UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO CROPSYST PARA UN CULTIVAR DE SOJA PARA LAS CONDICIONES DE PRODUCCIÓN DEL LITORAL-OESTE DE URUGUAY

por

Juan Carlos BAROFFIO QUILLET
Juan Pablo RAMOS BETANCURT

TESIS presentada como uno de los requisitos para obtener el título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO
URUGUAY
2009

Tesis aprobada por:

Director: ----------
Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. (PhD) Santiago Dogliotti

Fecha: 27/05/09

Autores:

Juan Carlos Baroffio Quillet

Juan Pablo Ramos Betancurt

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias especialmente, que con su esfuerzo y apoyo constante han permitido lleguemos a esta instancia.

Al tutor y amigo, “flaco” Sebastián Mazzilli, que por sus ganas y disposición en todas las etapas ha hecho posible este trabajo.

Al personal de la EEMAC que sin su apoyo el trabajo de campo hubiese sido mucho más difícil.

A todos los amigos que nos apoyaron durante toda la carrera y han colaborado en la realización de este trabajo.

Al Ing. Agr. Sebastián Arrivillaga que colaboró con el aporte de información del cultivar.

TABLA DE CONTENIDO

Página

PAGINA DE APROBACIÓN.....II
AGRADECIMIENTOS.....III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....VII

1. INTRODUCCIÓN.....1

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....2
2.1. FENOLOGÍA DEL CULTIVO DE SOJA.....2
2.1.1. Desarrollo.....2
2.1.1.1. Estados vegetativos (v).....2
2.1.1.2. Estados reproductivos (r).....4
2.1.2. Crecimiento.....5
2.1.3. Factores ambientales que afectan crecimiento y desarrollo.....6
2.1.3.1. Temperatura.....6
2.1.3.2. Fotoperíodo.....7
2.1.4. Períodos críticos.....7
2.2. MODELOS DE SIMULACION: CROPSYST.....9
2.2.1. Simulación de fenología.....10
2.2.1.1. Efectos del fotoperíodo sobre tiempo térmico.....11
2.2.2. Simulación de acumulación de biomasa.....11
2.2.2.1. El crecimiento a partir de la radiación.....13
2.2.2.2. El crecimiento a partir de la transpiración. 14
2.2.3. Simulación del crecimiento de área foliar.....15
2.3. BALANCE HÍDRICO.....17
2.3.1. Precipitación e intercepción.....17
2.3.2. Infiltración y almacenamiento de agua en el suelo.....18
2.3.3. Evapotranspiración potencial del cultivo.....18
2.3.4. Evaporación del suelo.....20
2.3.4.1. Evaporación potencial del suelo ($ES_{POTENCIAL}$)...20
2.3.5. Transpiración del cultivo.....21
2.3.5.1. Transpiración potencial.....21
2.3.5.2. Transpiración real del cultivo.....21
2.4. BALANCE DE NITRÓGENO.....23
2.4.1. Absorción de nitrógeno.....23
2.4.2. Fijación biológica de N.....24

3. MATERIALES Y MÉTODOS.....26

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERISTICAS DEL ENSAYO.....26
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL.....26
3.3. INSTALACIÓN Y MANEJO DEL CULTIVO.....26
3.4. DETERMINACIONES.....27
3.4.1. En suelo.....27
3.4.1.1. Textura, materia orgánica y densidad aparente.....27
3.4.1.2. Humedad gravimétrica.....28
3.4.2. En cultivo.....28
3.4.2.1. Población y fenología.....28
3.4.2.3. Biomasa aérea.....29
3.4.2.4. Índice de área foliar (IAF).....29
3.4.2.6. Rendimiento en grano.....29
3.5. CALIBRACIÓN DEL MODELO CROPSYST.....29
3.5.1. Suelo.....30
3.5.2. Clima.....31
3.5.3. Cultivar.....32
3.5.4. Manejo general del cultivo.....33
3.5.5. Evaluación de los resultados del modelo.....33
3.6. VALIDACIÓN DEL MODELO.....34
3.6.1. Caracterización de suelos.....34

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....36
4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO.....36
4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO.....38
4.2.1. Componentes del rendimiento.....38
4.2.2. Acumulación de biomasa aérea y evolución del área foliar.....41
4.2.3. Contenido de agua en el suelo.....43
4.3. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE CROPSYST.....46
4.3.1. Biomasa aérea.....47
4.3.2. Índice de área foliar e intercepción solar.....49
4.3.3. Dinámica de agua en el suelo.....52
4.3.4. Rendimiento en grano.....55
4.4. VALIDACIÓN DEL MODELO CROPSYST.....56
4.4.2. Biomasa aérea.....56
4.4.3. Crecimiento del area foliar e intercepción de radiación.....59
4.4.4. Dinámica de agua en el suelo.....62
4.4.5. Rendimiento en grano.....64
4.5. CONSUMO DE AGUA EN HORIZONTES CALCÁREOS.....65

5. CONLUSIONES.....68

6. RESUMEN.....70

7. SUMMARY.....71

8. BIBLIOGRAFÍA.....72

9. ANEXOS.....76

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No. Página

1. **Características promedio de suelos utilizados en la calibración**.....31

2. **Parámetros requeridos por el modelo CropSyst, sus valores y la fuente de esa información**.....33

3. **Características de los grupos de suelos usados en la validación**.....35

4. **Producción de biomasa, rendimiento en grano y sus componentes**.....39

5. **Correlaciones entre diferentes componentes del rendimiento y entre estos y la biomasa acumulada a cosecha**.....40

6. **Promedios de biomasa simulada y observada para los 3 grupos de sitios según las fechas de muestreo**.....48

7. **Promedios de IAF simulado y observado según fechas de muestreos para los tres grupos de la calibración**.....49

8. **Evolución del contenido de agua en suelo medida a campo y simulada por CropSyst, promedio para los tres grupos de sitios**.....54

9. **Índice de cosecha y rendimiento en grano simulado por CropSyst y observado a campo según sitio de muestreo**.....55

10. **Biomasa aérea promedio observada y simulada, para los grupos en validación**.....59

11. **Índice de área foliar simulado y observado promedio para los grupos usados en la validación. (no incluye el G1)**.....61

12. **Contenido de agua en suelo, promedio para los grupos de la validación y simulados por CropSyst**.....64

13. Rendimiento en grano e índice de cosecha simulados y observados en la validación.....64

Figura No.

1. **Diagrama conceptual de la estimación de acumulación diaria de biomasa por CropSyst. (Adaptado de Stockle et al., 2003)**.....12

2. **Temperaturas máximas y mínimas en el verano 07/08 (barras blancas) y para una serie histórica de años, 1971-1995, (barras negras)**.....36

3. **Precipitaciones sucedidas en el periodo de cultivo 07/08 (barras negras) y valores promedio de una serie histórica, 1971/1995 (barras blancas)**.....37

4. **Radiación solar expresada en $KJ.m^{-2}.día^{-1}$, para una seria histórica (barras blancas) y en el verano 07-08 (barras negras)**.....38

5. **Relación entre el rendimiento y el número de granos**..40

6. **Relación entre el rendimiento y el peso de granos**....41

7. **Evolución de biomasa aérea e IAF promedios en los dos experimentos: soja de primera, ensayo 1 (a), soja de segunda, ensayo 2 (b)**.....42

8. **Correlación entre aérea foliar verde máxima y acumulación de biomasa aérea máxima para cada uno de los sitios del ensayo 2**.....43

9. **Contenido de agua a punto de marchitez permanente (mm PMP), capacidad de campo (mm CC), y disponibilidad de agua útil (mm AU) a siembra para 7 sitios**.....44

10. **Correlación entre contenido inicial de agua total en el suelo y rendimiento en grano del experimento 1**....45

11. **Evolución de biomasa aérea simulada (línea negra) y medida a campo (puntos blancos) para los grupos utilizados en la calibración**.....47

12. **Lineal 1:1 entre biomasa simulada y observada, para los 3 grupos y 5 fechas de muestreo en el ciclo del cultivo**.....48

13. **Lineal 1:1 entre Índice de área foliar simulada y observada, para los tres grupos de la calibración en 4 fechas de muestreo**.....49

14. **Evolución de IAF simulado (línea) y observado (puntos blancos) para grupo 1 (a), 2 (b) y 3(c) usados en la calibración**.....50

15. **Evolución de la radiación interceptada por el cultivo estimada mediante estimaciones de IAF del modelo (líneas negras) y de las medidas de campo (puntos blancos)**.....52

16. **Dispersión de valores de intercepción de radiación simulados y estimados a partir del IAF observado y contra línea 1:1**.....53

17. **Evolución del contenido de agua en suelo, simulado por el modelo (línea negra) y determinado a campo (punto blancos) para grupo 1(a), 2 (b) y 3 (c) usados en la calibración. CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente**.....54

18. **Lineal 1:1 entre agua total simulada por CropSyst y observada**.....55

19. **Evolución de biomasa aérea simulada (linea negra) y observada (puntos blancos) para los grupos 1 (a), 2 (b), 3 (c) y 4 (d)**.....58

20. **Lineal 1:1 para biomasa aérea simulada y observada**...59

21. **Evolución de IAF simulado (linea) y observado (puntos blancos) para grupos 1 (a), 2 (b), 3 (c) y 4 (d)**.....61

22. **Lineal 1:1 entre valores simulados y observados de IAF**.....62

23. **Intercepción de la radiación por el cultivo simulada por modelo (línea negra) y estimada a campo (puntos blancos) para los grupos de sitios 2 (b) y 4 (d)**.....63

24. **Evolución del contenido de agua en suelo simulado (línea negra) y observado (puntos blancos) para grupos 1 (a), 2 (b), 3 (c) y 4 (d)**.....64

25. **Lineal 1:1 entre contenido de agua total en suelo simulado y observado para tres de los grupos usados en la validación**.....65

26. **Aumento en la producción de biomasa aérea con el agregado de capas de suelo (líneas) frente a la producción observada para ese sitio (puntos blancos)**.....68

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de simulación están siendo ampliamente aplicados en agricultura para realizar predicciones sobre las consecuencias agronómicas, ambientales y económicas de complejas interacciones entre manejo de cultivo, suelo y atmósfera. En nuestro país existen antecedentes aislados y discontinuados de uso de modelos de simulación. Esto determina que no se disponga de esta herramienta para su aplicación en el diseño y evaluación de sistemas de cultivos. Una de las principales limitantes para su aplicación es la falta de parámetros de desarrollo y crecimiento de los diferentes cultivos sembrados.

Si bien existe información sobre el cultivo en estudio, poder contar con una herramienta de simulación que permita explorar rápidamente situaciones de manejo como fecha de siembra, distribución, entre otras, ayudaría al diseño de experimentos de campo dirigidos a los problemas más importantes, así como integrarlos en la evaluación de secuencias de cultivos.

El modelo seleccionado para el trabajo es CropSyst (Cropping System Simulation Model). Este modelo de simulación de cultivos es de paso diario y permite el uso con rotaciones de cultivos. Tiene una interfase con el usuario amigable y es de libre distribución. Este modelo fue diseñado para servir como herramienta analítica para estudiar el efecto del ambiente, del sistema de rotación y el manejo sobre la productividad de los cultivos que integran la rotación.

Los objetivos del trabajo son: i) determinar los parámetros requeridos por CropSyst para la simulación del cultivo soja; ii) calibrar y validar la rutina de agua del modelo; iii) calibrar y evaluar la capacidad del modelo de predecir rendimiento en grano.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. FENOLOGÍA DEL CULTIVO DE SOJA

La soja (*Glycine max*) es una especie leguminosa anual y de ciclo de crecimiento estival. Existe una gran variabilidad genética lo que permite la adaptación del cultivo a condiciones ambientales muy diversas. Los cultivares de soja se agrupan en grupos de madurez que van de GM 00 a GM X cuyas diferencias principales radican en largo de ciclo y habito de crecimiento, producto básicamente de diferentes respuestas al fotoperíodo.

Su potencial de rendimiento está determinado por la interacción entre el potencial genético del cultivar y las condiciones del ambiente en el que crece. Las condiciones del ambiente están determinadas por las características del suelo como profundidad, estructura, resistencia mecánica, capacidad de almacenaje de agua, temperatura, aireación, aporte de nutrientes; así como características climáticas como temperatura, radiación, fotoperíodo y régimen hídrico. Algunas de estas condiciones pueden ser alteradas en cierta medida por prácticas de manejo como fertilizaciones, elección de fecha de siembra y cultivar, preparación del suelo (laboreos, duración de barbechos), densidades de siembra y controles de malezas, plagas y enfermedades (Andrade, 2000).

2.1.1. Desarrollo

Fehr y Caviness (1977) desarrollaron la escala para la descripción de estadios fenológicos externos.

2.1.1.1. Estados vegetativos (V)

Siembra-emergencia

Es una fase muy crítica del cultivo donde la humedad del suelo, la temperatura y la profundidad de siembra son determinantes en la supervivencia de las plántulas y del éxito en la implantación (Kantolic et al., 2003a). La germinación se desencadena cuando la semilla en el suelo absorbe el 50% de su peso en agua (Raper et al., citados

por Kantolic et al., 2003a) y se satisfacen sus requerimientos térmicos (Hesketh et al., 1973). El tamaño de la semilla define en cierta medida la duración de esta fase (semillas de menor tamaño están adaptadas a siembras con menor humedad en el suelo).

El primer evento de esta fase es la emergencia de la radícula que traspasa el tegumento de la semilla para anclarse definitivamente en el suelo. Posteriormente el hipocótile comienza su elongación en forma de arco hacia la superficie arrastrando al epicótile con los cotiledones. De esta forma las plantas alcanzan el estado V_E cuando los cotiledones alcanzan la superficie del suelo. El hipocótile (en arco) se endereza, los cotiledones se despliegan y se expone el epicótile (hojas jóvenes, tallo y ápice de crecimiento) determinando la ocurrencia del estado cotiledonar, V_C (Sadras et al., 2002). La semilla provee los nutrientes para el crecimiento de la plántula hasta V_E. Posteriormente los cotiledones cubren esas necesidades hasta que las primeras hojas verdaderas alcanzan la capacidad fotosintética que permite el autoabastecimiento (a partir de V_1), (Ritchie et al., 2003).

Emergencia-comienzo de floración (V_e-V_n)

Los sucesivos estadios vegetativos se identifican por el número de nudos en el tallo principal con hojas trifoliadas totalmente desarrolladas, es decir foliolos totalmente desplegados. El número de nudos por planta es variable y está directamente relacionado con el hábito de crecimiento. Las plantas con crecimiento indeterminado o semideterminado presentan superposición de fases vegetativas y reproductivas alcanzando mayor cantidad de nudos por planta, ya que bajo situaciones fuertemente inductivas el meristema apical mantiene la capacidad de generar hojas (Sadras et al., 2002).

El crecimiento de las raíces, primaria y secundarias, se extiende durante toda la fase al igual que el de la parte aérea y se concentra en los primeros 15 cm. del suelo (Lersten et al., citados por Kantolic et al., 2003a). En el estadio V_2 ocurre la infección del sistema radicular con la bacteria *Bradyrhizobium japonicum* causante de la formación

de nódulos radicales que permite, en relación simbiótica con la planta, la fijación biológica de nitrógeno atmosférico. El número de nódulos y la cantidad de nitrógeno fijado crece hasta el estadio reproductivo $R_{5.5}$ antes de decaer bruscamente por el cambio de sentido de traslocación de los asimilados en la planta.

2.1.1.2 Estados reproductivos (R)

Esta fase incluye cuatro etapas: floración (R_1-R_2); formación de vainas (R_3-R_4); llenado de grano (R_5-R_6) y madurez fisiológica (R_7-R_8).

Floración (R_1-R_2)

Esta etapa ocurre desde el momento que un meristema axilar del tallo principal presenta una flor abierta (R_1), hasta que la floración alcanza uno de los dos nudos superiores (R_2). El primer meristema en florecer ocupa generalmente una posición central del tallo (entre tercer y sexto nudo, dependiendo del estado vegetativo al inicio de floración). La floración progresa en el tallo principal hacia nudos superiores e inferiores simultáneamente y en ramificaciones desde la base hacia el ápice. La aparición de flores se extiende durante varias semanas hasta el estadio R_5 en nudos apicales de ramificaciones (Kantolic et al., 2003a).

Formación de vainas (R_3-R_4)

Esta fase corresponde con la presencia de vainas de un tamaño entre 5 y 20mm de largo en alguno de los cuatro nudos superiores del tallo principal. Los frutos alcanzan su tamaño máximo muy rápidamente cuando los granos pesan aun cerca del 4% del peso final pero ya han alcanzado el número máximo de células cotiledonares que determinan el tamaño potencial del grano (Sadras et al., 2002).

Llenado de granos (R_5-R_6)

Se extiende desde la existencia de granos de 3 mm de longitud hasta que estos completan la cavidad de las vainas en alguno de los cuatro nudos superiores del tallo

principal. Según los autores Sadras et al. (2002), Kantolic et al. (2003a) en esta etapa las plantas alcanzan su máximo número de nudos y por ende la mayor altura y la mayor área foliar.

Madurez fisiológica (R_7-R_8)

Se inicia con la presencia de al menos una vaina con la coloración característica de madurez, marrón pajizo y se concentra en pocos días (5 a 10 días). En esta etapa se acelera bruscamente la senescencia foliar (en sentido acrópeto) al mismo tiempo que cesa la acumulación de peso seco en grano y disminuye el contenido de humedad (Swank et al., citados por Kantolic et al., 2003a).

2.1.2. Crecimiento

Existen tres hábitos de crecimiento según el cultivar: determinados, indeterminados y semideterminados. Los materiales de habito determinado cesan la producción de hojas en el tallo principal una vez que el meristema apical cambia de estado con la aparición de un importante racimo apical; el crecimiento vegetativo se mantiene pero solo a nivel de ramas. Los indeterminados presentan una mayor superposición de fases, la aparición de hojas y nudos en el tallo principal se prolonga por varios días luego de comenzada la floración (no se observa racimo floral apical), esta característica viene asociada con mayor altura de planta, mayor susceptibilidad al vuelco y mayor tolerancia a condiciones adversas por mayor duración del periodo de aparición de hojas y de floración (Villalobos-Rodríguez et al., 1989). Finalmente los cultivares de hábito semideterminado presentan características intermedias entre los dos extremos y presentan racimo floral terminal.

El crecimiento vegetativo se extiende desde la emergencia hasta el comienzo de llenado (R_5) y la acumulación de materia seca en planta sigue un modelo de crecimiento sigmoidal con tasas máximas de acumulación que se alcanzan en R_2 y se mantienen hasta R_6 logrando la máxima acumulación total en ese momento. A partir de R_3 comienza

la acumulación de peso seco en vainas y posteriormente en $R_{5.5}$ comienza la redistribución de nutrientes desde estructuras vegetativas a semillas en rápido desarrollo, que acumulan hasta $R_{6.5}$ el 80% del peso seco total (Sadras et al., 2002).

2.1.3. Factores ambientales que afectan crecimiento y desarrollo

Los procesos que regulan el desarrollo son complejos, y dependen tanto de factores genéticos como ambientales así como de la interacción entre ambos. Existen evidencias que además de la temperatura y el fotoperíodo otros factores del ambiente como la fertilidad del suelo (Kantolic et al., 2003a), la disponibilidad hídrica y la radiación (Evans, Rawson, citados por Kantolic et al., 2003a) pueden modificar la tasa de desarrollo de los cultivos. Sin embargo, el impacto de estos últimos sobre la duración de las etapas del ciclo es poco consistente y de magnitud reducida. Es posible concluir entonces que la temperatura y el fotoperíodo son los principales reguladores del desarrollo (Kantolic et al., 2003a).

2.1.3.1. Temperatura

La temperatura influye sobre todo el ciclo del cultivo pero el mayor efecto es registrado en etapas vegetativas (Sadras et al., 2002). La duración de las etapas fenológicas de soja se expresa en °C.día^{-1}. La tasa de desarrollo crece linealmente acortándose la duración de las etapas entre la temperatura base (6-9°C) y la óptima (25-30°C). Temperaturas superiores a la óptima enlentecen el desarrollo hasta detenerlo completamente al alcanzar la temperatura crítica (35-40°C), de la misma forma cuando la temperatura es inferior a 6-9°C.

Estas temperaturas cardinales varían a lo largo del ciclo del cultivo (Kantolic et al., 2003a). En etapas reproductivas, el establecimiento de vainas se retrasa con temperaturas inferiores a 22°C, mientras que cesa por debajo de los 14°C (Jones et al., citados por Sadras et al., 2002).

2.1.3.2. Fotoperíodo

El fotoperíodo es el principal regulador de los eventos reproductivos como la iniciación floral, la floración, la fructificación y el llenado de granos. En cada una de estas fases éste define el inicio y el fin así como la tasa a la que progresan los cambios dentro de las plantas (Kantolic et al., 2003a). La soja es una especie que responde cuantitativamente al acortamiento del día (Kantolic et al., 2003a).

