

EL MODELO DE SIMULACIÓN CERES COMO HERRAMIENTA EN EL DIAGNÓSTICO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN TRIGO *

Fernando Salvagiotti¹, Julio Castellarín¹, Hugo Pedrol¹ y Emilio Satorre²
(1) EEA INTA Oliveros, (2) Facultad de Agronomía (UBA)
fsalvagiotti@cosolnet.com.ar

Los modelos de simulación en el planteo de fertilización de los cultivos

El rendimiento de trigo es la resultante de las interacciones que existen entre el cultivar, el ambiente edáfico, las variables climáticas y su manejo. Por ello su predicción, aún bajo condiciones de tecnología semejantes, resulta una tarea dificultosa. Dos aspectos son generalmente considerados al definir una estrategia de fertilización nitrogenada del cultivo:

- El rendimiento objetivo, ya que la necesidad de nitrógeno (N) aumenta en la medida que estos se incrementan.
- La respuesta al agregado de fertilizante, ya que es otro aspecto que, en conjunto con el rendimiento contribuye a definir el resultado económico de la fertilización y debe ser evaluada durante la planificación del cultivo.

La predicción del comportamiento de estas variables frente a distintas condiciones de suelo, clima, manejo o variedad está también sujeta a interacciones complejas, por lo que ha sido recientemente abordada a través de herramientas de simulación.

Los modelos de simulación agronómica son herramientas que integran información, y que permiten analizar y cuantificar las relaciones existentes entre los factores mencionados y sus efectos como componentes del sistema, permitiendo evaluar diferentes planteos productivos, o analizar un factor manteniendo los otros constantes, por ejemplo la variación del rendimiento por efecto del clima sin modificar el manejo, el genotipo y el suelo. Numerosos modelos han sido desarrollados por diferentes grupos de trabajo y cada uno de ellos tiene fortalezas y debilidades para predecir las variables de respuesta. Es por ello necesario validar los modelos en los ambientes en donde se los utilizará.

Los modelos de la familia CERES que están incluidos dentro del paquete DSSAT (**D**ecision **S**upport **S**ystem for **A**gro**t**echnology **T**ransfer) simulan el comportamiento de cereales, y han probado su aptitud para ser utilizados en regiones de la Argentina en cultivos como maíz (Mercau et al., 2001) o cebada (Travasso y Magrin, 1998). El modelo CERES trigo, que simula el cultivo de trigo, ha sido validado en nuestro país en condiciones experimentales (Magrin y Rebella, 1991) y de producción en el Norte de Buenos Aires (Calderini et al., 1994), SE de la provincia de Córdoba (Ruiz et al., 1998) y SO de la provincia de Buenos Aires (Satorre y Menéndez, 2001).

El riesgo y la planificación de la fertilización nitrogenada

Un componente que puede formar parte del costo de producción de un cultivo cuando se evalúa la inclusión de una tecnología, es el *riesgo empresarial*, que puede definirse como la probabilidad de lograr el éxito o el fracaso e indica hasta que punto se pone en juego la inversión. Generalmente se lo cuantifica como un porcentaje del costo real del cultivo, sujeto al juicio del empresario. Las aplicaciones de insecticidas o herbicidas, son consideradas tecnologías de bajo riesgo, ya que aplicadas según las recomendaciones de uso, las probabilidades de éxito son altas, al ser pocos los

elementos del sistema que están involucrados. La fertilización de los cultivos, presenta mayor riesgo, porque para lograr los rendimientos esperados entran en juego una mayor diversidad de componentes del sistema suelo – planta que interactúan entre sí y que son regulados por las variaciones climáticas anuales. Como la respuesta a la aplicación de nitrógeno es dependiente de las características edáficas de cada lote, el efecto del clima y la eficiencia de cada genotipo, los modelos de simulación pueden utilizarse como herramientas para cuantificar la probabilidad de ocurrencia de rendimiento y entonces evaluar el riesgo asociado a distintas alternativas de manejo de la fertilización nitrogenada.

