

“Predicción y modelización de la respuesta en rendimiento de trigo y maíz y necesidad de nitrógeno en función de variables climáticas previas a la siembra”

Juan M. Pautasso¹², Pedro A. Barbagelata¹² y Ricardo M. Melchiori¹.

pautasso.juan@inta.gob.ar; pedro.barbagelata@uner.edu.ar; melchiori.ricardo@inta.gob.ar.
EEA INTA Paraná; 2 FCA UNER. Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

1

**Trabajo presentado al
Segundo Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión
(CLAP2022)
30-31 de Marzo y 1 de Abril de 2022 Manfredi, Córdoba, Argentina**

Resumen. Los rendimientos de trigo y maíz presentan una importante variabilidad interanual. Parte de esa variabilidad está determinada por factores limitantes, siendo el factor agua el más importante en los sistemas de secano, seguido por deficiencias de nutrientes. El nutriente que en mayor medida condiciona el rendimiento es el nitrógeno (N). El desafío que tiene la agricultura moderna consiste en incrementar eficientemente los rendimientos minimizando los impactos ambientales. Es clave conocer la demanda de N (determinada por el rendimiento) para el manejo racional de este nutriente: si se aplican dosis que exceden la capacidad de asimilación del cultivo se incrementa el riesgo de pérdidas. Una de las razones de la falta de adopción de recomendaciones de manejo de N en función del rendimiento radica en la incertidumbre sobre la determinación del rendimiento objetivo. Para estudiar la variabilidad climática existen diversos índices que son de público acceso y cuentan con una base de datos histórica, pero para la región no existen modelos predictivos de rendimiento para los cultivos de trigo y maíz, basados en los diferentes índices climáticos y/o variables hídricas que prevean posibles escenarios de rendimientos para poder ajustar la necesidad de N cada año en cada ambiente. El objetivo de este trabajo es presentar una propuesta que modeliza mediante funciones matemáticas para la provincia de Entre Ríos los rendimientos de trigo y de maíz para cada año a partir de variables edafoclimáticas previas a la siembra de los cultivos y la respuesta esperada al agregado de N.

Palabras clave. modelos mecánicos, fertilización, variabilidad espacial, variabilidad temporal.

Introducción

El maíz y el trigo son cultivos de gran importancia a nivel mundial, ya sea como alimento humano y animal o como fuente de productos industriales (Paliwal et al.; 2001). Argentina ha experimentado un crecimiento en superficie (MAGyP; 2021), sustentado por la generación, transferencia y adopción de tecnologías adecuadas a la diversidad de nuestros sistemas productivos (García Bernado, 2020).

El rendimiento de estos cultivos presenta una importante variabilidad interanual. Para explicar esta variación en rendimiento, Robbinge (1993) diferencia entre rendimiento potencial, alcanzable y real; donde el rendimiento potencial está determinado por factores definitorios (radiación, temperatura, genética), el rendimiento alcanzable es el que puede obtenerse en condiciones de cantidades sub óptimas de factores limitantes (agua y nutrientes) y el rendimiento real es aquel que se obtiene actualmente y está determinado por factores reductores (plagas, enfermedades y malezas).

Ray et al. (2015) estudiaron a escala global la variabilidad climática y su efecto en los rendimientos, informando que para Argentina alrededor del 40% de la variabilidad total del rendimiento de maíz y trigo de un año a otro se explica por la variabilidad climática interanual. Por otro lado, la brecha que corresponde a limitaciones por nutrientes para Argentina (Global Yield Gap and Water Productivity Atlas; 2021) se estima que es del 69% en maíz y el 51% en el caso del trigo.

La agricultura de precisión (AP) presenta un gran desafío frente a esta variabilidad temporal, ya que el riesgo de aplicar acciones económica y ambientalmente inapropiadas se incrementa si los tratamientos diferenciales se basan únicamente en información espacial, requiriendo además análisis científicos de tratamientos que consideren tanto la variabilidad espacial como temporal (Whelan y McBratney; 2000).

