

La simulación del desarrollo, crecimiento y rendimiento en maíz

Edgardo Guevara
INTA EEA Pergamino

Introducción

El rendimiento es el resultado final de un juego de interacciones donde intervienen el genotipo, el clima, el suelo y el manejo del cultivo. El impacto de los distintos parámetros que intervienen en estas variables del sistema definen la fenología y el crecimiento de los cultivos. Boote y Tollenaar (1991) utilizan un criterio para elaborar el rendimiento basado en un esquema que jerarquiza cada momento del ciclo y que se describe en cinco etapas: crecimiento vegetativo, fotosíntesis, partición, llenado del grano y acumulación de reservas y removilización. El crecimiento vegetativo tiene su importancia en el establecimiento del cultivo y en la instalación del sistema foliar, para lo cual se deben optimizar prácticas como la densidad de plantas, el espaciamiento, la fertilización y la disponibilidad hídrica inicial que junto con factores genéticos como, tamaño inicial de la planta, tasa de aparición de hojas y partición al tejido foliar, nos permitirá llegar a la máxima intercepción de radiación en el menor tiempo posible, de manera de lograr un rápido crecimiento del Índice de Área Foliar (IAF) que junto con la temperatura, la disponibilidad hídrica, la fertilidad y la radiación determinarán la eficiencia de la fotosíntesis. La partición se define como la fracción de producción diaria de materia seca que tiene como destino el grano, la máxima intensidad de esta partición se alcanza en el momento de comienzo del llenado efectivo del grano, que para el caso de maíz ocurre entre 10 a 15 días después de floración femenina, de la intensidad y la duración de esa partición resultará el Índice de Cosecha (IC). Para la mayoría de los cultivos el rendimiento está positivamente relacionado con la duración del período de llenado del grano; Meghji et al. (1984) compararon materiales genéticos de maíz liberados en las décadas del '30, '50 y '70, encontraron un aumento de la duración del período de llenado de 55.4, 57.0 y 59.6 días respectivamente que resultó en un incremento del 7.6% en el rendimiento, nuevamente los factores genéticos, climáticos y de manejo que permitan una mayor duración y un mantenimiento de la fotosíntesis durante este período son fundamentales en su aporte a un incremento del rendimiento final.

Las limitaciones en agua y/o nitrógeno suelen tener un impacto tanto en la instalación del cultivo, como en su crecimiento y desarrollo y pueden limitar la capacidad productiva potencial. El nitrógeno, juega un rol crítico y es el elemento más deficitario, por lo tanto es un aspecto importante dentro de un esquema de producción de cultivos. Tradicionalmente la información para generar las curvas de respuesta al nitrógeno es obtenida a partir de experimentaciones a campo, para posteriormente poder decidir la dosis de aplicación, los modelos de regresión para aplicación de dosis de fertilizantes son estáticos y por lo tanto no tienen en cuenta la variabilidad de absorción hídrica y de los nutrientes dentro del ciclo del cultivo. Mientras que los modelos de simulación fueron concebidos para involucrar la variabilidad climática, el efecto de las propiedades del suelo y de las prácticas agronómicas sobre la dinámica del nitrógeno y su relación con el crecimiento de los cultivos, de manera de permitir una mejor comprensión del funcionamiento del fertilizante dentro del sistema.

Estos modelos con capacidad para simular varios cultivos y estrategias de fertilización podrían mejorar en forma significativa la eficiencia en el uso del fertilizante. A nivel del factor agua es bien conocido el impacto detrimental que sobre el rendimiento tienen la ocurrencia de períodos de sequía climática y edáfica de distinta intensidad y duración, y la gran variabilidad espacial en cuanto a la distribución de precipitaciones y a los distintos tipos de estrés hídrico en función de momento y severidad. En la dinámica del sistema intervienen los parámetros de suelo asociados con distribución de horizontes, tipo de suelo, impedimentos físicos para la profundización y exploración de las raíces, capacidad de drenaje e infiltración de los suelos y capacidad de absorción por el sistema radicular, que en interacción con factores de radiación y temperatura resultan en un juego muy grande de interacciones que difícilmente puedan ser explicados con modelos estáticos parciales; los modelos de cultivo, funcionales, tratan de describir esta dinámica, relacionando los distintos parámetros involucrados dentro de las variables, clima-suelo y planta en una escala de paso diario.

En general ese juego de interacciones es lo suficientemente compleja como para que pueda ser tenida en cuenta permanentemente cada año o campaña agrícola.

El remedio tradicional para cuantificar el impacto de la variabilidad climática en agriculturas de secano fue establecido sobre la base de la prueba y el error, lo cual resulta en un esquema de agricultura conservadora que provee un sustento mínimo aún en los años menos favorables, con un bajo nivel de riesgo. En un esquema tradicional de producción no habría indicios o pruebas de que los métodos de simulación puedan mejorar el balance logrado con el sistema de prueba y error. De todas maneras cuando se incorporan nuevos cultivos o nuevas tecnologías al sistema, es necesario recurrir a una herramienta que permita evaluar todo el juego de interacciones dentro de ese sistema. El grado actual de desarrollo de los modelos puede servir en forma específica dentro del sistema del productor para lograr un balance entre la productividad y la variabilidad.

Es importante diferenciar la táctica y la estrategia, esta última nos permite definir una práctica de manejo seguida cada año en espera que esta nos dará el mejor beneficio a largo plazo, mientras que la aplicación táctica significa cuales son los cambios de manejo necesarios en respuesta a los cambios del ambiente o de todo el sistema biológico. El desafío es poder decidir como elegir entre un amplio rango de opciones y resolver rápidamente.

Ejemplos de estrategias son: esquemas de irrigación, manejo de enfermedades, sistemas de pronósticos en tiempo real. Mientras que ejemplo de táctica puede ser definir la siembra de un trigo de primavera en una región semiárida en función de las precipitaciones que ocurran durante el período invernal.

El gran éxito de la aproximación de los modelos fue poder analizar la variabilidad entre campañas de cultivos para una localidad, y en segundo término el análisis entre localidades que puede ser más preciso usando esquemas de altos insumos.

QUE SON LOS MODELOS DE SIMULACION

El desarrollo de modelos para sistemas físicos, por ejemplo en ingeniería espacial, favoreció la idea 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 un enfoque sistemático de todo el sistema biológico o de una parte como es el sistema de producción agrícola.

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, como ejemplo un cultivo interactuando con las variables de clima, de suelo y las prácticas de manejo. En un extremo tenemos los modelos globales que ayudan a simular procesos en detalle con la esperanza que el modelo pueda ser robusto en un rango amplio de ambientes; en el otro extremo tenemos los modelos simples que son utilizados con pocos parámetros, formalmente optimizados para que el modelo sea preciso en una región determinada o en un estrecho rango de situaciones de sistemas de cultivos.

La disponibilidad de los modelos que simulan la Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC) en relación al ambiente, permiten a los científicos cuantificar la relación de la variabilidad climática con el rendimiento, y explorar las formas de combinar los cultivos y sistemas de cultivos con el ambiente (Angus 1990).

La simulación involucra el desarrollo de un modelo y su uso para caracterizar el sistema y sus interacciones con un mayor grado de detalle.

Si definimos a los modelos de cultivos como la representación matemática de una síntesis de mecanismos y procesos (Bonhomme y Ruget, 1991), es erróneo pensar que podamos representar perfectamente los sistemas biológicos y por lo tanto la modelización está orientada generalmente a ver la respuesta a aspectos precisos como: predicción de la producción, potencialidad de cultivares, manejo de la irrigación, entre otros.

Los modelos de simulación de cultivos contienen una gran variedad de niveles de detalle, el mínimo detalle necesario en modelos útiles para determinar el impacto del riesgo climático incluye la duración del crecimiento del cultivo, la tasa de crecimiento del cultivo (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 físico de las plantas, para determinar la sensibilidad de los estadios de crecimiento y la duración total del ciclo; el desarrollo 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, que nos permite definir con mayor precisión la incidencia de estos procesos en la partición de la biomasa aérea y radicular (Ritchie, 1990). Como ejemplo tenemos el tiempo térmico o suma de grados día para predecir el desarrollo de la planta, el uso de la radiación solar para predecir el crecimiento en biomasa y el uso de la evapotranspiración potencial para predecir transpiración de la planta y evaporación del suelo, que proveen conceptos para la simulación de cultivos, cuando disponemos de la información apropiada.

El concepto de simulación debe ser dinámico principalmente por dos razones una es la mejor comprensión de los procesos involucrados en la producción de cultivos y por otro lado para la resolución de problemas. Los modelos que sirven como herramienta para resolver modelos suelen ser modelos multidisciplinarios.

Dentro del área de investigación permite cuantificar las hipótesis planteadas para un problema específico, por ejemplo partición de la evapotranspiración en la transpiración por la planta y evaporación del suelo, en función de la ontogenia del cultivo, aportando entonces al conocimiento de la magnitud de los procesos involucrados y su relación con la variabilidad ambiental.

Otra posibilidad es la cuantificación de la potencialidad de un cultivo definiendo zonas con distinto grado de respuesta de la interacción genotipo-ambiente. Un tercer aspecto es que nos permite cuantificar el impacto de distintos tipos de estrés abióticos, y finalmente aporta a cuantificar ciertos mecanismos, jerarquizar la aparición de esos mecanismos y evaluar diferentes tácticas y/o estrategias productivas.

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

CERES-Maize V 1.0	Jones and Kiniry, 1986
CERES-Maize V 2.0	Ritchie et al, 1989
Generic CERES V 3.5	Ritchie et al, 1998
STICS	Brisson et al, 1998
CORNGRO	Voltz et Rambal, 1987
CORNF	Stapper and Arkin, 1980
GAPS	Buttler, 1989
MAIS	Tollenaar, 1990
VT-Maize	Newkirk et al 1989

La aparición de los modelos de simulación ocurre a partir de la década del 50 con modelos descriptivos y matemáticos de los procesos involucrados, luego a mediados de los 60 aparece el concepto de sistemas dinámicos que incluyen la variable tiempo y que representaban el flujo de esos procesos y sus interacciones. En esta etapa dos importantes precursores fueron W.G.Duncan en la University of Kentucky y C.T. de Wit en la Agricultural University de Wageningen, que desarrollaron modelos como herramienta para explicaciones científicas, como por ejemplo sintetizar y mejorar la comprensión de procesos tales como intercepción de radiación y fotosíntesis, desarrollando modelos simples que consideraban únicamente la producción potencial relacionada con la radiación y la temperatura. En la década del 70 se formaliza aquel concepto de dinámica de sistemas y en los 80 se refina mediante técnicas de computación la verificación, validación y evaluación de esos modelos. En esta última década aparecen los primeros modelos de simulación para los cultivos de maíz, soja, trigo y arroz, incluídos en el paquete DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) “Sistema de apoyo para las decisiones en transferencia agrotecnológica”. La simulación de sistemas agrícolas empezó entonces a ser una herramienta para la integración de los diferentes componentes productivos dentro de los sistemas agrícolas. Los avances en el conocimiento de las interacciones dentro del ecosistema, influenciado por el ambiente y por las prácticas de manejo, expandió la

potencialidad de uso de esta herramienta como ayuda para la toma de decisiones (Barrett and Nearing, 1998). La aparición a mediados de los 90 de la tecnología informática permitió una mayor utilización de estos modelos para el estudio y resolución de problemas específicos como: desarrollo y crecimiento de los cultivos, evaluación de respuesta a la fertilización, estrategias de riego, situaciones de estrés, predicción de pérdidas por erosión, lixiviación de pesticidas, contaminación del ambiente, calentamiento global de la atmósfera, entre otros

Los modelos permiten cuantificar el grado de riesgo de la, o las estrategias, de producción elegidas, en un momento anterior a la implantación del cultivo, a través del análisis que combina la variabilidad genética y ambiental en una serie histórica de datos climáticos diarios.

FUNCIONAMIENTO DE LOS MODELOS. MODELO CERES-Maize.

Los modelos de simulación en general y en el caso del modelo de cultivo CERES-Maize responden a un esquema de funcionamiento que puede graficarse a través de distintos módulos: Módulo de desarrollo, Módulo de producción y Módulo de Partición y Módulo de limitación hídrica(Fig 1).



El modelo CERES-Maize facilita la determinación cuantitativa del crecimiento y rendimiento del maíz en un amplio rango de condiciones de suelo y clima. Simula el desarrollo y crecimiento del cultivo y los balances de agua y nitrógeno.

