry, 1991).

La temperatura óptima por encima de la cual la velocidad de desarrollo deja de aumentar en forma lineal, se ubica entre  $30$  y  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Tollenaar *et al.*, 1979). Por otra parte, la temperatura máxima a la cual cesa el desarrollo en maíz se encuentra entre  $40$  y  $44\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Kiniry y Bonhomme, 1991).

La diferenciación foliar en el meristema apical durante su fase vegetativa responde lineal y positivamente a la temperatura en el rango térmico comprendido entre sus valores base y óptimo (Hardacre y Turnbull, 1986; Kiniry y Ritchie, 1981).

La temperatura regula también la aparición de hojas en maíz. La velocidad de aparición de puntas de hojas (extremos foliares visibles en el cogollo formado por las últimas hojas en expansión) es constante a partir de la segunda hoja, en condiciones de temperatura uniforme (Kiniry y Bonhomme, 1991), y está en función de las unidades

térmicas acumuladas, cuando se trabaja en condiciones de campo (Kiniry y Ritchie, 1981).

Si bien el tiempo de expansión de las hojas (desde la aparición de la punta de la hoja hasta la exposición de su lígula) varía con la hoja que se esté considerando (Kiniry y Bonhomme, 1991), varios trabajos indican una estrecha relación entre la velocidad de aparición de hojas totalmente expandidas y la temperatura (Hesketh y Warrington, 1989; Kiniry, 1991).

La duración del periodo entre el cambio de estado del ápice y la emergencia de la panoja en maíz, está determinada por el número de hojas a desplegar y la velocidad de aparición de las hojas (Tollenaar *et al.*, 1979; Kiniry, 1991). Cuanto mayor sea el número de hojas, mayor será la acumulación de unidades térmicas necesarias para completar la fase; y cuanto mayor sea la temperatura en el periodo, más rápido se desplegarán sus hojas. En consecuencia, la influencia de la temperatura sobre la duración de la fase de inducción a floración se ejerce a través de dos procesos independientes: 1) su incidencia sobre el número final de hojas, a través de su influencia sobre la producción de primordios foliares en el ápice, y 2) su efecto sobre la velocidad de aparición de hojas. Siendo de este modo la temperatura el principal factor modulador del desarrollo durante dicha fase (Ritchie y NeSmith, 1991).

Durante el periodo que transcurre entre la inducción floral en las yemas axilares y el panojamiento, tiene lugar la diferenciación de espiguillas en la espiga. Este proceso también está sometido a control térmico. Las diferencias genotípicas en la duración de este periodo modifican el número de espiguillas diferenciadas, dando como resultado espigas de distinta longitud.

La duración del periodo entre la floración y la madurez fisiológica, para un genotipo dado, depende especialmente de la temperatura (Kiniry y Bonhomme, 1991). La tasa de acumulación de materia seca en el grano, durante la etapa lineal de llenado efectivo, está fuertemente controlada por la temperatura. En consecuencia, la duración de la etapa depende del peso final que puede lograr el grano y de la mayor o menor velocidad en alcanzar ese peso en función de la temperatura (Cirilo y Andrade, 1996).

La elección de la fecha de siembra del cultivo es una decisión de manejo frecuentemente condicionada por razones operativas (oportunidad de labranzas,

disponibilidad de insumes) o estratégicas (escape a adversidades climáticas o biológicas), por lo que resulta conveniente conocer e interpretar los efectos de la variación del momento de implantación del cultivo sobre su productividad. En zonas de clima templado los niveles de radiación, los registros térmicos y el fotoperíodo varían marcadamente a lo largo del año. Tales factores ambientales tienen una gran influencia sobre el cultivo de maíz. La variación de la fecha de siembra, en la mayor parte de los ambientes, modifica las condiciones ambientales a las que se ve expuesto el cultivo a lo largo de la estación de crecimiento. Cuando la siembra se retrasa, las mayores temperaturas que experimenta el cultivo durante sus etapas iniciales de crecimiento, provocan la aceleración de su desarrollo (Andrade, 1992).

El retraso de la siembra de maíz desde septiembre a diciembre, acorta la duración del ciclo de crecimiento del cultivo debido, principalmente, al acortamiento del período siembra-floración. En tales condiciones, tanto el adelantamiento del momento de la emergencia del cultivo como el acortamiento de los períodos entre emergencia y cambio de estado del ápice, y entre éste y la floración, muestran una estrecha asociación con la temperatura. En ambientes templados el atraso de la fecha de siembra, debido a la mayor oferta ambiental modifica el número total de hojas diferenciadas. Al retrasar la siembra del cultivo, las mayores temperaturas aceleran la velocidad de aparición de hojas, acortando el tiempo empleado por cada hoja para desplegarse, y reduciendo el tiempo necesario para llegar a la floración (Cirilo, 1994).

La predicción de los eventos fenológicos es de suma importancia en diversos aspectos prácticos de la agronomía. Desde 1735 vienen siendo aplicados, como resultado de observaciones empíricas, los llamados modelos de tiempo térmico, sumas térmicas o grados-día para lograr la identificación de mejores épocas de siembra, el escalonamiento de fecha de cosecha, planeamiento de las actividades agrícolas y también en programas de mejoramiento (Warrington y Kanemasu, 1983).

En los modelos de producción es necesario conocer la ocurrencia de las etapas críticas de los cultivos ¿cuando se producen? y ¿cómo el ambiente las afecta?, estas respuestas permiten proporcionar información útil para las decisiones de manejo y para la cosecha (Daughtry *et al.*, 1984).

Un modelo de simulación es un programa que permite describir mediante fórmulas matemáticas diferentes procesos, mecanismos e interacciones que ocurren dentro de un sistema biológico, y que permite representar conceptualmente una simplificación del sistema de producción (Angus, 1990).

Utilizando distintas fórmulas de cálculo de tiempo térmico, los modelos permiten cuantificar el grado de riesgo de las estrategias de producción elegidas, en un momento anterior a la implantación del cultivo. Ello es posible a través del análisis que combina la variabilidad genética y ambiental en una serie histórica de datos climáticos diarios (Guevara, 2005).

Los modelos de simulación de cultivos contienen una gran variedad de niveles de detalle. El mínimo necesario para determinar el impacto del riesgo climático incluye la duración del crecimiento, la tasa de crecimiento (TCC), la fracción de la masa total que es particionada a los componentes del rendimiento y el balance de agua y nitrógeno. Una concepción de modelo ideal para determinar ese riesgo debería evaluar el desarrollo de fases de las plantas, para determinar la sensibilidad de los estadios de crecimiento y la duración total del ciclo. El análisis de la morfología de la planta para evaluar el número de hojas, el área foliar, tasa de crecimiento de la biomasa y el tamaño potencial de los componentes del rendimiento, permite definir con mayor precisión la incidencia de estos procesos en la partición de la biomasa aérea y radical (Ritchie, 1990).

Si en ambientes distintos se consideran distintos factores ambientales que desatan las distintas respuestas genotípicas observadas y las bases fisiológicas de dichas respuestas, los criterios de elección de genotipos se podrían definir en términos de caracteres o procesos. La utilización de modelos contribuye a mejorar la eficacia en la elección de cultivares que manifiesten reacciones adaptativas deseables a los tipos de ambiente que se presentan en un sistema de producción (Lawn e Imrie, 1991).

El cálculo del tiempo térmico (TT) es un sistema basado en la calificación de unidades de calor para predecir la madurez. Es más preciso en la determinación de la madurez que el sistema “días hasta cosecha”, ya que el crecimiento de la planta de maíz está directamente relacionada con la acumulación de calor en el tiempo más que el número de días naturales a partir de la siembra. El sistema de TT proporciona información para la elección de los híbridos sobre la fecha que van a madurar, dada la

ubicación y la fecha de siembra, ya que esta varía entre localidades y años, permitiéndole al agricultor seguir el progreso del cultivo a través de la estación de crecimiento, y ayudándole en la planificación de la fecha de cosecha (Brown, 1963; Earl, 2008).

A la hora de predecir las fechas de floración, los modelos térmicos arrojaron un dato más confiable y preciso que los días calendario. Se observaron mejoras significativas en el sesgo y la precisión cuando los modelos mixtos fueron utilizados para predecir las fechas de floración y madurez fisiológica, numerosos métodos empíricos y teóricos se han elaborado y comparado para estimar estos eventos en el maíz. A pesar de las pequeñas diferencias entre los métodos para la estimación de una determinada fase de desarrollo, todos los métodos de acumulación de unidades térmicas son mejores indicadores del desarrollo del cultivo que los días calendario (Daughtry *et al.*, 1984).

A la hora de predecir eventos fenológicos en maíz existen diferentes métodos de cálculo con diferentes opiniones sobre la precisión de cada uno. Para calcular el tiempo térmico (TT) Monteith (1977) propone utilizar el método simple, mientras que Villalobos (1998) sugiere emplear el método compuesto debido a la mayor precisión de este último. En primer lugar para el método simple se debe determinar la temperatura media del día. Esto suele hacerse mediante la adopción de las temperaturas máximas y mínimas de cada día, sumarlos y dividir por dos. La temperatura base de desarrollo se resta de la temperatura media para dar una unidad calórica diaria. Las unidades calóricas diarias se suman (acumulándose) en la estación de crecimiento (Gilmore y Rogers, 1958; Arnold, 1975).

Por otro lado, el método de cálculo compuesto, requiere para el cálculo de tres fórmulas distintas, las cuales son utilizadas de acuerdo al principio de desarrollo del cultivo de maíz que dice, que la tasa de desarrollo crece desde una temperatura base inferior ( $T_1$ ) hasta la temperatura óptima ( $T_0$ ) y que desde ahí decrece hasta valer cero para la temperatura base superior ( $T_2$ ) (Figura 1b. ANEXO), reconociéndose a  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_0$  como las temperaturas cardinales de un cultivo. Asumiendo que la temperatura a largo del día varía de un mínimo a un máximo ( $T_m$  y  $T_M$ ) se puede deducir que el valor

de tiempo térmico esta en función de estas temperaturas cardinales (McMaster y Wilhelm, 1997; Raes *et al.*, 2009).

### **I. 1. HIPÓTESIS**

El cálculo del tiempo térmico mediante el método compuesto presenta mejor valor predictivo que el cálculo simple.

### **I. 2. OBJETIVO GENERAL**

Comparar fórmulas de cálculo de tiempo térmico (cálculo simple y cálculo compuesto); y la ocurrencia fenológica de los distintos procesos fisiológicos desde siembra a madurez en el cultivo de maíz.

## **II. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **II. 1. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO**

#### **II. 1. a. CLIMA**

La región de Río Cuarto presenta un clima templado sub-húmedo, con precipitaciones que suelen exceder la evapotranspiración en los meses de primavera y otoño y con déficits puntuales en verano e invierno (Seiler *et al.*, 1995).

Analizando desde un punto de vista global el área, se puede concluir que se está frente a un régimen de precipitaciones irregular tipo monzónico, con un semestre lluvioso (octubre a marzo), que concentra el 81-82 % del agua pluvial, y un semestre seco (abril a septiembre), con solo el 18-19 % del agua precipitable (Carta de Suelos de la Republica Argentina, 1994).

La precipitación media anual normal es de 678,2 mm con valores extremos mínimos de 405 mm en 2001 y máximos de 1134 mm en 1998, para la los últimos 10 años; cabe destacar que la precipitación media normal durante el ciclo del cultivo (Septiembre-marzo) es de 685 mm (Cátedra Agro meteorología U.N.R.C., 2007).