El nutriente que en mayor medida condiciona el crecimiento y rendimiento del trigo y el maíz es el nitrógeno (N). El N debe proveerse en cantidades suficientes para asegurar un óptimo estado fisiológico durante el período crítico en el que se define el rendimiento de los cultivos (Echeverría y Sainz Rozas; 2015). El manejo de este nutriente se relaciona al rendimiento, determinando que mayores rendimientos corresponden mayores necesidades de N (Echeverría et al.; 2014; Correndo et al.; 2021; García y Reussi Calvo; 2014).

Siendo la disponibilidad hídrica el factor que mayormente limita la producción y en segundo lugar el nitrógeno (Maddonni et al., 2003; Echeverría et al., 2015), para lograr el máximo rendimiento posible cada año se debe, en primer lugar, conocer y manejar las interacciones entre estos dos factores.

Se considera clave conocer la demanda de N para el manejo racional de este nutriente, dado que si se aplican dosis que exceden la capacidad de asimilación del cultivo, se incrementan las pérdidas durante el ciclo de los cultivos fertilizados y/o aumenta el riesgo de pérdidas por lavado y desnitrificación durante el barbecho posterior si el N residual es alto (Meisinger y col.; 2008).

Existen distintas alternativas de diagnóstico para un correcto manejo de este nutriente en el cultivo de trigo y maíz, las que permiten formular recomendaciones ajustadas de fertilización de acuerdo a numerosos trabajos de calibraciones e interpretaciones (García y Reussi Calvo; 2014; Echeverría y col.; 2014; Correndo et al; 2021; Ruiz y col.; 2018; Howard et al.; 2002). Actualmente se conoce la relación entre la necesidad de N y el rendimiento objetivo del cultivo, tanto en maíz como en trigo (Sawyer y col.; 2006; García y Reussi calvo; 2014), pero una de las razones de la falta de adopción del enfoque de manejo de N en función del rendimiento radica es la incertidumbre sobre cómo determinar o predecir ese rendimiento objetivo (Sawyer y col.; 2006).

Poseer un modelo predictivo del rendimiento antes de la siembra permitiría optimizar la captación de

del N, minimizando los riesgos de pérdida, lo que contribuiría a la sostenibilidad de los agroecosistemas (Echeverría y Sainz Rozas; 2015).

Para estudiar la variabilidad climática existen diversos índices que son de público acceso (NOAA, 2021) y cuentan con una base histórica que permite modelizar alguno de dichos índices con comportamientos del clima. Si bien existen trabajos sobre la temática, como por ejemplo lo realizado por De la Casa y Nasello (2011) que estudiaron capacidad predictiva del Niño-oscilación sur (ENSO) y de otros indicadores climáticos sobre la precipitación; o Hurtado et al. (2003) que informaron efecto de los eventos de El Niño/Oscilación Sur (ENSO) en el rendimiento de maíz; no existen modelos predictivos que prevean posibles escenarios de rendimientos para poder ajustar la necesidad de N cada año.

El objetivo de este trabajo es presentar para la costa oeste de la provincia de Entre Ríos un modelo de estimación de los rendimientos de trigo y de maíz alcanzables cada año a partir de variables hídricas y/o índices climáticos previos a la siembra de los cultivos, y la respuesta esperada al agregado de N.

Materiales y métodos

Para el estudio de la variabilidad climática entre campañas se trabajó con datos de lluvias para cada campaña a partir de pluviómetros distribuidos en el territorio provincial pertenecientes a instituciones públicas y privadas; y los indicadores climáticos utilizados fueron tomados del “laboratorio de ciencias físicas” de la NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>). Para el estudio de la variabilidad de los rendimientos se trabajó en base a las estadísticas de la Bolsa de Cereales de Entre Ríos y de ensayos realizados por el INTA. Para estimar las respuestas a la fertilización nitrogenada se contó con ensayos de fertilización del INTA, donde la necesidad de N para cada rendimiento se expresó como nitrógeno disponible (ND), que suma N de nitratos del suelo de 0-20 cm en kg ha^{-1} más los kg por hectárea del N del fertilizante.

