

EVALUACIÓN DE WOFOST PARA LA PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ BAJO CONDICIONES POTENCIALES, LIMITADO POR AGUA Y RIEGO SUPLEMENTARIO EN LA REGIÓN LITORAL ESTE

Autores: Pistón, B; De Wit, A.; Maltese, N; Gaso, D.

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Colonia del Sacramento, Colonia, Uruguay, dgaso@inia.org.uy; nmaltese@inia.org.uy.

Facultad de Agronomía (Universidad de la República), Ciudad del Plata, San José, Uruguay, brunopiston@hotmail.com.

EVALUATING WOFOST FOR MAIZE YIELD PREDICTION ACROSS POTENTIAL, WATER-LIMITED, AND DEFICIT-IRRIGATION CONDITIONS IN THE EASTERN PAMPAS

Abstract

Maize (*Zea mays* L.) is a relevant crop for the sustainability of agricultural systems in South America; however, its productivity is strongly influenced by the variability in water availability. Simulation models, such as World Food Studies (WOFOST), integrate soil, climate, and management variables, and are therefore key tools for evaluating the stability of agricultural production systems under climate variability. The objective of this study was to evaluate the WOFOST model for predicting maize growth and yield under potential production, rainfed, and supplementary irrigation conditions, using experimental data from Uruguay and Argentina. The results indicate that the model adequately reproduces the observed variability in yield and biomass under the different conditions evaluated. This work confirms that WOFOST is a tool with great potential to support agricultural planning and resource management.

Resumen

El maíz (*Zea mays* L.) es un cultivo relevante para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas en América del Sur, sin embargo, su productividad está fuertemente influenciada por la variabilidad en la disponibilidad hídrica. Los modelos de simulación, como World Food Studies (WOFOST), integran variables de suelo, clima y manejo, y por lo tanto, resultan herramientas clave para evaluar la estabilidad de los sistemas de producción agrícola frente a la variabilidad climática. El objetivo de este estudio fue evaluar el modelo WOFOST para predecir el crecimiento y rendimiento de maíz en condiciones de producción potencial, secano y riego suplementario utilizando datos experimentales de Uruguay y Argentina. Los resultados indican que el modelo reproduce adecuadamente la variabilidad observada en rendimiento y biomasa bajo las distintas condiciones evaluadas. Este trabajo confirma que WOFOST es una herramienta de gran potencial para apoyar la planificación agrícola y la gestión de recursos.

Palabras clave / Keywords: Maíz, Wofost, Yield prediction, Crop simulation models.

1. Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, desempeñando un papel central en la alimentación humana, la producción ganadera y diversas cadenas de valor industrial (FAO, 2025). Se proyecta que para 2050 la demanda de alimentos aumentará significativamente, lo cual incrementaría la presión sobre los sistemas agrícolas para optimizar la producción por unidad de área. En la región del litoral este (Entre Ríos y Uruguay), la producción de maíz se desarrolla predominantemente bajo condiciones de secano, lo que expone al cultivo a la alta variabilidad interanual e intra-anual de las precipitaciones. Si bien la precipitación anual en la región ronda los 1000-1300 mm (Instituto Uruguayo de Meteorología [INUMET], 2024; Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2026), su distribución frecuentemente no coincide con la demanda hídrica del cultivo. Otras variables como suelos con erosión y baja capacidad de retención de agua incrementan el riesgo de estrés hídrico, afectando el rendimiento del cultivo. La expansión del riego es una alternativa clave para estabilizar y aumentar los rendimientos. Sin embargo, su gestión eficiente requiere de este tipo de tecnologías, que integran factores ambientales, de suelo y manejo para estimar la producción y los requerimientos hídricos (de Wit et al., 2019). Aunque este modelo se ha evaluado en diversos sistemas agrícolas (Dlamini et al., 2025, Guodong et al., 2025), aún es indispensable hacerlo para las condiciones locales específicas de la región litoral este para su aplicación confiable.

El objetivo de este estudio fue evaluar el modelo WOFOST para predecir el rendimiento y la biomasa aérea del maíz bajo condiciones de producción potencial, riego deficitario y secano en Uruguay. De esta manera, se busca proporcionar una base sólida para utilizar el modelo como herramienta estratégica en la estimación de producción del cultivo de maíz en la región teniendo en cuenta las variables utilizadas por el mismo.