El régimen térmico es mesotermal, la temperatura media del mes más cálido (enero) es 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 es el 25 de mayo y la de última es el 12 de septiembre, siendo el período libre de heladas 255 días en promedio.

La localidad de Venado Tuerto, provincia de Santa Fe presenta un clima templado subhúmedo-húmedo, presentando oscilaciones interanuales entre las condiciones húmedas y semiáridas, que caracterizan al sector occidental de la pradera pampeana. Las precipitaciones suelen exceder la evapotranspiración en los meses de primavera, con un déficit puntual en los meses de verano (diciembre a febrero) y con excesos de febrero a noviembre.

Analizando desde un punto de vista global el área, se puede concluir que el régimen de precipitaciones es de tipo monzónico, con tres trimestres lluviosos (septiembre a mayo), que concentra el 85 % del agua pluvial aproximadamente, y un trimestre algo más seco (junio a agosto), con solo el 15 % del agua precipitable.

La precipitación media anual normal es de 900 mm aproximadamente con valores extremos mínimos de 575 mm en 2005 y máximos de 1218 mm en 1991, para la

los últimos 20 años; destacando que la precipitación media normal durante el ciclo del cultivo (octubre-marzo) es de 760 mm.

El régimen térmico es mesotermal, con una temperatura media anual de 16,3 °C. La temperatura media del mes de enero es de 23,9 °C, siendo la temperatura máxima media de la estación cálida de 30 °C y con una temperatura mínima media de 15,5 °C. La temperatura media del mes más frío (Julio) es de 9,8 °C con una temperatura mínima media de 5 °C.

El periodo libre de heladas es mayor a los 8 meses (270 días aproximadamente) en promedio.

Los tiempos térmicos fueron calculados usando los datos suministrados por las estaciones meteorológicas próximas a los cultivos (en un radio de 500 m), aproximadamente para ambas localidades en las cuatro campañas en estudio.

Si bien los valores térmicos y de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo (Octubre-Marzo) para las localidades de Río Cuarto y Venado Tuerto son similares, los valores de humedad relativa ambiente, evapotranspiración, precipitaciones durante el invierno y la capacidad del suelo para retener agua marcan la diferencia productiva entre estos ambientes.

## **II. 1. b. FISIOGRAFÍA**

La zona de Río Cuarto se caracteriza por presentar planicies intermedias suavemente onduladas, con presencia de médanos aislados asociados a lomas muy suavizadas. El relieve es normal – subnormal suavemente ondulado, con pendientes medias y largas de gradientes de hasta 1,5% (Cisneros *et al.*, 1997). En cuanto a Venado Tuerto se encuentra en la pampa ondulada, con un relieve suavemente ondulado, con pendientes poco pronunciadas (menores al 1%), con bajos inundables y series de lagunas (Carta de Suelos de la República Argentina, 1994).

## **II. 1. c. CARACTERIZACION DEL CULTIVO**

Los materiales analizados fueron 5 híbridos de maíz comerciales de dos compañías productoras de híbridos. Los mismos presentan distintas características en cuanto a longitud de ciclo (cortos, intermedios y largos), con diferentes requerimientos

térmicos para cumplir sus etapas fenológicas, tanto entre híbridos de distinta empresa como entre híbridos de la misma empresa. Los materiales de la empresa Nidera SA (AX 882 CL MG y AX852 MG) corresponden a híbridos simples, con grano semi-dentado y ciclo intermedio ( $1700\text{ }^{\circ}\text{C día}^{-1}$  entre siembra y  $R_6$ ) los cuales fueron utilizados en las dos localidades (Venado Tuerto y Río Cuarto) en las campañas 2006/2007 y 2007/2008 en la localidad de Venado Tuerto y en la campaña 2009/2010 en la localidad de Río Cuarto. En cuanto a los materiales de la empresa Syngenta (NK 910 TDMax, NK 900 TDMax y NK 880 TDMax), híbridos simple con grano colorado duro, presentan las siguientes diferencias de ciclo, los dos primeros (NK 910 TDMax y NK 900 TDMax) son de ciclo largo ( $1900\text{ }^{\circ}\text{C día}^{-1}$  entre siembra y  $R_6$ ), mientras que el tercero (NK 880 TDMax) es de ciclo intermedio ( $1800\text{ }^{\circ}\text{C día}^{-1}$  entre siembra y  $R_6$ ) siendo utilizados en la campaña 2010/2011 en la localidad de Río Cuarto. Los datos de tiempo térmico correspondientes para determinar la fecha de ocurrencia de las diferentes etapas de los híbridos fueron proporcionados por las empresas, considerando que para el cálculo de ese valor la empresa Nidera Semillas utiliza para el cálculo temperatura base ( $T_b$ )  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que la empresa Syngenta utiliza temperatura base ( $T_b$ )  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  con lo cual los ciclos de sus materiales son más largo.

## **II. 2. DISEÑO EXPERIMENTAL**

El diseño experimental utilizado fue factorial, con un arreglo espacial en parcelas divididas. Se dispusieron dos parcelas principales en tres bloques. Sobre las parcelas principales se aleatorizaron las fechas de siembra y estas fueron divididas en sub-parcelas donde se aleatorizaron los híbridos. Las variables estudiadas fueron las etapas fenológicas del cultivo. El ensayo fue repetido durante cuatro campañas (2006/2007, 2007/2008, 2009/2010 y 2010/2011) para incrementar los datos y la variabilidad de los mismos, generando resultados más confiables. Para el factor fecha de siembra se probaron dos niveles: temprano (principios de octubre) y tardío (fines de noviembre) y para el factor híbrido se usaron los siguientes materiales: AX 882 CLMG y AX 852 MG para las campañas 2006/2007, 2007/2008 (Venado Tuerto) y 2009/2010 (Río Cuarto) y NK 910 TDMax, NK 900 TDMax y NK 880 TDMax para la campaña 2010/2011 (Río Cuarto).

En Río Cuarto el tamaño de las parcelas fue de 9,36 m de ancho, por 10 m de largo. El cultivo se sembró en la campaña 2009/2010 con una densidad de 70.000 semillas por hectárea, empleando para ello los híbridos simples AX 882 CL MG y AX 852 MG de Nidera, en tanto que la segunda fecha de siembra las parcelas fueron del mismo tamaño y la densidad utilizada fue de 65.000 semillas por hectárea para los híbridos anteriormente mencionados. Este procedimiento se repitió en la campaña 2010-2011 utilizando los híbridos NK 910 TDMax, NK 900 TDMax y NK 880 TDMax de la empresa Syngenta. Con respecto a Venado Tuerto en las campañas 2006-2007 y 2007-2008 la densidad de siembra fue de 80.000 semillas por hectárea para lo primera fecha y de 75.000 semillas por hectárea para la segunda, siendo las parcelas del mismo tamaño.

**Tabla 1.** Valores de TT medios de cada híbrido, proporcionados por las compañías proveedoras de cada genética, para los periodos emergencia-floración y floración-madurez fisiológica.

	Emergencia- Floración	Floración-Madurez fisiológica
AX 882 CLMG	765 °C día <sup>-1</sup>	800 °C día <sup>-1</sup>
	75 días	70 días
AX 852 MG	730 °C día <sup>-1</sup>	800 °C día <sup>-1</sup>
	72 días	58 días
NK 900 TDMax	705 °C día <sup>-1</sup>	1000 °C día <sup>-1</sup>
	76 días	76 días
NK 910 TDMax	867 °C día <sup>-1</sup>	1000 °C día <sup>-1</sup>
	79 días	77 días
NK 880 TDMax	845 °C día <sup>-1</sup>	900 °C día <sup>-1</sup>
	77 días	72 días

Se sembraron 18 surcos por parcela con una sembradora neumática marca Agrometal de 9 surcos distanciados a 0,52 m, con equipo fertilizador, sobre un rastrojo de soja para ambas localidades en condiciones de secano.

En todos los ensayos se realizaron controles químicos para mantener el cultivo libre de malezas.

## **II. 3. DETERMINACIONES REALIZADAS**

### **II. 3. a. FENOLOGIA DEL CULTIVO**

Se determinaron los estadios fenológicos del cultivo como emergencia (E), aparición de estigmas ( $R_1$ ) y madurez fisiológica ( $R_6$ ) según la escala propuesta por Ritchie y Hanway (1982), registrándose la fecha respectiva de los estadios E,  $R_1$  y  $R_6$ ; para la determinación se realizó el conteo de diez plantas consecutivas en cinco estaciones de muestreo por parcela en los ensayos de las cuatro campañas. Esta escala fenológica utiliza caracteres morfológicos externos (macroscópicos). En ella se pueden describir dos grandes períodos: vegetativo y reproductivo. El primero se subdivide en estadios identificados con la letra V y un subíndice, que señala el número de orden de la última hoja completamente expandida (lígula visible). El período reproductivo, subdividido en estadios identificados con la letra R y un subíndice, comienza con la emergencia de los estigmas ( $R_1$ ) y finaliza con la madurez fisiológica de los granos ( $R_6$ ). Las subdivisiones del período reproductivo corresponden a distintos momentos del llenado de granos.

### **II. 3. b. INFORMACIÓN CLIMÁTICA:**

Para poder analizar la oferta climática en relación con la fenología del cultivo, se utilizaron los valores registrados en las estaciones meteorológicas automáticas para las campañas 2006/2007 y 2007/2008 en la localidad de Venado Tuerto, provincia de Santa Fe; y para las campañas 2009/2010 y 2010/2011 para la localidad de Río Cuarto, provincia de Córdoba.

### **II. 3. c. TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN**

Precipitaciones y temperatura máxima y mínima durante el ciclo del cultivo registradas diariamente mediante la estación meteorológica automática ubicada en el Campo Experimental de la Universidad Nacional de Río Cuarto para los ensayos

realizados durante las campañas 2009/2010 y 2010/2011; y mediante la estación meteorológica automática ubicada en el Campo Experimental de NIDERA S.A. para los ensayos realizados en las campañas 2006/2007 y 2007/2008.

## II. 4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Los datos de temperatura obtenidos de las estaciones meteorológicas fueron procesados con las dos fórmulas de cálculo de tiempo térmico (fórmula simple y fórmula compuestas). Los métodos de cálculo utilizado fueron:

### ◆ *Cálculo simple*

El cálculo de TT según el método simple se realizó en base a la ecuación I (Monteith *et al.*,1977):

$$TT = \sum \frac{(T_{\max} (^{\circ}C) + T_{\min} (^{\circ}C))}{2} - T_b (^{\circ}C) \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde TT es el tiempo térmico que acumuló para una etapa determinada de la ontogenia el cultivo,  $T_{\max}$  la temperatura máxima diaria,  $T_{\min}$  la temperatura mínima diaria y  $T_b$  la temperatura base, utilizando las temperaturas recomendadas por las empresas proveedoras de los híbridos, siendo la temperatura base ( $T_b$ ) 8 °C para los híbridos de la empresa Nidera Semillas y temperatura base ( $T_b$ ) 10 °C para los híbridos de la empresa Syngenta.