El submodelo de desarrollo y crecimiento toma en cuenta los cambios diarios de materia seca y superficie foliar, el número de hojas, materia seca de tallos, materia seca de la

espiga, peso del grano expresado como materia seca, longitud de raíces por unidad de volumen de suelo y profundización radicular. El submodelo para el balance hídrico incluye la transpiración por la planta, la evaporación directa del suelo, la evapotranspiración potencial, el drenaje, el escurrimiento, el contenido de humedad del suelo e índices de estrés hídrico. Finalmente el submodelo para balance de nitrógeno tiene en cuenta la cantidad de nitrógeno proveniente de nitratos y amonio en el suelo, la cantidad de nitrógeno en el grano y en las partes vegetativas de la planta y las pérdidas de nitrógeno asociadas con el lavado, denitrificación y volatilización, más un índice de estrés para nitrógeno.

Módulo de desarrollo

Para poder llegar a una buena predicción del crecimiento es importante una buena cuantificación de la duración de cada una de las fases del ciclo del cultivo, la duración de cada fase es expresada como suma térmica con una temperatura base dada y teniendo en cuenta la sensibilidad a la duración del día, los cultivares de maíz responden entonces modificando la duración de sus fases en función de la temperatura y el fotoperíodo, como así también al estrés hídrico y nutricional que pueden aumentar o reducir la tasa de desarrollo.

Las características específicas de cada cultivar están dadas, en el caso de maíz, por un requerimiento térmico para la fase juvenil, para la duración entre la aparición de dos hojas sucesivas y para la etapa de llenado del grano a partir de floración femenina, teniendo en cuenta la sensibilidad fotoperiódica.

La edad fisiológica de la planta es descripta por nueve estadíos excepto el número 7 que es específico para simulaciones de estrategias y para modificar el comienzo de la simulación en un momento anterior a la fecha de siembra. Por otra parte en cada fase se define una escala jerárquica de partición de la materia seca producida en función de la prioridad de crecimiento de cada uno de los órganos de la planta (Tabla 1).

Tabla 1 Estadíos de crecimiento del cultivo de maíz, descriptos en el modelo CERES y crecimiento de los distintos órganos durante esos estadíos

Estadío	Eventos para cada estadío	Prioridad de crecimiento
7	Barbecho	
8	Siembra-Germinación	
9	Germinación-Emergencia	Raíces
1	Emergencia-Fin Período Juvenil	Hojas y Raíces
2	Fin Período Juvenile-Iniciación de la flor masculina	Hojas, tallos y raíces
3	Iniciación flor masculina – Finalización del crecimiento de las hojas	Hojas, tallos y raíces
4	Finalización del crecimiento e las hojas – Comienzo de llenado del grano	Tallo, espiga, raíces
5	Comienzo del llenado del grano – Madurez fisiológica	Granos y raíces
6	Madurez fisiológica – Cosecha	

La producción de materia seca total es el producto de la tasa de crecimiento por la duración para cada período fásico. La producción económica, el rendimiento, es la fracción de materia seca que es particionada al grano, que tiene un rango de partición desde 0 hasta más de 0.5 para el caso de cultivos con un estrés severo y en condiciones óptimas de crecimiento respectivamente. En la tabla 2 (Ritchie et al, 1998) podemos ver los factores que inciden en el crecimiento y desarrollo y la sensibilidad al estrés.

Tabla 2: Factores que intervienen en los procesos de desarrollo y crecimiento de la planta y su sensibilidad a estrés hídrico y de nitrógeno (Ritchie,1991)

	Crecimiento		Desarrollo	
	Materia Seca	Expansión	Fásico	Morfológico
Principal factor ambiental	Radiación solar	Temperatura	Temperatura y fotoperíodo	Temperatura
Grado de variación entre cultivares	Bajo	Bajo	Alto	Bajo
Sensibilidad de la planta al déficit de agua	Bajo – Regulación estomática Moderado – Para marchitamiento y enrulamiento de la hoja	Alto – Estadíos vegetativos Bajo – Estadío de llenado del grano	Bajo – retrasa los estadíos vegetativos	Bajo
Sensibilidad de la planta al déficit de nitrógeno	Bajo	Alto	Bajo	Bajo

Para el crecimiento el factor que juega un rol fundamental es la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR), que en términos generales es un 50% de la Radiación Global. Entonces la producción de materia seca tiene estrecha relación con la absorción de la PAR que se define a partir de la PAR incidente y de la eficiencia de intercepción en función de la superficie foliar disponible en cada momento del ciclo. Una parte del carbono fijado o asimilado por fotosíntesis se pierde a través del mecanismo de la respiración.

La variabilidad en el desarrollo fásico permite seleccionar cultivares que sincronicen su ciclo de acuerdo a las mejores condiciones térmicas e hídricas para un ambiente en particular, constituyéndose en la característica más importante para relacionar el riesgo con la producción del cultivo. El desarrollo morfológico se refiere al comienzo y final del desarrollo de distintos órganos de la planta, dando una indicación del número de hojas y granos que pueden ser producidos por la planta.

En resumen para el módulo de desarrollo el model CERES-Maize toma en cuenta como variables de entrada:

- la temperatura mínima diaria
- la temperatura máxima diaria
- la duración del día, en función la de latitud y el día del año.

Los parámetros a nivel del cultivo son:

- la suma de temperaturas medias por encima de una temperatura base determinada desde la emergencia hasta el fin de la fase juvenil, y que queda definido como coeficiente genético específico **P1**.
- Sensibilidad fotoperiódica después de la etapa juvenil expresada como coeficiente **P2**.
- La suma de temperaturas medias menos la temperatura base desde floración femenina hasta la madurez fisiológica definido por el coeficiente **P5**
- Sumatoria en grados día entre la aparición de dos hojas sucesivas, y que constituye el cuarto coeficiente genético **PHINT**.

Mientras que las hipótesis para este módulo (Bonhomme et Ruget 1991) se basan en que las sumas térmicas particulares permiten estimar las fechas de:

- emergencia, en función de la profundidad de siembra.
- fin de la fase juvenil
- diferenciación de la flor masculina, en función de la sensibilidad fotoperiódica para cada genotipo.
- floración femenina.
- comienzo efectivo del llenado del grano.
- madurez fisiológica.

Módulo de producción

Este módulo es el motor del modelo y toma en cuenta la intercepción de la radiación por las hojas para determinar la producción de asimilados por fotosíntesis a partir del gas carbónico del aire.

La fórmula general que define la producción potencial diaria de materia seca es:

$$PCARB = IPAR \times RUE$$

Donde IPAR es la fracción de PAR interceptada por las plantas expresada en MJ m^{-2} y RUE es la eficiencia en el uso de la radiación expresada en g MJ^{-1} , en el caso del CERES-Maize se toma una eficiencia promedio de 5.0 g MJ^{-1} , con un óptimo de temperatura para fotosíntesis de 26°C .

Los valores de IPAR son afectados por el coeficiente de extinción, que está definido en general para cada especie en función del ángulo de inserción foliar y del Índice de Área Foliar (IAF). El valor potencial de producción de materia seca (PCARB) puede disminuir en función de la temperatura (factor PRFT), del déficit hídrico (factor SWDF1) y de los déficits

de nitrógeno (factor NDEF1), cada uno de estos tres factores varía entre 1 (no limitante) y 0 (máximo déficit), de donde la fórmula propuesta originalmente queda como:

$$\text{CARBO} = \text{PCARB} \times \min(\text{PRFT}, \text{SWDF1}, \text{NDEF1})$$

Expresada en g m⁻². Donde “min” implica afectar la producción potencial diaria por el factor más limitante de los tres considerados.

La variable de entrada es la radiación global diaria, Mientras que las hipótesis para este módulo son:

- La superficie foliar del cultivo es conocida a partir de una estimación del módulo de crecimiento.
- Existe una proporcionalidad entre la fotosíntesis y la radiación solar diaria interceptada por el cultivo.
- La fotosíntesis diaria está ponderada por la temperatura con un máximo en 26°C.

Módulo de partición

En este módulo se cuantifica el crecimiento de cada órgano, pudiendo definir tres tipos de órganos que tiene una importancia fundamental:

- Las hojas, cuya superficie condiciona la producción fotosintética.
- Las raíces, donde la profundización y exploración de cada horizonte permite calcular la extracción hídrica
- Los granos como producción económica

Las hojas: la estimación de la instalación temprana del sistema foliar es crítico, para obtener los valores de índice de área foliar necesarios para el cálculo de la producción de materia seca. La expansión foliar resulta de afectar la tasa de expansión potencial multiplicada por una fracción que varía entre 0 y 1 relacionada con temperatura no óptima, y déficit de agua y nitrógeno. En el modelo CERES-Maize se trabajó para simular el patrón de senescencia natural acoplado al desarrollo de la planta, este patrón natural se acelera en condiciones de alta densidad de cultivo y altos valores de área foliar, donde las hojas inferiores están sombreadas causando una falta de actividad en la hoja y un inicio de senescencia. Los déficits de agua y nitrógeno aceleran este proceso.

Posterior a los momentos tempranos del ciclo del cultivo comienza el alargamiento de entrenudos del tallo y se convierte en el destino más importante para los asimilados producidos por fotosíntesis, a medida que el crecimiento del tallo avanza la prioridad de este órgano aumenta, siendo mayor en el momento en que se **detiene la expansión** foliar. El tallo es el órgano principal de almacenamiento de sustancias de reserva y su acumulación se produce hasta el momento de crecimiento efectivo del grano, posterior a la floración femenina. Estas sustancias de reserva podrán ser usadas total o parcialmente durante el

período de llenado del grano en función de la ocurrencia de algún tipo de estrés que limite la fuente para el suministro de carbohidratos al grano.

Las hipótesis que contiene el modelo referidas a la instalación del sistema foliar son:

- Existe un perfil foliar, que sirve para calcular la superficie de las distintas hojas cuya tasa de aparición está en función de la temperatura, ese perfil es variable con el número total de hojas expandidas.
- La superficie foliar se reduce por senescencia de una manera creciente a medida que avanzamos en la ontogenia de la planta.

- **Las raíces:** el compartimento raíces puede tener crecimiento durante todo el ciclo de la planta. Si bien no es fácil disponer de datos que permitan una mejor evaluación del crecimiento de la parte radicular a campo, en el modelo se plantean hipótesis con un supuesto de porcentaje mínimo de la materia seca total como destino para el crecimiento de la raíces, que varía para las diferentes fases y disminuye a medida que avanzamos en la ontogenia de la planta. Por otra parte el modelo tiene un sistema de control dinámico entre el crecimiento de la parte aérea y radicular, en ambientes con limitación de radiación o competencia por luz por altas densidades de plantas la parte aérea tiene prioridad en la utilización de los asimilados, mientras que una limitación edáfica por agua o nutrientes genera una prioridad de los asimilados hacia las raíces.

Los parámetros suplementarios que utiliza el modelo para el crecimiento de las raíces son la profundidad máxima y el número de horizontes del suelo para el cálculo del balance hídrico.

Mientras que las hipótesis referidas a crecimiento de raíces son:

- El perfil de enraizamiento crece linealmente en función de la suma de temperaturas.
- El perfil radicular es una función exponencial de la profundidad
- La longitud de las raíces en una capa u horizonte de suelo determinado se obtiene a partir del peso de raíces bajo el supuesto de una masa linear constante.

- **Los granos:** el número de granos por unidad de superficie es el determinante más crítico del rendimiento. Si bien existe un conocimiento cualitativo del tamaño relativo de la planta frente al tamaño óptimo en el momento de crecimiento de la espiga, es importante destacar la tasa de producción de materia seca, la duración durante el crecimiento de la espiga y las buenas condiciones para polinización. El modelo estima el número de granos a partir de la tasa de fotosíntesis alrededor de floración femenina y del número potencial de granos por planta.

La tasa de llenado del grano se calcula diariamente a partir del concepto de fuente-destino y de movilización de las reservas del tallo. La fuente es entonces una combinación de los productos de la fotosíntesis foliar más la removilización de las reservas acumuladas en el

tallos. Sobre el final del período de llenado del grano la tasa se reduce debido a senescencia foliar y a disminución de las reservas acumuladas en el tallo.

Para caracterizar el crecimiento de la espiga y de los granos, el modelo define dos parámetros genotípicos relacionados estrechamente con la producción de granos:

- - el número máximo de granos por planta (G2)
- - la tasa de crecimiento potencial de los granos durante el período de llenado (G3)

Las hipótesis para la producción de granos son:

- El número real de granos se determina a partir del coeficiente G2, al comienzo del período de llenado en función de la fotosíntesis después de floración
- El llenado de los granos es prioritario y lineal en función de la suma de temperaturas, de la translocación desde el tallo para compensar un porcentaje de la eventual falta de asimilados durante esta etapa.