2. Materiales y Métodos

2.1. Región de estudio

Se utilizaron datos de Uruguay y Entre Ríos para parametrizar y evaluar el modelo WOFOST (versión 73) bajo tres escenarios: producción potencial (sin limitación hídrica), secano (aporte de agua exclusivo por precipitación mediante un balance hídrico de una capa) y riego deficitario (precipitación más eventos de riego observados).

2.2. Datos experimentales

La condición hídrica del cultivo constituye un factor determinante y puede afectar en gran medida a los parámetros asociados al crecimiento del cultivo, como la asignación de biomasa a diferentes órganos, la translocación de fotoasimilados a grano y la senescencia foliar durante el periodo de llenado. Dado que estas variables resultan altamente sensibles en el desempeño de WOFOST, capturar su variabilidad es fundamental para la calidad de los resultados obtenidos de la simulación.

Para la calibración (ajuste de partición de biomasa a grano, translocación y senescencia foliar), se utilizaron ensayos de campo realizados en Paraná y Pergamino,

Argentina, durante las temporadas 2014/2015 y 2016/2017. Estos experimentos emplearon un diseño factorial que incluyó diversas dosis de nitrógeno (0 a 270 kg N ha⁻¹), densidades de siembra (5, 7 y 9 plantas m⁻²) y dos híbridos (DK73-10 VT3P y DK70-10 VT3P), bajo condiciones de secano (experimentos en Paraná) y riego (experimentos en Pergamino). En estas parcelas, se midió la biomasa de hojas, tallos y granos en floración y madurez fisiológica, además de la dinámica del índice de área foliar (IAF) durante el llenado de grano.

En cuanto a la evaluación del modelo, se empleó una base de datos proveniente de Uruguay, en la cual se identificaron las siguientes situaciones: i) producción potencial, con registro obtenidos en localidades de Salto (2 años) y Melilla (5 años), derivados de los ensayos de rendimiento máximo del Instituto Nacional de Semillas (INASE). ii) Producción limitada por agua (secano), con datos provenientes de experimentos en 13 combinaciones de localidad y año (cinco años). Por último, iii) riego deficitario, con ensayos realizados en el norte y sur de Uruguay durante tres años, para los cuales se dispuso de registros detallados de las cantidades y frecuencia de los eventos de riego. En todos los casos, el manejo agronómico se realizó con el objetivo de asegurar que los factores no hídricos, no limiten el crecimiento del cultivo.

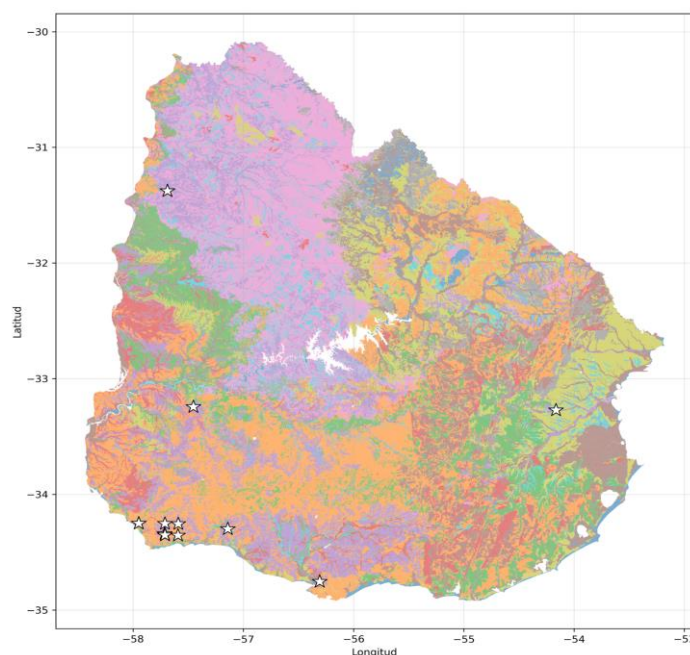


Figura 1. Mapa de Uruguay con los tipos de suelo representados mediante polígonos de diferentes colores y la distribución de los sitios experimentales utilizados para la calibración y evaluación del modelo, indicados con estrellas blancas.

2.3. Datos de clima y suelo

Los datos meteorológicos diarios requeridos por WOFOST, incluyendo temperatura mínima y máxima, radiación solar, precipitación, presión de vapor y velocidad del viento, se obtuvieron de datos grillados de ERA5. Los datos se descargaron desde Google Earth Engine.

En cuanto a la profundidad de suelo utilizada para las simulaciones, se utilizaron datos disponibles por muestreos a campo en donde la profundidad varió entre 58 y 120 cm. Así también, se utilizaron datos obtenidos de mapas locales (Molfino, 2009).