El rendimiento promedio puede definirse como aquel que es superado en al menos el 50% de los años de una serie climática, por lo tanto en un 50% de los años los rendimientos también pueden ser inferiores al promedio. Si se quiere tomar un riesgo bajo, la tecnología debería permitir establecer objetivos de rendimiento que estén por debajo de esta probabilidad, por ejemplo rendimientos que se den en al menos el 60% u 80% de los años de una serie climática. Si se quieren obtener rendimientos superiores a la probabilidad promedio, el riesgo empresario aumenta y disminuye la probabilidad de éxito.

Con la finalidad de incorporar las interacciones determinantes del resultado del cultivo a campo y la evaluación del riesgo a la planificación de la fertilización nitrogenada de trigo, se llevó a cabo el presente trabajo cuyos objetivos fueron:

- a) Validar las predicciones de rendimiento del modelo CERES - Trigo en sistemas de producción del cultivo de trigo en el centro - sur de Santa Fe.
- b) Desarrollar, a partir de las predicciones del modelo, herramientas para el diagnóstico de la fertilización nitrogenada y análisis de riesgo en diferentes escenarios de producción.

Materiales y Métodos

a) Validación del modelo

Para la validación del modelo se seleccionaron lotes de producción de trigo en los departamentos Iriondo, San Lorenzo y Caseros (entre 33° 20' y 32° 20' Lat. S y 61° 30' y 60° 45' Long. O). Se analizaron 62 situaciones de cultivo sembradas, en todos los casos, con la variedad Klein Cacique y con antecesor soja, manejadas con diferentes niveles de fertilidad nitrogenada durante tres años, sobre suelos representativos del área (Tabla 1).

Tabla 1. Características de los lotes utilizados para la validación del modelo CERES – Trigo en el Centro – Sur de Santa Fe.

Lote	Tipo y Serie de suelo	Fecha de siembra	Niveles de N	Campaña
1	Argiudol típico - Serie Chabás	7/6	2	1996/97
2	Argiudol típico - Serie Casilda	7/6	2	1997/98
3	Argiudol típico - Serie Casilda	24/5	2	1997/98
4	Argiudol típico -Serie Hansen	26/6	2	1997/98
5	Argiudol ácuico - Serie Oliveros	28/5	3	1997/98
6	Argiudol ácuico - Serie Oliveros	28/5	3	1997/98
7	Argiudol vértico - Serie Peyrano	25/6	3	1996/97
8	Argiudol vértico - Serie Roldan	15/5	3	1996/97
9	Argiudol vértico - Serie Roldan	16/5	3	1996/97
10	Argiudol vértico - Serie Roldan	14/6	3	1996/97
11	Argiudol vértico - Serie Peyrano	30/5	2	1997/98

12	Argiudol vértico - Serie Roldan	11/6	4	1997/98
13	Argiudol vértico - Serie Roldan	1/7	4	1997/98
14	Argiudol típico - Serie Classon	29/5	4	1996/97
15	Argiudol típico - Serie Chabás	10/6	2	1998/99
16	Argiudol típico - Serie Casilda	23/5	2	1998/99
17	Argiudol típico - Serie Chabás	24/6	2	1998/99
18	Argiudol típico - Serie Chabás	10/6	2	1998/99
19	Argiudol vértico - Serie Roldan	18/6	4	1998/99
20	Argiudol vértico - Serie Roldan	13/6	3	1998/99
21	Argiudol vértico - Serie Roldan	22/6	4	1998/99
22	Argiudol ácuico - Serie Oliveros	9/6	3	1998/99

Para la validación se utilizó la versión del modelo CERES – Trigo incluida en el paquete DSSAT 3.5. La información de las diferentes series de suelos fueron obtenidas a partir de las cartas de suelos de INTA y los datos climáticos de temperatura y radiación provistos por las estaciones agrometeorológicas de la EEA Oliveros INTA y la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNR en Zavalla. Los datos de precipitaciones fueron las registradas en el lugar más cercano al lote evaluado.

Las simulaciones del modelo se contrastaron con la información proveniente de los lotes. Se evaluó la bondad del ajuste a través del r^2 y el RMSE (cuadrado medio del error residual).

b) Utilización del modelo CERES para diagnóstico de la fertilización nitrogenada y análisis de riesgo.