### ◆ *Cálculo compuesto*

Se asume que la tasa de desarrollo crece desde una temperatura base inferior ( $T_1$ ) hasta la temperatura óptima ( $T_0$ ) y que desde ahí decrece hasta valer cero para la temperatura base superior ( $T_2$ ) (Figura 1b. ANEXO). Asumiendo que la temperatura a lo largo del día varía linealmente entre los valores extremos ( $T_m$  y  $T_M$ ) se puede deducir el valor del

tiempo térmico en función de la temperatura mínima y máxima, para los distintos casos (Villalobos, 1998):

1. Si  $T_m$  y  $T_M$  se hallan en el intervalo  $(T_1, T_0)$  entonces:

$$TT = 0,5(T_m + T_M) - T_1 = T_{med} - T_1 \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde  $T_{med}$  es la temperatura media del día.

2. Si  $T_m < T_1$  y  $T_M$  se halla en el intervalo  $(T_1, T_0)$  entonces:

$$TT = \frac{(T_M - T_1)^2}{2(T_M - T_m)} \quad (\text{Ecuación 3})$$

3. Si  $T_m$  se halla en el intervalo  $(T_1, T_0)$  y  $T_M > T_0$  entonces:

$$TT = \frac{T_M(T_0 - T_1)(T_2 - 0,5T_M) + T_m(T_2 - T_0)(T_1 - 0,5T_m) - 0,5T_0^2(T_2 - T_1)}{(T_M - T_m)(T_2 - T_0)} \quad (\text{Ecuación 4})$$

El ajuste comparativo de ambos modelos propuestos se realizó mediante la comparación entre las fechas de ocurrencia fenológica simuladas por éstos hasta acumular lo indicado por cada semillero para alcanzar esta etapa y la fecha de ocurrencia observada a campo, usando para ello el análisis de regresión lineal, la eficiencia del modelo E, el Índice de coincidencia D, la raíz cuadrada media del error RSME, su relación porcentual con el rendimiento promedio %RSME, según Willmott (1982), que permite establecer en qué medida los valores observados se aproximan a los simulados.

$$D = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \right] \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde,

D, índice de coincidencia.  
 n, número de casos.  
 Pi, datos simulados.  
 Oi, datos observados.  
 P̄i, siendo Pi -  $\bar{O}$   
 Ōi, siendo Oi -  $\bar{O}$

$$RMSE = \left[ n^{-1} \sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2 \right]^{0.5} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde,  
 RMSE, raíz cuadrada media del error, en días  
 n, número de casos.  
 Pi, datos simulados.  
 Oi, datos observados

$$\% RMSE = \frac{RMSE}{P} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde,  
 %RMSE, porcentaje raíz cuadrada media del error, me indica en qué proporción los datos pueden ser erróneos.  
 RMSE, raíz cuadrada media del error, en días.  
 P, promedio de los valores simulados.

$$E = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2} \right] \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Donde,  
 E, eficiencia del modelo.  
 n, número de casos.  
 Pi, datos simulados.  
 Oi, datos observados.

Todos los resultados fueron analizados mediante un modelo de regresión simple, con un nivel de significación  $\alpha = 0,05$ , utilizando el paquete estadísticos InfoStat (2008).

Estos índices se utilizan, debido a que Fox (1981) sugiere que la correlación entre el modelo de predicción y los datos observados, comúnmente descrito por el coeficiente de correlación de Pearson producto-momento (r) y el coeficiente de regresión

(R<sup>2</sup>), son a menudo una medida insuficiente y engañosa de precisión. Willmott y Wicks (1980) observaron que los valores "altos" o estadísticamente significativa de r y R<sup>2</sup>, de hecho puede ser engañosa, ya que a menudo no se relacionan con el tamaño de las diferencias entre lo observado (O) y lo simulado (P). Fox (1981) resume que RMSE se encuentra entre las mejores medidas generales de funcionamiento del modelo, ya que resume la diferencia promedio en las unidades de O y P.

### **III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **III.1. TEMPERATURA:**

Considerando que cuando las temperaturas son inferiores a la base de 8 °C (Jones y Kiniry, 1986), el cultivo de maíz no presenta desarrollo; en lo que se refiere a las siembras tempranas se observaron temperaturas por debajo de la base retrasando la emergencia y el desarrollo en los primeros estadios, no siendo así para la segunda fecha de siembra donde no se registraron temperaturas inferiores a las base de 8 °C. Cabe destacar que a partir de los 30 – 34°C (Tollenaar *et al.*, 1979) la velocidad de desarrollo del cultivo de maíz deja de ser lineal, y que en pocas ocasiones dicha temperatura fue superada, se considera que la misma no influyó en la normal tasa de crecimiento del cultivo. En referencia a las temperaturas máximas, no se registraron valores superiores a la máxima de 42°C (Kiniry y Bonhomme, 1991), por consiguiente no fue afectando el normal desarrollo por temperaturas extremas.

Los tiempos térmicos fueron calculados usando los datos suministrados por las estaciones meteorológicas próximas a los cultivos.

Analizando los años utilizados para la evaluación de los métodos de cálculo, se puede observar que la campaña 2007-2008 presento los registros mensuales promedio más bajos de temperatura, tanto para las temperaturas mínimas como para las máximas. En cuanto a la campaña 2009-2010, las temperaturas mínimas promedio mensuales mayores de las cuatro campañas estudiadas, destacándose una diferencia importante en las temperaturas a partir del mes de enero. Para las campañas 2006-2007, 2007-2008 y 2010-2011 las temperaturas mínimas promedio a partir del mes de Enero fueron similares, destacándose de las ocurridas en la campaña 2009-2010.

En la campaña 2006-2007 en el mes de noviembre se pueden observar las mayores temperaturas en las cuatro campañas, siendo la segunda fecha de siembra la que menos tiempo tardó en emerger de las cuatro campañas. Las temperaturas máximas promedio a partir de mediados de diciembre hasta fines de febrero fueron similares en las campañas 2006-2007, 2007-2008 y 2010-2011; y en ningún caso superaron los 30 °C, generando que el cultivo se desarrolle normalmente, considerando que en ese periodo se produjo la floración en las cuatro campañas (Figuras 2 y 3. ANEXO).

Aunque el desarrollo del cultivo se ve afectado de manera disímil entre años para las distintas etapas del desarrollo (E, R<sub>1</sub> y R<sub>6</sub>), con lo cual se presentan longitudes de periodo diferentes, al utilizar el método de cálculo compuesto se predice con mayor exactitud el momento de ocurrencia de un periodo determinado, a pesar de las diferencias encontradas entre años. Es de destacar que el cultivo no varía la suma térmica entre años, siendo esto un carácter regulado genéticamente.

### **III. 2. PRECIPITACIONES**

#### **III. 2. a. RIO CUARTO CAMPAÑAS 2009/2010 Y 2010/2011**

Considerando que la precipitación media normal durante el ciclo del cultivo (septiembre-marzo) es de 685 mm mientras que en el mismo período de la campaña 2009-2010 el registro ascendió a 505 mm. Este déficit de 180 mm durante el ciclo del cultivo juega un rol muy importante en la definición de los estadios fenológicos y del rendimiento, pudiendo llegar a enmascarar las diferencias en productividad de los diferentes ambientes. Para la campaña 2010-2011 las precipitaciones registradas fueron de 761 mm, superando la media en un 10% aproximadamente.

Cuando se analiza el primer ciclo del cultivo se puede observar que el año presentó valores de precipitaciones inferiores a los valores normales para Río Cuarto en 180 mm. Estos déficits se registraron a partir del estadio fenológico R<sub>1</sub>, (04/01/10) para la primera fecha de siembra, pleno periodo crítico del cultivo, y hasta R<sub>6</sub> (08/03/10) las precipitaciones estuvieron por debajo de lo normal, principalmente a partir de la segunda década de Enero donde la temperatura y la radiación es mayor, generando un estrés en el cultivo afectando el normal desarrollo y rendimiento. En lo que respecta a la segunda fecha de siembra el déficit antes mencionado ocurrió para el estadio V<sub>10</sub>, cabe destacar

que para la ocurrencia de  $R_1$  (PCC) si bien las precipitaciones no fueron superiores a las normales para la época, no condicionaron el normal desarrollo del cultivo, obteniéndose debido a esto un mejor rendimiento con respecto a la primer fecha de siembra (Figura 4. ANEXO).

### **III. 2. b. VENADO TUERTO CAMPAÑAS 2006/2007 Y 2007/2008**

Es de destacar que la precipitación media normal durante el ciclo del cultivo (octubre-marzo) es de 760 mm mientras que en el mismo período de la campaña 2006-2007 el registro ascendió a 764 mm, con lo que no se registró déficit hídrico. En cuanto a la campaña 2007-2008 para el mismo periodo los registros pluviométricos ascendieron a 575 mm, este déficit hídrico de 185 mm durante el ciclo del cultivo fue muy importante en la definición de los estadios fenológicos y del rendimiento, pudiendo llegar a enmascarar las diferencias en la productividad de los diferentes ambiente. Un estrés hídrico grave incrementa la asincronía entre la caída del polen y la emergencia del estigma y con ello una falla en la polinización.

Según Boyer y Westgate (2004), los efectos de la sequía en maíz, cuando ocurre en etapas tempranas del desarrollo reproductivo, se manifiestan en una reducción del número de granos, debido principalmente a la absorción del ovario o esterilidad del polen; esto debido a que el déficit hídrico inhibe la fotosíntesis y disminuye el flujo de fotosintatos a los órganos en desarrollo. Para Ober *et al.* (1987) y Desai y Singh (2001) cuando el estrés ocurre durante el desarrollo del cigoto, se provoca el aborto o bien el saco embrionario puede ser afectado en su desarrollo induciendo una asincronía entre la antesis y la floración femenina.

### **III. 3. FENOLOGÍA DEL CULTIVO:**

Para este estudio, los periodos fenológicos considerados fueron: siembra a emergencia (S-E), siembra a aparición de estigmas (S- $R_1$ ), siembra a madurez fisiológica (S- $R_6$ ) y de aparición de estigmas a madurez fisiológica ( $R_1$ - $R_6$ ). Para ello se consideró el tiempo en días que demoró el cultivo en llegar desde la primer etapa fenológica a la segunda (ejemplo S-E). La predicción de eventos fenológicos es de suma importancia en diversos aspectos prácticos. La utilización de los días calendario a la hora de predecir

estos eventos fenológicos nos llevan a cometer serios errores. Confalone y Dujmovich (1999) encontraron, evaluando métodos de tiempos térmicos en comparación con la suma de los días calendario, que los coeficientes de variabilidad de este último fueron mayores a cualquiera de los métodos de tiempos térmicos.

En la Tabla 2 se presentan los valores medios observados y simulados para cada periodo considerado, teniendo en cuenta los cinco híbridos utilizados, las cuatro campañas evaluadas y las dos fechas de siembra realizadas para cada año y para cada híbrido.

**Tabla 2.** Valores medios acumulados en cada periodo fenológico para los datos observado, simulado simple y simulado compuesto.

<b>Periodo</b>	<b>Observado (días)</b>	<b>Simulado Simple (días)</b>	<b>Simulado Compuesto (días)</b>
S-E	9	11	11
S-R1	76	71	73
S-R6	146	135	139
R1-R6	72	62	64

Se considera que el método que presenta la menor variación con respecto a los valores observados, es la mejor expresión de los efectos de la temperatura sobre el crecimiento y desarrollo del cultivo. Para evaluar los resultados, Willmott (1982) propuso diferentes indicadores que relacionan las observaciones a campo y los resultados de la simulación. De esta forma obtener valores más exactos de predicción, disminuyendo el error de basarnos únicamente en los valores de  $r$  y  $R^2$ .