2.4. Parametrización e inicialización del modelo

La capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) se estimaron mediante las funciones de pedotransferencia (Saxton y Rawls, 2006) a partir de muestras de suelo. Dado que WOFOST asume un perfil edáfico homogéneo, se calculó el promedio de todas las capas para obtener un valor único representativo para ambos parámetros. Para reducir la variabilidad, las simulaciones se iniciaron el 1 de julio con el contenido hídrico inicial fijado en CC. En cuanto a los parámetros fenológicos de suma térmica (TSUM 1 y TSUM 2) se ajustaron para cada sitio-año utilizando las fechas observadas de floración (R1) y madurez fisiológica (R6) (Ritchie et al., 1989). En WOFOST, una fracción de los asimilados se asigna inicialmente a las raíces, mientras que el remanente se distribuye entre los órganos aéreos. La partición de biomasa y la removilización de fotoasimilados se ajustaron a partir de datos experimentales que incluyen diversas combinaciones de nitrógeno, densidad de plantas, híbridos y regímenes hídricos. A partir de observaciones de biomasa acumulada en cada órgano en R1 y R6, se calcularon las proporciones de partición y la translocación de hojas y tallos hacia los granos durante el llenado. El parámetro relacionado a la duración de la vida útil máxima de la hoja (SPAN), se ajustó empleando mediciones consecutivas del IAF durante el llenado de grano. El IAF se estimó mediante métodos no destructivos (Montgomery, 1911) en experimentos que evaluaron distintos niveles de fertilización nitrogenada y densidad de plantas. La calibración del valor SPAN se llevó a cabo utilizando el paquete NOPT (PSCE notebooks), minimizando las diferencias entre el IAF observado y el simulado. Los parámetros previamente calibrados se utilizaron en todas las simulaciones realizadas para evaluar el desempeño del modelo.

2.6. Evaluación del modelo

El desempeño del modelo se evaluó comparando la biomasa aérea y el rendimiento simulados con los observados en los tres escenarios (potencial, seco y riego deficitario). La precisión de las simulaciones se cuantificó utilizando el error cuadrático medio (RMSE), el error cuadrático medio normalizado (RRMSE) y el error del modelo (BIAS).

3. Resultados y discusión

3.1. Parametrización del modelo

Se observó que la distribución de biomasa a R1 mostró valores estables de asignación de biomasa para hojas y tallos, independientemente del nivel de biomasa alcanzado. Estos valores de asignación de biomasa a tallos y hojas a floración fueron aproximadamente de 70 y 30 % respectivamente. Esto permitió definir valores fijos de asignación de biomasa para la calibración del modelo.

En cuanto a la biomasa translocada hacia los granos durante el llenado se observó una alta variabilidad en ambos regímenes hídricos (secano y riego), esto coincide con lo reportado por Ouattar et al. (1987), quienes afirman que la removilización de materia seca es mayor en condiciones limitantes. Para la calibración del modelo se utilizaron valores de translocación de 30 y 21 % para los compartimentos de tallos y hojas respectivamente, valores que fueron obtenidos de ensayos realizados en Paraná, Argentina (Maltese et al., 2020). Estos valores concuerdan con los reportados por Ruiz et al. (2025), quienes observaron una removilización de materia seca del tallo hacia el grano de hasta 22 % durante las etapas reproductivas. Sin embargo, la variabilidad reportada en la literatura evidencia una alta incertidumbre en la cantidad de biomasa traslocada hacia los granos desde órganos vegetativos y su alta dependencia de las condiciones ambientales, el genotipo y el manejo. La partición de biomasa entre tallos, hojas y granos fue similar entre tratamientos. El riego solo produjo variaciones leves respecto al secano: aumentó la asignación a tallos del 62 al 64%, disminuyó la destinada a hojas del 31 al 29 % y mantuvo constante la proporción asignada a granos (7 %). Se consideró una partición de biomasa común para todas las simulaciones. El ajuste del parámetro de vida útil máxima de la hoja (SPAN) permitió que el modelo realice una simulación precisa de la dinámica de senescencia foliar. La curva de IAF simulada se ajustó a los valores de IAF observados, lo que permitió una mejor representación de las características de “staygreen” de híbridos modernos. El valor promedio final ajustado para SPAN fue de 39.