Una vez terminado el periodo juvenil, en el cual las plantas se mantienen insensibles al fotoperíodo (Shanmugasundaram y Tsou, 1978) comienza la fase inductiva donde la exposición a fotoperíodos suficientemente cortos desencadena una serie de cambios que culminan con la iniciación floral. Tanto el valor de fotoperíodo umbral como la sensibilidad fotoperiódica presentan una considerable variabilidad genotípica: los grupos de madurez inferiores presentan umbrales elevados y baja sensibilidad y a medida que aumenta el grupo de madurez disminuye el umbral y aumenta la sensibilidad y se acentúa en post-floración (Kantolic et al., 2003a). Así los materiales 00-0I-II presentan baja sensibilidad al fotoperiodo, los grupos II-III y IV en cambio tienen sensibilidad media a baja y pueden florecer con fotoperíodos de 15-16 horas de luz, los grupos V al VII tienen una sensibilidad media a alta y pueden florecer con una duración del día entre 15-14 horas luz, mientras que los materiales de ciclo más largo (VIII-IX-X) presentan alta sensibilidad al fotoperiodo y requieren días más cortos para florecer (13 horas luz o menos).

2.1.4. Períodos críticos

Se trata del período en el ciclo del cultivo en el cual disminuciones en la tasa de crecimiento del cultivo inciden marcadamente y explican en mayor medida las variaciones en rendimiento. Factores de estrés como restricciones hídricas, deficiencias nutricionales, sombreo, así como factores bióticos como daño por insectos, enfermedades y competencia por malezas deprimen las tasas de crecimiento y por ende los rendimientos del cultivo.

En general variaciones en número de granos por superficie se reflejan en modificaciones del rendimiento final, mientras que cambios en el peso de grano no siempre se reflejan en rendimiento (Kantolic et al., 2003a). El número de granos por individuo se determina principalmente durante la fijación de vainas (R_3-R_6), y es función de la tasa de crecimiento por planta en esta etapa (Vega et al., citados por Andrade et al., 2002); esto coincide con lo propuesto por Kantolic y Slafer (2003b), quienes afirman que la supervivencia de vainas es la principal válvula de ajuste del número de granos y está fuertemente asociada con la disponibilidad de asimilados. Por lo tanto, el número de granos esta mayormente limitado por fuente y no por la cantidad de destinos iniciados.

Las etapas reproductivas tempranas no representan el periodo más crítico. Esto se da como consecuencia de la posibilidad de que aparezcan nuevas hojas luego del comienzo de floración, sumado a la gran cantidad de sitios potenciales donde se diferencian flores y lo extenso del período de floración (Kantolic et al., 2003a). A su vez una eventual disminución en número de vainas puede ser compensada por mayor peso de grano (Andrade et al., 2002). Limitaciones posteriores, principalmente en la etapa $R_{4.5}$-$R_{5.5}$ producen reducciones mayores en el número de granos por planta (por aborto de flores, de vainas chicas y disminución de número de granos en las vainas) no existiendo posibilidad de compensaciones por mayor peso. Por otra parte si las condiciones adversas se producen entre R_6-$R_{6.5}$, se acortará el período de llenado y por ende se obtendrán granos más livianos. Si el mismo estrés se produce entre $R_{6.5}$-R_7 el grano ya acumuló gran proporción de su peso final y por esto no hay grandes efectos sobre el rendimiento (Sadras et al., 2002). El manejo de fechas de siembra y elección de variedades puede resultar una medida de gran importancia para ubicar el período crítico en condiciones favorables para el cultivo.

2.2. MODELOS DE SIMULACION: CROPSYST

CropSyst es un modelo de simulación de paso diario capaz de abarcar varios cultivos y varios años. Fue desarrollado como herramienta analítica para el estudio del efecto del clima, del suelo y del manejo de los cultivos en la productividad de los sistemas agrícolas y sobre el ambiente (Stockle et al., 2003).

Este modelo simula evolución de contenido de agua y nitrógeno en el suelo, desarrollo fenológico, producción de biomasa, crecimiento aéreo (área foliar) y radical, rendimiento en grano, producción y descomposición de residuos y erosión del suelo. Estos procesos están afectados por factores diversos como el clima, características del suelo, del cultivo y medidas de manejo como rotación de cultivos, elección del cultivar, riego, fertilización, laboreos, y manejo de rastrojos (Stockle y Nelson, 1999). El desarrollo de CropSyst comenzó en los primeros años de la década del 90’ a raíz de una importante demanda por modelos de simulación que abarcaran rotaciones y no cultivos aislados (Stockle et al., 2003).

Las primeras referencias de modelos de simulación de crecimiento de cultivos datan de la década del 70’ (Wit et al., Arkin et al., citados por Stöckle et al., 2003). Recién en los 80’ aparecieron las primeras versiones de modelos orientados al apoyo en la toma de decisiones de manejo de cultivos como el riego suplementario y los controles de plagas, malezas y enfermedades; y hacia fines de la década se reportaron antecedentes de uso y aplicaciones de los modelos generados en sistemas comerciales (Stöckle et al., 2003).

Para el análisis de sistemas de producción agrícola resulta de vital importancia la capacidad de simular rotaciones de cultivos para evaluar su impacto económico y ambiental. Los modelos CERES y CROPGRO incluidos en la carcasa DSSAT pueden ser utilizados en el diseño y evaluación de rotaciones (Jones et al., 1998). Sin embargo DSSAT tuvo dificultades en integrar diversas plataformas de simulación que permitieran simplificar la simulación de rotaciones de cultivos (Jones et al., 2001). El desarrollo del modelo EPIC permitió alcanzar estos objetivos (Williams et al., 1984), sin embargo este modelo presento limitantes

en cuanto a la precisión en la simulación y descripción de los procesos biofísicos involucrados en el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

CropSyst fue diseñado siguiendo la línea de EPIC, pero incorporando mayor precisión en la simulación del crecimiento de los cultivos y su interacción con el ambiente y las practicas de manejo. También se atribuyo mucha importancia al diseño del software para mantener un equilibrio entre la precisión alcanzada en las simulaciones y la facilidad de uso y acceso al programa desde sus comienzos (Stockle et al., 2003).

2.2.1. Simulación de fenología

La simulación del desarrollo del cultivo se basa en tiempo térmico (°C-día), que es la acumulación diaria de temperatura media del aire por encima de la temperatura base; utilizando un valor predeterminado a acumular para alcanzar una nueva etapa de desarrollo.

Para el cálculo de tiempo térmico se utilizan los siguientes criterios:

$$\textbf{GD día} = \textbf{T diaria} - \textbf{T base}$$

$$\textbf{T diaria} \begin{cases} \textbf{T base si T diaria} < \textbf{T base} \\ \textbf{T máxima si T diaria} > \textbf{T máxima} \\ (\textbf{T max} + \textbf{T min}) / 2 \end{cases}$$

Esta acumulación de tiempo térmico puede ser acelerada por estrés hídrico, ya que limitaciones en la transpiración provocaría un aumento de la temperatura a nivel de planta. Para hacer esta corrección se utiliza la siguiente ecuación (1) para estimar la temperatura máxima:

$$T_{max} = \left[1 + \left(1,25 - DPV_{max}\right)\right] * IndiceEstres_{agua} * SFEH \qquad [1]$$

Donde:

- **Índice Estrés$_{agua}$** que va desde 0 (sin estrés) a 1 (el máximo estrés) es el índice de estrés hídrico diario de la planta.
- **DPV$_{max}$ (kPa)** es el máximo déficit de presión de vapor (por presión de vapor saturado (PVsat) en Tmax o Tmin) varía entre un rango de 0,0 a 0,6 kPa.
- **SFEH:** "Sensibilidad fenológica al estrés hídrico", que oscila entre 0 y 1, permite determinar el grado de los efectos de estrés hídrico. Para los cultivos cuyo desarrollo se espera no sea afectado por estrés hídrico, SFEH =0. Para la mayoría de las aplicaciones, este valor debe ser fijado en 1.

2.2.1.1. Efectos del fotoperíodo sobre tiempo térmico

El desarrollo de la planta puede responder a la longitud relativa de días y noches. En el caso de Soja, (planta de día corto) acumula tiempo fisiológico hacia la floración cuando la longitud del día está por debajo de un máximo.

Para cultivos de día corto cuando longitud del día< Longitud del día $_{if}$:

$$\mathbf{factor_{fotoperiodo}} = \frac{\mathbf{Longitud\ del\ día_{if}} - \mathbf{Longitud\ del\ día}}{\mathbf{Longitud\ del\ día_{if}} - \mathbf{Longitud\ del\ día_{is}}} \qquad \mathbf{[2]}$$

-Longitud del día de la insensibilidad (is): es la longitud del día por debajo del cual se produce el máximo de acumulación de tiempo fisiológico.

-Longitud del Día if: (la longitud del día para inhibir la floración) es un parámetro del cultivo, representa el límite de longitud del día por encima del cual no se produce acumulación de tiempo fisiológico.

2.2.2. <u>Simulación de acumulación de biomasa</u>

El crecimiento de los cultivos está representado por la acumulación de biomasa aérea. El proceso se extiende desde que se registra crecimiento activo hasta que se alcanza la madurez fisiológica.

En la figura siguiente se describe conceptualmente la simulación de la acumulación diaria de biomasa aérea. El procedimiento empleado consiste en estimar el crecimiento potencial por dos vías paralelas. La primera a partir de la transpiración potencial del cultivo y por otro a partir de la radiación interceptada. El valor menor de ambas estimaciones es el considerado por CropSyst como acumulación potencial de biomasa. La acumulación luego se corrige por limitantes de disponibilidad de agua y nitrógeno que se expresan con diferentes índices, que toman valores entre 0 y 1 (Stockle et al., 2003).

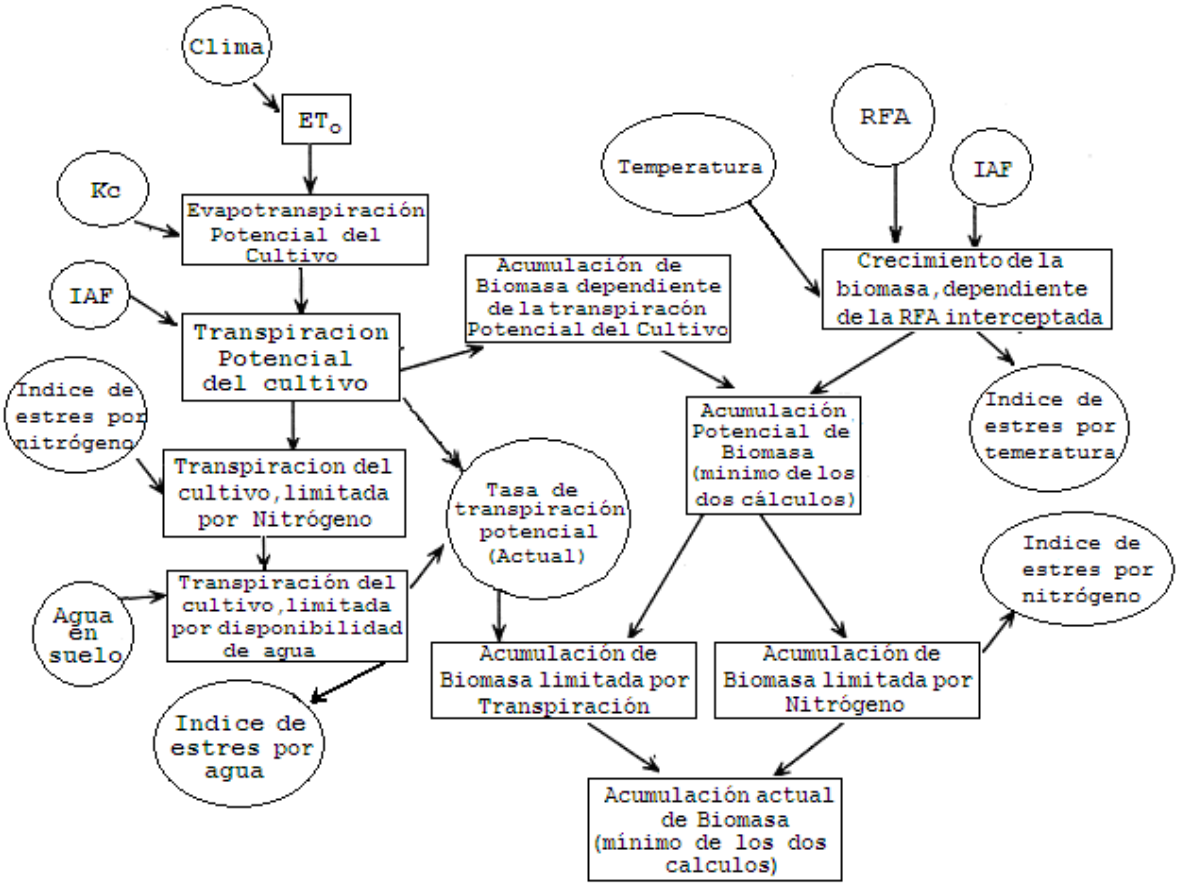


Figura No. : Diagrama conceptual de la estimación de acumulación diaria de biomasa por CropSyst (Fuente: adaptado de Stockle et al., 2003).

2.2.2.1. El crecimiento a partir de la radiación

La producción potencial de biomasa ($Kg.m^{-2}.día^{-1}$) está estrechamente relacionada a la radiación solar incidente, y se calcula de la siguiente manera:

$$\mathbf{Biomasa = ec*RFA*I} \qquad \mathbf{[3]}$$

Es el producto del total de radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA), la intercepción por parte de la canopía (I) y la eficiencia de conversión de la energía en biomasa (*e*). CropSyst desarrolla para este cálculo la fórmula siguiente.

$$\mathbf{Biomasa_{rad}} = \frac{\mathbf{EC_{rad} * R_{inc}}}{\mathbf{2 * FactorCobertura_{canopia} * T_{lim}}} \qquad \mathbf{[4]}$$

Donde:

EC_{rad}: ($Kg.MJ^{-1}$) es el coeficiente que representa la eficiencia de conversión de la radiación fotosintéticamente activa interceptada en biomasa. Para soja el modelo utiliza valores de 2 a 2,5 ($g.MJ^{-1}$). Estos valores resultaron algo superiores a los citados por la bibliografía regional que están en el entorno de 1,74 g. de $MS.MJ^{-1}.m^{-2}$ según Andrade (1995) por lo cual fueron modificados de acuerdo a la información regional.

Rad_{inc}: ($MJ.m^{-2}.día^{-1}$) es la radiación total incidente sobre la canopia del cultivo. El coeficiente **0,5** representa la fracción de la radiación total incidente que se considera fotosintéticamente activa (RFA).

$factorCobertura_{canopía}$ (0-1): Es la fracción de la radiación fotosintéticamente activa que es interceptada por el cultivo. Este parámetro se calcula relacionando el área foliar verde y el coeficiente de extinción de luz del cultivo.

T_{lim}: (0-1) Es un factor de corrección de la acumulación de biomasa cuando las temperaturas son diferentes a las consideradas por el coeficiente de conversión (**EC_{rad}**).

2.2.2.2. El crecimiento a partir de la transpiración

La producción potencial de biomasa (Kg.m^{-2}.día^{-1}) está determinada a la transpiración de los cultivos y se calcula utilizando la siguiente ecuación (Tanner y Sinclair, 1983):

$$\mathbf{Biomasa} = \frac{\mathbf{Tr_{potencial} * TB_{coef.}}}{\mathbf{DPV}} \qquad \mathbf{[5]}$$

Dónde:

$\mathbf{Tr_{potencial}}$ (mm): es la transpiración potencial.

$\mathbf{TB_{coef}}$ **(**(kg.m^{-2}.kPa).m^{-1}): es el coeficiente de transpiración de la biomasa por encima del suelo. Para especies C_3 (soja) este coeficiente toma valores que oscilan entre 3,5 y 6,0.

DPV (kPa): es la media diaria de déficit de presión de vapor: Si VPD > VPD límite (es un parámetro específico del cultivo), $G_{Tr} = G_{R.}$

Para determinar las limitaciones de crecimiento por transpiración el modelo debe estimar el efecto de las deficiencias de nitrógeno que se expresan en un incremento en la resistencia foliar (Van Keulen y Seligman, citados por Stöckle et al., 2003). Las concentraciones de nitrógeno en planta que permiten calcular la resistencia foliar varían a lo largo del ciclo del cultivo tendiendo a caer por dilución frente al incremento en biomasa. Finalmente la acumulación de biomasa limitada por transpiración resulta del producto entre el crecimiento potencial y el cociente entre la transpiración actual del cultivo (corregida por las limitaciones de nitrógeno) y la transpiración potencial [7] (Stockle y Jara, 1998).

$$\mathbf{B_{nitrógeno}} = \mathbf{B_{transpiración}}\left[\mathbf{1} - \frac{\mathbf{N_{crit}} - \mathbf{N_c}}{\mathbf{N_{crit}} - \mathbf{N_{min}}}\right] \qquad \mathbf{[6]}$$

Dónde:

$\mathbf{N_{crit}}$: es la concentración crítica de nitrógeno en planta, presenta un comportamiento lineal desde emergencia hasta madurez.

N_{min}: es la concentración mínima de nitrógeno en planta, la que detiene el crecimiento.

N_c: es la concentración de nitrógeno en planta después de un nuevo crecimiento.

$$B_{transpiración} = B_{potencial}\left[\frac{T_{actual}}{T_{potencial}}\right] \quad [7]$$

Donde:

$B_{transpiración}$: ($Kg.m^{-2}.día^{-}1$) es la acumulación de biomasa corregida por las limitaciones en transpiración.

$B_{potencial}$: ($Kg.m^{-2}.día^{-}1$) acumulación potencial de biomasa para ese día.

$T_{actual}/T_{potencial}$: es la relación que existe entre la transpiración actual y la potencial.

2.2.3. Simulación del crecimiento de área foliar

El aumento de área foliar durante el período vegetativo (m^2 hoja.m^{-2} suelo) se calcula en función de la acumulación de biomasa. Durante la fase vegetativa se asume que el área foliar se mantiene fotosintéticamente activa y por lo tanto el índice de área foliar (IAF) es igual al índice de área foliar verde (IAFV). En etapas reproductivas cuando comienza la senescencia foliar, (que está determinada por la duración de hojas en tiempo térmico), el IAFV cae en mayor tasa que el IAF. Para simular la evolución del área foliar se asigna una duración a cada hoja expresada en tiempo térmico (700-1000 $^0C.día^{-1}$) que permite incluir el proceso de senescencia foliar que ocurre paralelamente.

La expansión de área foliar es relacionada con la biomasa producida cada día y con la cantidad total acumulada a ese momento. Estos parámetros se utilizan para determinar el nuevo índice de área foliar verde producido en el día ($IAFV_{actual}$) de la siguiente manera:

$$\mathbf{IAFV_{actual}} = \frac{\mathbf{AFRB_{diaria} * AFE}}{\left(\mathbf{BAH * AFRB_{acumulada}} + \mathbf{1}\right)^2} \qquad \textbf{[8]}$$

Donde:

$AFRB_{diaria}$ es un indicador de acumulación foliar diaria relacionada a la acumulación de biomasa, esta ultima ya corregida por estrés hídrico (Kg de biomasa.m^{-2}).

AFE es el área foliar especifica (toma valores entre 15-25 $m^2.kg^{-1}$ de biomasa).

$AFRB_{acumulada.}$: representa la acumulación total de hojas relacionada a la biomasa, ya corregida por los factores de estrés (Kg de biomasa.m^{-2}).

BAH: es un coeficiente que expresa la fracción de biomasa que se acumula en hojas (toma valores en un rango de 1 a 10 $m^2.kg^{-1}$ de biomasa). Tomaría un valor de cero si toda la biomasa estuviese representada por hojas.

Sin embargo el proceso de expansión foliar se detiene antes que la acumulación de biomasa en condiciones de estrés hídrico por lo tanto es importante corregir la producción de área foliar por un indicador de la situación hídrica del cultivo (en este caso el cociente Tr actual/Tr potencial). La fracción de IAF_V producidos en cada día se inicia con cero grados-día, y el tiempo térmico durante la vida de esta fracción se calcula diariamente de la siguiente manera:

$$\mathbf{TTIAF_{verde}} = \mathbf{TT_{acum}}(1 + \mathbf{SDFEH * IndiceEstres_{agua}}) \qquad \textbf{[9]}$$

Dónde

$TTIAF_v$: Tiempo térmico que dura el área foliar verde.
TT_{acum}: es el tiempo térmico acumulado.
Índice $Estres_{agua}$: es el índice de estrés hídrico diario para la planta.
SDFEH: es la sensibilidad de duración de la hoja al estrés hídrico.

Cuando el tiempo térmico acumulado de cualquier fracción de IAVF alcanza el límite establecido de tiempo térmico, esta fracción senesce y se restará del total de IAFV.

2.3. BALANCE HÍDRICO

La cantidad de agua utilizada para el crecimiento del cultivo puede ser determinada mediante los componentes del balance hídrico considerados por el modelo. Este toma en cuenta: el riego, la precipitación, la lluvia interceptada por el cultivo y los residuos en superficie, el escurrimiento, la evaporación del suelo y los residuos, la infiltración a través de las capas del suelo, la transpiración y percolación de agua en el perfil del suelo (Stockle y Nelson, 1999).