Módulo de limitación hídrica

En el modelo CERES-Maize el déficit hídrico está caracterizado por la relación entre la transpiración real y la demanda climática, a partir de esa relación el modelo calcula dos coeficientes, el SWDF1 (menos sensible) y el SWDF2 (más sensible) que intervienen en la fotosíntesis y en el crecimiento respectivamente.

Las hipótesis son:

- La germinación es posible únicamente con niveles de humedad suficientes en la superficie del suelo.
- La profundización de las raíces depende de SWDF1, de la humedad en la capa u horizonte de suelo más profunda y de la temperatura
- El valor mínimo de SWDF1 o del coeficiente de temperatura reduce la producción de materia seca.
- El crecimiento diario de la superficie foliar es reducido por SWDF2.
- El crecimiento de la espiga inmediatamente después de la floración femenina depende del grado de déficit hídrico.

Datos necesarios para calibrar y evaluar el modelo CERES-Maize

La utilidad de los modelos no depende sólo de su disponibilidad para su aplicación, sino también la disponibilidad de la información que pueden hacer posible correr los

modelos para diferentes escenarios, y conocer la exactitud de esos modelos para una región o regiones determinadas. Los datos requeridos figuran en forma detallada en el tabla 3.

Tabla 3 Contenido de los datos mínimos necesarios para la operación, calibración y evaluación del modelo CERES-Maize (Hunt and Boote, 1998).

A - Para operar el modelo

1.- Sitio

- Latitud y longitud, elevación, promedio de temperatura anual y promedio de la amplitud térmica anual.
- Pendiente y aspectogeneral del paisaje, drenaje, presencia de piedras en superficie.

2.- Clima

- Radiación global diaria, temperaturas máxima y mínima y precipitaciones.

3.- Suelos

- Clasificación usando el sistema local y el sistema taxonómico del USDA-SCS a nivel de familia.
- Características básicas del perfil por cada capa de suelo u horizonte: determinaciones in situ curvas de retención hídrica (saturación, límite superior de drenaje (CC = Capacidad de Campo) y límite inferior (PM = Punto de Marchitez); densidad aparente, carbono orgánico; pH, factor de crecimiento de raíces, coeficiente de drenaje.

4.- Análisis de suelos

- Mediciones en las capas superficiales del suelo de la densidad aparente, carbono orgánico, nitrógeno orgánico, pH, P y K.

5.- Condiciones Iniciales

- Cultivo antecesor, raíces y cantidad de nódulos
- Agua, amonio y nitratos por capa de suelo.

6.- Manejo

- Nombre del cultivar y tipo
- Fecha de siembra, profundidad y método, espaciamiento entre surcos y dirección, densidad de plantas
- Irrigación y manejo del riego, fechas, métodos de riego y cantidades o profundidades.
- Fertilización inorgánica.
- Residuos (fertilizante orgánico), material vegetal, profundidad de incorporación cantidad y concentración de nutrientes
- Aplicaciones de otros agroquímicos
- Labranza
- Esquema de Cosecha

B. Para la Calibración

Lo indicado anteriormente más:

7.- Funcionamiento del cultivo:

- Fecha de emergencia
- Fecha de floración femenina
- Fecha de madurez fisiológica
- Área foliar y peso de la parte aérea de la planta en distintos momentos del ciclo.
- Rendimiento en grano expresado como materia seca
- Materia Seca total a cosecha o Índice de cosecha
- Peso unitario del grano en materia seca
- Número de granos por espiga o por planta
- Número de hojas producidas
- Porcentaje de nitrógeno en el grano
- Porcentaje de nitrógeno en el resto de la planta

Estos datos son necesarios tomando en cuenta los mismos cultivares y contemplando el mayor rango posible de condiciones ambientales.

C. Evaluación

Incluye todos los aspectos para la operación del modelo más la información de campo para la cual se validará el modelo (p.ej. fecha de floración femenina, madurez fisiológica, rendimiento en grano, materia seca de la parte aérea, entre otros). Se requieren datos de un número de experimentos que permitan evaluar la precisión y exactitud del modelo en un amplio rango de ambientes.

El modelo CERES-Maize requiere para su operación los aspectos relacionados a la caracterización del ambiente – clima y suelo - más otros aspectos del sistema como las características genéticas de los cultivares y el manejo del cultivo (fecha de siembra, distribución de plantas(densidad y espaciamiento), cantidad y dosis de fertilizante aplicado, láminas y momentos de riego).

Este modelo requiere que los datos climáticos tengan un registro diario, y esa complejidad de frecuencia de paso diario es, probablemente, la más apropiada para la aplicación en la producción de cultivos y en el estudio de problemas de sostenibilidad del ambiente. El mínimo juego de datos necesarios para la operación fue definido de manera de permitir que este modelo pueda ser usado ampliamente dentro de ese nivel de complejidad.

La calibración implica fundamentalmente, la caracterización genotípica de cada uno de los cultivares en estudio, a través de seis coeficientes genéticos, cuatro de desarrollo (P1, P2, P5 y PHINT) y dos de crecimiento (G2 y G3) definidos anteriormente en los módulos de desarrollo y partición. Los experimentos para la medición y cálculo de esos coeficientes se realiza contemplando la variabilidad ambiental, sin limitación hídrica ni nutricional, utilizando distintas fechas de siembra para cada condición ambiental específica, de manera de conocer el comportamiento de los cultivares en un rango más amplio de escenarios. Para una calibración que incluya estrés de agua y de nitrógeno, se deben instalar experimentaciones que contemplen diferentes niveles para ambos factores (simulación de sequía a campo, diferentes métodos y niveles de riego deficitario, distintos niveles de fertilización nitrogenada) y contar con mediciones con un mayor grado de detalle y frecuencia sobre distribución de raíces, contenido de humedad y evolución del nitrógeno inorgánico en el perfil del suelo durante todo el ciclo del cultivo de maíz.

La evaluación del modelo incluye la comparación de las salidas del modelo previamente calibrado frente a los datos reales para las variables deseadas. Esta evaluación permite conocer las bondades de uso de esta herramienta, a partir de la exactitud y precisión obtenida en la simulación. Si el objetivo fuera la predicción del rendimiento, la evaluación permitiría conocer la relación entre los valores calculados por el modelo y los valores reales medidos. Se pueden especificar ambientes a partir de índices ambientales (usado en programas de mejoramiento), o bien en función de factores agronómicos (fecha de siembra, densidad de plantas) o en términos de los aspectos físicos más importantes del ambiente (profundidad del perfil de suelo, duración del día, temperaturas medias).

Adquisición de datos

Clima: a partir de los registros de la Red de Estaciones Agroclimáticas del INTA o bien del Servicio Meteorológico Nacional.

Suelo: a partir de las Cartas de Suelo de INTA o de las publicadas a nivel provincial, o bien de información detallada mediante muestreos en calicatas para las determinaciones de las propiedades físicas, químicas e hídricas de cada perfil en estudio.

Genéticos: medición y cálculo de los coeficientes genéticos mediante experimentaciones de acuerdo a protocolos específicos, contemplando la variabilidad ambiental.

Manejo del cultivo: protocolos de ensayos y/o información a nivel de lote de producción o de pautas de manejo regional (fechas de siembra, densidad de plantas, espaciamiento de entre surcos, fertilización, dosis y momentos) Teniendo en cuenta las mediciones de las condiciones iniciales de agua y nitrógeno en toda la profundidad del perfil potencialmente explorable por las raíces.

Los datos de entrada, las salidas obtenidas a partir de las simulaciones como así también el comportamiento del cultivo figuran en archivos específicos que están descriptos en la tabla 4.

Tabla 4 Archivos usados para el almacenaje y transferencia de los datos más importantes para la operación, calibración y evaluación del modelo (Hunt and Boote, 1998).

Nombre de Referencia	Nombre del archivo (ejemplo)	Descripción
ARCHIVOS DE ENTRADA		
Detalles Experimentales Archivo _X CNPE9801.MZX		Detalles experimentales para un estudio específico de condiciones de campo o manejo
Clima y suelo Archivo _W CNPE9801.WTH		Datos climáticos diarios para un sitio y período determinados
Archivo _S SOIL.SOL		Datos del perfil del suelo para sitios experimentales o para un instituto determinado
Cultivo y cultivar Archivo _C MZCER980.CUL		Coeficientes genéticos específicos por cultivar
ARCHIVOS DE SALIDA		
OUT _O OVERVIEW.OUT		Vista general de las entradas y las salidas más importantes de las variables de cultivo y suelo.
OUT _S SUMMARY.OUT		Información resumida: entrada de suelo y cultivo y variables de salida.
OUT _G GROWTH.OUT		Información detallada en una secuencia de tiempo de: Crecimiento
OUT _W WATER.OUT		Balance hídrico

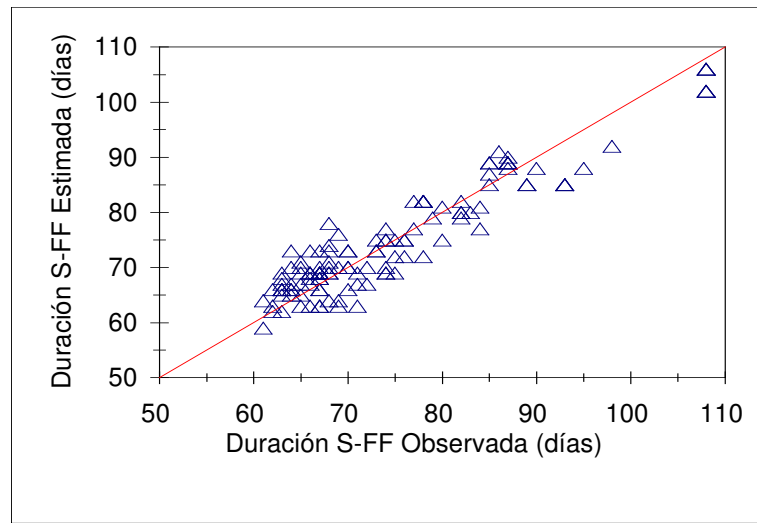
OUT _N NITROGEN.OUT	Balance de nitrógeno
ARCHIVOS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	
ARCHIVO _A CNPE9701.MZA	Valores promedio de los datos observados en un experimento específico (comparación con los resultados del modelo, p.ej rendimiento)
ARCHIVO _T CNPE9701.MZT	Datos promedio durante el ciclo del cultivo para un experimento específico (comparación gráfica entre valores medidos y simulados durante el ciclo del cultivo, p.ej. materia seca particionada)

Resultados obtenidos a nivel local

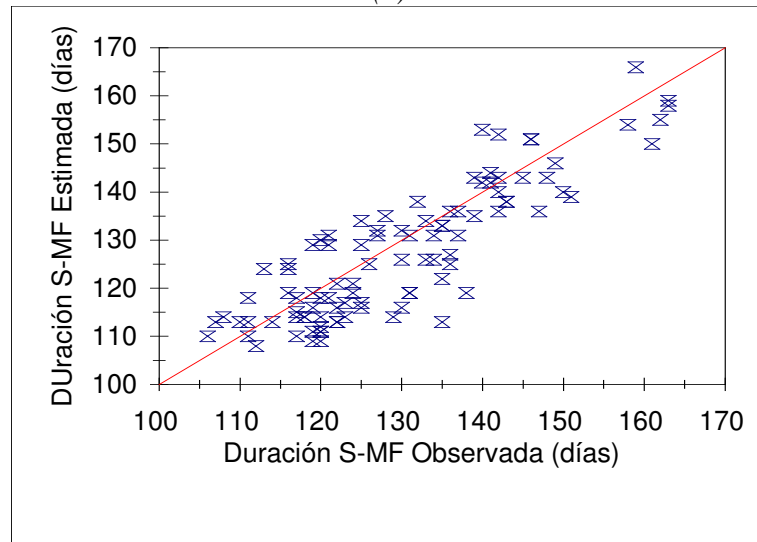
En nuestro país el trabajo con el modelo de cultivo CERES-Maize comienza a partir de la campaña 1991-92 con la calibración para las condiciones ambientales y de manejo del maíz en la zona cerealera típica. Las experimentaciones incluyeron los ambientes Rafaela, Paraná, Manfredi, Pergamino, Anguil, Balcarce e Hilario Ascasubi y para un híbrido doble semiprecoz y un híbrido triple de ciclo completo. Posteriormente se trabajó con niveles de agua y nitrógeno para validar las subrutinas respectivas. Los resultados de la validación en distintos ambientes y escenarios, mostraron un buen grado de ajuste del modelo, para la predicción de la fenología y el rendimiento comparando los valores estimados y medidos.