3.2. Desempeño de WOFOST bajo condiciones de producción potencial, secano y riego deficitario.

Luego de la calibración de los parámetros relacionados a la partición de biomasa, translocación y senescencia foliar, el modelo fue evaluado comparando los rendimientos de grano simulados frente a los observados para las tres condiciones: producción potencial, riego deficitario y secano (Figura 2).

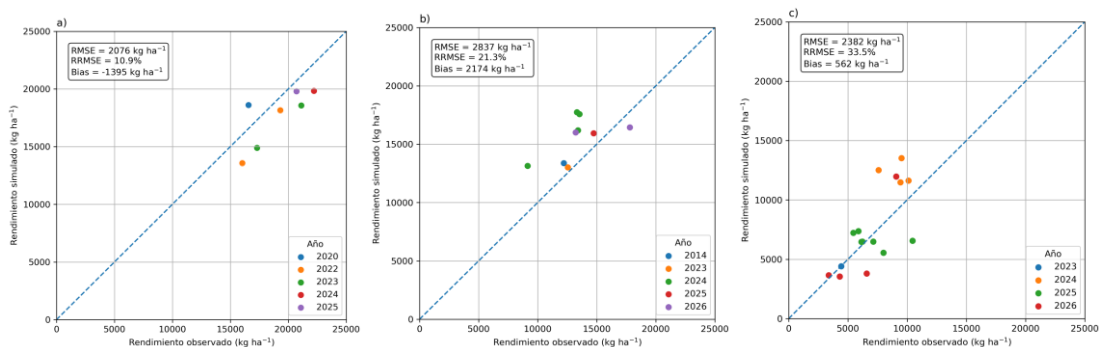


Fig 2. Rendimiento de grano observado frente al simulado bajo condiciones de producción potencial (a), riego deficitario (b) y secano (c). La línea cortada azul representa la relación 1 a 1.

En condiciones de producción potencial (Figura 2a) el modelo tuvo un ajuste aceptable ($RMSE = 2076 \text{ kg ha}^{-1}$, $RRMSE = 10.9\%$). El BIAS, indica que el modelo mostró tendencias a subestimar los rendimientos observados para 4 de los 5 años evaluados.

En cuanto a los datos simulados para las condiciones de riego deficitario (Figura 2b), el modelo presentó un RRMSE del 21.3% y un error de 2174 kg ha⁻¹, lo que indica que, en condición de estrés hídrico moderado, el modelo tendió a sobreestimar los rendimientos en comparación con los observados. La misma tendencia se vio reflejada en condiciones de secano, donde existe una mayor variabilidad en comparación de las otras situaciones productivas presentadas. El RMSE fue similar al tratamiento en condiciones de riego deficitario (RMSE= 2382 kg ha⁻¹), pero debido a los menores rendimientos totales, el RRMSE fue de 33.5%, lo que evidencia una mayor dispersión relativa de los datos simulados frente a los observados. Si bien el modelo tendió a sobreestimar en niveles de rendimientos más altos (9000-10000 kg ha⁻¹), mantuvo una tendencia de valores siguiendo la línea 1 a 1 en rangos de bajo y medio rendimiento (5000-8000 kg ha⁻¹). La capacidad del modelo de representar el rendimiento observado es comparable a evaluaciones de un modelo de soja con similares características realizadas en la misma región (Gasó et al., 2021) y a maíz en Sudáfrica (Dlamini et al., 2025).

En cuanto a la producción de biomasa total, en la Figura 3 se presenta la comparación entre biomasa total observada a campo y la simulada por el modelo WOFOST al alcanzar la madurez fisiológica (R6), bajo riego deficitario y secano.