El comportamiento de los cultivos en cada ambiente frente a distintos niveles de nitrógeno fue simulado. El impacto de la fertilización nitrogenada se analizó en dos escenarios de producción ubicados en el área de trabajo (Tabla 2). Se evaluaron a través de simulación 5 niveles de agregado de N al suelo (0, 30, 60, 90 y 120 kg de N por hectárea) aplicado a la siembra en forma de urea

Tabla 2. Características de los escenarios de producción simulados con el modelo CERES – Trigo, en el Centro-Sur de Santa Fe.

	Escenario I	Escenario II
Serie climática	Oliveros (1962-2001)	Zavalla (1975 – 2001)
Tipo y serie de suelo	Argiudol típico Serie Maciel	Argiudol vértico Serie Roldán
Cultivo antecesor	Soja 1 ^a	
Cultivar	Klein Cacique	
Fecha de siembra	10/6	
Materia orgánica y Nitrógeno Orgánico	2.36%, 0.12%	2.75%, 0.13%
Contenido hídrico a la siembra	Capacidad de Campo	
Contenido de nitrógeno a la siembra	15 kg de N ha ⁻¹	

RESULTADOS

a) Validación del modelo

Se observó una estrecha relación entre los valores relevados a campo y los simulados por el modelo CERES – Wheat en un amplio rango de condiciones ambientales (Figura 1). El 94% de la variación de los rendimientos observados fueron explicados por el modelo, poniendo en evidencia la escasa dispersión de los puntos alrededor de la relación 1:1 de ajuste óptimo.

El RMSE del ajuste fue de 240 kg ha^{-1} , y el error medio ((rendimiento simulado – rendimiento observado) / rendimiento observado), fue de apenas 8%. Sin embargo, el modelo tendió a subestimar los rendimientos cuando los mismos fueron superiores a 4000 kg ha^{-1} .

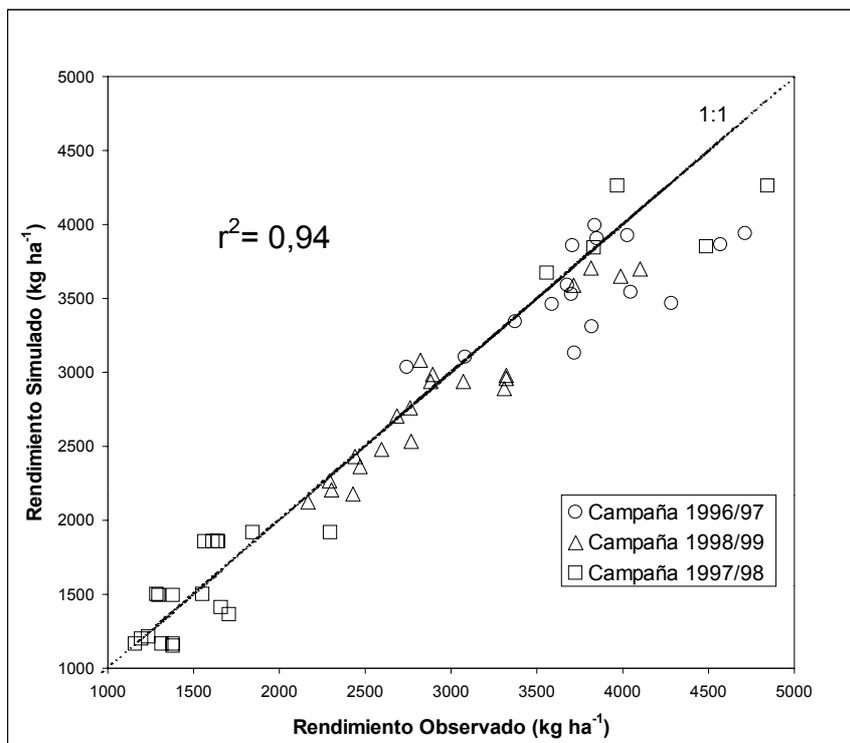


Figura 1. Validación CERES - Trigo en sistemas agrícolas del sur de Santa Fe. Relación entre rendimientos observados y simulados. La línea de puntos representa la relación 1:1.