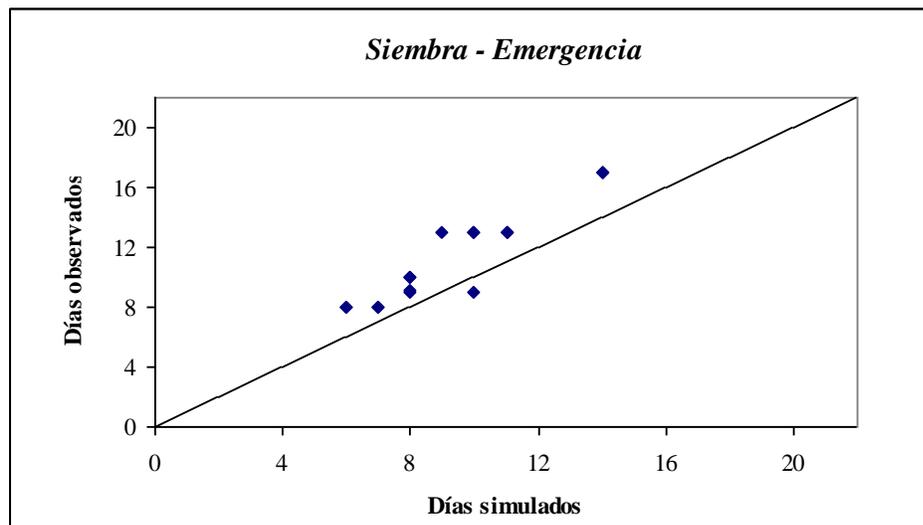
### **III. 4. PERIODOS EVALUADOS**

#### **Siembra - emergencia**

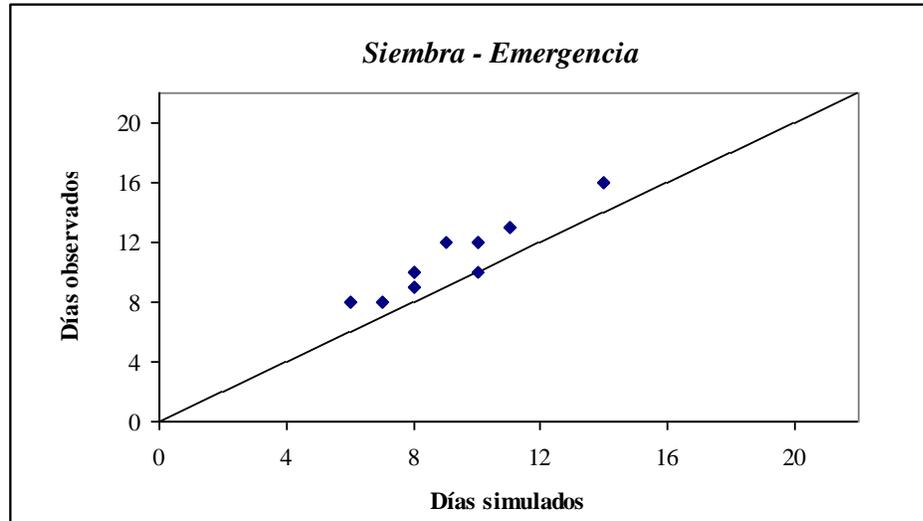
Al simular la duración de cualquier periodo, independientemente del método de predicción que se utilice, se busca que ésta sea similar a los días observados. Cuando

ambos valores coinciden (simulado y observado), se dice que el método empleado es el correcto y que la duración del periodo simulado es igual al tiempo observado. Cuando no se consigue esta igualdad, se dice que el modelo utilizado no es el apropiado para predecir la duración del periodo evaluado.

En las Figuras 5 y 6 se puede observar que los valores observados y los valores simulados en los modelos de cálculo simple y compuesto, están próximos a la pendiente ideal de regresión lineal simple (pendiente de 45 grados, donde los datos observados en X, se corresponden con los simulados en Y), lo que explica la similitud entre datos observados con los simulados. Para este periodo, el número de días calculados por ambos métodos de simulación no presentaron diferencias significativas con los datos observados con un valor de probabilidad de  $p= 0,0624$  para el método simple y  $p=0,4998$  para e método compuesto, con un nivel de significación  $\alpha= 0,05$  (Tabla 3 y 4) lo que indica que ambos modelos de simulación fueron apropiados para la predicción de la duración del periodo.



**Figura 5.** Análisis de regresión en el periodo S-E para los valores simulados por el cálculo simple (RMSE=2,6; D=0,84; E=0,1;  $r=0,9332$ ;  $R^2=0,8709$ ;  $p=0,0624$ ).



**Figura 6.** Análisis de regresión en el periodo S-E para los valores simulados por el cálculo compuesto (RMSE=2,1; D=0,88; E=0,41;  $r=0,9661$ ;  $R^2=0,9335$ ;  $p=0,4998$ ).

Analizando los indicadores de Willmott (1982), se observa que el índice de coincidencia (D) indica que los valores simulados en el método simple y compuesto se asemejan en un 84 y 88% a los valores observados respectivamente. El modelo simple tuvo una menor eficiencia (E) para predecir el número de días que duró el periodo con respecto al modelo compuesto (0,10 y 0,41 respectivamente). La raíz cuadrada media del error (RMSE) muestra cuantos días de error posee el cálculo del modelo con respecto a los días observados, indicando que el método de simulación compuesto posee menos error que el método simple (2,60 días y 2,10 días respectivamente). El % RMSE indica que simulando la duración del periodo con el método simple, se obtendrá un 23% de error con respecto a los valores observados, mientras que en el método compuesto el error es del 19%. El coeficiente de correlación (r) es altamente positivo en los dos métodos, indicando que cuanto más se acercan los valores simulados a los observados, mejor es el modelo (Tablas 3 y 4).

Si bien ambos métodos de simulación no proporcionan valores significativamente diferentes a los valores observados en este periodo, existen indicadores que muestran una mayor exactitud en el cálculo de días para el modelo compuesto.

**Tabla 3.** Resultados siembra-emergencia, método de cálculo simple.

RSME	2,60
%RSME	23%
D	0,84
E	0,10
r	0,9332
R <sup>2</sup>	0,8709
Valor p; O=S	0,0624
y=1,1666x + 0,4129	

**Tabla 4.** Resultados siembra-emergencia, método de cálculo compuesto.

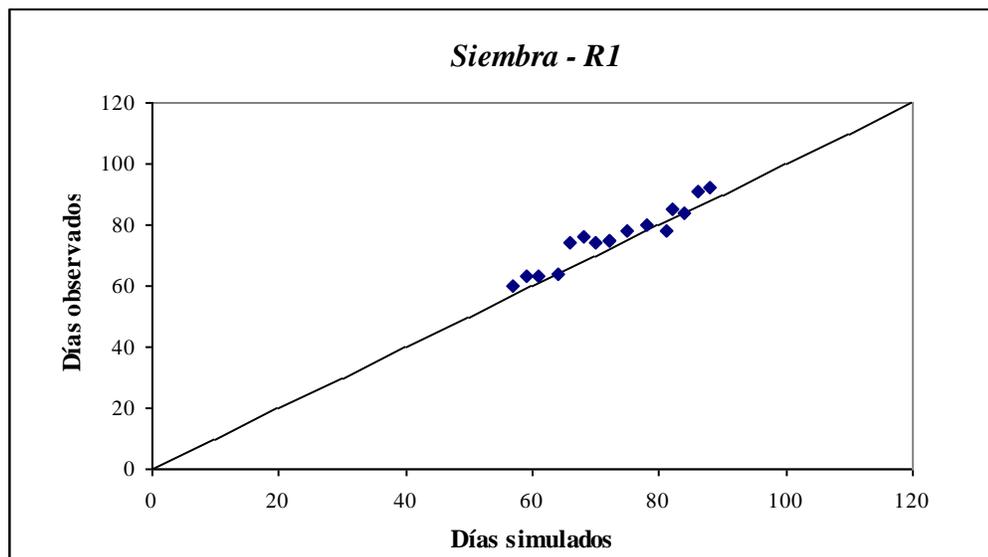
RSME	2,10
%RSME	19%
D	0,88
E	0,41
r	0,9661
R <sup>2</sup>	0,9335
Valor p; O=S	0,4998
y=1,0546x + 1,1859	

Vinocur y Ritchie (1996), mencionan que para los primeros estadios del cultivo, cuando el ápice se encuentra por debajo de la superficie del suelo, lo más exacto a la hora de medir el tiempo térmico es la utilización de la temperatura del suelo y no del aire, ya que el desarrollo del cultivo depende de la temperatura captada por el ápice. También considera que la diferencia es mayor, cuando las temperaturas del suelo y del aire posterior a la siembra son relativamente bajas, como ocurre en gran parte de la zona maicera argentina en siembras tempranas. El error en la estimación del desarrollo del cultivo puede ser bastante grande, si la temperatura del aire está cercana a la base. Esto coincide con los valores observados en este trabajo para la campaña 2007/2008 donde las temperaturas durante el mes de Octubre y Noviembre fueron bajas, ocasionando una mayor duración del periodo (Tabla 5 y Figura 2. ANEXO).

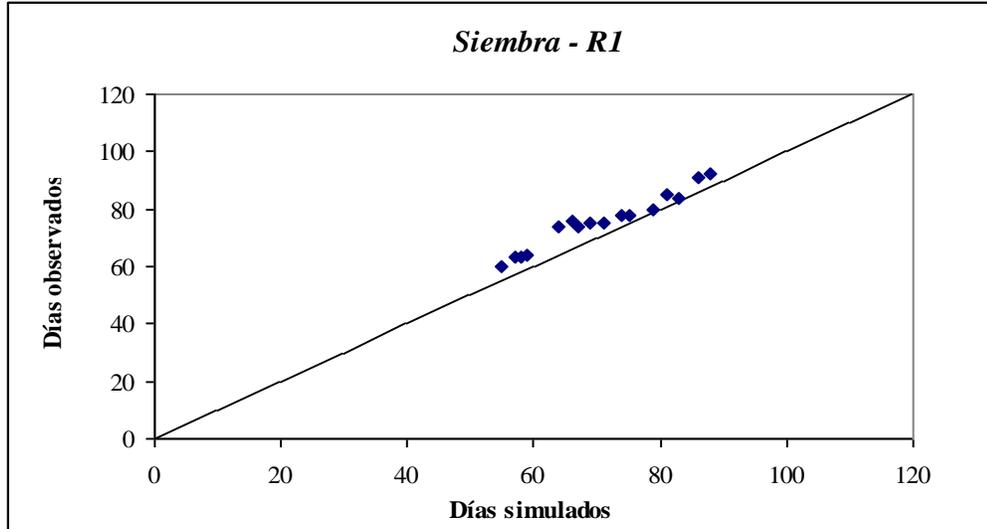
A diferencia de lo realizado y al considerar lo estudiado por Vinocur y Ritchie (1996) los cálculos del periodo (S-E), deberían efectuarse basándose en la temperatura del suelo, pudiendo concluir en la obtención de diferencias mayores entre los métodos de cálculo evaluados y en valores más exactos de los indicadores de efectividad de los modelos propuestos, coincidiendo con Blasón *et al.* (2002) quienes encontraron que en la fase siembra-emergencia, el subperiodo germinación-emergencia presenta tiempos térmicos que varían de acuerdo a la profundidad de siembra. Debido a que estas mediciones no son comunes y bastante complejas de obtener en grandes extensiones agrícolas no se utilizan.