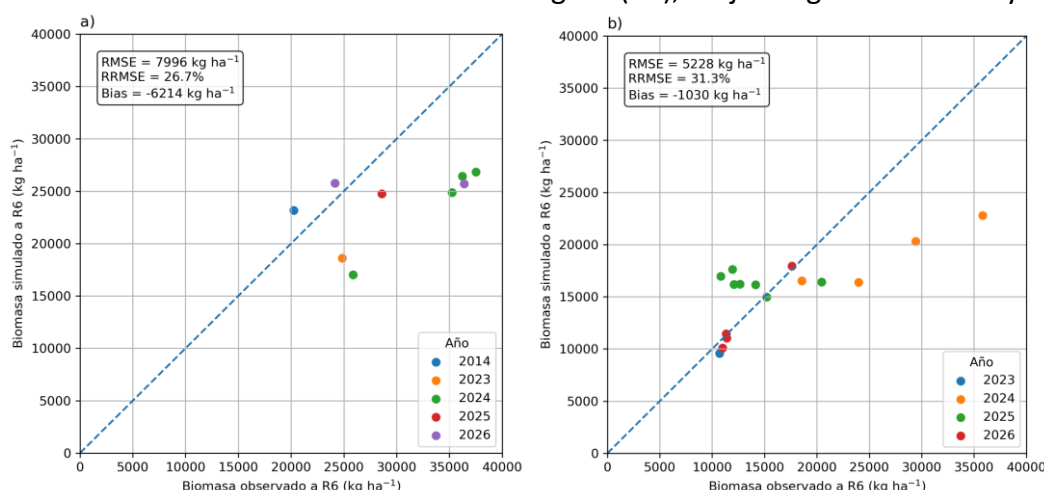


Fig. 3. Relación de la biomasa total acumulada a madurez fisiológica (DVS=2) observada y la simulada bajo condiciones de riego deficitario (a) y secano (b). La línea cortada azul representa la relación 1 a 1.

Bajo condiciones de riego deficitario, el modelo tendió a subestimar la producción de biomasa total en la etapa R6, lo cual se evidencia en el BIAS (-6214 kg ha⁻¹). Asimismo, el RMSE fue de (7996 kg ha⁻¹), con un error relativo del 26.7%. Aunque los registros máximos observados en campo alcanzaron entre 35000 y 38000 kg ha⁻¹, las simulaciones no superaron los 27000 kg ha⁻¹, limitando la expresión del potencial del cultivo bajo este manejo. Sin embargo, para el rango de 10000 a 20000 kg MS ha⁻¹, los resultados simulados mostraron un mejor ajuste siguiendo la tendencia 1:1.

La relación entre el error en rendimiento y el estrés hídrico acumulado indicó una variación consistente en el desempeño de la predicción del rendimiento por el modelo

(Figura 4). En niveles de bajo estrés hídrico, WOFOST generalmente sobreestimó el rendimiento del grano (sesgo positivo) tanto en condiciones de secano como riego deficitario. A medida que aumentó el estrés hídrico acumulado, la magnitud del sesgo positivo disminuyó progresivamente hasta volverse negativa en los niveles de estrés más altos, lo que indica una tendencia a subestimar el rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico severo. En general, WOFOST capturó la disminución del rendimiento asociada al estrés hídrico, aunque el cambio de signo en el sesgo sugiere que la respuesta simulada fue algo más pronunciada que la observada.

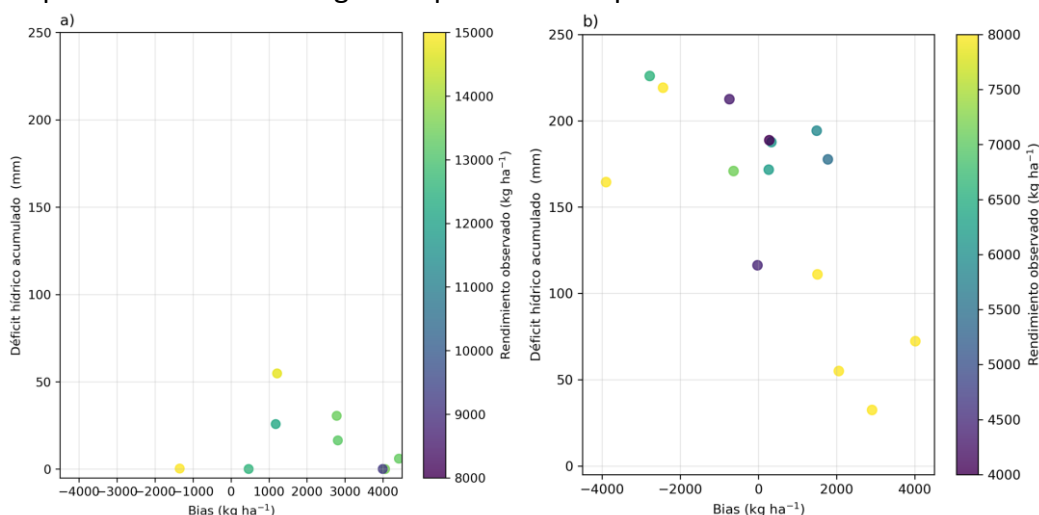


Fig. 4. Relación entre error medio en rendimiento (BIAS) y el estrés hídrico acumulado para cada combinación sitio-año bajo condiciones de secano (a) y riego deficitario (b). La escala de color representa el rendimiento observado.