La aparición de nuevos híbridos, con modificaciones en su fenología, en la tasa de crecimiento y en su potencialidad, generaron la necesidad de una nueva calibración y evaluación del modelo que incluyera la caracterización de fenología y crecimiento de estos nuevos genotipos. Se trabajó durante las campañas 1997-98 (5 genotipos) y 1998-99 (10 genotipos), en los ambientes Rafaela, Paraná, Marcos Juárez, Oliveros, Balcarce, Barrow y Pergamino. Para la caracterización de los cultivares se realizaron observaciones fenológicas de emergencia, tasa de aparición foliar, y floración femenina, la madurez fisiológica se calculó a partir de las mediciones de crecimiento del grano en el momento donde cesó la acumulación de materia seca, así mismo se realizó el recuento de granos por espiga para la determinación del número de granos por planta y con las mediciones del crecimiento del grano se calculó la tasa potencial de llenado.

Una vez calibrado el modelo para esos nuevos genotipos se utilizó un juego de datos fenológicos y de rendimiento obtenidos en los diferentes ambientes para evaluar el modelo en cuanto a su capacidad de predicción para la duración del ciclo a Floración Femenina (Fig 2a), a Madurez Fisiológica (Fig 2b) y para Rendimiento en grano (Fig 3). Los valores estimados por el modelo frente a los valores observados mostraron una correlación de 0.94 ($b = 0.84 \pm 0.027$; $n=123$), 0.87 ($b = 0.89 \pm 0.052$; $n=97$) y 0.81 ($b = 0.74 \pm 0.053$; $n=106$), para fecha de floración femenina, madurez fisiológica y rendimiento respectivamente (Guevara et al, 1999).



(a)



(b)

Fig 2: Valores observados y estimados por el modelo CERES-Maize para los períodos Siembra – Floración Femenina (S – FF) (a) y Siembra – Madurez Fisiológica (S – MF) (b), para 10 híbridos de maíz en diferentes fechas de siembra y para seis ambientes de la región cerealera

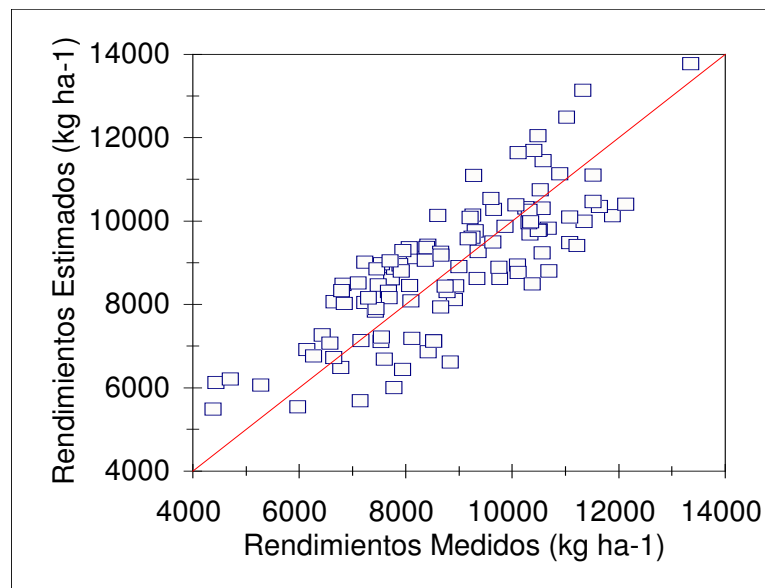


Fig 3: Rendimientos medidos y estimados por el modelo CERES-Maize, para 10 híbridos de maíz en diferentes fechas de siembra y para seis ambientes de la región cerealera

Un trabajo similar se realizó para tres híbridos tropicales, para los ambientes específicos de Santiago del Estero y Encarnación (Paraguay) (Guevara y Meira 1999). Las experimentaciones se condujeron sin limitación hídrica ni nutricional. Los resultados obtenidos mostraron dos situaciones contrastantes tanto en cuanto a su potencialidad media, como en impacto de las condiciones ambientales sobre el rendimiento en grano. Cuando se compararon los valores del rendimiento simulado por el modelo frente al rendimiento medido a campo se obtuvo una correlación de 0.96 ($b = 0.92 \pm 0.069$, $n=17$) (Fig 4)

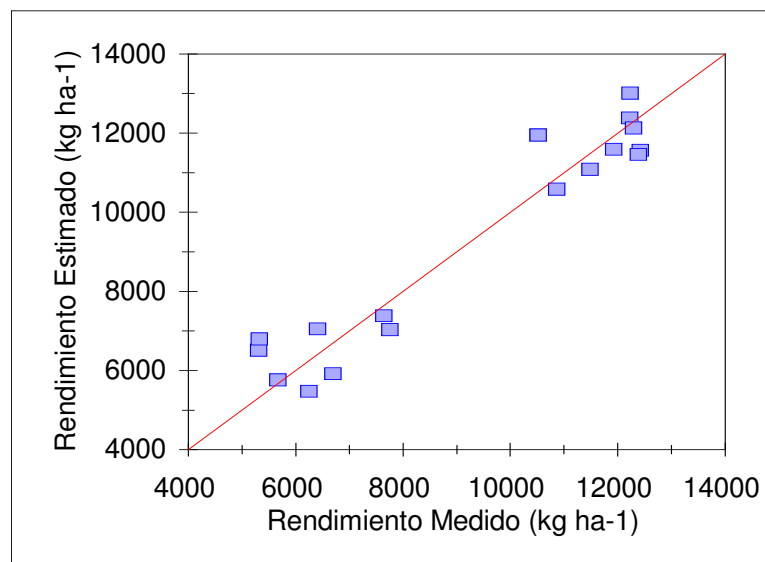


Fig 4: Rendimientos medidos y estimados por el modelo CERES-Maize, para 3 híbridos de maíz tres fechas de siembra y para dos ambientes subtropicales: Santiago del Estero y Encarnación (Paraguay)

EVALUACION DE ESTRATEGIAS

La complejidad el sistema biológico en el que se desarrolla la producción agrícola no permite avanzar muy rápidamente debido a la incertidumbre climática. Los productores no pueden conocer la respuesta a un insumo determinado, p.ej. fertilizante, con anterioridad a su siembra y sus decisiones están normalmente condicionadas a los años de experiencia admitiendo una probabilidad alta de fallas y aciertos. Por otra parte la dinámica de la tecnología agrícola hace que se incorporen nuevas prácticas de manejo al sistema, que a su vez deberían ser probadas para evaluar su posibilidad de éxito, sobre todo aquellas que tengan una alta dependencia del clima. Una herramienta para evaluar estas nuevas prácticas puede ser la experimentación tradicional, que necesita de una gran cantidad de ambientes y años para poder obtener resultados que describan el amplio juego de correlaciones planta-ambiente –manejo, normalmente esta larga serie de observaciones suelen no estar disponibles en el tiempo necesario, con lo cual una nueva práctica será evaluada en condiciones de incertidumbre. Los modelos de cultivos simulan las interacciones biológicas en los sistemas de producción agrícola y el efecto del clima sobre cultivares, fertilización e irrigación entre otros. Es posible entonces simular el funcionamiento de una nueva tecnología para una serie climática histórica y ese resultado puede ser comparado con otras estrategias productivas de manera tal de disminuir el impacto del clima en la variabilidad interanual del rendimiento (Godwin et al, 1990)

El modelo CERES-Maize incluye un programa de estrategias productivas, que nos permite analizar el impacto de la combinación de distintos niveles de factores ambientales y de manejo sobre el desarrollo, crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz analizando una serie histórica climática de datos diarios de: radiación, temperaturas mínima y máxima, y precipitaciones. Esta herramienta de estrategias dentro del modelo ha ido adquiriendo una importancia creciente para el estudio de la sostenibilidad y de los problemas ambientales, debido a que define la aproximación más razonable para la cuantificación de los procesos interactivos dentro del sistema biológico. En la Fig 5 podemos ver la respuesta del rendimiento de un híbrido simple de maíz para cuatro niveles de Agua Util Máxima (AUM) a la siembra – 30, 50, 70 y 90 % de AUM – en una serie climática de 30 años de Pergamino y en condiciones de secano.

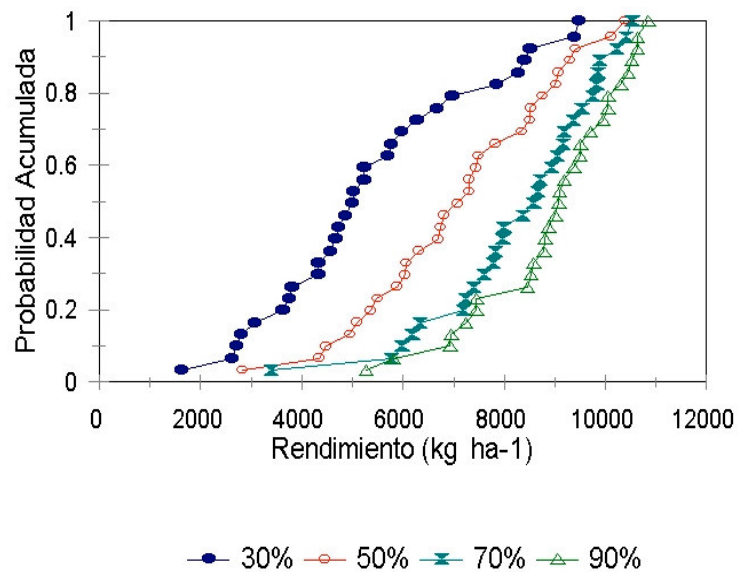


Figura 5. Probabilidad de rendimiento para maíz, durante una serie climática histórica, para cuatro niveles de agua útil máxima a la siembra.

APLICACION DE LOS MODELOS DE SIMULACION

Estrategia de irrigación

Un aspecto importante es poder predecir y evaluar la estrategia de riego deficitario (Keating et al 1991), que estará en función de la escases del recurso hídrico. En la figura 6 podemos ver la diferencia que se da en la aplicación de riego con criterio permanente durante el ciclo, con lo cual se incrementan las pérdidas de agua de riego, y si bien se puede maximizar el rendimiento disminuye la EUAr (Eficiencia en el Uso del Agua de riego).

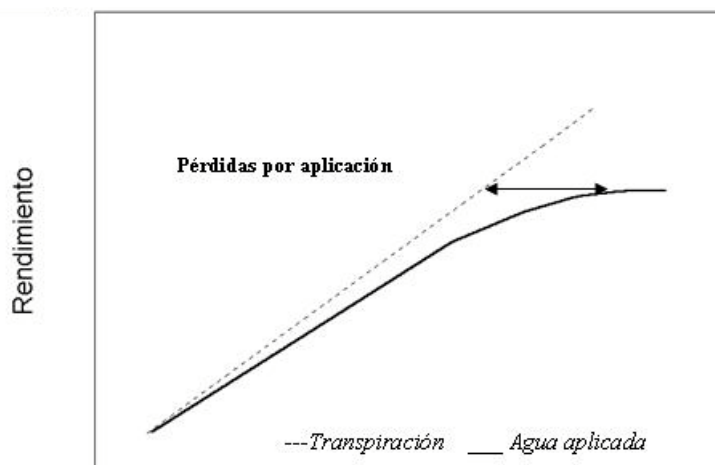


Figura 6. Forma general de la función de producción de un cultivo (según English, 1990)

Para desarrollar una estrategia relacionada con la práctica de riego deficitario es necesario contar con las respuestas del cultivo a la aplicación de láminas diferenciales durante el ciclo y además conocer las limitaciones ambientales al suministro de agua (Lecler, 1998), esta información puede obtenerse a partir de experimentaciones o bien usando modelos de simulación. Los inconvenientes de la experimentación son:

- datos caros y con gran consumo de tiempo, dificultando testear un gran número de cultivos en cuanto a la aplicación de agua y de manejo
- los experimentos son específicos para una localidad dada y es difícil extrapolar estos resultados más allá del sitio donde se realizó y de la estacionalidad durante el año
- usualmente se cuentan con pocos años de experiencias para ese o esos ambientes específicos.
- la mayoría de los ensayos tienen como objetivo la maximización de los rendimientos y no incluyen la respuesta a combinaciones de niveles de distintos factores.