Los datos se analizaron mediante correlaciones entre los indicadores y variables climáticas y los rendimientos de trigo y maíz y su respuesta al agregado de N. Se seleccionó el mejor modelo que explique significativamente ($p < 0,05$) la variabilidad de rendimiento de los cultivos y su respuesta al agregado de N en función de la variabilidad climática; el criterio de selección del modelo fue el grado de bondad de ajuste (R^2).

Resultados

Trigo: Modelización de la estimación del rendimiento y la respuesta al agregado de N:

La variabilidad interanual del rendimiento del trigo se explicó a partir de las lluvias ocurridas durante los meses de febrero, marzo, abril y mayo de cada año (Figura 1A). Los rendimientos máximos para cada año se pueden estimar a partir de la siguiente ecuación: $12 \cdot \text{mm acumulados} - 230$ y los rendimientos promedios: $1287 + 4 \cdot \text{mm acumulados}$. Con lluvias acumuladas mayores a 440 mm el rendimiento promedio se “estabiliza” en 3238 kg ha^{-1} y el rendimiento máximo en 5023 kg ha^{-1} .

En la Figura 2A se muestra la relación entre la necesidad de N disponible y el nivel de rendimiento de trigo ($0,03 \cdot \text{rend trigo} - 4,40$). Las pendientes y los valores absolutos obtenidos son similares a los informados por García y Reussi Calvo (2014).

La brecha entre los rendimientos promedios y los máximos son mínimas cuando el agua es muy limitante. El efecto “agua” generó una variabilidad de los rendimientos de trigo entre 40% y 80% para los rendimientos promedios y máximos rendimientos, respectivamente. Cuando la campaña se presenta sin limitación por “agua”, la variabilidad entre un escenario de máximos rendimientos vs rendimientos promedios fue del 55%.

Maíz: Modelización de la estimación del rendimiento y la respuesta al agregado de N:

La variabilidad interanual del rendimiento del maíz se explicó a partir del pronóstico de probabilidad de año Niño realizado en agosto para el trimestre noviembre – diciembre – enero (https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/?enso_tab=enso-cpc_plume) cada año (Figura 1B). Los rendimientos máximos para cada año se pueden estimar a partir de la siguiente ecuación: $-26.301 x^2 + 26.287 x + 6.741$ y los rendimientos promedios: $-5.684 x^2 + 8.147 x + 4.588$.

A partir de ensayos de fertilización nitrogenada, en la Figura 2B ($0,01 \times \text{rend maíz} - 11,65$) se muestra la relación entre N disponible y el rendimiento del cultivo de maíz.

La brecha entre los rendimientos promedios y los máximos son máximas en valores intermedios de pronóstico de año Niño. Tomando los rendimientos más bajos en contraposición con los rendimientos máximos, el efecto “año” generó una variabilidad de los rendimientos de maíz entre 71% y 74% para los rendimientos promedios y máximos rendimientos, respectivamente. Para los años de altos rendimientos (cuando los pronósticos ENSO predicen entre 40-60% NIÑO) la variabilidad entre máximos rendimientos y los rendimientos promedios es del 82%.