4. Conclusiones

En condiciones potenciales, el modelo presentó un ajuste aceptable para las variables evaluadas (RRMSE = 10,9 %) y un error menor que en condiciones de déficit hídrico (RRMSE = 21.3% con riego y 33.5% secano). WOFOST capturó la disminución del rendimiento asociada al aumento del estrés hídrico; sin embargo, tendió a sobreestimarlo bajo estrés leve y a subestimarlo bajo estrés severo, lo que indica una respuesta simulada más pronunciada que la observada. Este comportamiento podría deberse a que una tasa fija de translocación no representa adecuadamente el rango de condiciones evaluadas o a limitaciones en la simulación del balance hídrico y la evapotranspiración del cultivo.

5. Apoyo Financiero

Este trabajo fue realizado en el marco del Programa de Becas de Posgrado Nacional financiado por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII). Los autores agradecen al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) y a la Facultad de Agronomía (Universidad de la República) por el apoyo institucional brindado para el desarrollo de esta investigación y la posibilidad de participar en este congreso.



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

6. Referencias

- Boogaard, H.L.; De Wit, A.J.W.; Te Roller, J.A.; Van Diepen, C.A. 2014. Wofost Control Centre 2.1; User's guide for the Wofost Control Centre 2.1 and the crop growth simulation model Wofost 7.1. Alterra. Wageningen, The Netherlands.
- Calviño, P.; Andrade, F.; Sadras, V. 2003. Maize yield is affected by water availability, soil depth, and crop management. *Agronomy journal* 95, 275–281.
- De Wit, A.; Boogaard, H.; Fumagalli, D.; Janssen, S.; Knapen, R.; van Kraalingen, D.; Supit, I.; van der Wijngaart, R.; van Diepen, K. 2019. 25 years of the wofost cropping systems model. *Agricultural systems* 168, 154–167.
- Dlamini, L.; Crespo, O.; van Dam, J.; Gaso, D.V.; de Wit, A. 2025. Estimating actual maize yield with wofost in data-scarce small-scale cropping systems of south africa: Data assimilation approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 144, 104848.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025. The state of the world's land and water resources for food and agriculture 2025: The potential to produce more and better. doi:10.4060/cd7488en.
- Fu, G.; Li, C.; Liu, W.; Pan, K.; He, J.; Li, W. 2025. Maize yield estimation based on UAV multispectral monitoring of canopy lai and wofost data assimilation. *European Journal of Agronomy* 168, 127614.
- Gaso, D.V.; de Wit, A.; Berger, A.G.; Kooistra, L. 2021. Predicting within field soybean yield variability by coupling sentinel-2 leaf area index with a crop growth model. *Agricultural and forest meteorology* 308, 108553.
- Giménez, L.; Petillo, M.G.; Paredes, P.; Pereira, L.S. 2016. Predicting maize transpiration, water use and productivity for developing improved supplemental irrigation schedules in western Uruguay to cope with climate variability. *Water* 8, 309.
- Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), 2024. Boletín Climático Anual 2024. Technical Report. Instituto Uruguayo de Meteorología. Uruguay. URL: www.inumet.gub.uy.
- Maltese, N.E.; Maddonni, G.A.; Melchiori, R.J.M.; Ferreyra, J.M.; Caviglia, O.P. 2020. Crop nitrogen status of early-and late-sown maize at different plant densities. *Field Crops Research* 258, 107965.
- Molfino, J.H. 2009. Estimación del agua disponible en los grupos coneat - ideuy. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). Uruguay. <https://visualizador.ide.uy/geonetwork/srv/api/records/3020e028-25f6-4bb7-8c3e-36cedac0ae3>.
- Montgomery, E.G. 1911. Correlation studies in corn. Annual Report of the Nebraska Agricultural Experiment Station 24, 108–159.
- Quattar, S.; Jones, R.; Crookston, R.; Kajeiou, M. 1987. Effect of drought on water relations of developing maize kernels 1. *Crop Science* 27, 730–735.
- Ritchie, S.W.; Hanway, J.J.; Benson, G.O. 1989. How a corn plant develops. Technical Report. Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service.
- Ruiz, A.; Listello, A.; Trifunovic, S.; Archontoulis, S.V. 2025. Maize breeding enhances lodging resistance through vertical allocation changes of stem dry matter and nitrogen. *Frontiers in Plant Science* 16, 1514045.
- Saxton, K.E.; Rawls, W.J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal* 70, 1569–1578.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2026. Estadísticas climáticas. URL: <https://www.smn.gob.ar/estadisticas>.