Mientras que los modelos de simulación si bien se basan sobre modelos experimentales representan conceptualmente un rango de sistemas en el mundo real que proveen formas de transferir conocimientos desde mediciones experimentales hasta situaciones sin experimentación donde la información sobre el manejo es necesaria, entonces el uso de la herramienta de modelización nos permite:

- evaluar un amplio rango de diseños o estrategias de manejo en forma relativamente rápida y poco costosa.
- evaluar diferentes estrategias para un amplio rango de condiciones inciertas tales como estaciones secas o húmedas.

- integrar numerosos y complejos procedimientos y conocimientos que pueden ser usados como ayuda en la toma de decisiones.

Como un ejemplo específico del uso de los modelos de simulación para definir esquemas de irrigación tenemos:

- Esquema de demanda de acuerdo a la disminución del agua del suelo: se requiere una determinada lámina de riego cuando el agua contenida en una capa definida de suelo alcanza un valor umbral. Por ejemplo un umbral equivalente a un 50% del agua disponible. Las experimentaciones que se hayan conducido con umbrales de AUM durante distintos períodos fenológicos del cultivo nos permite disponer de resultados que facilitan una mejor elección del criterio a utilizar minimizando la disminución del rendimiento y mejorando la EUAr (Eficiencia del Uso del Agua de riego).

- Esquema con un ciclo y láminas fijas de riego: es un esquema fácilmente manejable, pudiéndose optimizar la duración de los ciclos y las láminas a aplicar optimizando la eficiencia del agua del riego. Esta aproximación es más adecuada para un esquema de irrigación deficitaria, respecto a la EUAr, comparada con el esquema de irrigación completa durante todo el ciclo. Es fácil de seleccionar las especificaciones de equipo óptimas para este tipo de riego y la simulación por computadora es fácil de implementar a nivel de productor.

- Esquema con ciclo fijo y lámina variable: este sistema es útil para riego por aspersión manual o “dragline irrigation system”. El equipo se mueve se acuerdo a ciclo fijos y esquemas regulares, lo que simplifica el manejo. La irrigación se produce en el momento del requerimiento por el cultivo teniendo en cuenta las limitaciones del equipo. La lámina aplicada después de cada posición está determinada por la capacidad potencial de almacenamiento del suelo, que puede ser completa o parcialmente recargado dependiendo de las limitaciones del sistema y de la disponibilidad de agua, la aplicación puede realizarse antes de la siembra y completar con riegos tempranos de manera de tener el agua disponible en los momentos de mayor requerimiento de evapotranspiración, que sería imposible disponer debido a que es probable que los requerimientos en un momento dado del ciclo excedan la capacidad del equipo de riego.

En la Fig 7a se puede ver el impacto de la técnica de riego en la productividad de un cultivo de maíz, utilizando un híbrido simple, sembrado a fines de septiembre con una densidad 7.5 pl m⁻² a cosecha. Las medias de productividad para una serie climática histórica son de 7 t ha⁻¹ y 10.2 t ha⁻¹ para secano y riego respectivamente. Para el 50% de los años los niveles de rendimiento para secano estarán entre 5.8 y 8.6 t ha⁻¹, mientras que con irrigación esa probabilidad tendrá límites de 9.8 y 11 t ha⁻¹

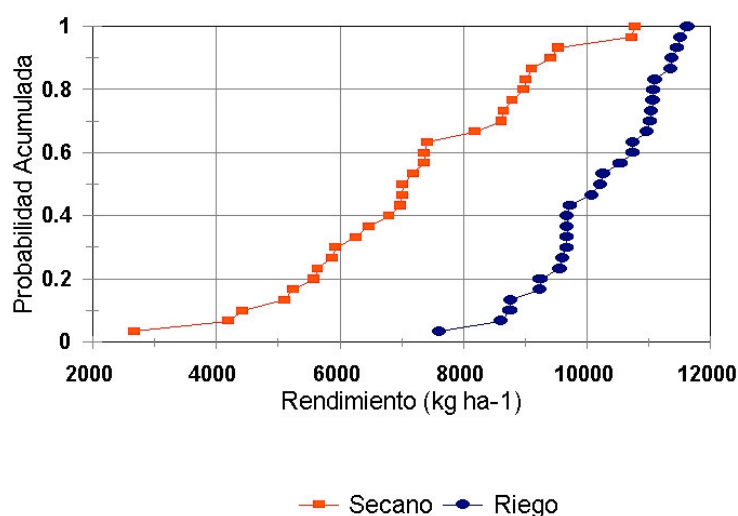


Figura 7. Rendimiento en condiciones de riego y secano para un híbrido simple sembrado a fines de septiembre con una disponibilidad hídrica a la siembra de 70% AUM y fertilizado con 120 kg N ha⁻¹.

Estrategia de fertilización nitrogenada

Los modelos pueden aportar a la resolución de : - cuantificación de las interacciones entre el clima-manejo y propiedades del suelo relacionadas a la oferta y demanda de nitrógeno; - identificar los factores o procesos que ofrecen la mayor potencialidad para mejorar el funcionamiento del sistema (Keating et al 1991)

La mayoría de las recomendaciones para la aplicación de nitrógeno en un sistema de cultivo anual se basan en un balance entre los requerimientos del cultivo para un objetivo de rendimiento y las cantidades disponibles de nitrógeno en el suelo, con modificaciones de aprovechamiento a partir de coeficientes de eficiencia del uso de cada uno de los componentes del sistema nitrógeno. Para cuantificar cada uno de los componentes del sistema entonces se deben medir las siguientes variables:

contenido de nitrógeno para alcanzar el objetivo de rendimiento, el nitrógeno potencialmente mineralizable, el nitrógeno total contenido en el suelo, el nitrógeno mineral presente en el perfil de suelo a la siembra y la concentración de nitrógeno o medición de clorofila en los distintos períodos fenológicos del cultivo. La relación entre estas variables son usualmente definidas en los estudios de calibración a campo, con lo cual son consejos definidos para cada sitio específico, y para lo cual se deben conducir experimentos contemplando la variabilidad de suelo-cultivo-clima. Los modelos de cultivos son una herramienta complementaria para evaluar las prácticas de manejo de nitrógeno basadas en la simulación mediante modelos dinámicos, capaces de reproducir los procesos más importantes relacionados a la demanda y oferta de nitrógeno en el sistema (Tabla 5). Juntando la información experimental junto con los modelos disponibles en un marco de modelos dinámicos hacen que esta herramienta sea muy importante para valorar diferentes

estrategias de manejo de nitrógeno en un amplio rango de interacciones ambiente-sistema de cultivo.

Tabla 5: Principales procesos simulados y factores ambientales que los afectan en el submodelo nitrógeno (Bowen and Baethgen, 1998)

Procesos simulados	Principales factores que los afectan
DEMANDA DE N POR EL CULTIVO	
Crecimiento	Radiación solar y temperatura
Desarrollo	Fotoperíodo y temperatura
NITROGENO DISPONIBLE PARA EL CULTIVO	
Mineralización/Inmovilización	Suelo, temperatura, agua en el suelo, C/N
Nitrificación	Temperatura del suelo, agua en el suelo, pH, Concentración de amonio
Denitrificación	Temperatura de suelo, agua en el suelo, pH y Carbono orgánico
Lixiviación de nitratos	Drenaje
Hidrólisis de la urea	Temperatura de suelo, agua en el suelo, pH y Carbono orgánico
Absorción de nitrógeno	Agua en el suelo, Nitrógeno inorgánico, Demanda por el cultivo, Densidad Volumétrica de raíces

La importancia potencial del nitrógeno inicial puede ser demostrado con un ejemplo de simulación. En la Fig 8a se muestra la relación entre la absorción de nitrógeno por el maíz y la producción de materia seca de la parte aérea de la planta para 30 años climáticos en Pergamino. Si bien los niveles iniciales no tienen un rango de diferencias muy grande, tomando los resultados para los extremos de N inicial (71 y 134 kg N ha⁻¹) vemos que la fuente de nitrógeno puede ser importante si el nitrógeno mineral permanece en el perfil el tiempo suficiente para que pueda ser utilizado por las raíces. De todas maneras existen puntos que se escapan de este comportamiento y que deben estar relacionados con años climáticos muy desfavorables, para las condiciones de crecimiento del cultivo.

Cuando contrastamos las mismas variables pero para distintos niveles de agua disponible en el momento de la siembra del cultivo de maíz, se verifica un comportamiento más asociado a la evolución de las condiciones climáticas durante el ciclo del cultivo, salvo para los años más desfavorables donde la limitación por agua afecta la producción de biomasa (Fig 8b)

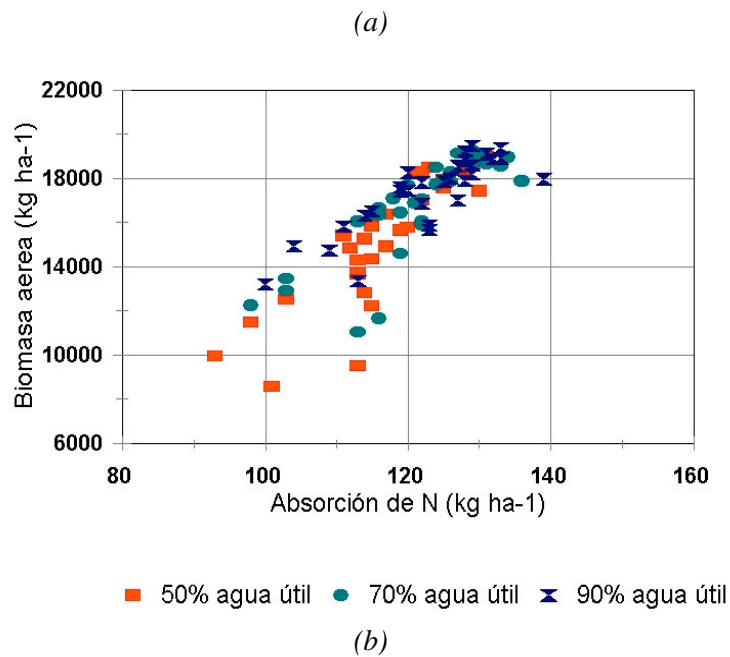


Figura 8.(a) Producción de Biomasa (kg ha-1) y absorción de N (kg ha-1) en tres condiciones de N inicial al momento de la siembra

(b)) Producción de Biomasa (kg ha-1) y absorción de N (kg ha-1) en tres condiciones de agua inicial al momento de la siembra

En la Fig 9 se puede ver la importancia de la lixiviación de nitratos para un cultivo de maíz, sobre un suelo Hapludol para tres fechas de siembra y para una serie climática de 27 años. La fecha de siembra más tardía muestra siempre una mayor lixiviación asociada con mayores precipitaciones durante el ciclo del cultivo. Un 60% de los años la magnitud de la lixiviación estará comprendida entre 10 y 20 kg N ha-1, mientras que para el 15% de los años los valores de lixiviación estarán entre 28 a 45 kg N ha-1 para la siembra más temprana y entre 35 a 71 kg N ha-1 para la siembra más tardía. Esto puede ser importante no sólo para definir el momento más adecuado para la siembra minimizando la lixiviación sino también para la decisión sobre el método y criterios de irrigación, en caso de aplicarse esa práctica.

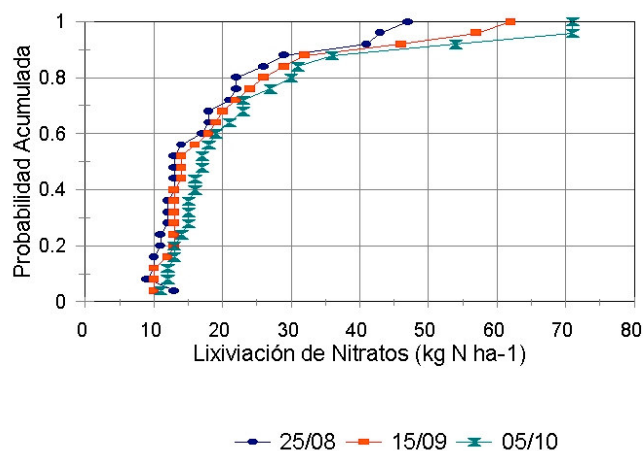
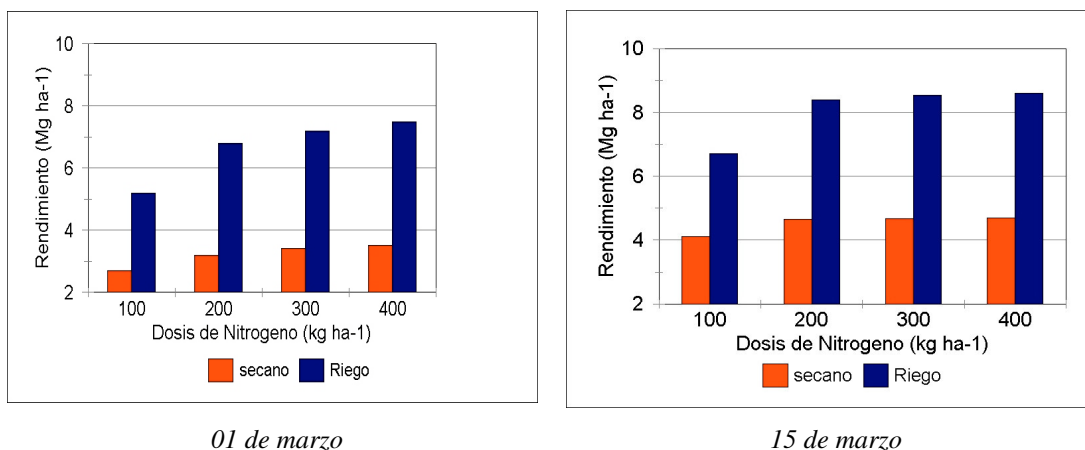


Figura 9. Lixiviación de nitratos (kg ha⁻¹) para tres épocas de siembra en un suelo Hapludol.