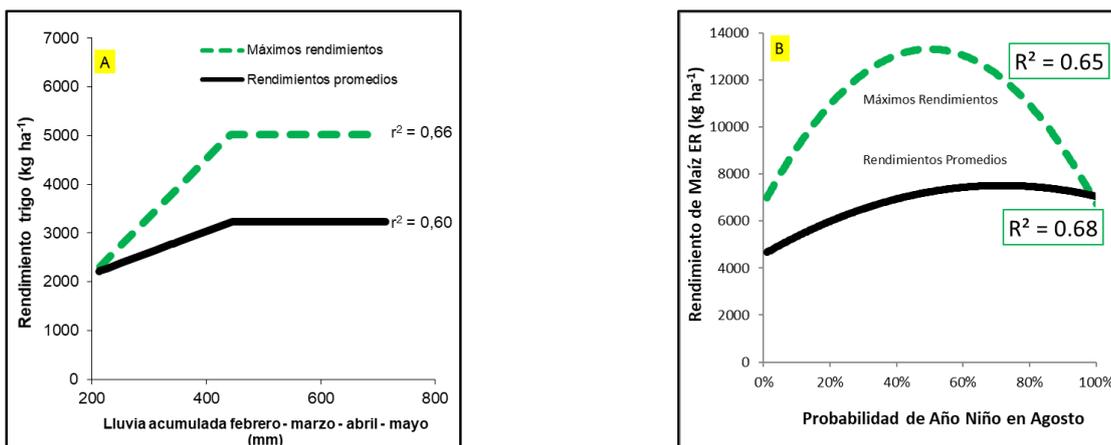


Figura 1: Rendimientos en función de variables climáticas: A) Rendimiento de trigo en función de las lluvias acumuladas; B) Rendimiento de maíz en función del porcentaje de Niño.

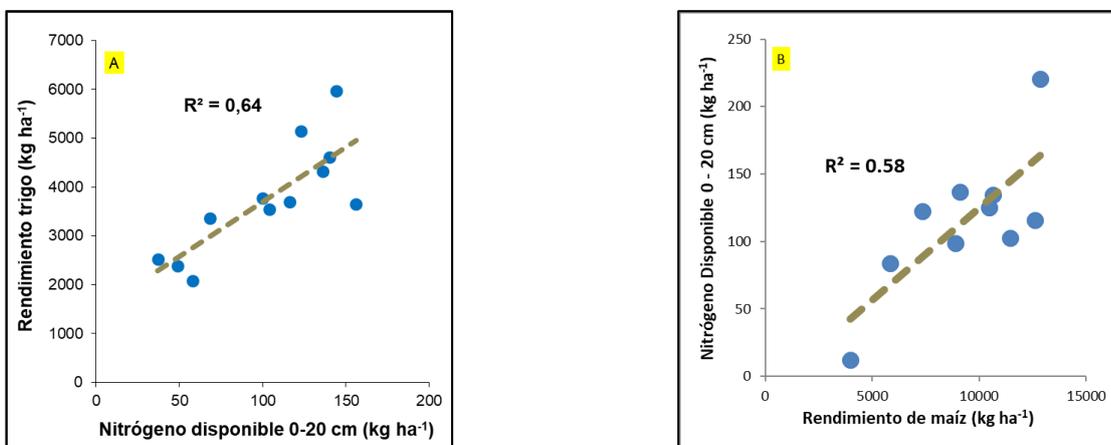


Figura 2: Nitrógeno disponible en función del rendimiento: A) trigo; B) maíz.

Conclusiones

La variabilidad interanual de rendimientos de los cultivos de trigo y maíz en Entre Ríos fue alta, siendo los valores encontrados similares a los informados por la bibliografía. Se determinaron variables climáticas que predicen satisfactoriamente el rendimiento a lograr cada año, siendo un aporte importante para poder tomar decisiones con menor grado de incertidumbre sobre el agregado de N de fertilizantes. Las brechas de rendimientos encontradas podrían ser utilizadas para asignar los rendimientos a alcanzar cada año en diferentes zonas de productividad dentro de los lotes, potencialidad que debe validarse aún y de esta manera ser un aporte para intentar “gestionar” la variabilidad interanual para luego asignar la dosis de insumos como el N y manejar la variación espacial de los rendimientos de trigo y maíz en cada lote.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el PE-E9-I177-001 del INTA.