2.3.1. Precipitación e intercepción

La lluvia se obtiene de los datos meteorológicos diarios reales, que son ingresados a la simulación. En cada evento de lluvia se simula la intercepción por la canopía del cultivo y por la capa de residuos en superficie, el agua interceptada debe restarse de la precipitación total dejando el importe efectivo de agua que entra en el suelo. La influencia de los residuos en el almacenaje de agua es modelado mediante la adición de los residuos a la superficie del suelo como una capa que puede almacenar y evaporar agua (Bristow et al., citados por Stöckle y Nelson, 2003).

El modelo asume para calcular la intercepción por la canopia que si el cultivo cubriera todo el suelo se interceptaría 1mm y corrige por un factor de cobertura cuando esta es menor (Campbell y Díaz, 1988). Luego de considerar la intercepción por la canopia se considera el almacenaje de la capa de residuos la cual se satura en 4kg $H_2O.kg^{-1}$ de residuos. Una vez cubiertos estos sitios, se asume que el agua tiene capacidad de ingresar al suelo.

2.3.2. Infiltración y almacenamiento de agua en el suelo

La cantidad de agua disponible para la infiltración es la precipitación menos la interceptada por la canopía del cultivos y los residuos. CropSyst ofrece dos posibilidades para simular la infiltración: Modelo de cascada y Modelo en diferencias finitas. Se trabajara con el modelo de cascada que supone que no hay flujo de agua hacia arriba en el perfil del suelo, por lo que la fuente de agua para la evaporación es la precipitación y/o el riego. El suelo es dividido en capas de 10cm o menos profundidad si se le indica. Se asume que el agua ingresa a una capa y la completa hasta capacidad de campo, el agua remanente se mueve a la siguiente capa y la completa hasta capacidad de campo, hasta que se agota o pasada la zona de raíces, se asume que se pierde como drenaje profundo (Stockle y Nelson, 1999).

2.3.3. Evapotranspiración potencial del cultivo

CropSyst ofrece dos opciones para el cálculo de la evapotranspiración máxima diaria del cultivo (ET) ($mm.día^{-1}$):

- Modelo Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972)
- Modelo Penman-Monteith (Monteith, 1965).

Los modelos utilizados para obtener evapotranspiración potencial provienen de dos enfoques diferentes que se aplican de acuerdo a la disponibilidad de información climática. La evapotranspiración potencial es la de un cultivo de referencia ($RefET_{pot}$) (césped cortado de 0.12m de altura) que cubre completamente el suelo y sin limitantes de agua, se multiplica por un coeficiente de cultivo (K_c) para obtener la evapotranspiración del cultivo.

Penman-Monteith:

La ecuación de Penman-Monteith puede ser usada si contamos con los datos diarios de temperatura del aire, radiación solar, máximos y mínimos de humedad relativa (RHmax y RHmin) (punto de rocío o la temperatura a partir

de la cual puede calcularse la humedad relativa) y la velocidad del viento.

$$\mathbf{ET_{pot.}} = \frac{\mathbf{ET_{pot.REF} * K_C}}{\mathbf{CLV}} \qquad \textbf{[10]}$$

Dónde

$\mathbf{ET_{pot.REF}}$ es la evapotranspiración potencial para un cultivo de referencia.

$\mathbf{K_C}$ (0-1) es el coeficiente de cultivo.

CLV ($MJ.kg^{-1}$) es el calor latente de vaporización, en su cálculo se incluye la temperatura media del aire.

Para calcular la evapotranspiración de referencia el modelo Penman-Monteith utiliza la siguiente ecuación:

$$\mathbf{ET_{pot.REF}} = \frac{\mathbf{CS_{PVT} * (RN - FC_{suelo}) + (FD_{diurna} * DPV * CV_A) / R_a}}{\mathbf{CS_{PVT} + K_p * (1 + R_c / R_a}} \qquad \textbf{[11]}$$

Dónde:

$\mathbf{FC_{suelo}}$ ($(MJ.m^{-2}).día^{-1}$) es el flujo de calor del suelo, este se determina a partir de la radiación neta.

$\mathbf{FD_{diurna}}$ (0-1) es la fracción del día que representa la fase diurna.

$\mathbf{CV_A}$ ($(MJ.m^{-3}).°C^{-1}$) es la capacidad volumétrica de calor del aire, tomado como $1.2x10^{-3}$.

$\mathbf{K_p}$ ($kPa.°C^{-1}$) es la constante psicométrica.

$\mathbf{CS_{PVT}}$ ($kPa.°C^{-1}$) es la curva de saturación de presión vapor en función de la temperatura.

DPV (kPa) es el déficit de presión de vapor.

RN ($(MJ.m^{-2}).día^{-1}$) es la radiación neta.

R_a, R_c (día.m^{-1}) son la resistencia aerodinámica y de la canopía a la transferencia de vapor para el cultivo de referencia (pastura corta; 0,12m de altura). Para determinarlos debemos conocer la velocidad del viento.

La evapotranspiración potencial total está compuesta por la transpiración potencial del cultivo, la evaporación potencial del suelo y de los residuos.

2.3.4. Evaporación del suelo

2.3.4.1. Evaporación potencial del suelo ($ES_{potencial}$)

La evapotranspiración potencial del suelo se calcula considerando las fracciones del suelo que no son cubiertas por los residuos y por la canopía del cultivo, es decir la proporción de suelo descubierto.

$$ES_{potencial} = (1 - FC_{residuos}) * (1 - FC_{canopía}) * ET_{potencial} \quad [11]$$

Donde:

$FC_{residuos}$: es un factor que representa la fracción del suelo que es cubierta por los residuos.
$FC_{canopía}$: este representa la proporción del suelo cubierta por la canopía.
$ET_{potencial}$: es la evapotranspiración potencial.

La evaporación real del suelo se basa en el contenido de agua de la primera y segunda capa del suelo (10cm), y se simula en dos etapas. Durante la primera etapa, la evaporación continúa a una tasa potencial hasta que el contenido de agua en la parte superior del suelo llega al punto de marchitez permanente (PMP) (Stockle y Nelson, 1999). Para la segunda etapa de evaporación, se utiliza la siguiente ecuación (Campbell y Díaz, 1988):

$$ES_{actual} = ES_{potencial} \left[\frac{CAC_1 - CAaire_1}{PMP_1 - CAaire_1} \right] \quad [12]$$

Dónde:

ES_{actual} (m/día) es la evaporación del suelo.

$ES_{potencial}$ (m/día) es la evaporación potencial del suelo.
CAC_1 (m^3/m^3) es el contenido de agua de la capa de suelo 1.
PMP_1 (m^3/m^3) es el contenido de agua en el punto de marchites permanente de la capa 1 del suelo.
$CAaire_1$ ($m^3.m^{-3}$) es el contenido de agua de la capa superior del suelo secado al aire, se calcula como un tercio del punto de marchites permanente.

2.3.5. Transpiración del cultivo

Se asume que existe transpiración del cultivo desde la emergencia hasta el momento en que este alcanza la madurez fisiológica.

2.3.5.1. Transpiración potencial

Esta es calculada con la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Tr_{potencial} = RIAFV * ET_{potencial}} \qquad \textbf{[13]}$$

Donde:

RIAFV: es la fracción de la radiación incidente que es interceptada por área foliar verde del cultivo.

2.3.5.2. Transpiración real del cultivo

CropSyst asume que no existe almacenamiento de agua por el cultivo, por lo tanto la absorción de agua es igual a la transpiración real. Para el cálculo de la absorción de agua por los cultivos, el perfil del suelo se divide en capas, y la captación de agua de cada capa se calcula a partir de la diferencia de potencial de agua entre el suelo y el xilema de la planta, multiplicado por la conductancia de la planta (determinada por la conductancia de la raíz). La conductancia del suelo se supone que es mayor a la conductancia de la raíz de modo que la absorción de agua, no es limitada por el movimiento de agua hacia las raíces. El total de la absorción de agua, es la suma de la absorción en cada capa de suelo (Stockle y Nelson, 1999).

La absorción de agua (WU_1, en $kg.m^{-2}.día^{-1}$, equivalente a $0,001m.día^{-1}$) de la capa 1 del suelo está dado por:

$$WU_1 = K*C1/1,5*(\psi_{s1} - \psi_1) \quad [14]$$

Dónde:

Ψ_{s1}: ($J.kg^{-1}$ o $m^2.s^{-2}$) es el potencial hídrico de la primer capa del suelo.

Ψ_1: es el potencial hídrico foliar.

Para su cálculo se incluye, el promedio de potencial hídrico entre las capas del suelo, que depende del potencial hídrico en el suelo y la fracción de la longitud total de raíces que hay en cada capa de suelo. Ψ_1 también depende de la transpiración potencial del cultivo, de la conductancia actual de la raíz, e incluye un factor (1,5) que convierte la conductancia de la raíz en conductancia hidráulica de toda la planta (Stockle y Nelson, 1999).

C_1: es la conductancia de la capa 1 de las raíces determinada a partir de la conductancia total de la raíz y la fracción de la longitud total que representa cada capa.

K: representa el número de segundos por día, 86400.

1,5: es un factor que convierte a la conductancia total de la raíz a conductancia hidráulica total de la planta.

2.4. BALANCE DE NITRÓGENO

El modelo incluye en el balance de nitrógeno (N) los procesos de transformaciones que sufre el N en el suelo, la dinámica del amonio, la fijación biológica de N, la demanda del cultivo y la absorción del mismo.

2.4.1. Absorción de nitrógeno

CropSyst utiliza el modelo propuesto por Godwin y Jones (1991). Este determina que la absorción resulta del mínimo entre la demanda de N del cultivo para alcanzar el crecimiento potencial (ya corregido por limitantes de radiación, agua, temperatura o algún otro nutriente) y el potencial de absorción del nutriente. La demanda de N (DN) se calcula de la siguiente forma:

$$DN = (CN_{max} - CN_{pc}) * (BA + BR) + CN_{max} * (CA_{pot} + CR_{pot}) \quad [15]$$

Donde:

CN_{max} (Kg N.Kg de MS^{-1}): Es la concentración máxima de N en el cultivo.

CN_{pc} (Kg N.Kg de MS^{-1}): Es la concentración de N en planta previa al nuevo crecimiento.

BA (Kg.ha^{-1}): Es la cantidad de biomasa aérea acumulada

BR (Kg.ha^{-1}): Es la cantidad de biomasa radical acumulada

CR_{pot} (Kg.ha^{-1}): Es el potencial de crecimiento de las raíces.

CA_{pot} (Kg.ha^{-1}): Es el potencial de crecimiento del cultivo sobre la superficie del suelo.

La absorción potencial de N se calcula como la sumatoria del valor obtenido para cada capa del suelo, que se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$N_{abs.capa\ 1} = N_{abs.max} * LR * N_{disp} * AD^2 \quad [16]$$

Donde:

$N_{abs.capa\ 1}$ (Kg N.ha^{-1}.dia^{-1}): Es la cantidad de N diaria que absorbe el cultivo de la capa 1 del suelo.

$N_{abs.max}$ (Kg N.día^{-1}.m^{-1}): Es la cantidad máxima de N que puede absorber el cultivo por cm de largo de raíces.
LR (m.ha^{-1}): Es el largo de las raíces.

N_{disp}: es un factor de corrección según disponibilidad de N en el suelo, toma valores entre 0 y 1 (Godwin y Jones, 1991).

AD (mm): Es el agua disponible en el suelo para las plantas.

2.4.2. Fijación biológica de N

Las leguminosas, como la soja, presentan la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico a partir de una asociación simbiótica con bacterias del género *Bradyrhizobium Japonicum*. La demanda de N para este tipo de cultivos se estima descontándole a la demanda potencial la cantidad de N fijado por la bacteria [17] (Bouniols et al., citados por Stockle et al., 2003).

$$DN_{actual} = DN_{potencial} - N_{fijación} \quad [17]$$

La tasa de fijación de N acompaña la tasa de crecimiento del cultivo. La cantidad de N fijado puede estar afectada por la disponibilidad de agua de las plantas, el contenido de N mineral en la rizósfera, y la temperatura del suelo.

$$N_{fijación} = \min\left[\left(DN_{pot} * FDFB, 6KgN/ha\right)/día\right] \quad [18]$$

$$FDFB = FB_{crec} * \min\left[FB_{agua}, FB_{NR}, FB_t\right] \quad [19]$$

FDFB: Es la fracción de la demanda diaria de N del cultivo que es cubierta por la fijación biológica (toma valores entre 0 y 1).

FB_{crec}: Es el factor de corrección que permite relacionar la fijación biológica con el crecimiento del cultivo.

$$FB_{crec}\begin{cases}\dfrac{GD_{acum.}}{GD_{acum.\ a\ R1}} & \text{Si hay activo crecimiento (hasta } R_5)\\ 1 & \text{si hay senescencia (llenado de granos – R5)}\\ 1-[GD_{acum.}-GD_{acum.\ a\ R5}/GD_{acum.fin\ de\ fij.}-GD_{acum.\ a\ R5}] & \text{Si esta senesciendo (desde } R_7)\end{cases}$$

FB_{agua}: Es un coeficiente que corrige la Fijación biológica de N por el contenido de agua disponible para las plantas entre los primeros 10 y 30 cm de suelo.

$$FB_{agua} = (AD_{plantas} - 0,5)/0,5 \qquad [20]$$

$AD_{plantas}$: es el Agua Disponible para las Plantas.

FB_{NR}: La presencia de altas concentraciones de N (como nitratos o amonio) en la rizósfera inhibe la fijación por parte de las bacterias. La magnitud de este efecto se estima según los siguientes criterios:

$$FB_{NR}\begin{cases}0 & \text{si } N_{rizosfera} \text{ mayor a 300Kg/ha}\\ 1 & \text{si } N_{rizosfera} \text{ menor a 100Kg/ha}\\ 1-(N_{rizosfera}-100)/200 & \text{entre ese rango}\end{cases}$$

FB_t: Es el factor que corrige la fijación potencial de N por las temperaturas registradas en los primeros 30 cm del suelo según los siguientes criterios:

$$FB_t\begin{cases}1 & \text{si t entre 30 y 36°C}\\ 0,7 & \text{si t es mayor a 36°C}\\ 0 & \text{si t es menor a 0°C}\\ t/30°C & \text{si t entre 0 y 36°C}\end{cases}$$

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERISTICAS DEL ENSAYO

El trabajo se realizó en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni de la Facultad de Agronomía, ubicada sobre la ruta 3, Km. 363, Departamento de Paysandú, Uruguay (32°22´ S 58°03´ W), en el verano 2007/2008.

Las determinaciones necesarias para calibrar y validar el modelo de simulación CropSyst se realizaron en dos experimentos instalados sobre suelos de la formación Fray Bentos, pertenecientes a la unidad San Manuel de la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (escala 1:1000000). Caracterizados como Brunosoles eutricos/subeutricos, integran el Grupo de suelos 11.3 (CONEAT). Presentan fertilidad alta, textura franco arcillo limosa y drenaje moderado a imperfecto. En el Anexo 1 se describen en detalle cada uno de los 27 sitios de muestreo (18 en el ensayo 1 y 9 en el ensayo 2). Los ensayos se ubicaron en laderas con pendientes de 2-3% y 4-6% para el ensayo 1 y 2 respectivamente.

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

No existe un diseño experimental determinado, sino que se seleccionaron sitios en ambos ensayos procurando obtener diferencias en tipo, profundidad y grado de conservación del suelo.

3.3. INSTALACIÓN Y MANEJO DEL CULTIVO

La totalidad de los sitios de muestreo se sembraron el 7 de diciembre 2007 pero sobre diferentes antecesores, según el ensayo. El ensayo 1 fue sembrado sobre una pradera vieja con importante presencia de *Cynodon dactylon*, pero con un adecuado manejo del barbecho (100 días barbecho), en contraparte el ensayo 2 tuvo un cultivo de trigo como antecesor con rendimiento promedio de 3200 $kg.ha^{-1}$ y que fuera cosechado el 18/11.

La siembra se realizó con un equipo de siembra directa Semeato SHM-11 de 5 surcos a una distancia entre hileras de 0,52m y con una densidad de 20 $semillas.m^{-1}$ con el objetivo de alcanzar una población de aproximadamente 300000

plantas.ha^{-1} (95% de germinación y 85% de implantación). A siembra se agregaron 50 unidades de Fósforo como pentóxido de forma de evitar pérdidas de rendimiento por deficiencia de este nutriente. A su vez el cultivo se mantuvo libre de plagas y enfermedades con aplicaciones semanales de insecticida y 2 aplicaciones de fungicida en el estadio de R1 y R5 (0,5l de Opera.ha^{-1} en cada aplicación).

El material genético utilizado fue "Don Mario 6200" perteneciente al grupo de madurez VI y de crecimiento determinado. Según la información de evaluación de INIA-INASE, se trata de un material con un potencial de rendimiento superior a la media y presenta un buen comportamiento en siembras tardías como las que se manejaron en este experimento (Ceretta, 2006).

3.4. DETERMINACIONES

3.4.1. En suelo

3.4.1.1. Textura, materia orgánica y densidad aparente

Antes de la siembra se tomaron muestras en cada sitio en ambos ensayos, fraccionando las muestras en las siguientes profundidades para el ensayo 1: 0-5cm, 5-10cm, 10-20cm, 20-30cm, 30-50cm, 50-70cm, 70-+cm mientras que para el ensayo 2 se fraccionaron de 0-15cm, 15-30cm, 30-45cm, 45-+. Las mismas se realizaron con un barreno de 7,5cm de diámetro. Una sub-muestra fue tamizada a 2mm, secada en estufa a 60°C durante 48h y posteriormente analizada para textura mediante el método de Bouyucous, (Bouyoucos, 1936) y materia orgánica con el método de Nelson y Sommers (1982). Otra sub-muestra fue utilizada para el cálculo de densidad aparente secándose a estufa de 105°C durante 48h.

3.4.1.2. Humedad gravimétrica

Se extrajeron muestras de suelo de todo el perfil con un calador (1,8cm de diámetro) en 5 momentos del cultivo: V_3-V_4 (10/01), V_8-R_1 (1-2/02), R_2-R_3 (16/02), R_6 (12/03) y R_7 (26/03), respetando el mismo criterio de fraccionamiento en profundidad utilizado en las muestras a siembra. Estas muestras se colocaron en estufa a 105 C° hasta alcanzar peso constante. Se calculó humedad gravimétrica por la siguiente fórmula:

$$\mathbf{Hg = (M_T - M_S) / M_S} \qquad \mathbf{[21]}$$

Dónde:

Hg: (g/g o tt/tt) Humedad gravimétrica, masa de agua en una masa de suelo determinada.
M_T: Masa total.
M_S: Masa de suelo, (luego de pasar por la estufa).

Posteriormente con el dato de densidad aparente (DA) se procedió a estimar la humedad volumétrica:

$$\mathbf{Hv = Hg * D_{ap}} \qquad \mathbf{[22]}$$

Dónde:
Hv: es la humedad volumétrica, cm^3/cm^3 o m^3/m^3.
D_{ap}: es la densidad aparente del suelo, g/cm^3 o tt/m^3.

Una forma de expresar el contenido de agua en el perfil de suelo es como lámina de agua, considerando la profundidad de cada estrato (en mm) y la humedad volumétrica calculada para cada capa, obtenemos los mm de agua en todo el perfil.

3.4.2. <u>En cultivo</u>

3.4.2.1. Población y fenología

Se realizó un conteo de plantas en 5 metros lineales por sitio en V3-V4 y a cosecha. Se realizaron lecturas de fenología cada 10-15 días durante todo el ciclo del cultivo según la escala elaborada por Fehr y Caviness (1977).

3.4.2.3. Biomasa aérea

La acumulación de biomasa se evaluó mediante 6 cortes 0,5m lineales al ras del suelo por sitio cada 15 días desde los 25 días post emergencia hasta la cosecha. Las muestras se secaron en estufa a 60 C° hasta peso constante y los resultados se expresaron en Kg de materia seca por hectárea.

3.4.2.4. Índice de área foliar (IAF)

Para medir este índice se realizaron 4 cortes de plantas en distintos momentos del cultivo, coincidiendo siempre con la fecha y lugar de los cortes para medición de biomasa. Las plantas cortadas, correspondientes a 0,5m lineales fueron defoliadas en su totalidad y las hojas fotosintéticamente activas y completamente desarrolladas se escanearon. El área foliar (m^2 de hoja) se midió con un procesador de imágenes digitales "*ImageJ*" (descargado de rsb.info.nih.gov/ij/) que proporciona la medida individual de cada hoja a partir de la cual se calculo el IAF en cada sitio muestreal.

3.4.2.6. Rendimiento en grano

Se cosecharon manualmente 3 hileras de un metro de largo (1,68m^2) en cada sitio el 12 y 21 de abril para los ensayos 1 y 2. Las muestras se colocaron en estufa a 60C° (24 horas) y se trillaron también en forma manual. La humedad del grano a la trilla oscilaba entre 8% y 9% pero el rendimiento se corrigió finalmente a 0% humedad.