Estrategia combinando distintos factores de producción

Una de las aplicaciones es la utilización para definir la combinación de problemas de manejo de cultivos que deben afrontar los productores, el modelo CERES-Maize fue utilizado en Gainesville (Jones and Ritchie, 1990) para definir la mejor combinación de época de siembra, niveles de nitrógeno e irrigación en maíz, se trabajó con cuatro épocas de siembra, cuatro niveles de nitrógeno y las alternativas de riego y secano

Los resultados obtenidos cuando se analizó una serie climática de 22 años fue una mejor respuesta del cultivo en las dos fechas intermedias de siembra, mientras que la combinación de los tres factores permitió definir como mejor estrategia, la siembra intermedia, con un mayor requerimiento hídrico por mayor longitud de ciclo y una respuesta a la fertilización nitrogenada hasta un nivel de 200 kg N ha⁻¹, partiendo de un suelo con niveles bajos de nitrógeno inorgánico inicial en alrededor de 36 kg N ha⁻¹ provenientes de NO₃⁻ y NH₄⁺. (Fig 10)



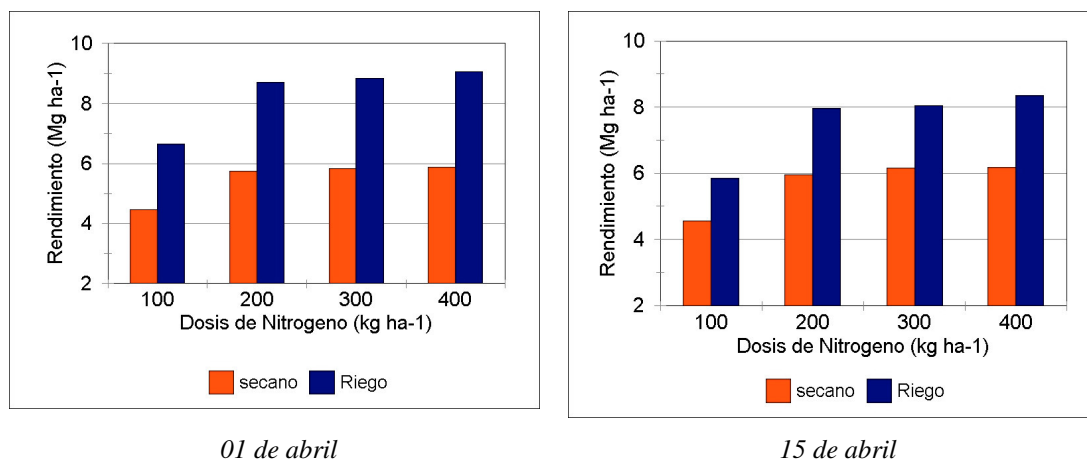


Figura 10. Simulación del rendimiento de maíz, combinando fechas de siembra y dosis de nitrógeno en riego y secano (Según Jones and Ritchie, 1990)

Mejoramiento genético de los cultivos

En mejoramiento genético se han buscado tradicionalmente las características definidas para un buen comportamiento de un cultivar en una región determinada, la disponibilidad de modelos de simulación de cultivos hace posible refinar esta información examinando resultados en forma cuantitativa más que cualitativa, estudiando respuestas ambientales y características morfológicas (Hunt, 1998). Los modelos de simulación de cultivos permiten una nueva aproximación analítica para conocer las bases fisiológicas de la interacción genotipo –ambiente, examinando la respuesta a temperatura, fotoperíodo, humedad del suelo, nutrientes, para identificar los mecanismos que determinan respuestas de adaptación de los genotipos. Este nivel de análisis puede llevarnos a caracterización más realista del ambiente y de los grupos de cultivares (Chapman et Barreto, 1994).

Siguiendo el criterio de las cinco fases propuestas por Boote and Tollenaar (1991) para la construcción del rendimiento, podemos analizar alguna de ellas en cuanto al impacto sobre el mejoramiento genético en maíz a partir del uso de modelos de simulación. La fotosíntesis de las hojas parece ser la característica más importante a mirar para un aumento del rendimiento, a través del mejoramiento genético, al menos por el número de investigaciones realizadas sobre este proceso. En un ejemplo específico para el hemisferio norte Tollenaar (1991) encontró que partiendo de una fotosíntesis máxima (P_{max}) de $2.78 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ seg}^{-1}$ y una eficiencia fotosintética de $1 \text{ mol CO}_2/15 \text{ (mol) fotones}$ en condiciones no limitantes de agua y nitrógeno, y para un promedio del resto de las condiciones ambientales, dio como resultado un rendimiento de 11700 kg ha^{-1} . La tasa de fotosíntesis de la masa foliar puede ser mejorada por: -un incremento en la fotosíntesis máxima foliar (P_{max}), - un incremento en la eficiencia fotosintética y/o una reducción en la respiración. Cuando se duplicó el P_{max} el rendimiento simulado se incrementó en un 17%. Cuando la eficiencia fotosintética se incrementa en un 50%, el rendimiento incrementó un 33%; finalmente cuando se redujo un 25% la respiración de mantenimiento el incremento del rendimiento fue del 14%. Cuando los tres procesos se aplicaron simultáneamente el incremento del rendimiento fue de 82%

(21400 kg ha⁻¹), si bien este rendimiento puede parecer excesivo, se han registrado rendimientos a campo para las mismas condiciones de 19600 kg ha⁻¹. Otro aspecto importante es el uso del modelo para un incremento del rendimiento a partir de la tolerancia al estrés hídrico. En este sentido existen evidencias experimentales que indican que la mejora genética del maíz puede ser atribuida a un incremento en la tolerancia a los estrés abióticos, con un aparente resultado acumulativo a través del proceso de mejoramiento y evaluado a partir de cultivares antiguos y modernos, tomando como indicador la acumulación de materia seca. En experimentos conducidos en Canadá (Tollenaar 1991) se encontró una diferencia de 1.5 hojas a favor de los híbridos de última generación, y la disminución en rendimiento fue un 20% superior en los híbridos más antiguos para condiciones de estrés leve a moderado. En un trabajo conducido durante dos campañas agrícolas en Pergamino, donde se evaluaron 7 híbridos liberados entre 1961 y 1995, en condiciones de sequía simulada a campo y riego, no se encontraron diferencias significativas entre las pendientes obtenidas para ambos tratamientos y para la relación rendimiento-época de liberación del híbrido, lo cual indica que el mejoramiento fue igualmente efectivo en ambas condiciones, en condiciones de sequía los cultivares más antiguos mostraron una disminución del rendimiento de 38% comparados con los híbridos de última generación (Presello et al , 1997)

SUR 98 Sistema de Análisis para la toma de decisiones

El programa SUR 98 se desarrolló en la EEA Pergamino a partir de la rutina de estrategia del modelo CERES-Maize (Guevara et al, 1999). El objetivo fue facilitar y agilizar el uso de la rutina de estrategia de los modelos de cultivos, para ser utilizada en la toma de decisiones previo a la siembra y cuantificar los resultados de la combinación de diferentes prácticas de manejo, evaluando el impacto sobre la fenología y el rendimiento, contemplando la variabilidad climática de una serie histórica e interactuando con el recurso suelo y genético disponibles. Los ajustes obtenidos en las evaluaciones previas del modelo, definen un buen grado de confiabilidad para las tendencias de respuesta a distintas variables ambientales y de manejo, utilizando el análisis de estrategias productivas. Este programa permite a través de distintas carpetas (Fig 11) definir: las condiciones climáticas y el factor suelo, para cada situación específica, ya sea a partir de los climas y suelos contenidos en la base de datos, “disponibles”, que serán seleccionados como “elegidos”, o bien incorporando los datos necesarios para una nueva situación edafoclimática.

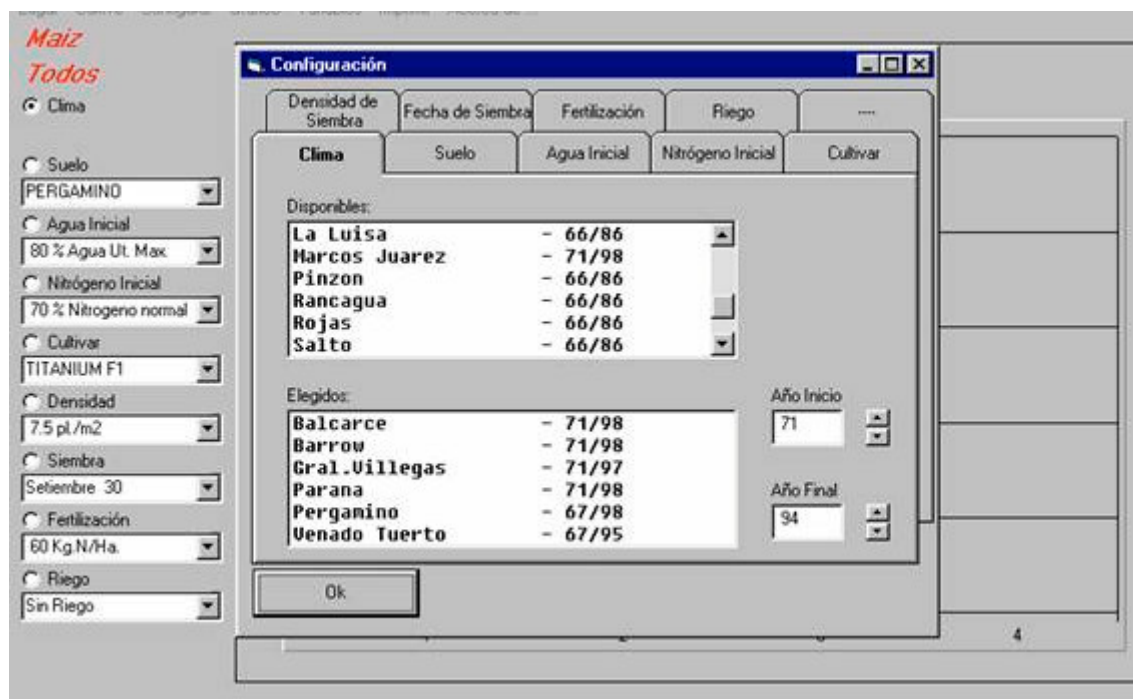


Fig 11: Definición de las variables ambientales y de manejo para la simulación de estrategias productivas. Carpetas para la disponibilidad de recursos ambientales y genéticos, y para la elección de los diferentes niveles de los factores de manejo

Posteriormente podemos elegir distintos niveles de disponibilidad de agua y nitrógeno en el momento de la siembra para evaluar la sensibilidad de cada uno de esos dos factores. La carpeta siguiente define los genotipos disponibles, templados y subtropicales, que fueron previamente caracterizados en desarrollo y crecimiento en experimentaciones dentro de los cuales podemos seleccionar aquellos que sea interés evaluar su comportamiento en diferentes condiciones ambientales y de manejo. Finalmente podemos definir niveles para cuatro factores productivos – fecha de siembra; densidad; fertilización nitrogenada y riego - en estrecha relación con la caracterización ambiental y que serán objeto de estudio para establecer la optimización en cuanto a las estrategias con mayor productividad o bien con una mayor estabilidad en el tiempo. Una vez definida esta configuración, podemos elegir uno de los factores de interés a evaluar. La dificultad de poder mostrar la interactividad en esta presentación , hace que sea necesario utilizar como ejemplo los resultados para un factor productivo específico. Es importante aclarar que tanto los factores ambientales como de manejo tienen una relación jerárquica, siendo el primero el factor climático. En nuestro ejemplo evaluaremos la respuesta para diferentes dosis de nitrógeno, aplicado en forma de Urea en el momento de la siembra e incorporado a 0.10m de profundidad para el clima Pergamino, en un suelo Serie Pergamino, con un nivel de agua y nitrógeno disponibles a la siembra de 80% del AUM (Agua Util Máxima) y 72 kg N ha⁻¹ respectivamente, para un híbrido simple, y con una densidad de plantas a cosecha de 75000 pl ha⁻¹, para una fecha de siembra del 30 de septiembre y en condiciones de secano. La salida de los resultados se muestran en las figuras 14, 15 y 16. A través de un gráfico de barras (Fig 12) podemos ver,

el rendimiento mínimo (límite superior del rojo), máximo (límite superior del verde) y medio (límite superior del amarillo) , expresados en quintales por hectárea en materia seca, como respuesta para cada una de las dosis probadas y para una serie climática histórica desde 1967 a 1997.