### Siembra – R1

En cuanto al periodo comprendido entre la siembra (S) y aparición de los estigmas (R1), la simulación realizada por el método de cálculo simple muestra que los valores proporcionados por éste son próximos a la recta ideal, a diferencia de los valores que presenta el método de cálculo simple (Figura 7 y 8). Esto significa que para este periodo, el número de días simulados con el método de cálculo simple fueron significativamente diferentes con respecto a los valores observados, con un valor de probabilidad de  $p=0.0025$  (Tabla 6 y 7). En cambio, los días simulados con el método de cálculo compuesto, no se diferenciaron significativamente con respecto a los datos observados ( $p=0,1450$ ). Esto indica que el método simple predice una cantidad de días diferente (estadísticamente) a la cantidad de días observados, mientras que no existen diferencias significativas entre los tiempos simulados con el método compuesto y los tiempos observados, siendo este último el modelo más exacto para predecir la duración del periodo S-R1.



**Figura 7.** Análisis de regresión en el periodo S-R1 para los valores simulados por el cálculo compuesto (RMSE=4,68; D=0,95; E=0,81;  $r=0,9604$ ;  $R^2=0,9225$ ;  $p=0,145$ ).



**Figura 8.** Análisis de regresión en el periodo S-R1 para los valores simulados por el cálculo simple (RMSE=6,43; D=0,92; E=0,64; r=0,9378; R<sup>2</sup>=0,9484; p=0,0025).

En consecuencia, el índice de coincidencia (D) indica que los datos simulados en el método simple y compuesto se acercan en un 92 y 95% a los valores observados respectivamente, mostrando la tendencia del segundo método a ser más exacto al momento de predecir la duración del periodo S-R1. El modelo simple tuvo una menor eficiencia (E) para la predicción de los días que persiste el periodo con respecto al modelo compuesto (0,64 y 0,81 respectivamente). La raíz cuadrada media del error (RMSE) muestra cuantos días de error posee el cálculo con respecto a los días observados, indicando que el método de simulación compuesto posee menos error que el método simple (6,43 días y 4,68 días respectivamente). El % RMSE indica que para el método simple, se tendrá un 9% de error con respecto a los valores medio observados, mientras que en el método compuesto el mismo es del 6% (Tablas 6 y 7).

De manera similar al periodo S-E, el modelo de simulación compuesto es más exacto para estimar la duración del periodo S-R1 ya que los días simulados no difieren en la cantidad de días observados, siendo este método más exacto que el simple.

**Tabla 6.** Resultados siembra-R1, método de cálculo simple.

RSME	6,43
------	------

%RSME	9%
D	0,92
E	0,64
r	0,9738

$R^2$	0,9484
Valor p; O=S	0,0025
$=0,8815x + 13,382$	

%RSME	6%
D	0,95
E	0,81
r	0,9604
$R^2$	0,9225
Valor p; O=S	0,1450
$y=0,943x + 7,2092$	

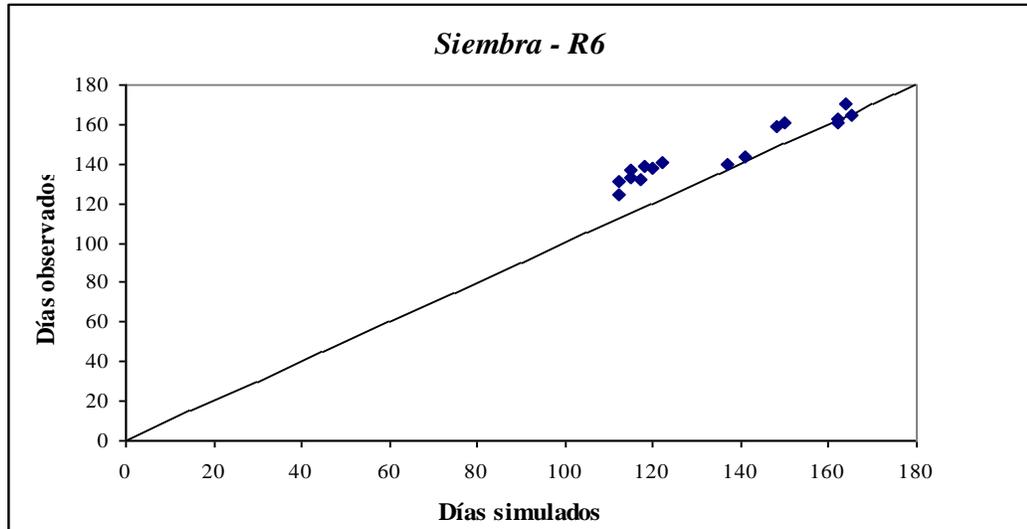
**Tabla 7.** Resultados siembra-R1, método de cálculo compuesto.

RSME	4,68
------	------

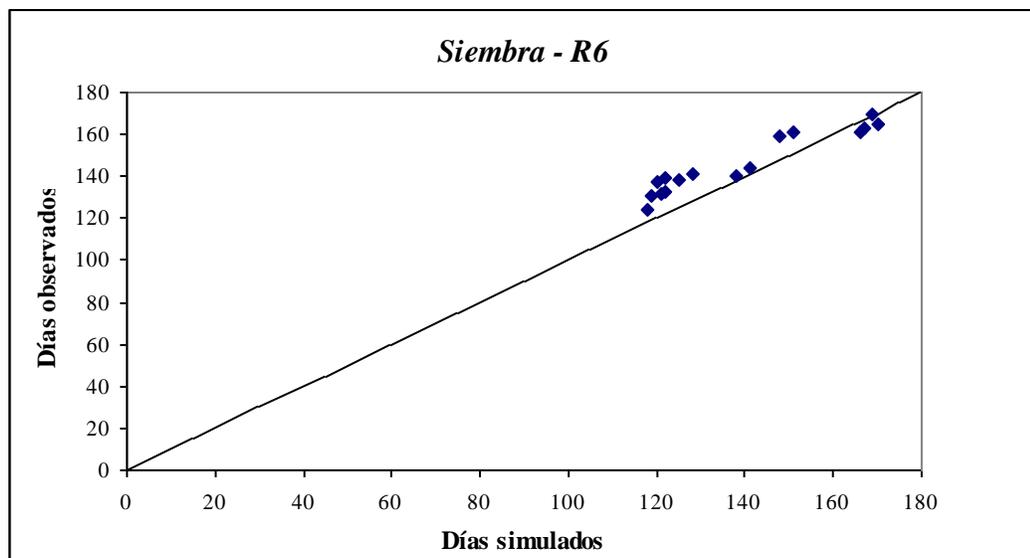
Es de suma importancia destacar que el periodo S-R1 es el más afectado con el atraso de la fecha de siembra, disminuyendo considerablemente el número días calendario requeridos para completar la etapa. Sin embargo, los tiempos térmicos correspondientes a la etapa (S-R1) no mostraron diferencias entre las siembras tempranas y las siembras tardías para una misma campaña (Tabla 8. ANEXO).

### **Siembra – R6**

En las Figuras 9 y 10 se puede apreciar que los datos observados se aproximan a la recta ideal en relación a los simulados, indicando similitud entre los modelos para la predicción en la duración del periodo S-R6. Teniendo en cuenta el valor de probabilidad de ambos métodos de predicción, se interpreta que existen diferencias significativas entre los días predichos por los dos modelos y los días observados, con  $p < 0,0001$  para ambos métodos de cálculo (Tabla 9 y 10). Esto indica que los dos modelos utilizados no son adecuados para predecir la duración del periodo ya que los días simulados no son iguales a los observados.



**Figura 9.** Análisis de regresión en el periodo S-R6 para los valores simulados por el cálculo simple (RMSE=15,59; D=0,82; E=-1,51;  $r=0,9566$ ;  $R^2=0,9151$ ;  $p<0,0001$ ).



**Figura 10.** Análisis de regresión en el periodo S-R6 para los valores simulados por el cálculo compuesto (RMSE=11,52; D=0,87; E=0,17;  $r=0,9555$ ;  $R^2=0,913$ ;  $p<0,0001$ ).

La determinación del índice de coincidencia (D) indica que los valores simulados por ambos modelos se acercan con un 82 y 87% a los valores observados. Si bien estos valores son semejantes entre los modelos, son un 10% menor a los obtenidos en los periodos analizados anteriormente. En ambos modelos la eficiencia de los métodos fue extremadamente baja. El modelo de cálculo simple presentó un valor E negativo, lo que indica que el modelo no es el adecuado para la predicción del periodo fenológico. De

acuerdo al valor de RSME, el método simple posee un error de 15,59 días en la predicción, mientras que en el otro método de cálculo el error fue de 4 días menos que el primero. Si se tiene en cuenta el porcentaje de RSME, vemos que el modelo propuesto por Villalobos (1998) tiene un 4% menos de error que el modelo simple.

Si se considera los altos valores que arrojan los coeficientes  $r$  y  $R^2$  se concluiría que los modelos son adecuados para predecir la duración del periodo, pero estos datos no coinciden con los detallados anteriormente. En este caso se coincide con lo sugerido por Fox (1981) quien mencionó que estos coeficientes son insuficientes y engañosos para predecir la duración del periodo fenológico.

**Tabla 9.** Resultados siembra-R6, método de cálculo Simple.

RSME	15,59
%RSME	12%
D	0,82
E	-1,51
r	0,9566
$R^2$	0,9151
Valor p; O=S	<0,0001
$y=0,669x + 55,813$	

**Tabla 10.** Resultados siembra-R6, método de cálculo Compuesto.

RSME	11,52
%RSME	8%
D	0,87
E	0,17
r	0,9555
$R^2$	0,913
Valor p; O=S	<0,0001
$y=0,6939x + 49,626$	

Estos valores pueden estar reflejando cambios fenológicos producidos por factores ambientales que generaron un estrés al cultivo en distintas etapas de desarrollo, y consecuentemente estar afectando la eficacia de predicción de los modelos. En tanto que si las temperaturas en las primeras etapas de desarrollo son muy altas y las precipitaciones son escasas, se estaría alterando el normal desarrollo; de la misma forma si esto ocurriera alrededor de la floración.

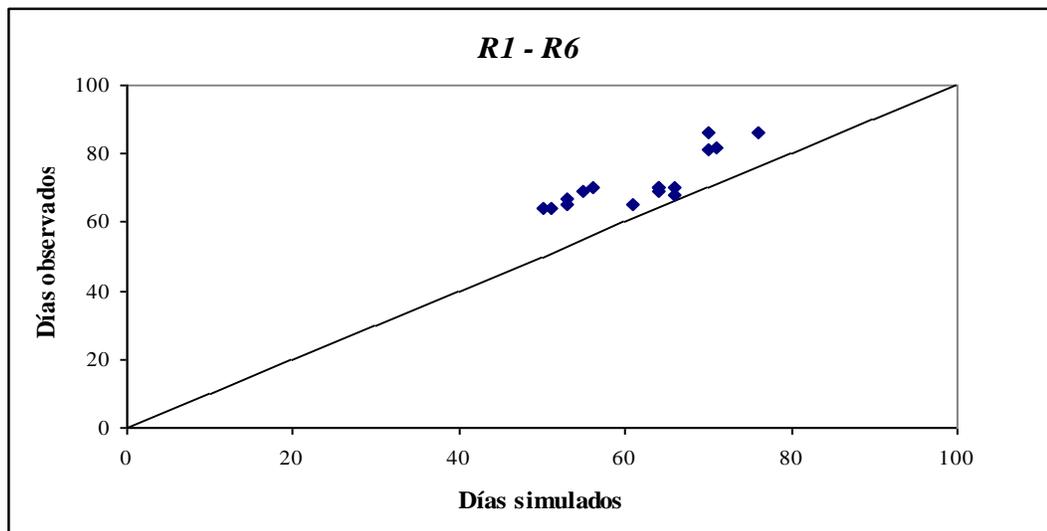
Observando las Figuras 2, 3 y 4; y las Tablas 5, 13 y 14 del ANEXO se puede inferir que haya ocurrido lo antes mencionado, ya que en las distintas campañas se encuentran periodos donde las precipitaciones fueron escasas y las temperaturas máximas fueron altas.