3.5. CALIBRACIÓN DEL MODELO CROPSYST

Se utilizó la versión 4.09.01 del año 2007 disponible gratuitamente en http://www.bsyse.wsu.edu/cropsyst.

Para calibrar el modelo se compararon los resultados observados a campo y simulados por el modelo, individualmente para cada sitio. Con ésta metodología no se logró un buen ajuste por la variabilidad entre valores observados explicada por error experimental en los métodos de estimación de las distintas variables. Para reducir o minimizar ese error se compararon medias de varios sitios con características de suelo similares. Se ingresaron al

modelo los datos de cada uno de los grupos (promedios entre los sitios que lo componen, Cuadro No. 1) tanto de textura, materia orgánica, contenidos de humedad a siembra, a capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

3.5.1. Suelo

Las propiedades hidráulicas del suelo requeridas por CropSyst fueron estimadas de la información de los muestreos realizados al comienzo del ensayo (textura, materia orgánica y densidad aparente). Para ello se utilizaron las ecuaciones desarrolladas por Saxton y Rawls (2006).

Los principales criterios para formar los grupos de sitios (suelos) fueron profundidad del perfil, textura y materia orgánica. Considerando también que los resultados de las corridas del modelo para cada uno de los sitios por separado fuese similar (antes de agruparlos).

Cuadro No. : Características promedio de suelos de los tres sitios utilizados en la calibración.

Grupo	Profundidad (cm.)	Textura (%)			% MO	Dap gr/cm³	CC mm	PMP mm
		Limo	Arcilla	Arena				
1	0-5	60,3	19,4	20,3	5,4	1,0	17,6	7,4
	5-10	62,2	18,2	19,6	4,2	1,2	16,9	6,8
	10-20	62,2	17,9	19,9	3,7	1,2	33,0	13,1
	20-30	60,4	23,2	16,4	3,2	1,1	34,8	15,7
	30-50	62,6	25,1	12,3	2,3	1,1	70,7	32,5
	50-70	48,4	38,0	13,6	1,6	1,2	77,6	46,0
	70-105	56,4	29,1	14,5	1,0	1,2	123,6	62,8
							374,2	**184,4**
2	0-5	53,2	20,4	26,4	4,3	1,1	16,5	7,4
	5-10	56,2	16,8	26,0	3,4	1,23	15,4	6,2
	10-20	51,0	23,2	25,8	2,9	1,30	32,7	15,6
	20-30	50,4	26,2	23,4	2,8	1,26	34,0	17,1
	30-50	49,6	27,2	23,6	1,7	1,19	67,3	34,4
	50-70	49,7	34,9	15,4	1,1	1,20	74,7	42,4
	70-104	56,8	25,5	17,7	0,6	1,21	112,6	53,7
							353,3	**176,9**
3	0-5	55,8	18,6	25,6	5,4	1,1	16,9	7,3
	5-10	57,8	16,5	25,8	3,6	1,3	15,6	6,2
	10-20	55,8	19,6	24,6	3,6	1,2	32,4	14,0
	20-30	46,6	34,7	18,8	2,7	1,2	37,4	21,5
	30-50	39,1	44,7	16,2	2,1	1,0	81,8	53,4
	50-70	43,1	40,7	16,3	1,7	1,0	78,9	48,9
	70-100	54,7	26,5	18,8	0,8	1,3	100,3	49,2
							363,3	**200,6**

Dap: Densidad aparente, CC: Capacidad de Campo, PMP: Punto de marchitez de permanente.

3.5.2. Clima

La base de datos climáticos (Tmax, Tmin, precipitaciones, Radiación global, Humedad relativa máxima y mínima) fue ingresada al modelo a través de la interfase denominada "ClimGen" por medio de la cual se transformaron datos de formato Excel a formado UED (Universal Enviromental Database).

3.5.3. Cultivar

Existe una serie de coeficientes de cultivo (fisiológicos, fenológicos y generales a la especie) necesarios para poder calibrar CropSyst, los cuales pueden

obtenerse a partir de: a) bibliografía, b) valores tomados por el modelo por defecto, c) ajustando los valores del parámetro (dentro de un rango considerado razonable, a criterio del investigador) hasta tener una aproximación de los valores simulados por el modelo con los reales obtenidos a campo. Estos se detallan en el cuadro No. 2.

Para la calibración de las características del cultivar seleccionado, se utilizó la información obtenida en los ensayos, información suministrada por el semillero "Don Mario" – Barraca ERRO e información bibliográfica. En una primera etapa se utilizó la interfase del modelo denominada "Crop Calibrator" para ajustar parámetros hasta lograr que el modelo se comporte de acuerdo a los resultados experimentales. Posteriormente se hizo un ajuste manual corriendo el modelo hasta ajustar la salida del modelo con los resultados experimentales.

Cuadro No. : Parámetros requeridos por el modelo CropSyst, sus valores y la fuente de esa información.

Parámetro	Fuente	Valor	Unidad
Coeficiente de conversión transpiración/biomasa	C	5	kPa kg m^{-3}
Eficiencia de Uso de la Radiación	B	2,0	$g.MJ^{-1}$

Índice de área foliar verde inicial	C	0,06	$m^2.m^{-2}$
Índice de área foliar máximo	C	5	$m^2.m^{-2}$
Área foliar especifica	C	22	$m^2.kg^{-1}$
Duración del Área foliar	C	1000	$°C.día^{-1}$
Sensibilidad de la duración foliar al estrés hídrico	M	2	
Fracción del IAF máximo a madurez fisiológica	C	0	
Profundidad máxima de raíces	B	1,7	M
Largo de raíces por biomasa de raíces	M	90	$Km.Kg^{-1}$
Superficie de raíz por densidad de raíz	M	3	$cm.cm^{-3}$
Coeficiente de extinción de la radiación	B	0,55	
Absorción máxima de agua	B	12	$mm.día^{-1}$
Potencial hídrico al inicio del cierre estomático	B	-1000	$J.Kg^{-1}$
Potencial hídrico para marchitamiento foliar	B	-1500	$J.Kg^{-1}$
Grados día a emergencia	C	135	$°C.día^{-1}$
Grados día a inicio floración	C	1150	$°C.día^{-1}$
Grados día a inicio llenado de grano	C	1750	$°C.día^{-1}$
Grados día a madurez fisiológica	C	1950	$°C.día^{-1}$
Temperatura Base	B	7,5	°C
Temperatura optima para el crecimiento	B	18	°C
Temperatura máxima	B	30	°C
Índice de Cosecha	C	0,35	

B: Bibliografía; M: Manual del Modelo CropSyst; C: Calibrado

3.5.4. Manejo general del cultivo

En esta etapa se cargó al software la información sobre el manejo general que se efectuó en los sitios seleccionando algunas de las opciones que incluye el modelo como: fertilización, riego, labores, métodos y fechas de siembra y cosecha etc.

3.5.5. Evaluación de los resultados del modelo

Se confrontaron valores simulados y observados para ver el ajuste en las curvas de evolución de biomasa aérea acumulada, índice de área foliar y contenido de agua en suelo, también se comparó rendimiento logrado en los sitios con el simulado por el modelo.

La evaluación de los resultados del modelo y su capacidad predictiva se realizó básicamente mediante un método visual (con la gráfica "simulado vs observado" y la lineal 1:1) y un método cuantitativo calculando la Raíz del Cuadrado Medio del Error (RMSE) como forma de evaluación objetiva del ajuste del modelo a la realidad:

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_j)^2}{n}} \qquad \textbf{[23]}$$

Dónde:
S: Corresponde con los valores obtenidos de la simulación.
O: Son los valores medidos en los sitios experimentales.
n: es el número de medidas contando todos los sitios evaluados.

3.6. VALIDACIÓN DEL MODELO

Esta etapa permite corroborar la capacidad predictiva demostrada por CropSyst en la calibración. Para esto se corrió el modelo manteniendo los coeficientes del cultivo, la base climática y el manejo pero trabajando con un set de datos independientes de los utilizados para la calibración. Para esto se compararon los resultados simulados y observados en el experimento 2, realizado sobre suelos con propiedades hidráulicas diferentes y en una condición de humedad del suelo a siembra también muy diferente ya que se manejaron cultivos de soja de segunda sobre rastrojo de cultivos de trigo.

3.6.1. Caracterización de suelos

Al igual que en la calibración para hacer la comparación también se agruparon sitios con características edáficas similares minimizando de esta manera las imprecisiones en los métodos de estimación de las distintas variables.

Cuadro No. : Características de suelo promedio de los grupos de sitios utilizados en la validación.

Grupo	Prof.	Textura (%)			MO%	Dap gr/cm^3	CC mm	PMP mm
		Limo	Arcilla	Arena				
1	0-15	38,25	31,95	29,8	4,91	1,32	54,7	31,6

	15-30	30,23	48,13	21,64	4,12	1,25	62,5	43,3
	30-40	28,63	56,19	15,18	3,15	1,28	66,4	49,2
							183,6	**124,0**
2	0-15	46,9	27,4	25,7	4,1	1,38	52,6	22,5
	15-30	40,4	41,2	18,5	2,8	1,41	59,4	25,5
	30-45	36,1	51,8	13,4	2,3	1,36	64,9	36,0
	45-60	39,6	48,1	12,3	1,6	1,40	63,4	42,7
	60-75	51,4	37,3	11,3	1,3	1,37	58,1	33,8
	75-90	60,3	24,2	15,6	0,2	1,37	49,2	22,4
							347,7	**182,8**
3	0-15	51,34	23,05	25,62	3,42	1,4	49,7	23,6
	15-30	45,74	28,67	25,60	2,51	1,5	51,5	27,5
	30-45	38,09	43,00	18,92	2,14	1,3	60,2	36,0
	45-60	39,61	43,63	16,76	2,18	1,4	60,7	39,2
	60-75	37,59	48,11	14,30	1,94	1,3	63,2	42,7
							285,3	**169,1**
4	0-15	47,18	29,3	23,52	3,31	1,40	53,1	28,4
	15-30	31	58,5	10,5	2,03	1,28	68,2	40,5
	30-45	38,19	54,16	7,65	1,65	1,40	66,4	47,4
	45-60	41,3	49,53	9,17	1,31	1,38	64,4	43,7
	60-75	67,5	23	9,5	0,7	1,34	51,0	21,7
							303,2	**181,8**

mmCC: mm de agua a capacidad de campo; mmPMP: mm a punto de marchitez permanente.

El Grupo No. 1 presenta como característica general un perfil de suelo más superficial que el resto de los grupos que se refleja claramente en la capacidad de almacenaje de agua útil, 60mm frente a los 134mm que podrían almacenar en promedio los demás grupos. Por otra parte el grupo No. 3 se diferencia del resto por su menor diferenciación textural entre horizontes ya que el contenido de arcillas aumenta progresivamente conforme aumenta la profundidad del perfil. Contrariamente el grupo No. 4 se destaca por su transición abrupta entre el horizonte A y Bt, y su mayor capacidad de almacenaje de agua.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO

En la Figura No 2 se presentan las temperaturas máximas y mínimas decádicas ocurridas en el ciclo del cultivo en relación a los registros históricos (71/95). Si

bien las diferencias encontradas no son importantes, la media de temperatura registrada durante el cultivo es algo superior al promedio histórico, en especial, durante el comienzo de enero y fines de febrero y abril.

A pesar de estas variaciones los registros máximos y mínimos están dentro del rango recomendado para la especie: 9-35 °C. La temperatura media está por debajo del rango óptimo, 23,3°C vs 25-30°C.

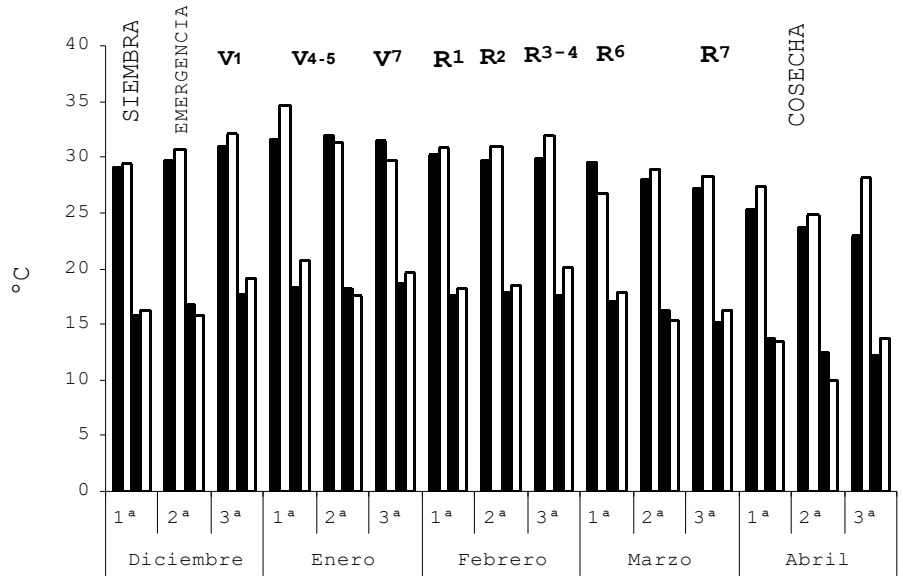


Figura No. : Temperaturas máximas y mínimas en el verano 07/08 (barras blancas) y para una serie histórica de años, 1971-1995, (barras negras).

El total de precipitaciones durante el ciclo del cultivo fue de 438mm frente a 556mm para la serie histórica en ese mismo período, pero es importante resaltar que casi el 40% de ese total (168mm), ocurrió en dos días (28 y 29 de febrero) (Figura No. 3).

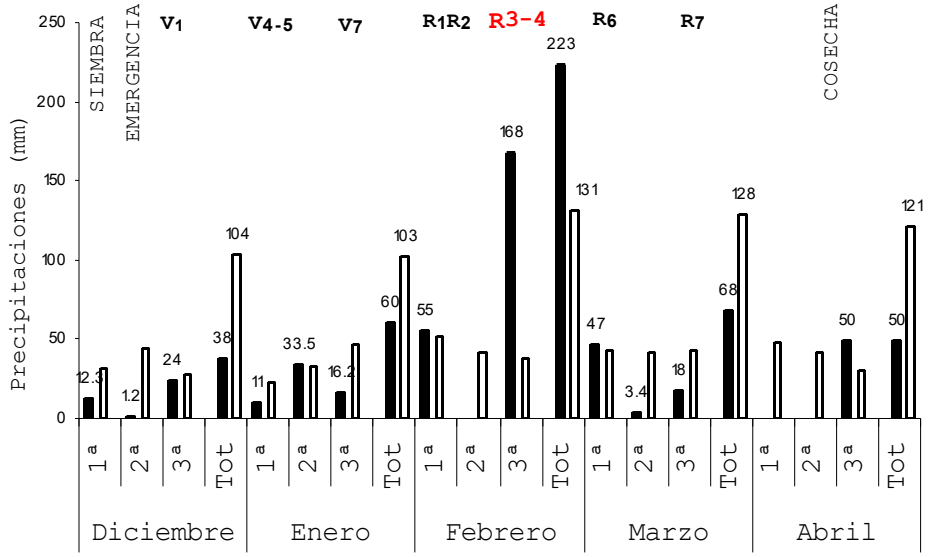


Figura No. : Precipitaciones sucedidas en el periodo de cultivo 07/08 (barras negras) y valores promedio de una serie histórica, 1971/1995 (barras blancas).

Si bien la gran mayoría de la precipitaciones están concentradas en un momento, ocurrieron cuando el cultivo estaba entre R_3-R_4, momento en que se inicia el período crítico (Sadras et al., 2002). Esto puede explicar, junto con la capacidad de retención de agua del suelo, los altos rendimientos obtenidos (3414 $Kg.ha^{-1}$, promedio de los 27 sitios) ya que luego de terminado el periodo crítico y hasta la cosecha solo llovieron 18mm.

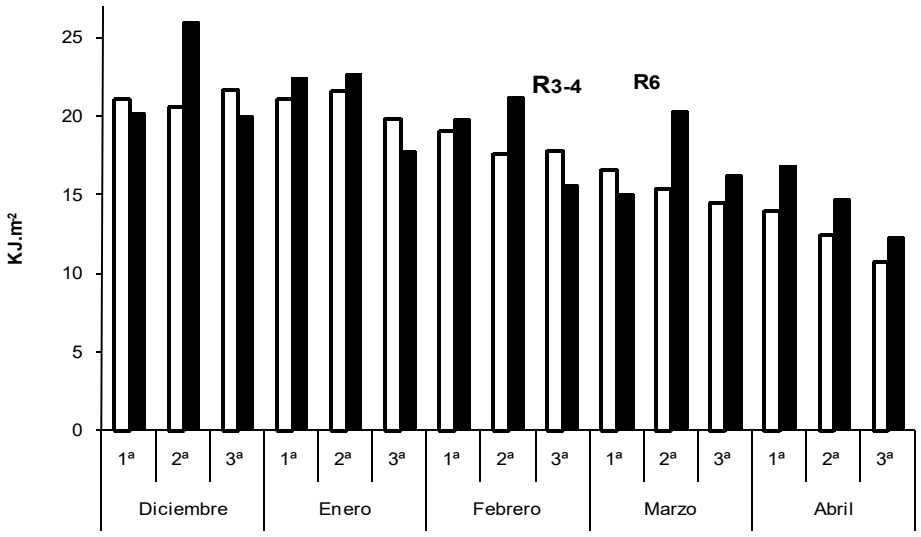


Figura No. : Radiación solar expresada en $KJ.m^{-2}.día^{-1}$, para una seria histórica (barras blancas) y en el verano 07-08 (barras negras).

La radiación solar total durante el ciclo del cultivo superó a la media de la serie histórica, 282 $MJ.m^{-2}$ frente a 264 $KJ.m^{-2}$ esto determino que la radiación media diaria fuera superior, 18,8 vs 17,6 $KJ.m^{-2}$. La excepción fue la última década de febrero y la primera de marzo, donde los valores registrados de radiación promedio diario fueron 2 $KJ.m^{-2}.día^{-1}$ inferiores a los de la serie histórica. Coincidiendo con los momentos de mayores registros pluviométricos durante el ensayo (varios días de alta nubosidad). Todo este período (15-20 días) sucede cuando la soja estaba entre R_{3-4} y R_6 (Figura No. 4).

4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO

4.2.1. Componentes del rendimiento

Se logró una importante variabilidad tanto en producción de biomasa como en rendimiento en grano y sus componentes (Cuadro No. 4).

Cuadro No. : Producción de biomasa, rendimiento en grano y sus componentes.

	Max	Min	Media	% CV
Biomasa Cosecha (Kg. ha^{-1})	9455,1	3000	6288,7	27,59
Rendimiento (Kg. ha^{-1})	4856,2	1499,8	3414,2	27,46
Índice de Cosecha	0,50	0,22	0,34	20,68
Peso de mil granos (g.)	168,0	118,8	151,8	8,15
Numero de granos. m^{-2}	2946	1241	2228	23,27
Población (pl. m^{-2})	31,4	16,0	23,1	15,33

La dispersión obtenida en las variables listadas en el cuadro anterior, son producto de la variabilidad edáfica y topográfica del terreno ya que el manejo del cultivo (barbecho, fecha de siembra, fertilización, control de plagas, malezas y enfermedades) fue idéntico en todos los sitios.

El peso de grano fue menos variable en comparación a los demás componentes del rendimiento, ya que la duración del llenado depende del material genético, la temperatura, el fotoperíodo (todos comunes entre sitios), pero también depende de la disponibilidad hídrica y nitrógeno, explicando estos la variación encontrada (sitios ubicados sobre suelos superficiales sufrieron estrés hídrico severo en fin de llenado de grano R_6-R_7, logrando bajo peso de grano). Además de los factores ambientales mencionados esta variable es también dependiente en cierta medida del número de granos por unidad de superficie.

En el Cuadro No. 5 se presenta la matriz de correlaciones entre los componentes del rendimiento y entre estos y la biomasa máxima producida. En el mismo se detallan los coeficientes de correlación (R^2, por debajo de la diagonal) y las significancias de esas correlaciones (*p*-valor, por encima de la diagonal).

Cuadro No. : Correlaciones entre diferentes componentes del rendimiento y entre estos y la biomasa acumulada a cosecha.

	Rendimiento	Biomasa	IC	PMG	Nro. granos	Población
Rendimiento	1	**0,0001**	**0,1661**	**0,0001**	**0,0001**	**0,5284**
Biomasa	0,97	1	**0,1478**	**0,0001**	**0,0001**	**0,4626**
IC	0,08	0,08	1	**0,3761**	**0,0701**	**0,093**
PMG	0,47	0,48	0,03	1	**0,0051**	**0,0539**
Nro. granos	0,95	0,92	0,13	0,27	1	**0,776**
Población	0,02	0,02	0,24	0,14	3,30E-03	1

El rendimiento en grano es el resultado final de una serie de procesos fisiológicos de captura y distribución de recursos por parte de la planta por lo que es la variable considerada para resumir el comportamiento del cultivo. En este caso aparece claramente relacionado con el número de granos por unidad de superficie (órganos fosa).