b) *Análisis de riesgo de la fertilización nitrogenada*

Las simulaciones del comportamiento de los cultivos en cada escenario climático frente a distintos manejos de fertilización pusieron en evidencia la respuesta del cultivo a esta tecnología. La simulación sugirió que en el escenario I (Tabla 2, Fig 2), si no se fertilizara el cultivo, el rendimiento promedio sería de 2450 kg ha^{-1} . Sin embargo, para el mismo nivel de probabilidad (50%) los rendimientos se elevarían a 3300, 3900, 4250 y 4.450 kg ha^{-1} , para el agregado de niveles de 30, 60, 90 y $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$, respectivamente. Además este análisis permite observar que, si el contenido inicial de nitrógeno del suelo fuera de sólo $15 \text{ kg de N ha}^{-1}$, la probabilidad de llegar a una meta de rendimiento de 4000 kg ha^{-1} sería baja, menor al 8% de los años cuando sólo se aplican $30 \text{ kg de N ha}^{-1}$. Sin embargo, al duplicar la cantidad de fertilizante, el riesgo disminuye y la probabilidad de lograr esa meta aumenta, ya que ésta sería del 40%.

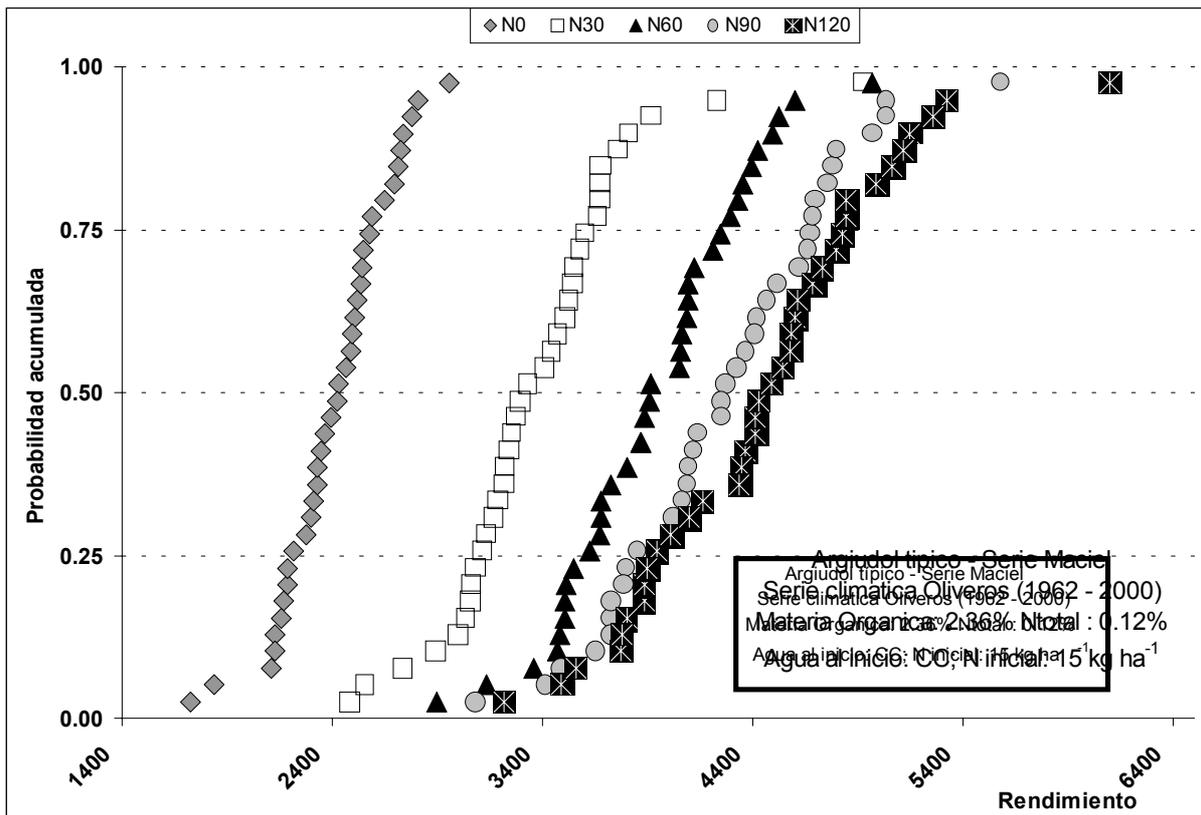


Figura 2. Probabilidade acumulada de ocorrência de rendimento de trigo com diferentes níveis de fertilização nitrogenada a la siembra en el Escenario I. (Oliveros, 1962-2000)

Asimismo, los resultados obtenidos muestran que en las condiciones simuladas (nitrógeno inicial en el suelo equivalente a $15 \text{ kg de N ha}^{-1}$), aplicaciones de más de $90 \text{ kg de N por ha}$, no producirían incrementos importantes en el rendimiento (Figura 2).

En el escenario II (Tabla 2, Fig 3), distante a 70 km de la estación climática de Oliveros, sin el uso de fertilizantes el rendimiento más probable (50% de probabilidad) fue 2033 kg ha^{-1} . Con la aplicación de $30 \text{ kg de N ha}^{-1}$, el rendimiento alcanzó a 3000 kg ha^{-1} y con $60 \text{ kg de N ha}^{-1}$ se podría obtener entre 3500 y 4000 kg ha^{-1} de grano en el 50% de las situaciones simuladas con el modelo. Es importante destacar que el modelo puso en evidencia que el cultivo de trigo en el Escenario II presenta mayor respuesta a la fertilización nitrogenada en comparación con el Escenario I.