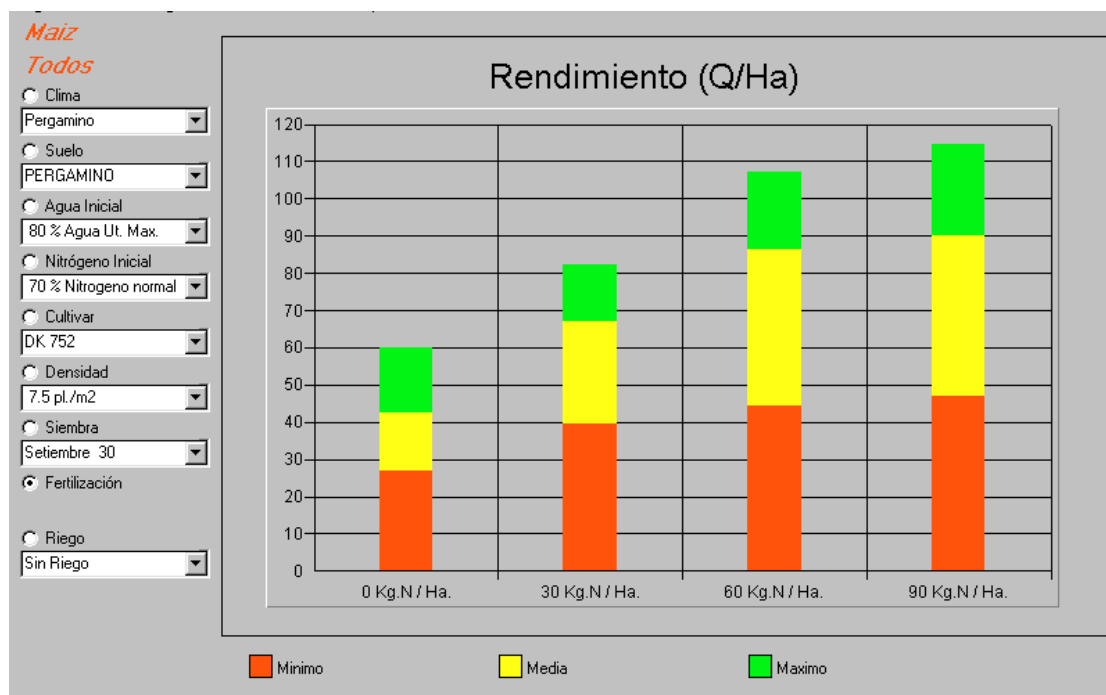


Fig 12: Rendimiento en función de dosis de nitrógeno, los límites superiores indican los valores mínimo absoluto (rojo), promedio (amarillo) y máximo absoluto (verde) para una serie climática de 30 años de Pergamino. Sobre la izquierda figuran los niveles de cada una de las variables ambientales y de manejo para esta estrategia de fertilización.

El segundo gráfico de salida (Fig 13) permite conocer la composición de esa media histórica de respuesta al fertilizante, para cada uno de los años climáticos. Es decir podemos cuantificar la variabilidad interanual del rendimiento en función del nivel de fertilización, manteniendo fijas las otras variables de manejo e interactuando con el resto de los recursos ambientales y genéticos.

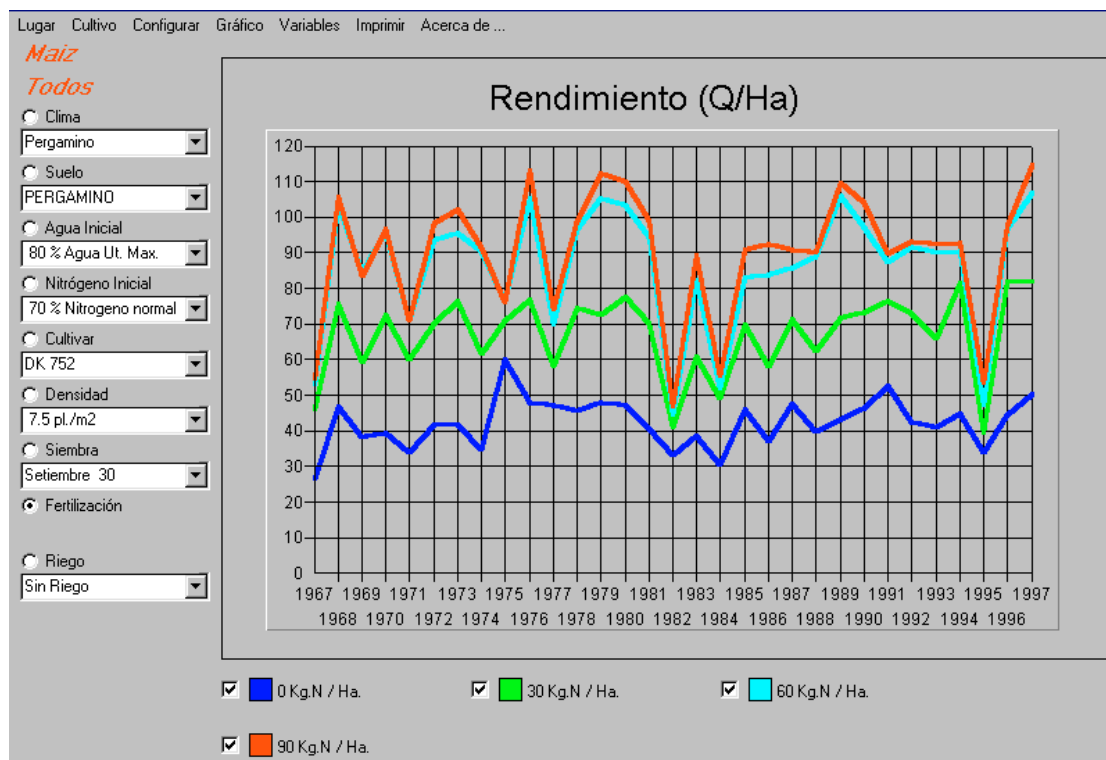


Fig 13: Variabilidad interanual del rendimiento en respuesta a tres niveles de fertilización nitrogenada interactuando con las variables ambientales para la serie climática 1967 - 1997.

Finalmente el tercer gráfico (Fig 14) de salida de la simulación permite cuantificar la probabilidad de éxito de cada nivel de ese factor en interacción con los otros componentes del sistema y de manejo. Este gráfico nos permite una doble entrada, por un lado podemos fijar un rendimiento objetivo y ver la probabilidad de lograrlo a medida que aumentamos los niveles de kilogramos de nitrógeno aplicado por unidad de superficie; el segundo análisis es a partir de la probabilidad acumulada, una vez definido el porcentaje de riesgo con el que queremos trabajar, en este ejemplo podemos fijar un nivel de riesgo del 30%, entrando entonces por el 70% de probabilidad acumulada, cortamos cada una de las curvas de respuesta y obtenemos el nivel de rendimiento esperado en función de cada uno de los niveles de fertilización, en este ejemplo vemos que con una fertilización con 60 kg N ha⁻¹, tres años de cada diez tenemos una probabilidad de obtener rendimientos entre 84 y 45 q ha⁻¹, mientras que siete de cada diez años podemos obtener rendimientos superiores a 84 q ha⁻¹ hasta un máximo absoluto de 107 q ha⁻¹. Si dividimos la probabilidad acumulada en cuartiles vemos que tenemos una probabilidad de obtener rendimientos entre 83 y 97 q ha⁻¹ en el 50% de los años. Las corridas para este u otro factor son en tiempo real lo que nos permite ahora modificar el nivel de cualquier otro factor ambiental o de manejo y realizar una nueva simulación, por ejemplo variando la disponibilidad inicial de agua o de nitrógeno y ver el resultado esperado siguiendo el mismo análisis anterior.