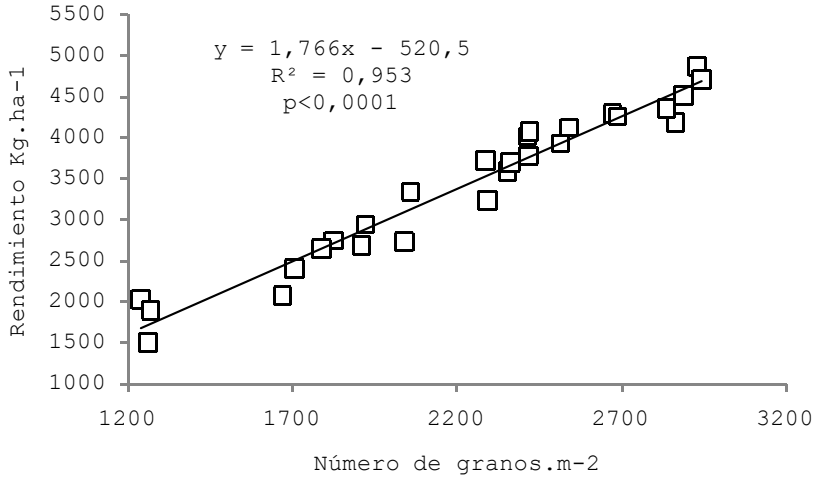


Figura No. : Relación entre el rendimiento y el número de granos por unidad de superficie.

El peso de grano presentó una correlación media con el rendimiento (R^2=0,47). Se identificaron concretamente dos sitios de muestreo con bajo rendimiento (por bajo

número de granos) y alto peso de grano que distorsiona la tendencia lineal creciente. Este tipo de relación, se asocia con la ocurrencia de restricciones al crecimiento en etapas de formación de granos R_3-R_4 seguidas por mejora de las condiciones hídricas en etapas posteriores del ciclo R_5-R_6).

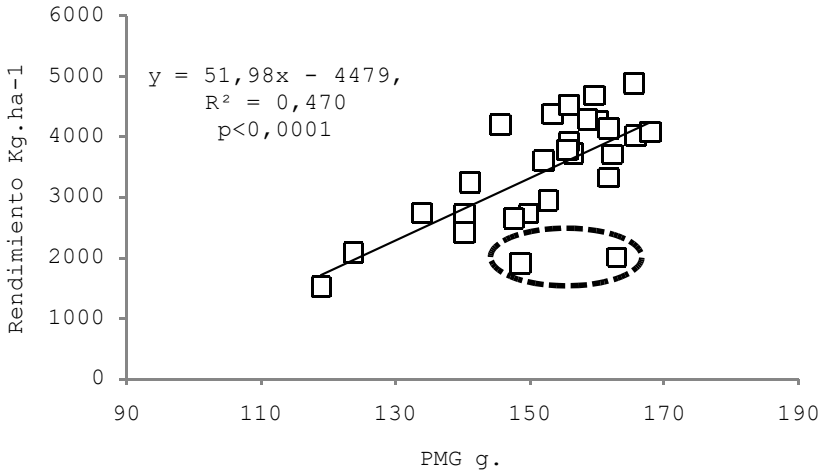


Figura No. : Relación entre el rendimiento en grano y el peso de granos.

Estos resultados permiten concluir que en primer lugar la relación entre las variables número y peso de grano presenta una dispersión muy importante (R^2=0,19), y por otra parte el rendimiento estuvo explicado en mayor medida por el número de granos.m^{-2} que por el peso de los mismos (sitios con igual peso de grano mostraron diferencias en rendimiento de 1500Kg.ha^{-1}, Figura No. 6).

4.2.2. Acumulación de biomasa aérea y evolución del área foliar

La evolución de la biomasa y el área foliar (IAF) se analizaron por separado para cada experimento. Se compararon entre ellos mediante los promedios de todos los sitios que incluye cada experimento.

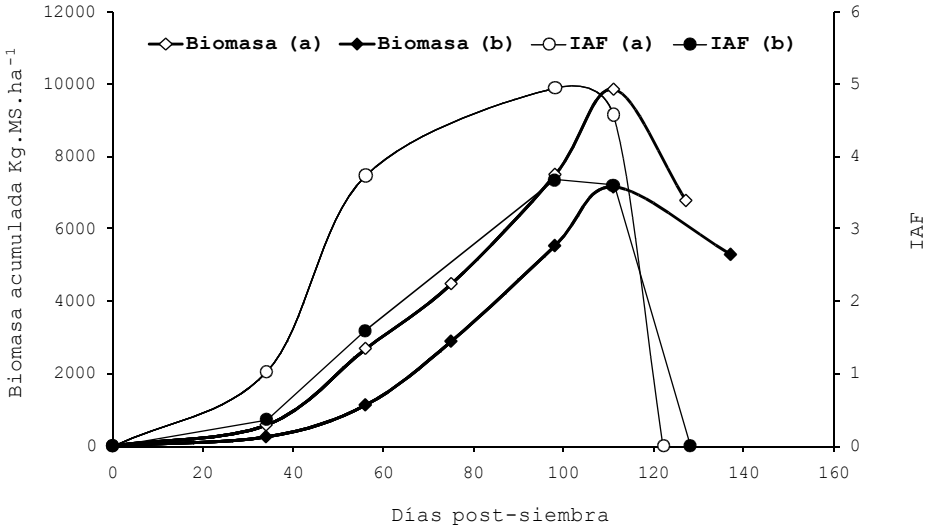


Figura No. : Evolución de biomasa aérea e IAF promedios en los dos experimentos: soja de primera, ensayo 1 (a), soja de segunda, ensayo 2 (b).

Ambas variables presentan una evolución semejante en las dos situaciones de siembra (primera y segunda). El IAF alcanzó el máximo con algunos días de anticipación sobre la máxima acumulación de biomasa aérea.

El ensayo 1 presentó mayor acumulación media de biomasa aérea, superando los 10000Kg.ha^{-1} de materia seca, un 30% superior a la acumulada en el ensayo 2. El índice de área foliar logrado en ese ensayo fue también cerca de un 20% superior al ensayo 2, lo que se asocia a los mayores rendimientos en grano obtenidos en estos sitios (mayor captación de energía solar asociada al mayor IAF y mayor numero de estructuras reproductivas asociado a mayor biomasa aérea total).

En todos los sitios evaluados la acumulación de biomasa aérea se describe por una curva tipo sigmoide. En particular para los sitios del ensayo 2, el momento y el valor máximo acumulado presentan una importante variabilidad entre sitios. La variabilidad fue menos importante en el ensayo 1 (menos de 1000Kg.ha^{-1} de diferencia entre los sitios de menor y mayor acumulación de materia seca).

El índice de área foliar presentó al igual que la biomasa, una evolución diferencial entre sitios. Por otra parte en el ensayo 1 se observó una diversidad menor con un coeficiente de variación de 28% para el valor del IAF máximo entre sitios.

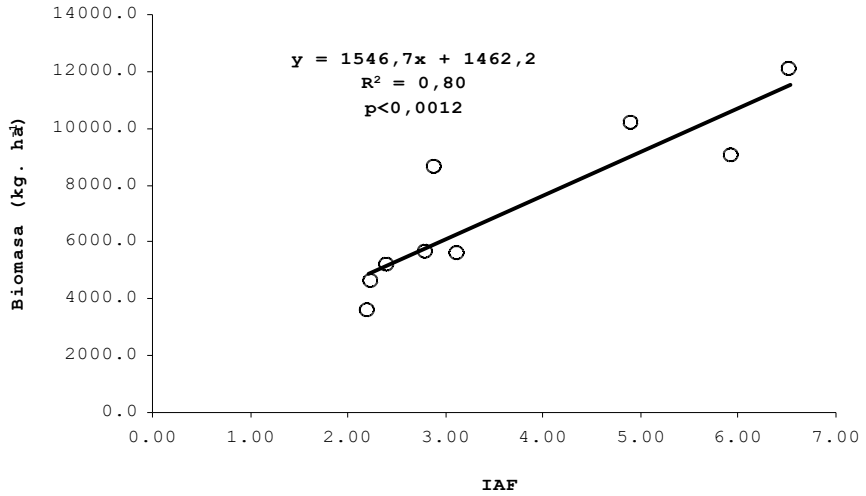


Figura No. : Correlación entre aérea foliar verde máxima y acumulación de biomasa aérea máxima para cada uno de los sitios del ensayo 2.

Se observó una relación lineal creciente entre las dos variables medidas en el ensayo 2 mientras que en el ensayo 1 dicha relación no se expresó.

4.2.3. Contenido de agua en el suelo

La variabilidad de suelos en los experimentos, principalmente en profundidad del perfil, origina la importante diferencia que se observa entre los sitios experimentales. La misma fuente de variación sumado a la variabilidad de cultivos antecesores que presentaron los dos experimentos (barbecho invernal en el experimento ubicado en el ensayo 1 y cultivo de trigo en el experimento ubicado en el ensayo 2) se tradujeron en importantes diferencias registradas entre sitios en cuanto a los volúmenes de agua acumulados en todo el perfil al inicio del experimento.

La cantidad de agua útil con la que partieron los cultivos en ambas condiciones de siembra, es por lo general superior en soja de primera (Figura No. 9, Calibración). En soja de primera el período de barbecho permitió recargar el perfil, lo que se manifiesta en el mayor volumen acumulado de agua a siembra frente a la de segunda, donde el cultivo de invierno antecesor extrajo un volumen de agua muy importante y no se logró la recarga del perfil entre madurez fisiológica del trigo y siembra de soja.

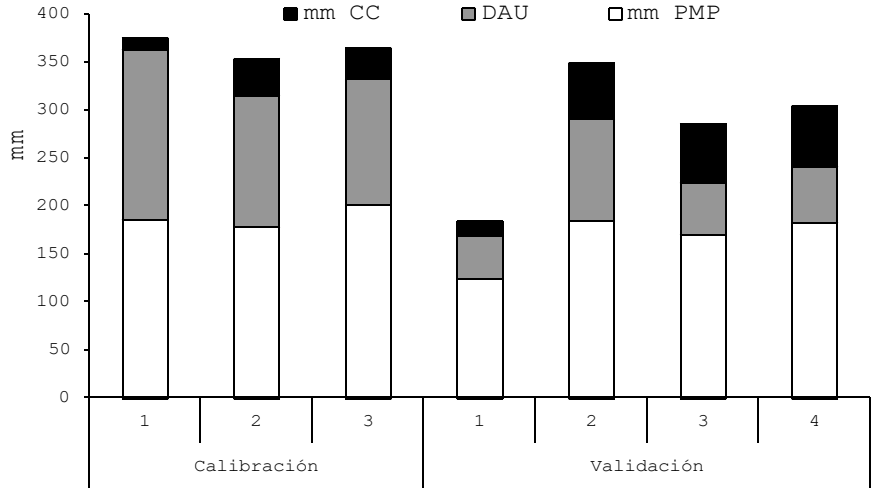


Figura No. : Contenido de agua a punto de marchitez permanente (mm PMP), capacidad de campo (mm CC), y disponibilidad de agua útil (mm AU) a siembra para 7 sitios.

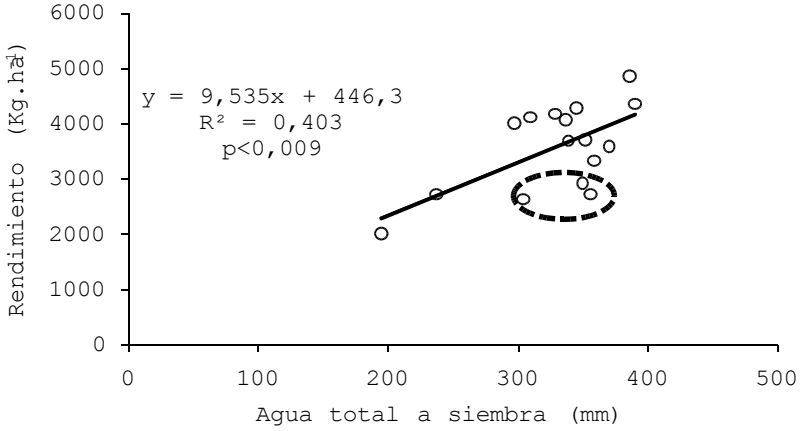


Figura No. : Correlación entre contenido inicial de agua total (agua útil y también por debajo de Punto de marchitez) en el suelo y rendimiento en grano del experimento 1.

La correlación que existe entre el contenido de agua a la siembra y el rendimiento obtenido en suelos con capacidad de almacenaje intermedia es baja, ya que el consumo total de agua por el cultivo en todo el ciclo es muy superior al volumen que se puede acumular previo a la siembra. Por lo tanto, las precipitaciones posteriores y en particular aquellas próximas al período crítico, juegan un papel muy importante en la determinación del rendimiento.

En la Figura No. 10 se observa cierta tendencia que marca que los sitios de menores rendimientos se asociaron con menores contenidos iniciales de agua. Por otra parte cuánto mayores son los contenidos de agua a siembra (suelos más profundos) la dispersión de los rendimientos en grano resulta mayor. Como las precipitaciones durante el ciclo del cultivo son iguales, se podría adjudicar la diferencia observada en rendimiento en grano entre los sitios al contenido de agua total en suelo al momento de la siembra, más allá de las posibles diferencias en disponibilidad hídrica (explicadas por la textura). En la misma se remarcan tres puntos que, a pesar de que tienen altos contenidos de agua a siembra, lograron rendimientos 30% inferiores a los alcanzados en otros sitios con similar contenido inicial de agua. En estos puntos las plantas fueron defoliadas o totalmente removidas por venados,

provocando una depresión en la producción inicial de biomasa que no se recuperó en todo el ciclo del cultivo. Separando estos puntos (*"outlyers"*) la correlación se incrementa aproximadamente en un 68% (R^2= 0,64 p<0,0015).

Esta tendencia no se observa en los sitios con soja de segunda, donde los que rinden más se ubican sobre suelos más superficiales (45-60cm), frente a los demás sitios, por lo tanto con el menor nivel de agua total a la siembra. A su vez la variabilidad en rendimientos es superior a la encontrada en la soja de 1ª con valores que fluctúan desde 1,5 a 4,7 $tt.ha^{-1}$ frente a 2-4,8$tt.ha^{-1}$.

4.3. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE CROPSYST

En primer lugar, es importante destacar que la representación del desarrollo fenológico del cultivo fue adecuada luego de ajustar las duraciones potenciales de algunas etapas críticas del ciclo para el cultivar en cuestión (cuadro No. 2).

De acuerdo a la lógica de funcionamiento del modelo se presentan a continuación los resultados de la calibración de la biomasa aérea. Esta es una de las variables centrales del funcionamiento del modelo (figura No. 1). Una adecuada simulación de biomasa está condicionada por el desarrollo de área foliar ya que ésta determina la intercepción de radiación y por ende condiciona la energía solar disponible para el crecimiento. Si el crecimiento de la biomasa logra un ajuste razonable, es altamente probable que la evolución del contenido de agua (con la extracción por el cultivo como uno de los componentes principales del sistema), logre una buena representación, ya que el crecimiento está mayormente limitado por agua y radiación (considerando N no limitante). Finalmente, si las variables anteriores representan la realidad, el rendimiento en grano tendrá una adecuada estimación, ya que su valor resulta de un ajuste al índice de cosecha potencial para el cultivar simulado que el modelo corrige por estrés hídrico en floración y llenado de grano.

4.3.1. Biomasa aérea

La biomasa simulada por CropSyst tiene un adecuado ajuste con los valores medidos a campo para los tres grupos utilizados en la calibración (Figura No. 12 y Figura No. 13 y Cuadro 6).

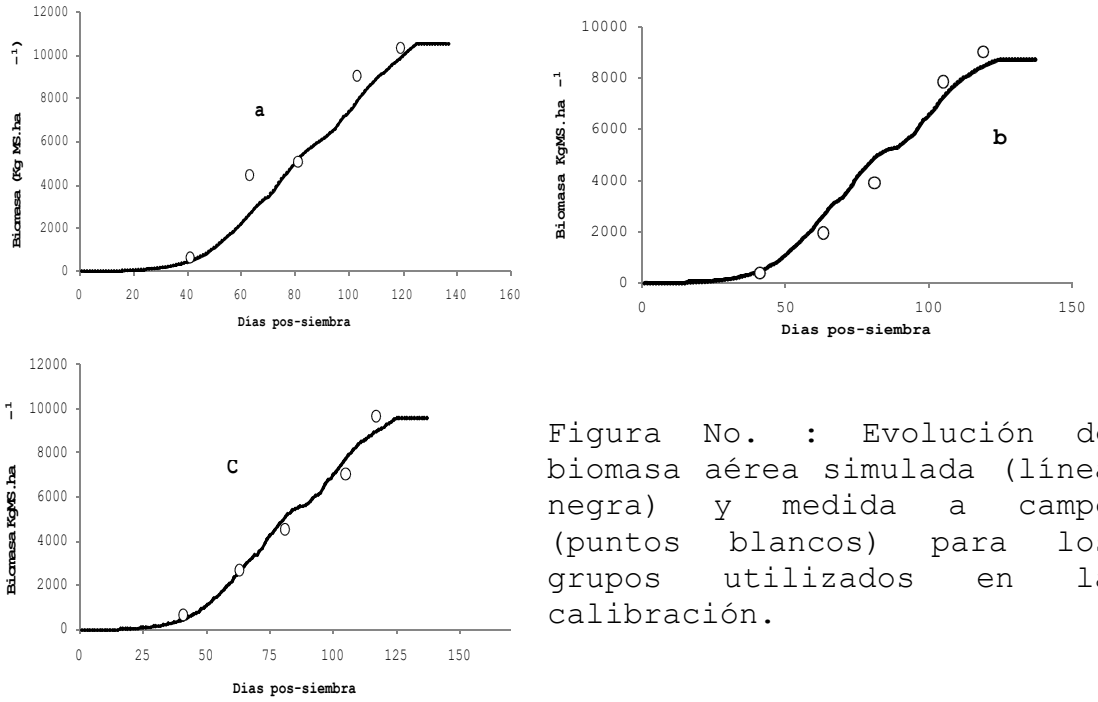


Figura No. : Evolución de biomasa aérea simulada (línea negra) y medida a campo (puntos blancos) para los grupos utilizados en la calibración.

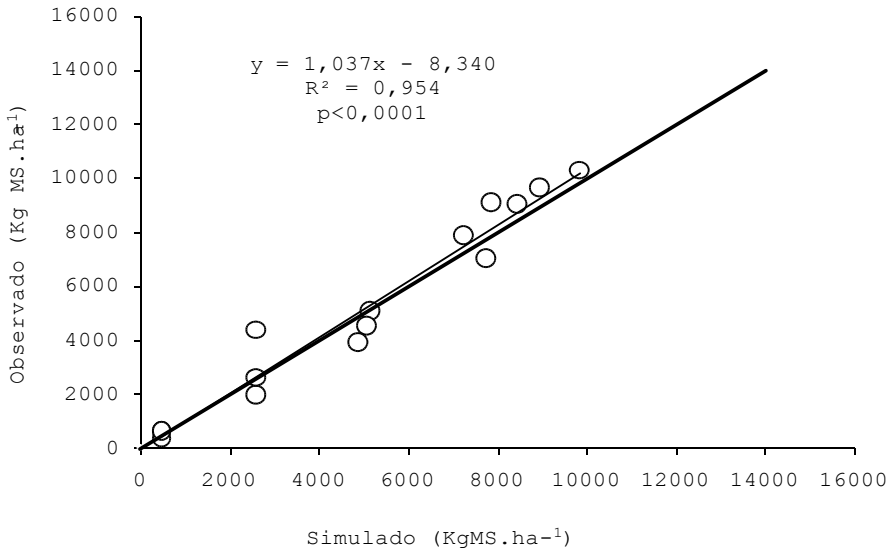


Figura No. : Lineal 1:1 entre biomasa simulada y observada, para los 3 grupos y 5 fechas de muestreo en el ciclo del cultivo.

En ésta comparación no se tuvo en cuenta el muestreo de biomasa a cosecha ya que el modelo no considera la pérdida de hojas en la acumulación de biomasa aérea, por lo que en esa etapa el valor predicho por el modelo es muy superior al observado.

Cuadro No. : Promedios de biomasa simulada y observada para los 3 grupos de sitios según las fechas de muestreo.

Fecha	Observado	Simulado	RCME	%RCME
10/01	554,2	455,7	148,9	26,9
1/02	3010,5	2607,2	1120,6	37,2
19/02	4508,4	5051,7	649,8	14,4
12/03	7988,1	7630,6	875,8	11,0
28/03	9662,5	9086,1	580,6	6,0
Media Total	**5144,7**	**4966,3**	**748,9**	**14,6**

Existe una variación promedio entre los valores observados y simulados de cada grupo y para todas las etapas del ciclo del cultivo de 750KgMS.ha^{-1} (RCME, Cuadro No. 6). Los resultados fueron en términos relativos más variables y diferentes a los observados en las primeras

estimaciones, etapas iniciales de crecimiento del cultivo, con valores bajos de biomasa acumulada a pesar de ser los momentos de mejor ajuste en la simulación de índice de área foliar como se muestra en el capítulo siguiente.