Coincidiendo con Codromaz de Rojas *et al.* (1997) y Karam *et al.* (2003) quienes señalaron que en años con severas condiciones ambientales se produjo un acortamiento

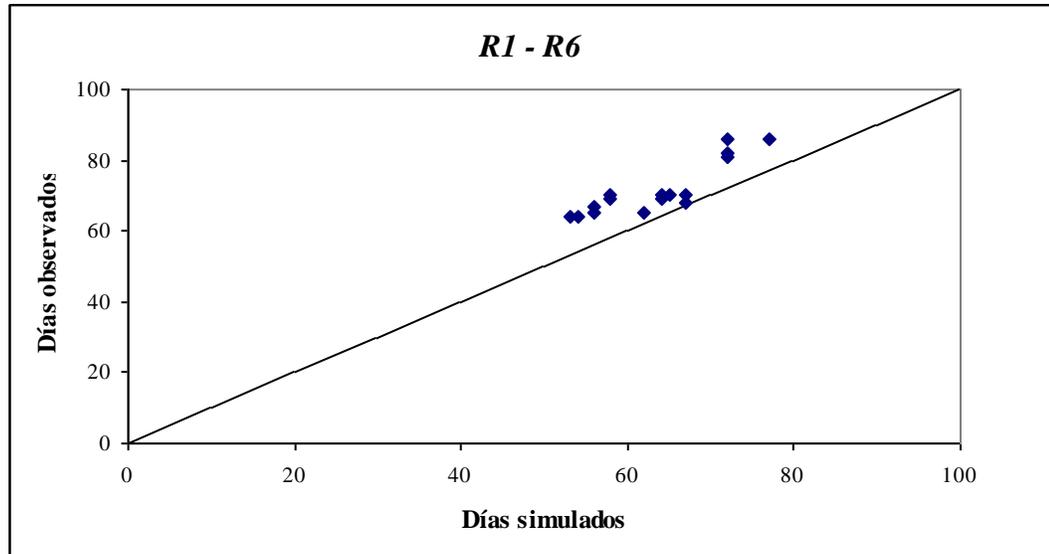
entre fases fenológicas del cultivo, ya que se alcanzó antes la madurez fisiológica. Rivetti (2007) mencionó que el ciclo del cultivo para sus tratamientos, osciló siempre entre los mismos valores, aunque destacó que con déficits hídricos hubo variaciones en algunas de las etapas del ciclo de crecimiento. Esto podría estar explicando las principales variaciones observadas para el periodo S-R6 y los bajos valores de E encontrados (-1,51 y 0,17) para el método de cálculo simple y el método de cálculo compuesto respectivamente.

### **R1 - R6**

En el periodo R1-R6, los valores observados tienen una distribución semejante a los datos observados en el periodo S-R6 en relación a los valores simulados (Figuras 11 y 12). En el modelo simple los datos observados difieren estadísticamente de los datos simulados con un  $p= 0,0172$ , lo que muestra que el modelo no es bueno para predecir la duración del periodo. En cambio, los datos observados no difieren significativamente de los simulados por el método de cálculo compuesto ( $p= 0,1087$ , Tablas 11 y 12).



**Figura 11.** Análisis de regresión en el periodo R1-R6 para los valores simulados por el cálculo simple (RMSE=12,34; D=0,64; E=-1,10;  $r=0,8335$ ;  $R^2=0,6948$ ;  $p=0,0172$ ).



**Figura 12.** Análisis de regresión en el periodo R1-R6 para los valores simulados por el cálculo compuesto (RMSE=10,21; D=0,70; E=-0,44;  $r=0,8747$ ;  $R^2=0,7652$ ;  $p=0,1087$ ).

De acuerdo al índice de coincidencia (D), los valores simulados se aproximan en un 64 y 70% a los datos simulados. Estos valores son un 20% más bajos que los datos obtenidos en el periodo S-E y S-R1, lo que indica que el modelo no es el adecuado para estimar la duración del periodo. Si analizamos los valores de E, vemos que los mismos son negativos en ambos modelos, lo que estaría mostrando una ineficiencia de los métodos para la predicción en la duración de la fase. Estos resultados no se corresponden con los valores de p para el cálculo compuesto, el cual indica que los valores observados no difieren de los simulados. De acuerdo al valor de RSME, el método simple posee un error de 12,34 días en la predicción, mientras que en el otro método de cálculo el error fue de 2 días menos que el primero. Si se tiene en cuenta el porcentaje de RSME, vemos que el método de cálculo compuesto tiene, al igual que para el periodo S-R6, un 4% menos de error que el modelo simple, solo que en la fase R1-R6 estos porcentajes de error son más elevados que los obtenidos en la fase anterior.

El coeficiente de correlación r presentó valores de 0,8335 y 0,8747 los cuales son aceptables para ambos modelos, no obstante deberían hacerse similares observaciones en relación a la utilización de estos coeficientes como se planteó en párrafos anteriores.

**Tabla 11.** Resultados R1-R6, método de cálculo Simple.

RSME	12,34
%RSME	20%

D	0,64
E	-1,10
r	0,8335
R <sup>2</sup>	0,6948
Valor p; O=S	0,0172
y=0,7936x + 22,521	

**Tabla 12.** Resultados R1-R6, método de cálculo Compuesto.

RSME	10,21
%RSME	16%
D	0,70
E	-0,44
r	0,8747
R <sup>2</sup>	0,7652
Valor p; O=S	0,1087
y=0,912x + 13,655	

A diferencia de lo mencionado por Hunter *et al.* (1977), los tiempos térmicos y los días requeridos para completar el periodo R1-R6 no presentaron cambios significativos con el atraso de la fecha de siembra.

Según lo encontrado por Confalone y Dujmovich (1999), el periodo correspondiente al llenado de granos (R1-R6) es el más variable, ya que manifiesta los valores más altos de coeficiente de variabilidad en todos los métodos estudiados en su trabajo, coincidiendo con los valores observados anteriormente, donde el periodo comprendido entre R1-R6 y el periodo S-R6 que comprende el periodo antes mencionado, son los que presentan la mayor variabilidad a la hora de predecir con ambas fórmulas los eventos fenológicos.

La variación que presentan las sumas de temperaturas depende de la fecha de siembra, del año y del ambiente. Según Daubenmire (1959) las temperaturas cardinales, y por lo tanto, también los umbrales térmicos, varían con la edad de la planta, con sus condiciones fisiológicas, con la duración de niveles particulares de temperatura y con variaciones en otros factores ambientales.

El análisis compuesto concede mayor estabilidad a los datos, otorgando valores de tiempo térmico no tan extremos cuando la temperatura mínima del día está por debajo de la base (ecuación 2), lo mismo ocurre cuando se utiliza la ecuación 4, ya que los valores estimados no llegaron a ser tan extremos, como los obtenidos por el método de cálculo simple.

La evaluación de los híbridos en dos localidades con distintas fechas de siembras se realizó con la finalidad de generar mayor dispersión de datos, logrando confiabilidad en el método que más precisión presente.

### **III. CONCLUSIONES**

El método de cálculo compuesto presenta mejor valor predictivo que el método de cálculo simple al momento de predecir eventos fenológicos en el cultivo de maíz, para los periodos S-E y S-R1. En relación a los periodos

R1-R6 y S-R6, sería conveniente generar un modelo que incluya en la predicción fenológica el efecto del estrés ambiental por déficit hídrico. Además debería incrementarse la base de datos empleados en estos estudios, a través de la incorporación de una mayor cantidad de localidades e híbridos, para ampliar regionalmente la conclusión obtenida.

## **V. BIBLIOGRAFÍA**

ARNOLD, C. Y. 1975. Heat unit systems in corn production. Ill. Res., 13, 6-7.

ANDRADE, F. H. 1992. Radiación, y temperatura determinan los rendimientos máximos de maíz. Boletín técnico Nro. 106. Estación

Experimental Agropecuaria Balcarce (INTA). Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

ANGUS, J.F. 1990. Evolution of methods for quantifying risk in water limited environments. p: 39-53 In: MUCHOW, R.C. and J.A. BELLAMY (Eds). Climatic risk in crop production: model and management for semiarid tropics and subtropics. CAB International, UK. En: <http://www.fertilizando.com/articulos/SimulacionDesarrolloCrecimientoRendimientoEnMaiz.asp>

BLASÓN, A.D.; FERNÁNDEZ, N.R.; RODRÍGUEZ, R.O. 2002. Duración térmica siembra emergencia para un maíz híbrido en ensayos a campo sin limitación hídrica. Hybrid corn sowing emergence thermal time to field assays without water stress. Asociación Argentina de Agrometeorología. Buenos Aires. AR. Vol.2, no.2. p.119-123.

BOYER, JS y WESTGATE, ME. 2004. Grain yields with limited water. Journal of Experimental Botany. 55(407): 2385-2394.

BUNTING, E. 1976. Accumulated temperature and maize development in England. Journal of Agricultural Science, Great Britain, v. 87, p. 577-583. En: CANFALONE, A.E. y M. NAVARRO DUJMOVICH. 1999. Comparación de modelos de tiempo térmico para maíz. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 207-211, 1999.

BRAGACHINI, M.; J. PEIRETI y D. DAMEN. 2007 Mejoras en la eficiencia de cosecha en el cultivo de maíz. En:

[www.cosechaypostcosecha.org/data/gacetillas/2007/20070126\\_eficienciaMaiz.asp](http://www.cosechaypostcosecha.org/data/gacetillas/2007/20070126_eficienciaMaiz.asp) Consultado el 30/04/07.

BROWN, D. 1963. A "heat unit" system for corn hybrid recommendations. National Conference on Agricultural Meteorology 5th, Lakeland, Florida, Toronto, Ontario Research Foundation, 10 p. En: ASPIAZÚ, C. 1971. Comparison of several methods of heat unit calculation for corn (*Zea mays* L.). M.S. thesis. Ames, Iowa State University Library, 148 p. Revista de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de Buenos Aires, 19 (1-2): 61-69, 1971.

BROWN, D.M. 1978. Heat units for corn in Southern Ontario, Ontario : Ministry of agriculture and Food, Canada. (Fact sheet AGDEX 111/31, Order N° 75-077). En: CANFALONE, A.E. y M. NAVARRO DUJMOVICH. 1999. Comparación de modelos de tiempo térmico para maíz. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 207-211, 1999.