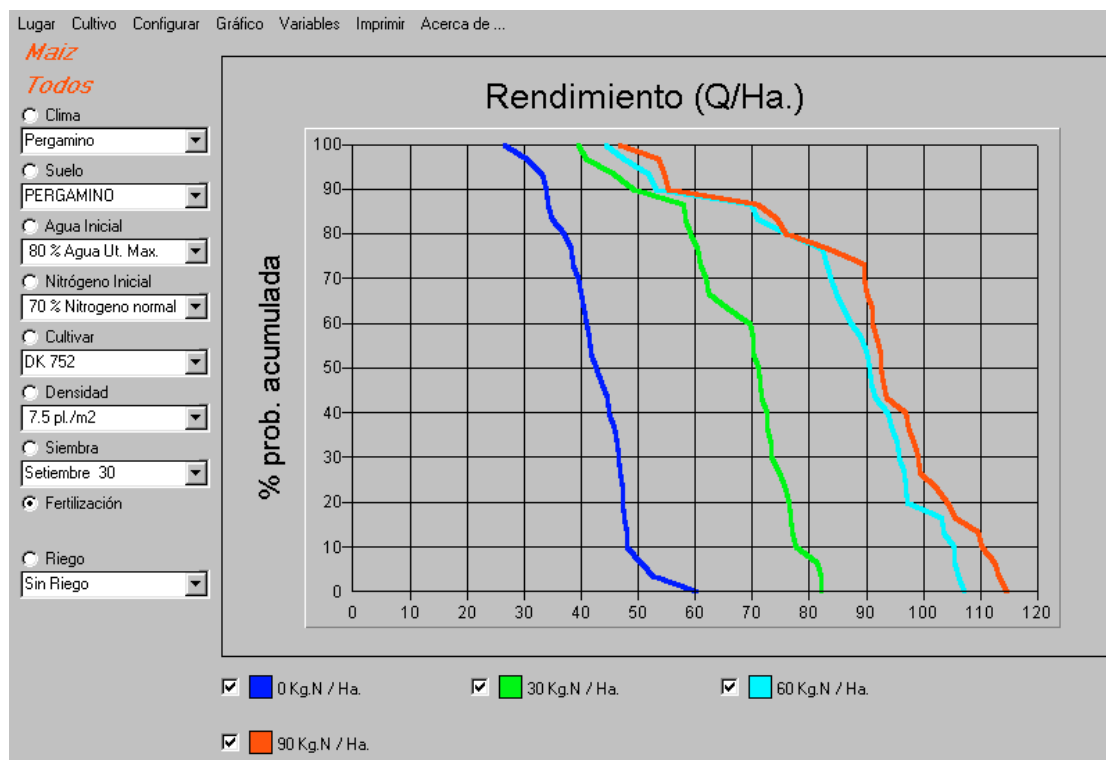
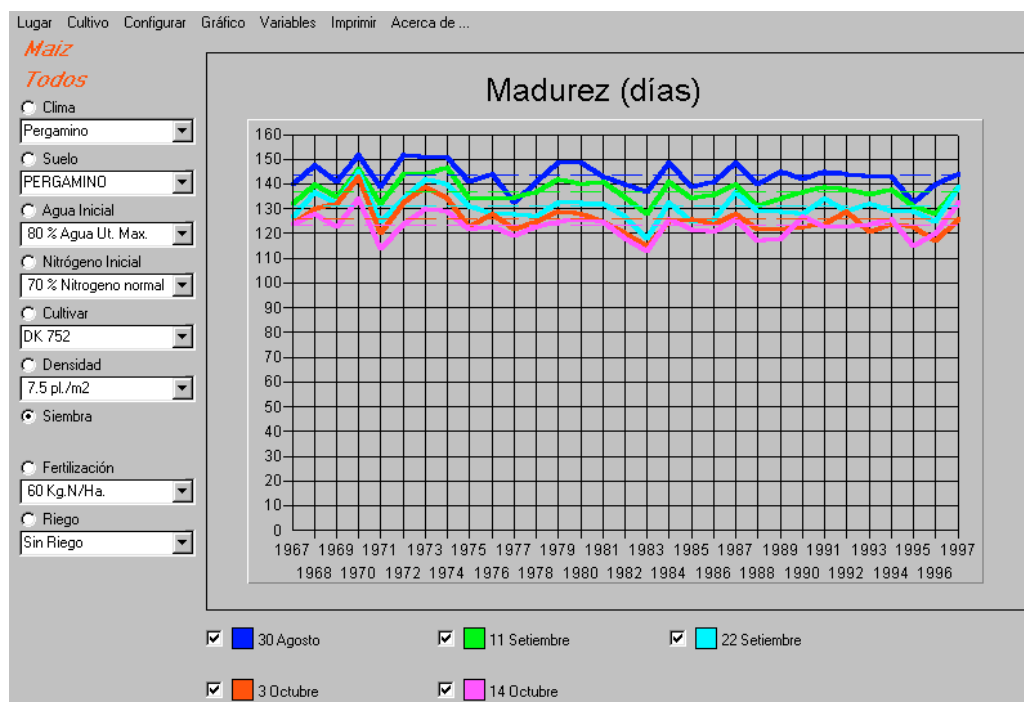
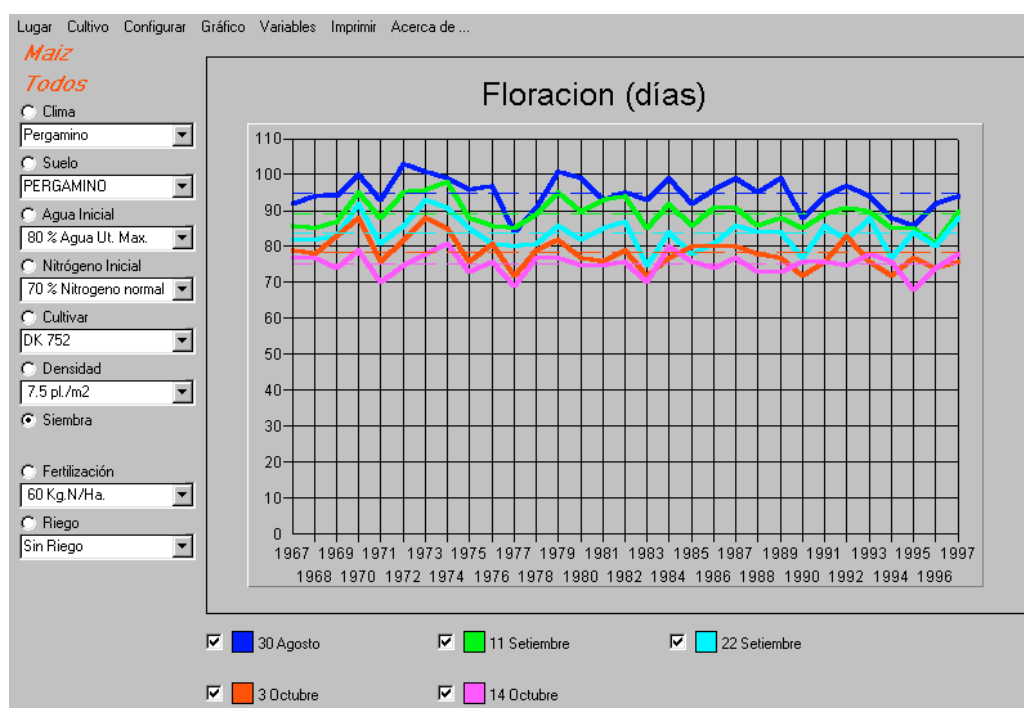


Fig 14: Probabilidad de respuesta del rendimiento de un cultivo de maíz, a la aplicación de diferentes dosis de nitrógeno, para un suelo de Pergamino, analizando una serie climática de 30 años en condiciones de secano.

Otra posibilidad es evaluar la sensibilidad de otro de los factores en sus diferentes niveles, manteniendo constante el nivel de fertilización, de las combinaciones probables surgen las estrategias más convenientes y nos permite decidir entonces cual de ellas aplicar en la próxima siembra. A nivel de predicción de la fenología del cultivo en función de las fechas de siembra podemos ver en la Fig 15, la variabilidad interanual de la duración de ciclo a floración y a madurez fisiológica de un cultivo de maíz simulado para la misma serie de 30 años climáticos para Pergamino en cinco fechas de siembra, con intervalos de 11 días a partir del 30 de agosto, para un híbrido simple de ciclo completo, con medias de duración de 95, 89, 84, 78, 76 y 144, 137, 131, 126, 124 para floración y madurez fisiológica respectivamente.



(a)



(b)

Fig 15: Variabilidad interanual y medias de la duración (en días) desde siembra a floración femenina (a) y a madurez fisiológica (b) para cinco fechas de siembra, para la serie climática 1967-1997 de Pergamino y para un híbrido simple en condiciones de secano.

Conclusiones

Si bien es cierto que los modelos no pueden facilitarnos todas las respuestas sobre los problemas productivos en los cultivos, en la medida que sean construídos en forma razonable permiten ser una herramienta integradora tanto en la enseñanza, como en la investigación y para las aplicaciones de manejo de los cultivos. Las investigaciones sobre aspectos específicos de los procesos dentro de un sistema biológico de cultivo anual o sucesión de cultivos, la experimentación y las observaciones no pueden ser reemplazadas por los modelos, pero existe una estrecha relación entre ambos enfoques que hacen que tanto la experimentación y la investigación puedan enriquecer la comprensión y el conocimiento sobre el funcionamiento del sistema, así como los modelos pueden ser una herramienta que permita cuantificar con mayor precisión las hipótesis planteadas y avanzar con mayor rapidez para la solución de los problemas agronómicos dentro de la interacción planta-ambiente-manejo.

Los modelos pueden ser usados para analizar nuevos trabajos experimentales o teóricos, permitiendo un marco conceptual para interpretar los resultados obtenidos en diferentes ambientes, como un medio para mejorar el manejo del cultivo o de minimizar el riesgo, los avances que se logren en los modelos deben tener necesariamente la concurrencia de enfoques científicos, que permitan conocer aspectos de la estructura mecánica de las plantas y la interacción con su ambiente y aspectos de ingeniería que permita definir qué hacer para mejorar el manejo de los cultivos. Ambos enfoques son complementarios y deben permitir mejorar las herramientas actuales facilitando la toma de decisiones para resolver problemas agronómicos en un marco de estrategias sostenibles. Podemos decir finalmente que los modelos de cultivos han demostrado ser una buena herramienta para la investigación, para el manejo de tecnologías de los cultivos y para las decisiones en planificación y que sus desarrollos futuros amplían su potencialidad de uso.

Referencias

- Angus J.F. 1990 Evolution of methods for quantifying risk in water limited environments. pages 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.
- 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.
- Bonhomme R et F. Ruget 1991. Modélisation du fonctionnement d'une culture de maïs: cas de CORNGRO et CERES-Maize pp 385-392 In: D. Picard (ed) Physiologie et production du maïs. INRA, Paris, France.
- Boote K. and M. Tollenaar. 1991. Modeling genetic yield potential. pp 533-565 In: K.Boote, J.M. Bennett, T.R. Sinclair and J.M Paulsen (eds) Physiology and determination of crop yield. ASA, Madison, WI,USA.

Bowen W.T and W.E. Baethgen. 1998. Simulation as a tool for improving nitrogen management. pp 189-204 In: G.Y.Tsuji, G. Hoogenboom and P.K.Thorton (eds) Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Neetherlands.

Brisson N., B. Mary, D. Ripoche, M.H. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoullaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayoy, D. Plenet, P. Cellier, J.M.Machet, J.M.Maynard et R. Delécolle 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18 (1998) 311-346.

Buttler I.W. 1989. Predicting water constraints to productivity of corn using plant-environmental simulation models. PhD Thesis. Cornell University, Itaka

Chapman S.C. and Barreto H.J. 1994 Using simulation models, espatial data bases to improve the efficiency of plant breeding programs. ICRISAT G x E Workshop. Hyderabad, India.

English M. 1990. Deficit irrigation. I: Analytical framework. *J. Irrigation Drainage Eng.* 116 (3): 399-412.

Godwin D.C. and C. A. Jones 1990. Nitrogen dynamics in soil-plant systems In: Hunt R.J. and J.T. Ritchie (eds) *Modelling Plant and Soil Systems*. ASA, Madison,WI,USA.

Godwin D.C. , Thorton P.K., Jones J.W. Shing, U., Jagtap S.S. and Ritchie J.T. 1990. Using IBSNAT's DSSAT, in strategy evaluation pp 59-71, In: *Proceedings of the IBSNAT Symposium: Decision Support System for Agrotechnology transfer.Part 1*, Department of Agronomy and Soil Science. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, USA.

Guevara E.R, S. Meira and C. Hernandorena 1999. SUR 98 Decision Support System for important Pampas field crops. *International Symposium Modelling Cropping Systems*. Lleida, España.

Guevara E.R, S. Meira, M. Maturano and G. Coca. 1999. Maize simulation for different environments of Argentina. *International Symposium Modelling Cropping Systems*. Lleida, España.

Guevara E.R. y S.Meira. 1999. Calibration and evaluation of CERES-Maize model for subtropical environments. *The Third International Symposium on Systems Approaches for Agricultural Development (SAAD-III)*. Lima, Perú.

Harrison S.R., P.K. Thornton and J. B. Dent 1990, The IBSNAT project and agricultural experimentation in developing countries. *Exp. Agric.* V26 pp: 369-380

Hunt L.A. 1998. Use of simulation model for crop improvement. pp 89-101 In: Otegui M.E. and G.A. Slafer (eds) *International Workshop on Physiological Bases for Maize Improvement*. Buenos aires, Argentina.

- Hunt L.A. and K.J. Boote 1998. Data for model operation, calibration and evaluation pp 9-39 In : G.Y.Tsuji, G. Hoogenboom and P.K.Thorton (eds) Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Neetherlands.
- Jones C.A and Kiniry J.R. (eds) 1986. CERES-Maize. A simulation model of maize growth and development. Texas A&M, University Press. College Station. USA
- Jones J.W and J.T. Ritchie. 1990. Crop Growth Models. pp 63-89 In: G.J. Hoffman, T.A. Howell and K.H. Solomon (eds) Management of Farm Irrigation Systems. ASAE St. Joseph, MI, USA.
- Keating B.A., D.C.Godwin and J.M. Watiki. 1991. Optimising nitrogen inputs inresponse to climatic risk. pp 329-358 In: R.C. Muchow and J.A. Bellamy. Climatic risk in crop production: models and management for the semiarids tropics and subtropics. CAB Inernational. Wallingford, UK.
- Lecler N.L. 1998. Interated Methods and Models for Deficit Irrigation Planning. pp283-299. In: R.M Peart and R.B. Curry (eds) Agricultural Systems Modelling and Simulations. Marcel Dekker Inc. New York
- Meghji M.R., J.W. Dudley, R.J. Lambert and G.F.Sprague. 1984. Inbreeding depression, inbreed and hybrid grain yields, and other traits of maize genotypes representing three eras. Crop Sci. 24: 545-549.
- Nexkirk K.M., J.C. Parker, J.C. Baker, V.W Carson, T.V. Brumback and O. Balci. 1989. User's guide to VTMaize version 1.0. Virgina Water Resources Research Center. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- Presello D.A., A.E.Céliz, S.G.Meira y E.R. Guevara 1997. Comportamiento de híbridos de maíz liberados en diferentes épocas, en condiciones d eriego y sequía simulada. VI Congreso Nacional de Maíz, tomo I. Pergamino, Argentina.
- 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.
- 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. Thorton (eds) Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Neetherlands.
- 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.
- Tollenaar M. 1990. The influence of developmental patterns on grain yield of maize. pp 181-193 In: S. K. Sinha et al (eds) Proc. Int. Congr. Plant Physiology. New Delhi, India.

Tollenaar M. 1991. Physiological basis of genetic improvement of maize hybrids in Ontario, from 1959 to 1988. *Crop Sci.* 31:119-124

Voltz M et Rambal S. 1987. Evaluation de CORNGRO: Un modèle de simulation des transferts hydriques et de la croissance d'une culture du maïs. *Agronomie* 7 (9): 727-738.