4.3.2. Índice de área foliar e intercepción solar

CropSyst en líneas generales no demostró buena performance en las predicciones del índice de área foliar en los distintos grupos de suelos ni en los distintos momentos de desarrollo del cultivo. La mayoría de los valores simulados por CropSyst subestiman los valores medidos a campo para esta variable (Figura No. 14) por lo tanto la media observada para todos los grupos y fechas es superior a la simulada (Cuadro No. 7 y figura No.).

Cuadro No. : Promedios de IAF simulado y observado según fechas de muestreos para los tres grupos de la calibración.

Fecha	Observado	Simulado	RCME	%RCME
10/01	0,93	0,77	0,25	27,3
1/02	2,43	3,51	0,87	35,9
12/03	4,22	1,74	1,83	43,4
28/03	4,50	0,88	2,82	62,7
Media Total	3,02	1,73	1,74	**57,6**

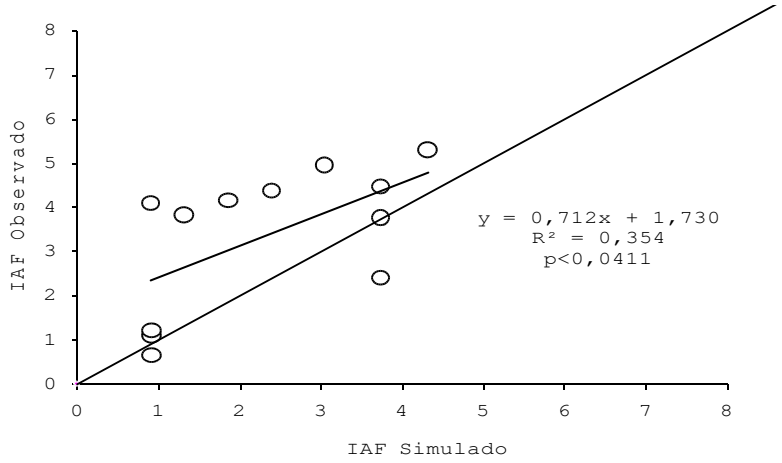


Figura No. : Lineal 1:1 entre Índice de área foliar simulada y observada, para los tres grupos de la calibración en 4 fechas de muestreo.

A pesar de esto, la acumulación de área foliar verde (IAFv) resultó mejor representada por el modelo en etapas iniciales del cultivo que hacia el final del ciclo alcanzando valores máximos similares (entre 4 y 6 para los tres grupos) a los obtenidos a campo pero con 10 días de anticipación en el tiempo. Contrariamente a partir del pico máximo de IAF la senescencia foliar es simulada por el modelo más rápidamente generándose en esta etapa las mayores diferencias entre los valores simulados y observados (Figura 15).

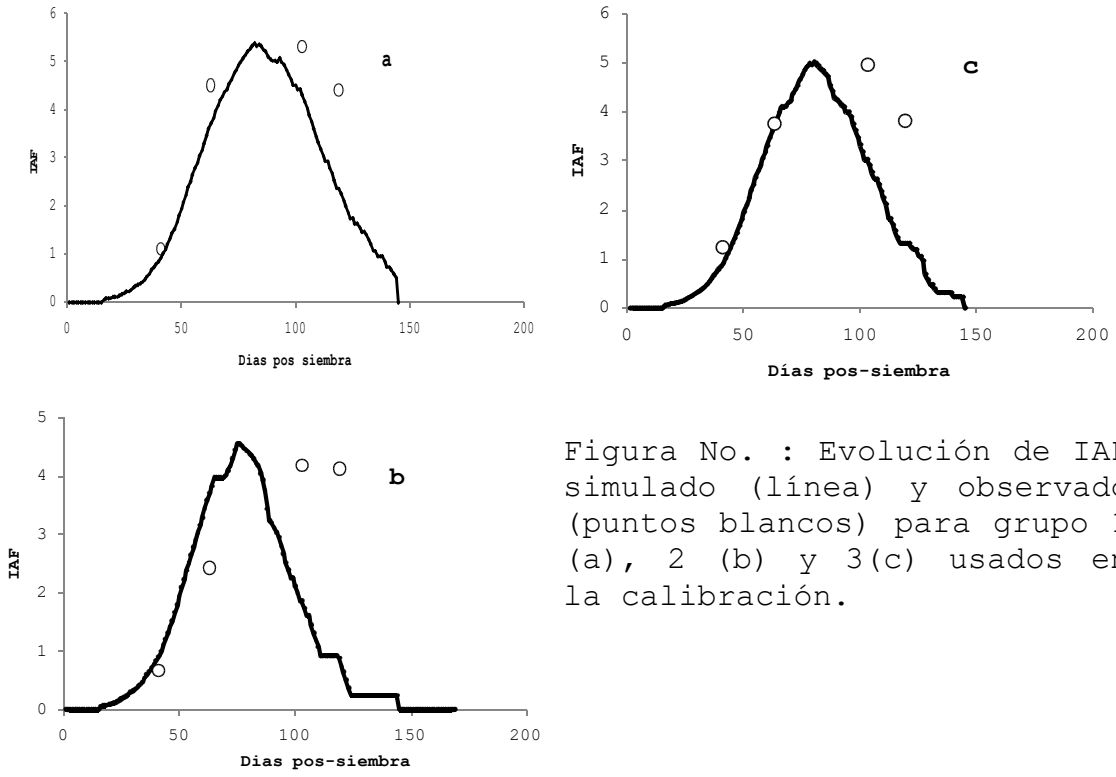


Figura No. : Evolución de IAF simulado (línea) y observado (puntos blancos) para grupo 1 (a), 2 (b) y 3(c) usados en la calibración.

A pesar de los errores comentados anteriormente, desde el punto de vista de la simulación parecen no ser importantes, ya que valores superiores al IAF óptimo presentan poco peso relativo en el proceso de acumulación de biomasa porque la intercepción de radiación se torna insensible a incrementos en el área foliar (95% de la intercepción de luz). De esta forma se explica la capacidad del modelo de simular con precisión la intercepción de luz

y por ende la fijación de CO_2 y la acumulación de biomasa a pesar de la diferencia media obtenida entre simulados y observados para la variable IAFv (cuadro No. 7).

La intercepción de radiación por parte del cultivo se estima a partir del índice de área foliar acumulado diariamente (ecuación 23).

$$R_{Int.} = RFA * [1 - e^{(-Kc * IAF)}] \qquad [24]$$

R_{int}: Es la radiación interceptada por el cultivo.
RFA: Es la radiación global incidente.
K_c: Es el coeficiente de extinción de luz específico para soja (0,55)

En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos de la comparación entre la intercepción de radiación estimada por el modelo y la estimada a partir de las mediciones de IAF en los ensayos.

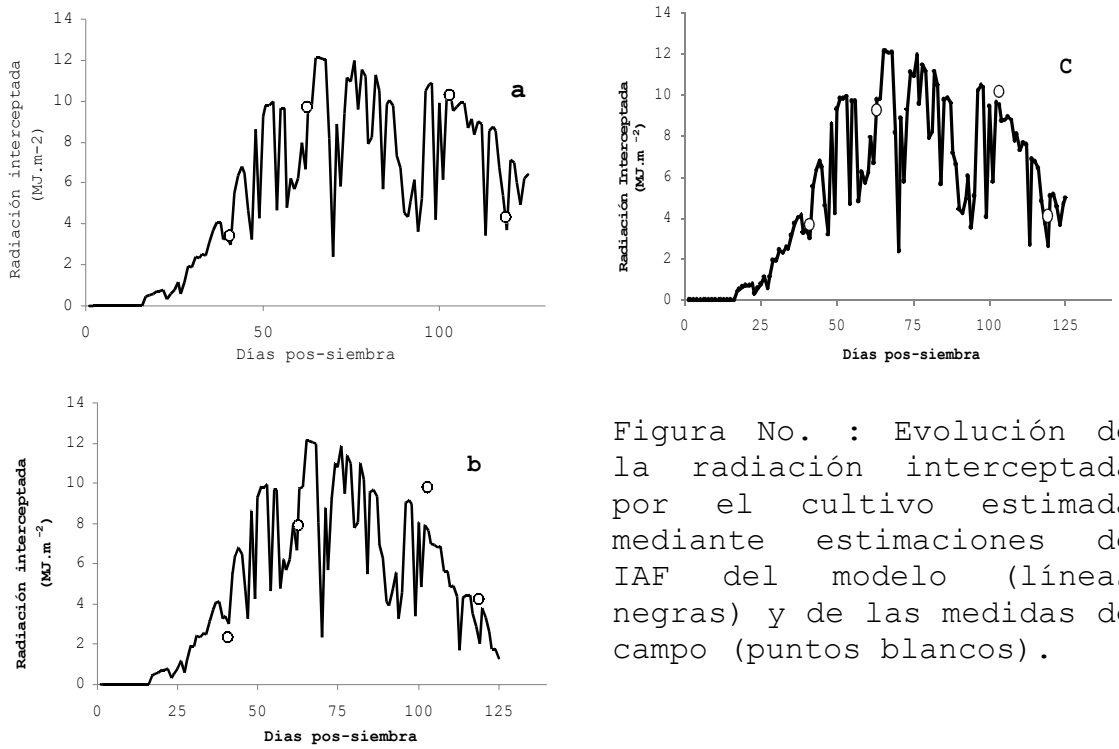


Figura No. : Evolución de la radiación interceptada por el cultivo estimada mediante estimaciones de IAF del modelo (líneas negras) y de las medidas de campo (puntos blancos).

La comparación de ambas estimaciones de intercepción de radiación por parte del cultivo presenta un ajuste superior al observado para estimaciones de la variable IAFv (RRCME 18%) (Figura No. 17). Esto podría explicar en parte la precisión demostrada por el modelo en representaciones del crecimiento, ya que la vía limitada por radiación es una de las principales para la estimación de la acumulación de biomasa aérea (ver, capítulo 2.2.2.1. El crecimiento a partir de la radiación).

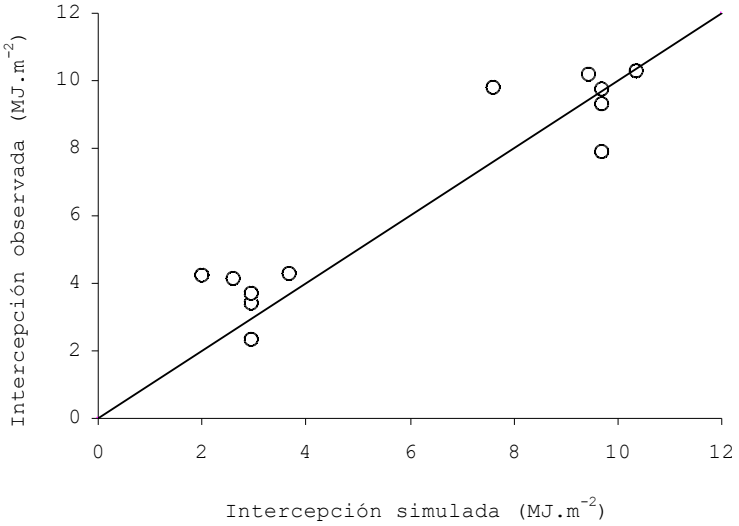


Figura No. : Dispersión de valores de intercepción de radiación simulados y estimados a partir del IAF observado y contra línea 1:1.

4.3.3. Dinámica de agua en el suelo

La comparación en la evolución del contenido de agua en suelo simulado-observado se realizó hasta 70cm de perfil. La evaluación se realizó con estimaciones de agua total en suelo para minimizar errores en la comparación, por el hecho de confrontar dos estimaciones (simulación vs agua disponible de acuerdo a la estimación de CC y PMP).

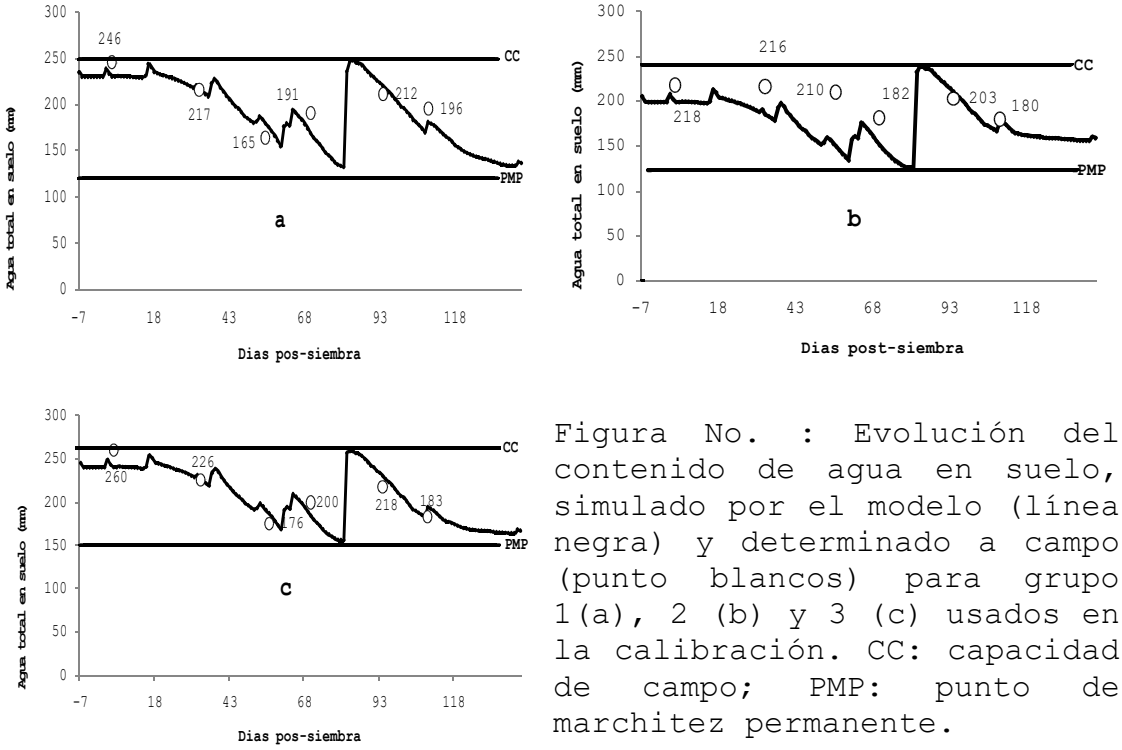


Figura No. : Evolución del contenido de agua en suelo, simulado por el modelo (línea negra) y determinado a campo (punto blancos) para grupo 1(a), 2 (b) y 3 (c) usados en la calibración. CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente.

Los grupos de sitios con los que se realizó la calibración presentan como característica general que el contenido inicial de agua a siembra era similar a capacidad de campo por tratarse de siembras sobre pasturas en barbecho químico durante la primavera (100 días). Existió un período de 80 días de extracción de agua continua y a tasas crecientes por parte del cultivo con recargas mínimas del perfil hasta alcanzar una disponibilidad hídrica cercana al punto de marchitez permanente a los 70 dps. Esta situación se traduce en un estrés por deficiencia hídrica que se prolonga hasta comienzos del período crítico de concreción de rendimiento (R_3-R_6, ver capitulo 2.1.4, Períodos críticos) afectando la acumulación de biomasa y posteriormente el rendimiento en grano. Esta situación se revierte con la ocurrencia de importantes precipitaciones que recargan el perfil hasta capacidad de campo, levantando la restricción y el estrés permitiéndole al cultivo lograr el crecimiento observado y correctamente simulado por CropSyst. Posterior a esa recarga el modelo demuestra alta precisión en predecir la tasa de consumo de agua por parte

del cultivo que es el principal factor de extracción de agua del suelo (Figura 17).

En resumen el modelo logra predecir con precisión la evolución del contenido de agua en suelo, ya que existe una variabilidad promedio entre valores observados y simulados de 21mm de agua total (Figura 18 y Cuadro 8)

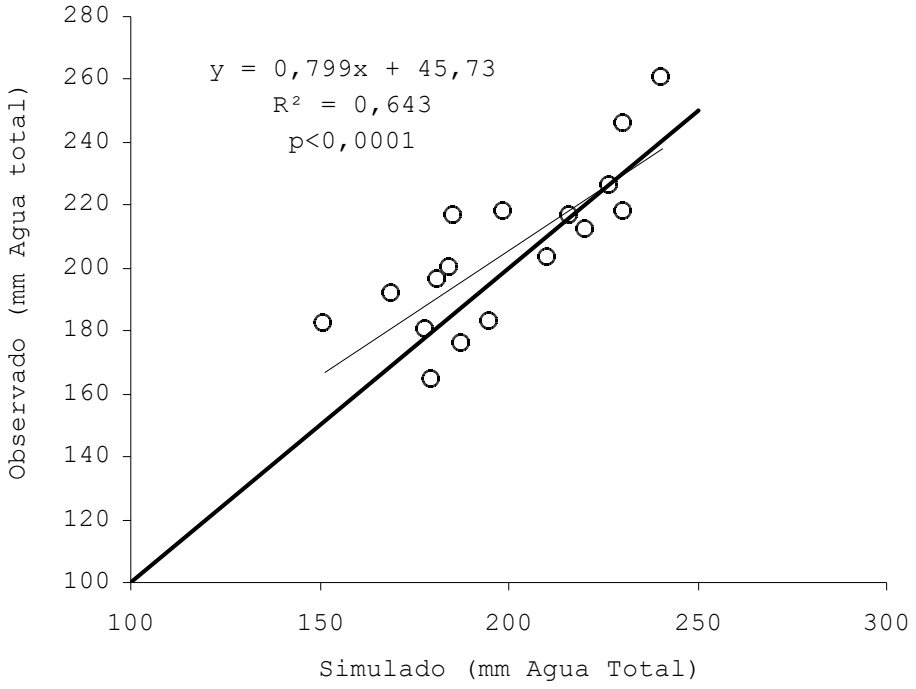


Figura No. : Lineal 1:1 entre agua total simulada por CropSyst y observada.

Cuadro No. : Evolución del contenido de agua en suelo medida a campo y simulada por CropSyst, promedio para los tres grupos de sitios.

Fecha	Observado	Simulado	RCME	%RCME
12/12/07	241,3	223,5	17,9	7,4
10/01/08	219,5	209,5	17,7	8,1
1/02/08	183,5	172,4	36,8	20,0
16/2/08	191,1	168,3	23,7	12,4
12/03/08	210,9	220,8	10,1	4,8
28/03/08	186,3	185,0	10,8	5,8
Media Total	**205,4**	**196,6**	**21,5**	**10,5**

Las diferencias más importantes suceden en los muestreos del 1 y 16/02 (Cuadro 8), donde el suelo se encontraba más seco. Durante esos muestreos el cultivo estaba fenológicamente en transición de etapa vegetativa a reproductiva y con una demanda atmosférica muy alta que se traduce en un consumo importante de agua por parte del cultivo. CropSyst sobreestima la absorción de agua en esa etapa del cultivo mientras que en etapas más avanzadas cuando el consumo es mayor el ajuste resultó superior. De todas maneras este ajuste deja claro la capacidad de esta herramienta para el análisis de sistemas de cultivos en cuanto a la dinámica del agua en suelo.

4.3.4. Rendimiento en grano.

Para calibrar rendimiento en grano se le ingresó al modelo un índice de cosecha potencial para el cultivar de 0,38 que fue el que arrojó el mejor ajuste entre valores simulados y observados de rendimiento (Cuadro 2). Este índice alcanzó valores diversos en el ensayo de campo pero la media para los grupos fue de 0,39, muy similar al índice potencial ingresado al modelo para el cultivar.

Cuadro No. : Índice de cosecha y rendimiento en grano simulado por CropSyst y observado a campo según sitio de muestreo.

Grupo	IC		Rendimiento		
	Simulado	Observado	Simulado	Observado	RCME
1	0.38	0.36	4004	3735	268.9
2	0.38	0.38	3312	3459	147.1
3	0.38	0.43	3637	4094	456.6
Total	0.38	0.39	**3651**	**3763**	**317.5**
%RCME					**8.4**

Para los tres grupos de suelos utilizados en la calibración de CropSyst el modelo presentó buena capacidad de predecir el rendimiento en grano ya que en promedio la diferencia entre simulados y observados fue menor a 320kg. ha^{-1} de grano lo que significa un 8% del rendimiento medio observado. Por otra parte los índices de cosecha obtenidos en la simulación resultaron menos variables que los

obtenidos a campo y muy similares al potencial ingresado para el material genético.