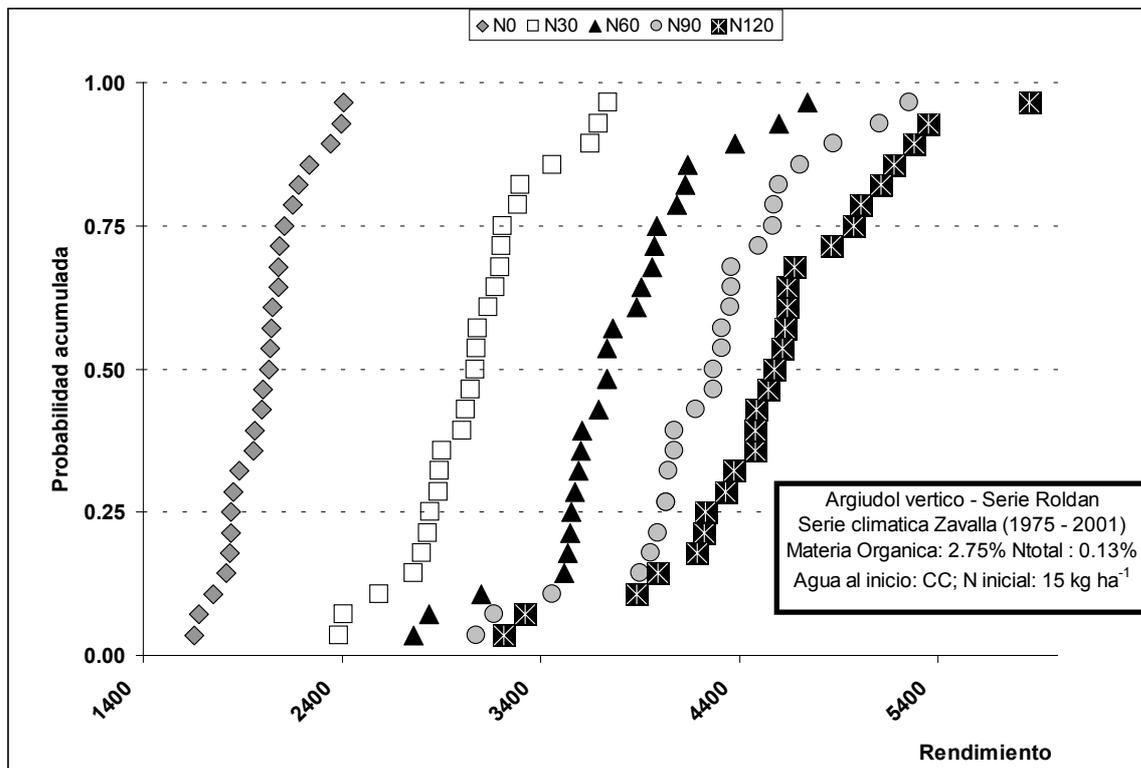


Figura 3. Probabilidad acumulada de ocurrencia de rendimiento de trigo con diferentes niveles de fertilización nitrogenada a la siembra en el Escenario II (Zavalla, 1975-2001).

CONCLUSIONES

La robusta relación encontrada entre los rendimientos observados de los lotes de producción bajo las condiciones edafoclimáticas del Centro – Sur de Santa Fe y los rendimientos simulados por el modelo CERES Trigo, permite que su aplicación para explorar las complejas interacciones entre variables de suelo, clima y manejo a las que está sometido el cultivo en la región sea considerada. De este modo, la aplicación del modelo al desarrollo de herramientas de diagnóstico y manejo de la fertilización nitrogenada del cultivo de trigo resulta confiable. En este sentido, el análisis del rendimiento del cultivo frente a distintos niveles de oferta de nitrógeno resultó de utilidad para conocer la probabilidad de alcanzar determinados resultados de producción.

Utilizado en forma conjunta con otros instrumentos de decisión o metodologías de diagnóstico, donde sea necesaria la estimación del rendimiento objetivo, el análisis realizado permite incluir y cuantificar el riesgo, o la probabilidad de lograr la meta de rendimiento según el nivel de fertilización nitrogenada sobre suelos con bajos contenidos de nitrógeno inicial, en diferentes sistemas productivos de la región.

De este modo, es posible incorporar efectivamente elementos al proceso de toma de decisión del asesor o productor que contribuyen a aumentar la eficiencia en el uso del fertilizante nitrogenado.

AGRADECIMIENTOS