CARCOVA, J.; L. BORRAS, Y M.E. OTEGHI. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y calidad en maíz. En: SATORRE, E.H.; R.L. BENECH ARNOLD; G.A. SLAFER; E.B. DE LA FUENTE; D.J. MIRALLES; M.E. OTEGHI Y ROXANA SAVIN. Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Primera edición. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. p: 135-157.

CARTA DE SUELOS DE LA REPÚBLICA ARGENTINA. Hoja Río Cuarto. 1994. Plan Mapa de Suelos de Córdoba. INTA-MAGyRR. 97 p.

CATEDRA AGRO METEOROLIGIA, UNRC. 2007. Material Inédito.

- CIRILO, A.G. 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. 86 págs. En: ANDRADE, F.; A. CIRILO; S. UHART Y M. OTEGUI. **Ecofisiología del cultivo de maíz**. Editorial La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires, Argentina. p: 193-220.
- CIRILO, A.G. y F.H. ANDRADE. 1994. Sowing date and maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Sci.* 34:1039-1043. En: SATORRE, E.H.; R.L. BENECH ARNOLD; G.A. SLAFER; E.B. DE LA FUENTE; D.J. MIRALLES; M.E. OTEGHI y R. SAVIN. **Producción de granos: Bases funcionales para su manejo**. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. p: 135-163.
- CIRILO, A. G. y F. H. ANDRADE. 1996. Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Science*, 36:325-331. En: ANDRADE, F.; A. CIRILO; S. UHART Y M. OTEGUI. **Ecofisiología del cultivo de maíz**. Editorial La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires, Argentina. p: 15-39.
- CISNEROS J.; C. CHOLAKY; O. GIAYETTO y J. CANTERO. 1997. Efectos del uso agrícola sobre las propiedades físicas de un suelo Haplustol típico del Centro de Córdoba. **Rev UNRC 17 (1):13-22**.
- CODROMAZ de ROJAS, A.; H. PELTZER; N. KAHN y N. GARCIARENA. 1997. Distribución de la humedad en el suelo durante el ciclo del cultivo de Maíz. VI Congreso Nacional de Maíz. Pergamino. Argentina. p: 186-189.

- COELHO, D. y R. DALE. 1980. An energy-crop growth variable and temperature function for predicting corn growth and development-planting to silking. *Agronomy Journal*, Madison, v. 72, n. 3, p. 503-510. En: CANFALONE, A.E. y M. NAVARRO DUJMOVICH. 1999. Comparación de modelos de tiempo térmico para maíz. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa María, v. 7, n. 2, p: 207-211, 1999.
- CONFALONE A.E. y M.N. DUJMOVICH. 1999. Comparación de modelos de tiempo térmico para maíz. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa María, v. 7, n. 2, p: 207-211.
- DAUBENMIRE, R. F. 1959. A canopy-coverage method of vegetation analysis. *Northwest Sci.* 33: 43-64.
- DAUGHTRY C.S.T.; J.C. COCHRAN y S.E. HOLLINGER. 1984. Meteorological Models for Estimating Phenology of Corn. Laboratory for Applications of Remote Sensing. Purdue University. 1291 Cumberland Ave. p: 22.
- DERIEUX, M. y R. BONHOMME. 1986. Different approaches to maturity ratings in maize in the world. *Information bulletin of the FAO Research Network on Maize*, 3:15-21. En: ANDRADE, F.; A. CIRILO; S. UHART Y M. OTEGUI. **Ecofisiología del cultivo de maíz**. Editorial La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires, Argentina. p: 15-39.
- DESAI, S.A. y R.D. SINGH. 2001. Combining ability studies for some morphophysiological and biochemical traits related to drought tolerance in maize (*Zea mays* L.). *Indian Journal Genetic Plant Breeding* 61: 34-36.

EARL H. 2008. Rm. 405 Crop Science Building PBIO\*3110 – Crop Physiology Lecture #4 Fall Semester 2008. University of Guelph. 50 Stone Road East Guelph, Ontario, N1G 2W1 Canada.

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

GILMORE, E.C.Jr. y J.S. ROGERS. (1958): Heat units as a measure of measuring maturity in corn. Agron J., 50, 611–615.

GRIMM, S.S.; J.W. JONES; K.J. BOOTE y D.C. HERZOG. 1994. Modeling the ocurrence of reproductive stages after flowering for four soybean cultivars. Agron. J. 86: 31-38. En: ANDRADE, F.H. y V.O. SADRAS (Eds.), Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. E.E.A. INTA Balcarce- F.C.A. U.N.M.P. p: 25-56.

GUEVARA, E. 2005. La simulación del desarrollo, crecimiento y rendimiento en maíz. En: <http://www.fertilizando.com/articulos/SimulacionDesarrolloCrecimientoyRendimientoEnMaiz.asp>

HARDACRE, A. K. y H. L. TURNBULL. 1986. The growth and development of maize (*Zea mays* L.) at five temperatures. Annals of Botany, 58:779-787. En: ANDRADE, F.; A. CIRILO; S. UHART Y M. OTEGUI. Ecofisiología del cultivo de maíz. Editorial La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires, Argentina. p: 15-39.

- HESKETH, J. D. y I. J. WARRINGTON. 1989. Corn growth response to temperature: rate and duration of leaf emergence. *Agronomy Journal*, 81:696-701. En: ANDRADE, F.; A. CIRILO; S. UHART Y M. OTEGUI. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Editorial La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires, Argentina. p: 15-39.
- HUNTER, R. ; M. TOLLENAAR y C. BREUER. 1977. Effects of photoperiod and temperature on vegetative and reproductive growth of a maize (*Zea mays*) hybrid. *Canadian Journal of Plant Science*, Ottawa, v. 57, p. 1127-1133, 1977.
- 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 of maize growth and development. Texas, A&M Univ. Press.
- KARAM, F.; J. BREIDY; C. STEPHAN y J. ROUPHAEL. 2003. Evapotranspiration, yield and water use efficiency of drip irrigated corn in the Bekae Valley of Lebanon. *Agricultural Water Managenent*. 63: 125-137.
- KINIRY, J. R. y J. T. RITCHIE. 1981. Rates of leaf primordia and tip appearance of different maize genotypes in the field. *Agronomy Abstraéis*, pág. 12. En: ANDRADE, F.; A. CIRILO; S. UHART Y M. OTEGUI. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Editorial La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires, Argentina. p: 15-39.

- KINIRY, J.R. 1991. Maize phasic development. En: J. Hanks y J.T. Ritchie (Eds.) Modeling plant and soil systems. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wisconsin. Agronomy Monograph, 31:55-70. En: ANDRADE, F.; A. CIRILO; S. UHART Y M. OTEGUI. Ecofisiología del cultivo de maíz. Editorial La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires, Argentina. p: 15-39.
- KINIRY, J.R. y R. BONHOMME. 1991. Predicting maize phenology. En: T. Hodges (ed.). Predicting crop phenology. CRC Press. Boca Raton, Ann Arbor. Boston. Págs. 115-131. En: ANDRADE, F.; A. CIRILO; S. UHART Y M. OTEGUI. Ecofisiología del cultivo de maíz. Editorial La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires, Argentina. p: 15-39.
- LAWN, R.J. y B.C. IMRIE. 1991. Crop improvement for tropical and subtropical Australia: Designing plants for difficult climates. Field Crops Res. 26: 113-139. En: SATORRE, E.H.; R.L. BENECH ARNOLD; G.A. SLAFER; E.B. DE LA FUENTE; D.J. MIRALLES; M.E. OTEGHI y R. SAVIN. Producción de granos: Bases funcionales para su manejo. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. p: 319-349.
- LOZADA, B. y L. ANGELOCCI. 1999. Determinação da temperatura-base e de graus-dia para estimativa da duração do subperíodo da sementeira à floração de um híbrido de milho (*Zea mays*). Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 31-36. En: CANFALONE, A.E. y M. NAVARRO DUJMOVICH. 1999. Comparación de modelos de tiempo térmico para maíz. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 207-211, 1999.

- McMASTER, G. y W. WILHELM. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology* 87:291-300.
- MIRALLES D.J.; L.B. WINDAUER y N.V. GOMEZ. 2006. Factores que regulan el desarrollo de los cultivos de granos. En: SATORRE, E.H.; R.L. BENECH ARNOLD; G.A. SLAFER; E.B. DE LA FUENTE; D.J. MIRALLES; M.E. OTEGHI y R. SAVIN. *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo*. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. p: 61-71.
- MONTEITH J.L., 1977. Climate. En: *Ecophysiology of Tropical Crops* (Alvim P.T., Kozlowski T.T eds). Academic Press, New York. Pp 1-27.
- OBER, E.S.; T.L. SETTER; J.T.; MADISON; J.F. THOMPSON y P. SHAPIRO. 1991. Influence of water deficit on maize endosperm development. *97*: 154-164.
- RAES, D.; P. STEDUTTO; T. HSIAO y L. HENG. 2009. Calculation procedures. In: *Aquacrop. Reference Manual*. Chapter 3. FAO. Rome. Italy.: 1-79.
- RITCHIE, S.W. y J.J. HANWAY. 1982. "How a corn plant develops", Iowa State Coop. Ext. Serv. Spec. Rep., 48. En: SATORRE, E.H.; R.L. BENECH ARNOLD; G.A. SLAFER; E.B. DE LA FUENTE; D.J. MIRALLES; M.E. OTEGHI y R. SAVIN. *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo*. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. p: 135-163.

- RITCHIE, J.T. 1990. Specifications of the ideal model for predicting crop yields. pp 97- 122 In: Muchow R.C and J.A. Bellamy (eds) Climatic Risk in Crop Production: models and management for the semiarid tropics and subtropics. CAB International, Wallingford, UK. En: <http://www.fertilizando.com/articulos/SimulacionDesarrolloCrecimientoyRendimientoEnMaiz.asp>
- RITCHIE, S.W. y D.S. NeSMITH. 1991. Temperature of crop development. En: J. Hanks y J.T. Ritchie (Eds.) Modeling plant and soil systems. Agronomic Monograph N° 31 pp. 5-29. ASA CSSA SSSA, Madison, Wi. En: ANDRADE, F.; A. CIRILO; S. UHART Y M. OTEGUI. Ecofisiología del cultivo de maíz. Editorial La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires, Argentina. p: 15-39.
- SEILER, R., R. FABRICIUS, V. ROTONDO y M. VINOCUR. 1995. Agroclimatología de Río Cuarto – 1974 / 1993. Volumen I. UNRC. p: 41.
- SERRATOS HERNÁNDEZ J.A. 2009. El origen y la diversidad del maíz en el continente americano. Universidad Autónoma de la Ciudad de México. p: 1.
- SUMMERFIELD, R.J., E.H. ROBERT y R.J. LAWN. 1989. Photo thermal modulation of flowering in grain legumes crops. Proc. of the Inter Congress of Plant physiology and Biochemistry, New Delhi, India.
- TOLLENAAR, M.; T. DAYNARD y R. HUNTER. 1979. Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. Crop Science, Madison, v. 19, n. 1, p. 363-366. En: ANDRADE, F.; A. CIRILO; S. UHART Y M. OTEGUI. Ecofisiología del cultivo de

maíz. Editorial La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires, Argentina. p: 15-39.

VILLALOBOS, F. 1998. Crecimiento y desarrollo de los cultivos. Material inédito. Fitotecnia general. UC, Córdoba, España. En: Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Rio Cuarto. 2007. Rev. FCA UNCuyo. Tomo XXXIX.