4.4. VALIDACIÓN DEL MODELO CROPSYST

El conjunto de suelos sobre los que se realizó la validación se caracterizó por una importante variabilidad edáfica entre puntos de muestreo de un mismo sitio (cuadro No. 3). Esto determinó imprecisiones en los muestreos de suelo, lo cual le quita fiabilidad a las estimaciones de las propiedades del suelo como profundidad del perfil, textura y capacidad de almacenaje de agua. Esta situación determina que se cuestione la calidad de la información recabada para validar adecuadamente el modelo, ya que es probable que en muchos casos no exista correspondencia entre las mediciones de campo y los parámetros de suelo ingresados al modelo en cada sitio (acumulación de biomasa aérea e IAFv se estimaron mediante métodos destructivos que impedían volver a realizar el muestreo en exactamente el mismo lugar del sitio, ver Materiales y métodos 3.4.2.3. Biomasa aérea y 3.4.2.4. Índice de área foliar (IAF)). Es decir que se puede estar simulando el crecimiento del cultivo en un suelo de profundidad, textura y materia orgánica diferente al que se está midiendo en cada momento. Esto puede explicar parte importante de las diferencias encontradas entre valores simulados y observados en producción de biomasa en algunos sitios y por lo tanto el bajo ajuste alcanzado para índice de área foliar y rendimiento en grano.

4.4.2. Biomasa aérea

En la figuras 19 y 20 y cuadro 10 se presenta la comparación entre valores observados y simulados para acumulación de biomasa aérea. A excepción de algunos sitios particulares (Sitio d Figura 19) el modelo no logra representar adecuadamente lo sucedido en la realidad. Si bien esto puede deberse a desajustes del modelo, una parte importante del error puede estar dado por la heterogeneidad del suelo tal como fue comentado anteriormente.

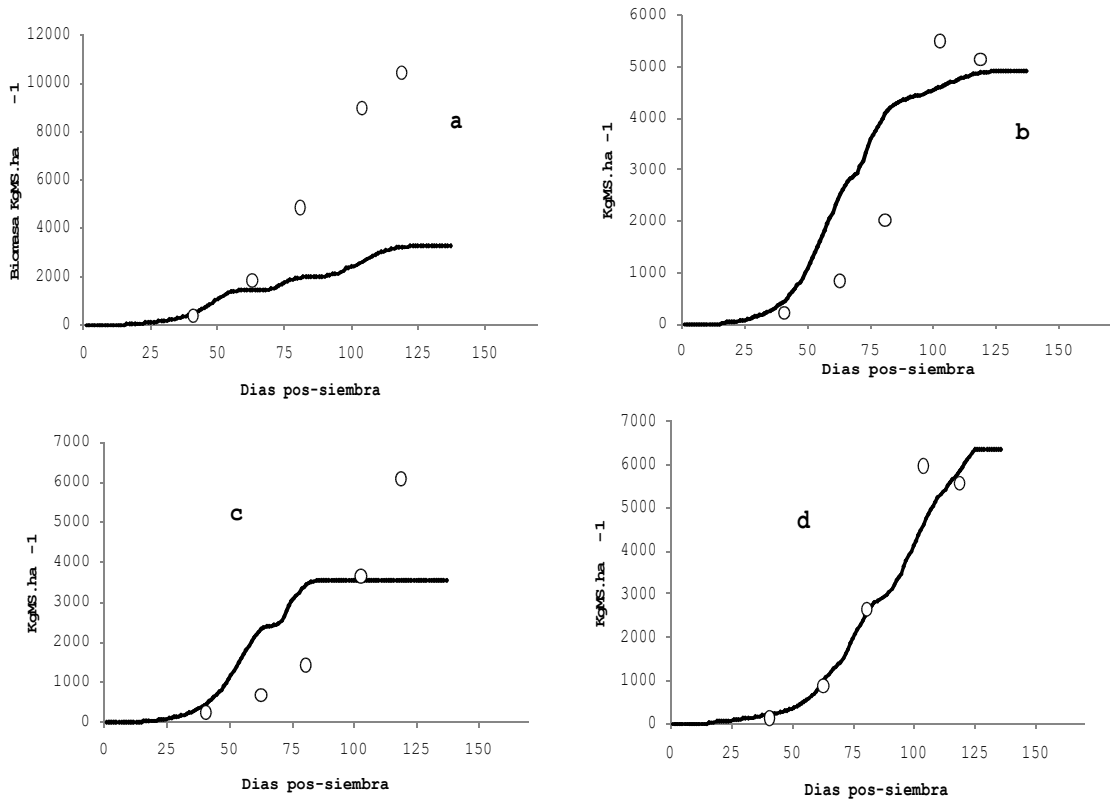


Figura No. : Evolución de biomasa aérea simulada (linea negra) y observada (puntos blancos) para los grupos 1 (a), 2 (b), 3 (c) y 4 (d).

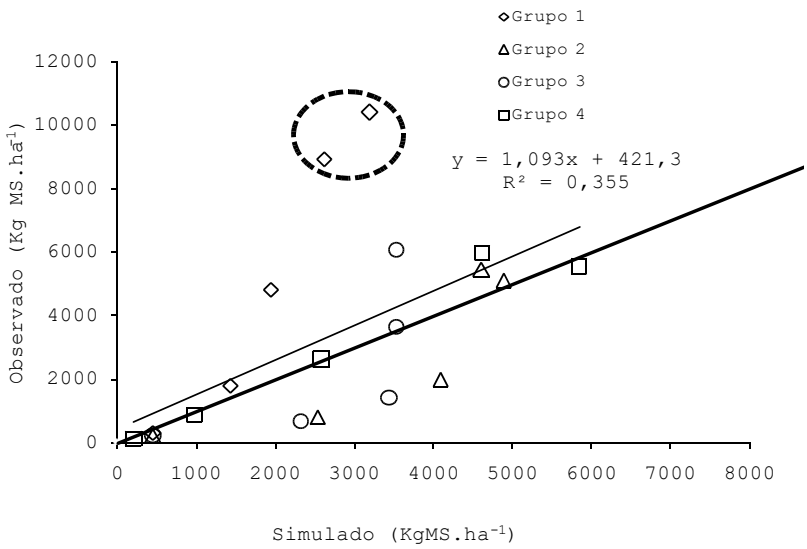


Figura No. : Lineal 1:1 para biomasa aérea simulada y observada.

Un grupo particularmente llamativo fue el 1, en sitios con suelos superficiales y con poca capacidad de almacenar agua, el crecimiento fue mal respresentado por el modelo, dado que se detiene a los 120 dps en un nivel de acumulación de biomasa de sólo un 30% de la observada (figura No. 20, puntos remarcados). La escasa profundidad del suelo del conjunto de sitios del grupo 1 con presencia de horizontes calcareos a 30 cm de profundidad hace prácticamente inexplicable los resultados observados en el campo. Es improbable que el modelo simule altas producciones de biomasa dado un suelo de dichas características,por lo tanto, se requiere un análisis independiente que será presentado en mayor detalle en el capítulo 4.5.

Para el grupo 3 el modelo presenta un crecimiento inicial superior al observado lo que puede atribuirse a una posible respuesta del cultivo al efecto de sombreo ejercido por el rastrojo del cultivo de trigo antecesor (60 cm de altura). En esta situación las plantas modificarían la estructura y su relación hoja-tallo acumulando menor biomasa aérea en etapas iniciales del cultivo que le permiten posteriormente sobrepasar momentos de déficit

hídrico con niveles menores de estrés y acumular finalmente mas biomasa aérea de la estimada por CropSyst.

En el cuadro 10 se presentan los resultados de la comparación simulado-observado para el promedio de los tres grupos de sitios similares (excluído el Grupo 1). Los mayores errores de la simulación son en las primeras mediciones, lo cual además de lo ya comentado respecto de la variacion en las características de suelo, puede deberse a las diferencias en crecimiento inicial asociadas a la presencia del rastrojo en pie del cultivo antecesor.

Cuadro No. : Biomasa aérea promedio observada y simulada, para los grupos en validación.

Fecha	Observado	Simulado	RCME	%RCME
10/01	222,6	394,6	199,0	89,4
1/02	1044,2	1813,9	1373,8	131,6
19/02	2720,0	3014,8	1678,7	61,7
12/03	6007,2	3841,1	931,7	15,5
28/03	6793,1	4364,0	1487,0	21,9
Media Total	**3357,4**	**2685,7**	**1250,9**	**37,3**

Si bien se hallaron diferencias relativas importantes entre simulado y observado, éstas se concentraron en los primeros momentos de muestreo. El ajuste entre estimaciones (por modelo y por muestreo) al final del ciclo del cultivo (R_4 en adelante) fue semejante al obtenido en la calibración (entorno a 15-20% de la media observada).

4.4.3. Crecimiento del area foliar e intercepción de radiación

En la figura siguiente se presentan la evolución de IAFv simulado y observado para los grupos utilizados en la validación. El resultado observado tal como era esperado es coincidente con lo sucedido para la biomasa.

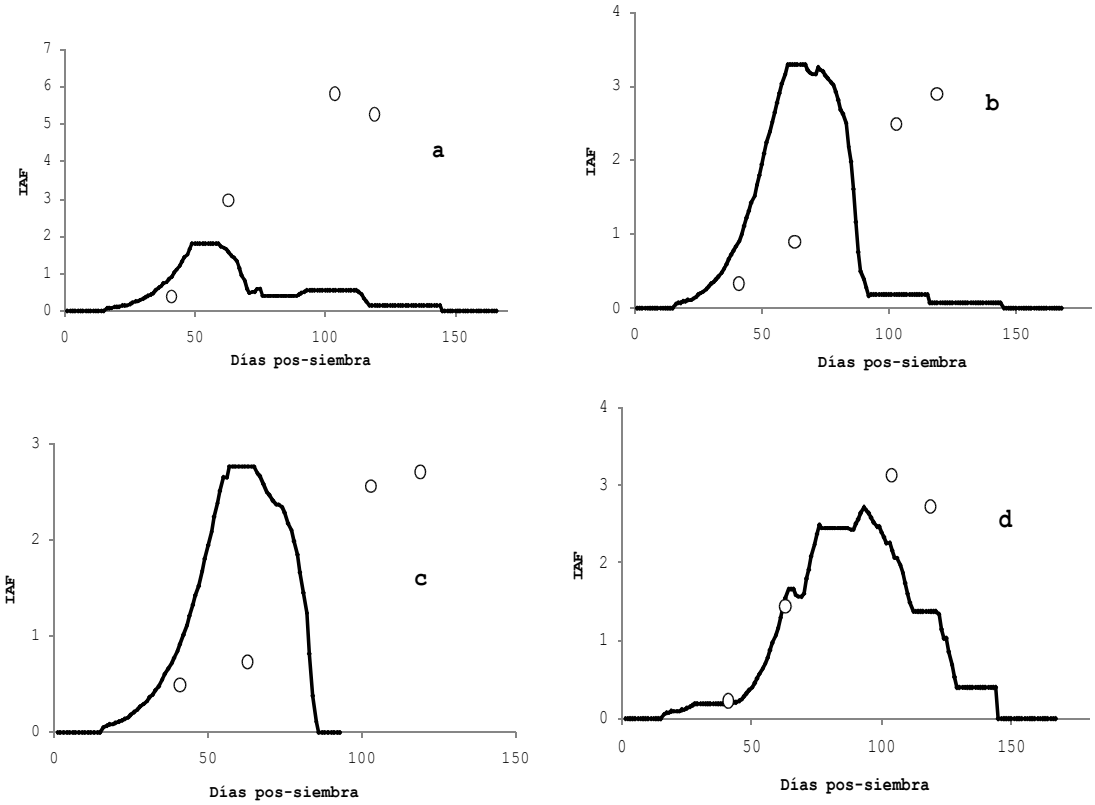


Figura No. : Evolución de IAF simulado (linea) y observado (puntos blancos) para grupos 1 (a), 2 (b), 3 (c) y 4 (d).

Las características del grupo 1 son particulares y como se comentó anteriormente será analizado en detalle en el capitulo 4.5, pero se resalta que en las etapas iniciales, mientras el agua no fue limitante el ajuste fue adecuado.

Los grupos 2 y 3 presentan las principales diferencias entre simulados y observados en etapas avanzadas del ciclo del cultivo ya que en ambas simulaciones la defoliación fue mas rápida y anticipada en el tiempo (figuras No. 21b y 21c). Esto podría interpretarse como una respuesta del modelo a la evolución de la condición hídrica de estos suelos que le permiten al cultivo un desarrollo foliar inicial incluso superior al observado que en definitiva agudiza las posteriores consecuencias del estrés provocado por el déficit hídrico registrado.

Finalmente CropSyst logró para el grupo 4 una buena representación de la realidad aunque con un valor máximo de IAFv algo inferior al observado que no afectó el resultado de la simulación del crecimiento del cultivo (figura No. 21).

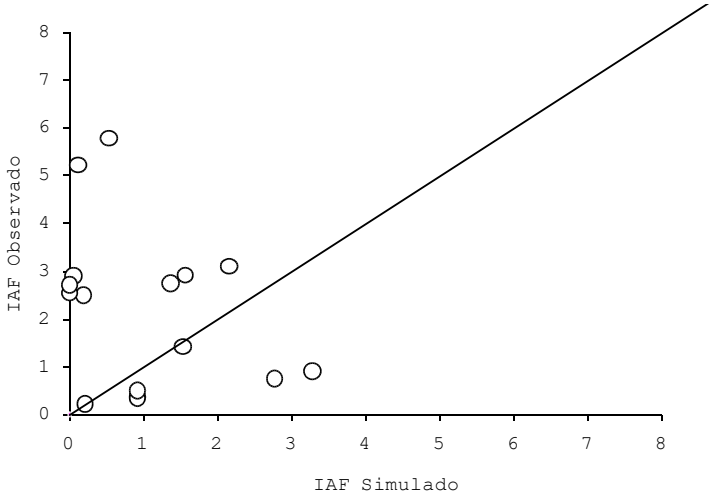


Figura No. : Lineal 1:1 entre valores simulados y observados de IAF.

Cuadro No. : Índice de área foliar simulado y observado promedio para los grupos usados en la validación. (no incluye el G1).

Fecha	Observado	Simulado	RCME	%RCME
10/01	0,35	0,68	0,42	121,1
1/02	1,02	2,54	1,82	178,3
12/03	2,72	0,79	2,06	75,7
28/03	2,77	0,48	2,38	86,0
Media Total	**1,71**	**1,12**	**1,83**	**106,8**

La cuantificación de las diferencias entre las estimaciones muestra que en líneas generales la performance de CropSyst para estimaciones de Índice área foliar no es satisfactoria (diferencias superiores a 70% de la media de todas las observaciones). Sin embargo estas imprecisiones no siempre limitan la estimación de acumulación de biomasa aérea ni la evolución del contenido de agua en el suelo ya que parte de estos errores se disimulan en intercepción de

radiación como el caso del grupo 4 (RRCME =16% para la variable intercepción de radiación) (figura No 23d).

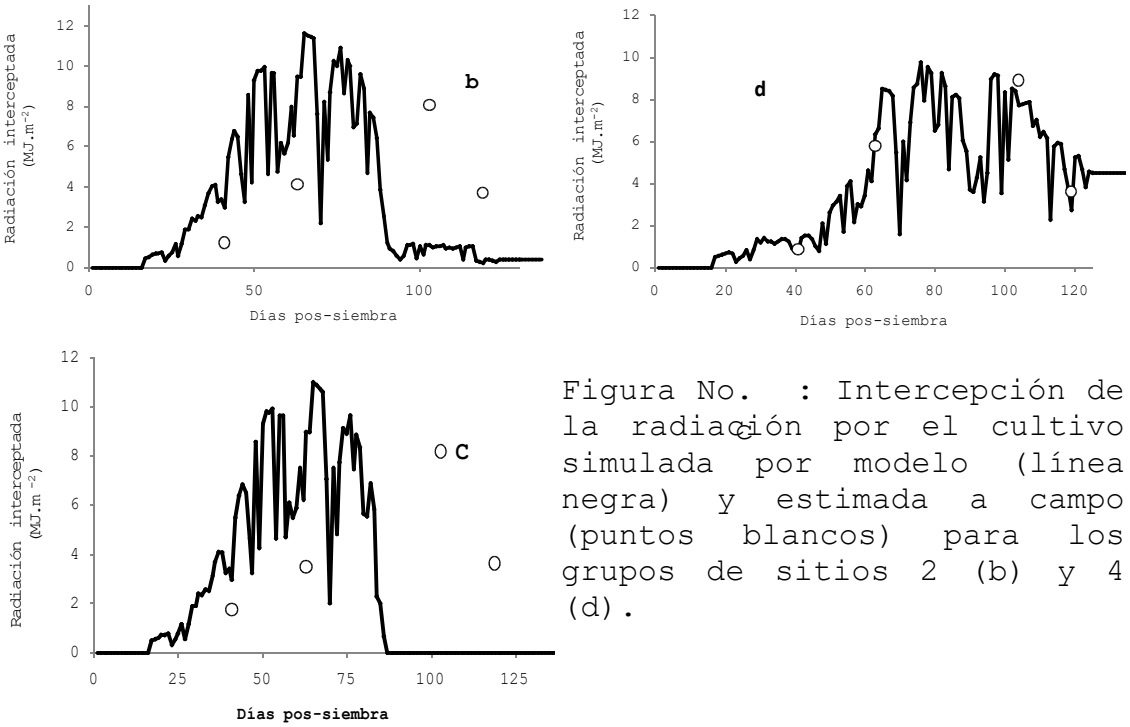
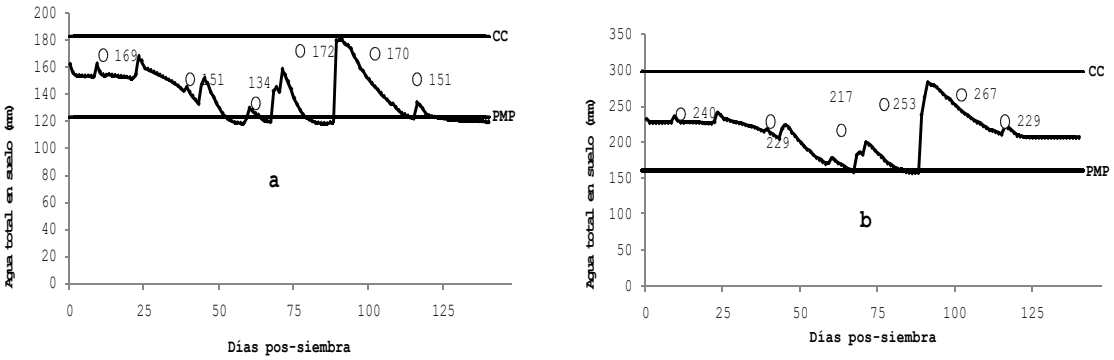


Figura No. : Intercepción de la radiación por el cultivo simulada por modelo (línea negra) y estimada a campo (puntos blancos) para los grupos de sitios 2 (b) y 4 (d).

4.4.4. Dinámica de agua en el suelo

En la figura siguiente se presentan las curvas de evolución del agua en el suelo a la profundidad máxima de muestreo.



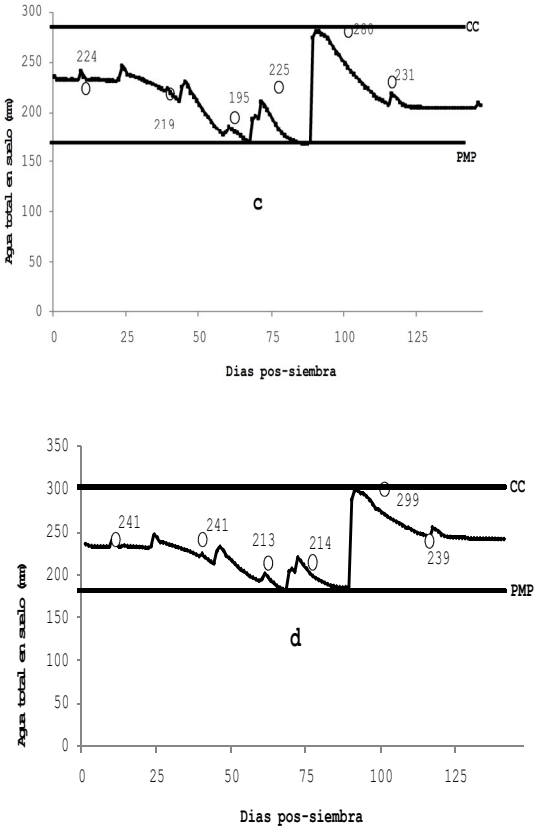


Figura No. : Evolución del contenido de agua en suelo simulado (línea negra) y observado (puntos blancos) para grupos 1 (a), 2 (b), 3 (c) y 4 (d).

A pesar de los errores en las simulaciones de biomasa e IAF, el contenido de agua total de suelo a la profundidad de muestreo fue adecuado a la realidad (Figura 23 y 24).

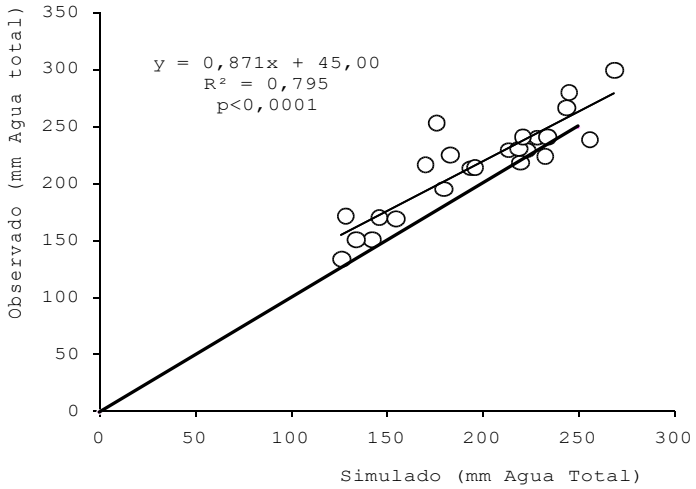


Figura No. : Lineal 1:1 entre contenido de agua total en suelo simulado y observado para tres de los grupos usados en la validación.