Referencias

- Correndo A., F. Gutiérrez-Boem, F. García, C. Alvarez, C. Alvarez, A. Angeli, P. Barbieri, M. Barraco, A. Berardo, M. Boxler, P. Calvino, J. Capurro, H. Carta, O. Caviglia, I. Ciampitti, M. Díaz-Zorita, S. Díaz-Valdéz, H. Echeverría, G. Esposito, M. Ferrari, G. Ferraris, S. Gambaudo, V. Gudelj, J. Ioele, R. Melchiori, J. Molino, J. Orcellet, A. Pagani, J.M. Pautasso, N. Reussi Calvo, M. Redel, S. Rillo, H. Rimski-Korsakov, H. Sainz-Rozas, M. Saks, M. Tellería, L. Ventimiglia, J. Zorzín, M. Zubillaga, F. Salvagiotti. 2021. Attainable yield and soil texture as drivers of maize response to nitrogen: A synthesis analysis for Argentina. *Field Crops Research*, Volume 273, 2021, 108299, ISSN 0378-4290, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108299>.
- De la Casa, A. y O. Nasello. 2011. Capacidad predictiva del Niño-oscilación sur (ENSO) y de otros indicadores climáticos sobre la precipitación en Córdoba, Argentina. *Anales Afa Vol. 22 (114-119) Malargüe 2010*. <https://afan.df.uba.ar/journal/index.php/analesafa/article/view/27/54>
- Echeverría, H. y H. Sainz Rozas. 2015. Nitrógeno. Pp. 189-228. En H. Echeverría y F. García (Eds). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Echeverría, H.; H. Sainz Rozas y P. Barbieri. 2014. Maíz y Sorgo. Pp. 435-478. En H. Echeverría y F. García (Eds). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- García Bernado, Rolando. (2020) Impacto del modelo productivo agrario en la industria química argentina en los años recientes (2006-2017). *H-industri@* 26: 85-108. <http://ojs.econ.uba.ar/index.php/H-ind/article/view/1774H-industri@>
- García F. y N. Reussi Calvo. 2014. Trigo. Pp. 401-434. En H. Echeverría y F. García (Eds). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Global Yield Gap and Water Productivity Atlas. 2021. URL disponible: www.yieldgap.org (acceso: diciembre, 2021)
- Howard, D.; M. Newman; M. Essington y W. Percell. 2002. Nitrogen fertilization of conservation-tilled wheat. I. Sources and application rates. *Journal of Plant Nutrition* Volume 25, 2002 - Issue 6. <https://doi.org/10.1081/PLN-120004391>
- Meisinger, JJ, Calderón, FJ y Jenkinson, DS. 2008. Soil nitrogen budgets. En *Nitrogen in Agricultural Systems* (eds JS Schepers y WR Raun). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr49.c13>
- MAGyP. 2021. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Estimaciones agrícolas. <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar>
- NOAA. 2021. National Oceanic and Atmospheric Administration. Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time-Series. <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>
- Paliwal R. L.; G. Granados, H. R. Lafitte y A. D. Violic. 2001. El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción. FAO, Roma. <http://www.fao.org/3/x7650s/x7650s00.htm>.
- Rabbinge, R. 1993. The Ecological Background in Food Production. In *Crop Protection and Sustainable Agriculture*. John Wiley and Sons. Symp. 177, Chicester (págs. 2 a 29).
- Ray, D.; J. Gerber; G. MacDonald & P. West. 2015. Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nat. Commun.* 6:5989 doi: 10.1038/ncomms6989 (2015).
- Ruiz, A.; T. Coyos, y L. Pagnan. 2018. Manejo de la fertilización nitrogenada y densidad de siembra de maíz en ambientes del sudeste de Córdoba – Experiencias de la Chacra Justiniano Posse. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/3052>
- Sawyer J.; E. Nafziger; G. Randall; L. Bundy; G. Rehm and B. Joern. 2006. Concepts and rationale for regional nitrogen rate guidelines for corn. PM2015. Iowa State University. Ames, Iowa, EEUU. <https://store.extension.iastate.edu/Product/pm2015>
- Whelan, B. M.; McBratney, A.B. (2000) "The "Null Hypothesis" of Precision Agriculture Management." *Precision Agriculture* 2: 265 - 279.