Parte de la información utilizada para la validación del modelo fue originada en los ensayos conducidos en campo de productores por los Ings. Agrs. Fernando Martínez, Graciela Cordone, Adrián Gargicevich y Oscar Gentili (AER Casilda); Ing. Agr. Juan Carlos Felizia (AER Roldan) y el Ing. Agr. José Méndez (AER Totoras)

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Calderini, D., Maddoni, G., Miralles, D., Ruiz, R. y Satorre, E. 1994. Validación del modelo CERES – Wheat para producciones extensivas de trigo en diferentes situaciones de fertilidad del norte de la provincia de Buenos Aires. Actas III Congreso Nacional de Trigo, 81-82.
- ✓ Magrin, G. y Rebella C. 1991. Informe de estado de avance. Proyecto Previsión de Cosecha de Cereales y Oleaginosas. Convenio INTA-JNG. 13 pp.
- ✓ Mercáu, J. L.; Satorre, E. H.; Otegui, M. E.; Maddoni, G.; Cárcova, J.; Ruiz, R. A.; Uribe Larrea, M. A. y Menéndez, F. J. 2001. Evaluación a campo del comportamiento del modelo CERES en cultivos de maíz del norte de la provincia de Buenos Aires. Actas VII Congreso Nacional de Maíz. Pergamino. Argentina.
- ✓ Ruiz, R., Satorre, E., Calderini, D. y Miralles, D. 1998. Simulación del comportamiento del cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) del sur de Córdoba, usando el modelo CERES-Wheat. Actas IV Congreso Nacional de Trigo, 3-54.
- ✓ Satorre, E. y Menéndez, F. 2001. Usando el modelo CERES – Trigo para evaluar la respuesta del cultivo a la disponibilidad de nitrógeno, el cultivo antecesor y la profundidad del suelo en el sudoeste pampeano. Actas IV Congreso Nacional de Trigo. Córdoba. Argentina.
- ✓ Travasso, M. I. y Magrin G. O. 1998. Utility of CERES – Barley under Argentine conditions. *Field Crops Research* 57: 329 – 333.