No existen indicios claros respecto a la razón por la cual a pesar de no existir adecuados ajustes en biomasa, que en definitiva es la que determina el consumo de agua, ésta logre un buen ajuste. Una alternativa es que el modelo sobreestime otros procesos involucrados en la dinámica del agua en el suelo como drenaje profundo y evaporación. La otra alternativa es que a la profundidad de muestreo el consumo este bien simulado y el crecimiento de radical supere esa profundidad y por tanto el mayor crecimiento de biomasa este dado por el consumo de agua en profundidad.

Cuadro No. : Contenido de agua en suelo, promedio para los grupos de la validación y simulados por CropSyst.

Fecha	Observado	Simulado	RCME	%RCME
12/12/07	218,5	212,4	9,6	4,4
10/01/08	209,9	198,9	14,8	7,0
1/02/08	189,8	167,4	30,7	16,2
16/2/08	216,1	170,8	51,8	24,0
12/03/08	254,2	225,9	30,0	11,8
28/03/08	212,4	208,0	12,5	5,9
Media Total	**216,8**	**197,2**	**28,9**	**13,3**

CropSyst mostró buena capacidad de predecir la evolución del contenido de agua en el suelo en líneas generales para los cuatro grupos de suelos y en las distintas etapas del ciclo del cultivo.

4.4.5. Rendimiento en grano

La representación del rendimiento en grano por el modelo no alcanzó el ajuste esperado ya que las diferencias entre valores simulados y observados superan el 30% de la media observada.

Cuadro No. : Rendimiento en grano e índice de cosecha simulados y observados en la validación.

Grupo	IC		Rendimiento		
	Simulado	Observado	Simulado	Observado	RCME
2	0.38	0.43	1869	2383	513.5
3	0.38	0.39	1341	2368	1026.9
4	0.38	0.32	2411	1890	521.4
Total	0.38	0.38	**1874**	**2213**	**728.1**
%RCME					**32.9**

El grupo 3 presenta el máximo desajuste explicado por la subestimación importante en la acumulación de biomasa aérea. Por otra parte los grupos 2 y 4 para los cuales CropSyst representó adecuadamente los valores máximos de biomasa aérea acumulada presentaron una alta variabilidad en los índices de cosecha observados que no fue copiada por el modelo que mantuvo en ambas situaciones índices de cosecha potenciales.

Finalmente es importante resaltar que los valores de RCME medios obtenidos en la validación para las diferentes variables son suficientemente altos como para afirmar que el modelo Cropsyst no resultó validado en las condiciones de este trabajo. Si bien se supone que las dificultades de carácter metodológico ya mencionadas sean la principal limitante, esto significa que la buena performance mostrada por el modelo en la calibración para estimar con precisión la acumulación de biomasa aérea, la dinámica del agua en el sistema y el rendimiento en grano no es extrapolable a otras condiciones de crecimiento del cultivo. Para

descartar que la calidad del conjunto de datos utilizados para la validación no sea la causa del mal comportamiento del modelo, es necesario realizar nuevos intentos de validación con otros datos. Si el problema se mantiene, deberán identificarse los problemas a nivel de la calibración realizada.

4.5. CONSUMO DE AGUA EN HORIZONTES CALCÁREOS

En la validación del modelo uno de los grupos de suelos obtuvo resultados diferentes al resto, con un perfil de 30-35cm de profundidad logró alta producción de biomasa aérea (10400KgMS.ha^{-1}) con un rendimiento en grano que superó los 4000Kg.ha^{-1}. Para lograr esta producción de biomasa el cultivo tuvo que transpirar 416mm de agua según la ecuación de Sinclair (1998):

$$\mathbf{B = T*(k/VPD)}$$

Dónde:
B: Biomasa acumulada
T: Agua transpirada, mm.
k: coeficiente de transpiración, KPa Kg/m^3.
VPD: Déficit de presión de vapor, Pa.

Las precipitaciones totales (438mm) de los cuales un 40% estuvo concentrado en dos días, más el agua disponible en suelo a siembra (45mm) superan la demanda estimada de transpiración. Pero a esto se debe descontar otras salidas no cuantificadas de agua del suelo. Si se considera la estimación que el modelo realiza de tales salidas, escurrimiento superficial (88mm), drenaje profundo (54mm), evaporación (167mm) por tanto la cantidad de agua útil que puede ser transpirada es de 174mm. Entonces para que realmente exista esa producción de biomasa el cultivo debe tomar agua de otra parte, por lo que se plantea la hipótesis de que las raíces penetren horizontes calcáreos en profundidad. En la Figura 26 se presenta la producción de biomasa simulada agregando espesor al horizonte profundo. Se definió una textura franco arcillo-limosa razonable para un horizonte BC de un suelo de estas

características (31% de arcilla, 19% de arena y 50% de limo).

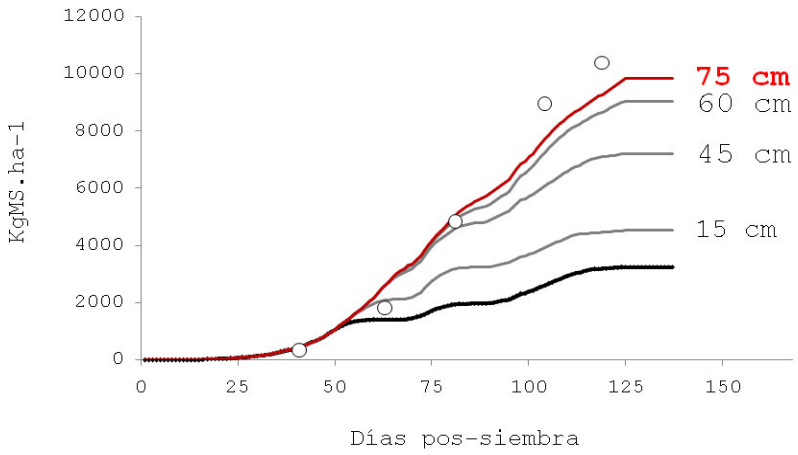


Figura No. 26: Aumento en la producción de biomasa aérea con el agregado de capas de suelo (líneas) frente a la producción observada para ese sitio (puntos blancos).

De acuerdo a los resultados de la simulación, sería necesaria una profundidad de 75 cm del horizonte más profundo, o sea una profundidad total del perfil de 120 cm, para alcanzar en la estimación del modelo niveles de acumulación de biomasa semejantes a los observados a campo. Esta hipótesis deberá ser corroborada con trabajos experimentales diseñados a tales efectos.

5. CONLUSIONES

- Los resultados de la acumulación de biomasa aérea simulados permiten afirmar que CropSyst presentó en las condiciones de la calibración buena capacidad de estimar el crecimiento a lo largo de todo el ciclo del cultivo de soja y por ende el rendimiento en grano.

- Si bien el desarrollo de área foliar no resultó bien representado en las condiciones de la calibración, el ajuste en la estimación de la radiación interceptada por el cultivo fue bueno, lo que explica el buen ajuste logrado para la estimación de la producción de biomasa del cultivo.

- Los resultados obtenidos en la calibración reflejan la capacidad del modelo de estimar con precisión la magnitud de los diferentes procesos involucrados en la dinámica del agua en el suelo.

- En la etapa de validación, la falta de información confiable generó incertidumbre en cuanto al origen de las diferencias entre estimaciones de campo y del modelo. En este marco resultó imposible discriminar los problemas metodológicos de las posibles debilidades del modelo en la representación de los diversos procesos involucrados en el crecimiento del cultivo.

- La falta de diversidad de escenarios en cuanto a fechas de siembra y clima (dependiente del año y lugar de evaluación) resultaron limitantes para una calibración y validación de mayor amplitud espacial y temporal.

- CropSyst requiere una importante cantidad de parámetros/ coeficientes específicos del cultivo y del cultivar, no explícitamente jerarquizados, lo cual dificulta la calibración del modelo ya que no se dispone de toda la información a nivel local, por lo tanto es importante continuar con el desarrollo de trabajos tendientes a conocer los coeficientes para las condiciones locales.

- Se considera que es necesaria realizar una nueva validación de la calibración realizada en este trabajo, con un conjunto de datos de mejor calidad, de manera de descartar a ésta como causa de la falta de ajuste cuantificada en ésta etapa

6. RESUMEN

En Uruguay hay poca experiencia en el uso de modelos de simulación de cultivos. La principal limitante para su utilización resulta la falta de información necesaria para calibrarlos y validarlos para las condiciones particulares de nuestro país. Con el objetivo de iniciar el proceso de validación y ajuste del modelo Cropsyst para el cultivo de soja, se instalaron ensayos en la EEMAC durante el verano 07/08. Se recolectó la información ambiental requerida como las condiciones climáticas, caracterización de suelos y del cultivar. En los experimentos instalados se realizaron las mediciones de variables de suelo y de cultivo para evaluar la capacidad predictiva del modelo en acumulación de biomasa aérea, desarrollo de área foliar, humedad en suelo y rendimiento en grano. Para la evaluación de los resultados se utilizó un método visual (gráficas de dispersión con línea 1:1) y se calculó la raíz cuadrada media del error. En la etapa de calibración se utilizó información de sitios con suelos de características similares y con buena disponibilidad de agua a la siembra

(barbecho largo) y se modificaron algunos coeficientes del cultivo (dentro de un rango determinado) hasta lograr el ajuste entre simulados y observados. Los resultados logrados para la calibración fueron aceptables para la acumulación de biomasa aérea y en evolución del contenido de agua en suelo con diferencias medias entre valores estimados a campo y por el modelo de 14,5% (RCME=750kg) y 10% (RCME=22mm) respectivamente. La validación se llevó a cabo sobre sitios con características de suelo diferentes. El ajuste alcanzado por CropSyst fue inferior al de la calibración para la biomasa y el rendimiento en grano aunque mantuvo una buena performance en la estimación de los distintos procesos de la rutina del agua en el suelo (13,3% de diferencia media entre valores simulados y observados de humedad del suelo). Los ajustes para las estimaciones de variables del cultivo resultaron inferiores a los esperados, por lo que el modelo no se puede considerar validado en las condiciones de este trabajo.

Palabras clave: CropSyst; Modelo de simulación; Soja; Calibración; Validación; Biomasa aérea; RCME (raíz cuadrada media del error).

7. SUMMARY

There is little experience in Uruguay with the use of crop simulation models. Indeed, the major limitation for their use is the lack of necessary calibration and validation information for our country's unique conditions. In order to start the validation and adjustment process of the CropSyst model for soybean crops, some trials were set up in the Paysandú University (EEMAC) during the summer 2007-2008. The required environmental information was collected, such as weather conditions, and soil and crop characterization. Measurements of soil and crop variables were carried out in the trials set up, in order to assess the predictive capacity of the model in the accumulation of aboveground biomass, development of foliar surface, soil moisture and grain yield. For the assessment of outcomes, a visual approach was used (leakage charts with 1:1 line) and the root-mean-square error was calculated. In the calibration stage, information of sites with similar characteristics soils was used, as well as soils with good

seeding water availability (long fallow), and some crop coefficients (within a specific range) were changed until the adjustment between simulated and observed values was achieved. The outcomes achieved for the calibration were acceptable for the aboveground biomass accumulation and for the evolution of the water content on the soil, with mean differences between estimated field values and by the 14.5% (RCME=750kg) and 10% (RCME=22mm) models, respectively. The validation was carried out on sites with different soil characteristics. The adjustment achieved by CropSyst was lower than the calibration for the biomass and the grain yield, though it kept a good performance in the estimation of the different processes of the water routine in the soil (mean difference of 13.3% between simulated and observed values of soil moisture). Adjustments for the estimations of crop variables were lower than expected; therefore, we cannot consider the model as validated in this work's conditions.

Key words: CropSyst; Simulation model; Soybean; Calibration; Validation; Aboveground biomass; RCME (root-mean-square error).

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ANDRADE, F. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean growth at Balcarse. Field Crops Research 41: 1-12.

2. _____.; 2000. Producción potencial y demanda futura de alimentos agrícolas. In: Andrade, F.; Sadras, V. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Balcarce, INTA Balcarse/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 9-25.

3. _____.; AGUIRREZÁBAL, L.A.; RIZZALLI, R. 2002. Crecimiento y rendimiento comparados In: Andrade, F.; Sadras, V. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Balcarce, INTA Balcarse/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 61-96.

4. BOUYOUCOS, G.S. 1936. Directions for making mechanical analysis of soil by hydrometer method. Soil Science. 4: 225-228.

5. CAMPBELL, G.S.; DIAZ, R. 1988. Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. In: Bidinger, F. R.; Johnson, C. eds. Drought research priorities for the dryland tropics. Patancheru, India, ICRISAT. 181 p.

6. CERETTA, S. 2006. Evaluación nacional de cultivares de soja evaluados en la zafra 2005/2006. Montevideo, INIA/INASE. s.p.

7. FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. 1977. Stages of soybean development. Special Report (Iowa State University). 80: 12 p.

8. GARDENR, F.; PEARCE, R.; MITCHEL, R. 1985. Physiology of crop plants. Ames, Iowa State University. 327 p.

9. GODWIN, D. C.; JONES, A. C. 1991. Nitrogen dynamics in soil-plant systems. In: Hanks, J.; Ritchie, J.T. eds. Modeling plant and soil systems. Madison, WI, American Society of Agronomy. pp. 297-302.

10. HESKETH, L.D.; MYHRE, D.L.; WILLEY, C.R. 1973. Temperature control of time intervals between vegetative and reproductive events in soybeans. Crop Science. 13: 250-254.

11. JONES, J.W.; TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; HUNT, L.A.; THORNTON, P.K.; WILKENS, P.W.; IMAMURA, D.T.; BOWEN, W.T.; SINGH, U. 1998. Decision support system for agrotechnology transfer DSSAT v3. In: Tsuji, G.Y.; Hoogenboom, G.; Thornton, P.K. eds. Understanding options for agricultural production. Dordrecht, Kluwer. pp. 157-177.

12. _____.; KEATING, B.A.; PORTER, C.H.; 2001. Approaches to modular model development. Agricultural System. 70: 421-443.

13. KANTOLIC. A.; GIMENEZ, P.; de la FUENTE, E. 2003a. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. In: Pascale, A. ed. Producción de granos. Bases fisiológicas para su manejo. s.l., Facultad de Agronomía. pp. 165-201.

14. _____.; SLAFER, G. 2003b. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja; número de granos en soja y la sensibilidad al fotoperíodo en etapas reproductivas. In: Pascale, A. ed. Producción de granos. Bases fisiológicas para su manejo. s.l., Facultad de Agronomía. pp. 186-187.

15. MONTEITH, J. 1965. Climate and the efficiency of crop production in britain. Phisiology Transpiration Research Society. 281: 277-329.

16. NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L.; Miller R.H.; Keeny D.R. eds. Methods of soil analysis. Madison, Wiscosin, American Society of Agronomy. pt. 2, pp. 539-579

17. PRIESTLEY, C.; TAYLOR, R. J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Monthly Weather Review. 100: 81-92.

18. RITCHE, S. W.; HANWAY, J.; THOMPSON, H.; BENSON, G. 2002. Como se desarrolla una planta de soja. University of Science and Technology. Reporte especial no. 53. 21 p.

19. SADRAS, V.O.; FERREIRO, M.; GUTHEIM, F.; KANTOLIC, A. 2002. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. In: Andrade, F.; Sadras, V. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Balcarse, INTA Balcarse/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 29-60.

20. SAXTON, K.E.; RAWLS, W.J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil Science Society. American Journal. 70: 1569-1578.

21. SHANMUGASUNDARAM, S.; TSOU, S.C.S.; 1978. Photoperiod and critical duration for flower induction in soybean. Crop Science. 18: 598-601.

22. SINCLAIR, T. R. 1999. Limits to crop yield. In: Colloquium on Plants and Populations; is there time? (1998, Irvine). Proceedings. Washington DC, National Academy of Science. s.p.

23. STÖCKLE C.O.; JARA, J.; 1998. Modeling transpiration and soil water content from a corn field: 20 min vs. daytime integration step. Agriculture Forecast Meteorology. 92: 119-130.

24. _____.; NELSON, R. 1999. Cropping systems simulation model, user's manual. Washington, D. C., Washington State University. Biological Systems Engineering Department. 235 p.

25. _____.; DONATELLI, M.; NELSON, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. European Journal of Agronomy. 18: 289-307.

26. TANNER, C. B.; SINCLAIR, T. R. 1983. Efficient water use in crop production; research or research? In: Limitations to efficient water use in crop production. Madison, Wiscosin, American Society of Agronomy. pp 1-27.

27. VILLALOBOS-RODRÍGUEZ, E.; SHIBLES, R. 1989. Response of determinate and indeterminate tropical soybean cultivars to water stress. Field Crops Research. 10: 269-281.

28. WILLIAMS, J.R.; JONES, C.A.; DYKE, P.T. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 27 (1): 129-144.

9. ANEXOS

Anexo No.1: Características de suelos de todos los sitos del ensayo 1 y 2.

Sitio	Prof.	Textura			% MO	Dap.
		Limo	Arcilla	Arena		
122	0-5	52,4	23,2	24,4	s/d	1,29
122	5-10	59,2	17,4	23,4	s/d	1,29
122	10-20	55,2	23,2	21,7	s/d	1,19
122	20-30	43,0	38,5	18,5	s/d	1,18
122	30-50	38,0	47,8	14,1	s/d	1,19
122	50-70	40,5	43,2	16,3	s/d	1,15
122	70-104	60,1	21,7	18,2	s/d	1,24
123	0-5	54,6	22,1	23,3	s/d	1,00
123	5-10	57,8	19,8	22,5	s/d	1,20
123	10-20	34,0	44,2	21,8	s/d	1,26
123	20-30	52,2	30,5	17,3	s/d	1,14
123	30-50	38,0	47,8	14,1	s/d	1,14
123	50-70	39,6	45,1	15,3	s/d	1,14
123	70-100	60,1	21,7	18,2	s/d	1,14
141	0-5	54,6	22,1	23,3	5,6	1,01
141	5-10	61,6	18,3	20,2	4,1	1,18
141	10-20	59,4	20,3	20,4	3,8	1,26
141	20-30	67,4	16,7	15,9	3,7	1,15
141	30-50	70,5	18,0	11,5	3,0	1,13
141	50-70	45,2	36,4	18,4	1,4	1,19
141	70-105	60,1	21,7	18,2	0,9	1,19
142	0-5	71,3	18,3	10,5	6,1	0,83
142	5-10	69,2	18,5	12,3	5,2	1,23
142	10-20	66,7	20,1	13,2	4,2	1,03
142	20-30	65,7	23,2	11,1	3,8	1,16
142	30-50	73,4	19,6	7,1	2,6	1,06
142	50-70	54,9	36,7	8,4	1,5	1,27
142	70-104	50,8	37,6	11,6	1,3	1,27
143	0-5	54,6	22,1	23,3	5,3	0,92
143	5-10	62,6	18,5	19,0	3,7	1,23
143	10-20	64,8	16,1	19,1	3,5	1,14
143	20-30	64,0	19,0	17,1	3,3	1,09
143	30-50	66,5	20,8	12,7	2,2	1,07
143	50-70	50,2	38,0	11,8	1,5	1,10
143	70-108	50,4	35,8	13,8	1,0	1,10
222	0-5	53,8	18,0	28,2	s/d	1,02
222	5-10	43,5	15,0	28,5	s/d	1,26
222	10-20	56,8	16,3	26,9	s/d	1,20
222	20-30	41,9	41,4	16,7	s/d	1,12
222	30-50	39,4	42,4	18,2	s/d	1,17
222	50-70	43,3	41,0	15,7	s/d	1,27
222	70-102	49,7	30,9	19,5	s/d	1,27
233	0-5	37,85	38,15	24	s/d	1,01
233	5-10	52,45	18,61	24,3	s/d	1,10
233	10-20	49,2	31	19,8	s/d	1,39
233	20-30	56,71	28,61	14,68	s/d	1,47
233	30-50	60,06	20,02	19,92	s/d	1,12
233	50-76	54,49	28,61	16,9	s/d	0,97
312	0-5	52,74	22,13	25,13	s/d	s/d
312	5-10	56,35	17,47	26,18	s/d	s/d
312	10-20	53,43	22,71	23,86	s/d	s/d
312	20-30	42,18	43,85	13,97	s/d	s/d
312	30-50	39,49	45,39	15,12	s/d	s/d
312	50-70	43,29	41	15,71	s/d	s/d
312	70-101	58,18	24,3	17,52	s/d	s/d
311	0-5	60,7	15,1	24,2	5,2	1,16