VINOCUR, M. G. y J. T. RITCHIE. 1996. Maize Leaf Development Biases Caused by Air–Apex Temperature Differences. Published in *Agronomy Journal* 93:767–772, 2001.

WANG, J.Y. 1960. A critique of the heat unit approach to plant response studies. *Ecology* 41 : 785-790. En: ASPIAZÚ, C. 1971. Comparison of several methods of heat unit calculation for corn (*Zea mays* L.). M.S. thesis. Ames, Iowa State University Library, 148 p. *Revista de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de Buenos Aires*, 19 (1-2): 61-69, 1971.

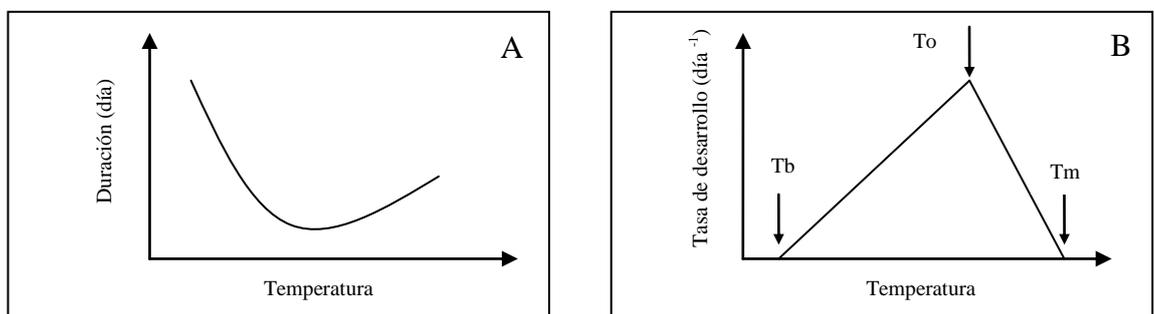
WARRINGTON, I.J. y E. KANEMASU. 1983. Corn growth response to temperature and photoperiod. I. Seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. *Agronomy Journal*, Madison, v. 75, n. 5, p. 749- 754, 1983. En: CANFALONE, A.E. y M. NAVARRO DUJMOVICH. 1999. Comparación de modelos de tiempo térmico para maíz. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 207-211, 1999.

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.º11:1309-1313.

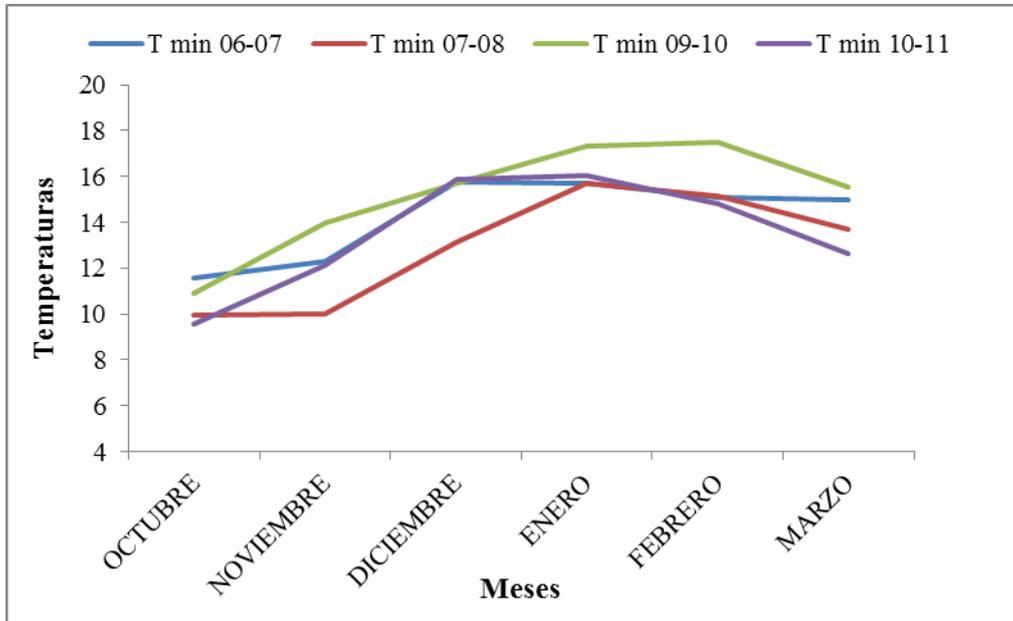
## VI. ANEXO

**Figura 1.** Respuesta idealizada a la temperatura de a) duración de una fase fenológica y de b) su inversa, la tasa de desarrollo.

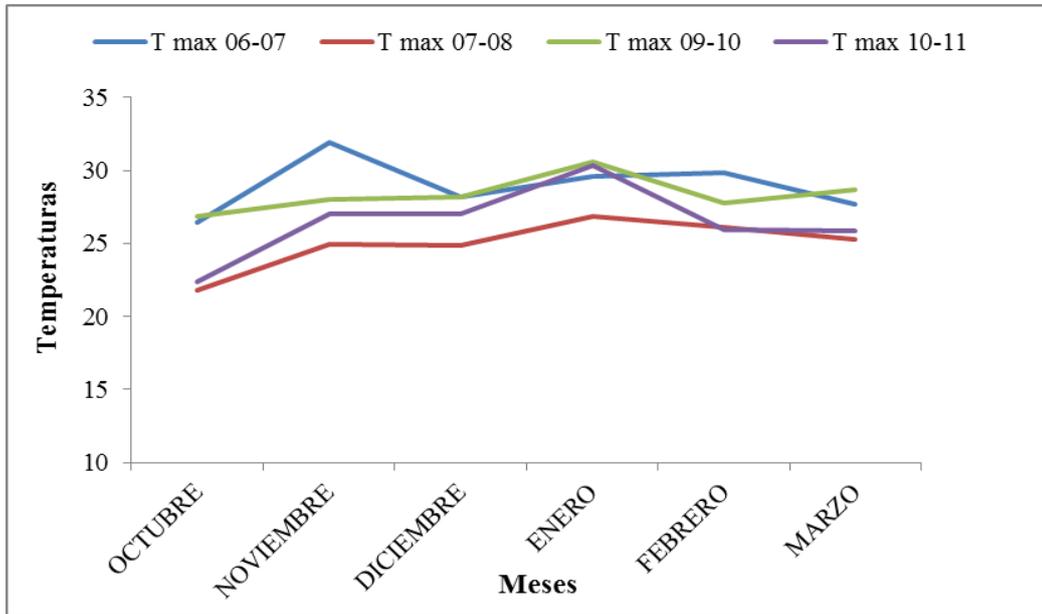


**Figura 2.** Temperaturas mínimas mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la

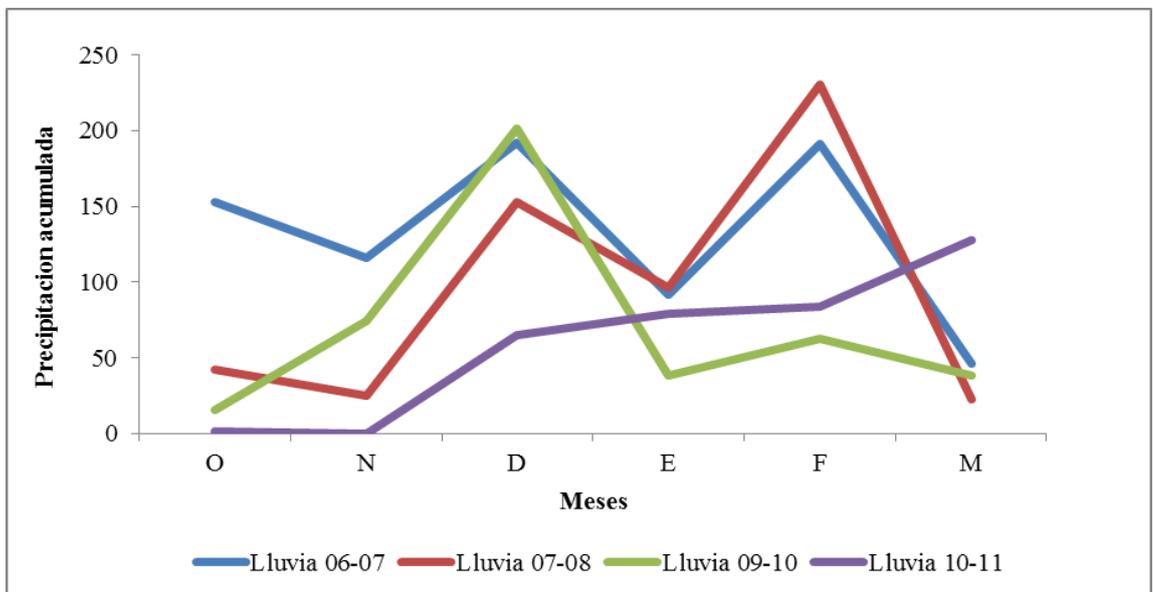
localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto.



**Figura 3.** Temperaturas máximas mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto.



**Figura 4.** Comparación entre precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto. Tabla va arriba y figura abajo



**Tabla 5.** Precipitaciones mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto.

Meses	Campañas			
	2006-2007	2007-2008	2009-2010	2010-2011
Octubre	153	43	16	1
Noviembre	116	25	75	0
Diciembre	192	153	201	65
Enero	92	97	39	79
Febrero	191	230	63	84
Marzo	47	22	38	128
TOTAL	790	570	431	357

**Tabla 8.** Tiempos térmicos y días transcurridos de siembra a floración (R1) para los híbridos utilizados en las cuatro campañas evaluadas.

Siembra-R1		Primera Fecha		Segunda Fecha	
Campaña	Híbrido	°C día-1	Días	°C día-1	Días
2006-2007	AX 882 CLMG	970	75	944	64
	AX 852 MG	956	74	931	63
2007-2008	AX 882 CLMG	934	92	890	75
	AX 852 MG	921	91	875	73
2009-2010	AX 882 CLMG	1000	76	968	63
	AX 852 MG	975	74	930	60
2010-2011	NK 910 TDMax	904	85	860	67
	NK 900 TDMax	890	84	850	64
	NK 880 TDMax	860	81	805	60

**Tabla 13.** Temperaturas mínimas mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto.

	T min 06-07	T min 07-08	T min 09-10	T min 10-11
OCTUBRE	11,6	10,0	10,9	9,6
NOVIEMBRE	12,3	10,0	14,0	12,1
DICIEMBRE	15,8	13,1	15,7	15,9
ENERO	15,7	15,7	17,3	16,0
FEBRERO	15,1	15,2	17,5	14,8
MARZO	15,0	13,7	15,6	12,6

**Tabla 14.** Temperaturas máximas mensuales promedio durante el ciclo del cultivo para las cuatro campañas en estudio (06-07 y 07-08) para la localidad de Venado Tuerto y las campañas (09-10 y 10-11) para la localidad de Río Cuarto.

	T max 06-07	T max 07-08	T max 09-10	T max 10-11
OCTUBRE	26,47	21,79	26,85	22,37
NOVIEMBRE	31,96	24,94	27,99	27,01
DICIEMBRE	28,19	24,85	28,23	27,02
ENERO	29,56	26,86	30,59	30,36
FEBRERO	29,87	26,10	27,74	25,91
MARZO	27,68	25,27	28,69	25,88