



Foto: Gonzalo Rizzo

¿Qué está pasando con las brechas de rendimiento en Uruguay?

Gonzalo Rizzo¹, Gian Franco Rodríguez¹, Sofía Pejo¹, Juan Manuel Sanchis¹, Milton Pintos²

1- Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de la República.

2- Departamento de Ciencias Sociales, Facultad de Agronomía, Universidad de la República.

1- INTRODUCCIÓN

Se estima que hacia el 2050 la población mundial se acercará a 9.7 mil millones de personas. Satisfacer la demanda de alimentos resultante de manera sostenible, al tiempo que se mitigan los impactos negativos del cambio climático, es uno de los mayores desafíos que la humanidad ha enfrentado (Cassman and Grassini, 2020; United Nations, 2019). Existe consenso en la comunidad científica de que la intensificación sostenible es la estrategia más adecuada para afrontar ese desafío; esto es, aumentar los rendimientos de los cultivos en las tierras agrícolas existentes evitando, y, en lo posible, mitigando, los impactos negativos en la calidad del suelo y los recursos hídricos (Pretty and Bharucha, 2014).

Los análisis de brechas de rendimiento son una metodología clave para cuantificar las posibilidades que un país o región tienen de incrementar su producción de alimentos, e identificar áreas del conocimiento donde la inversión en investigación y desarrollo tendría mayor impacto en este incremento productivo (Grassini et al., 2015; van Bussel et al., 2015; van Ittersum et al., 2013). En términos generales, el análisis de la brecha de rendimiento implica dos pasos principales: (i) estimar la magnitud de la brecha entre el rendimiento potencial y el rendimiento promedio, y (ii) identificar los factores limitantes y reductores del rendimiento que explican la brecha.

El rendimiento potencial (Y_p) de un cultivar está determinado por la concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera, la temperatura y la radiación solar, en ausencia de limitaciones por agua, nutrientes, malezas, patógenos y plagas (Evans, 1993). El rendimiento potencial limitado por agua (Y_w) está definido por los mismos factores que el Y_p , pero también está determinado por la disponibilidad de agua (cantidad y distribución) y por las propiedades del suelo que influyen en el balance hídrico del cultivo (van Ittersum et al., 2013). En el caso de Uruguay, donde las

secuencias de cultivo son intensivas, cada ciclo de cultivo tiene un Yp (o Yw) diferente debido a las diferencias en la fecha de siembra y, por lo tanto, en las condiciones climáticas y disponibilidad hídrica (en el caso de cultivos de secano). Los rendimientos promedio de los productores suelen estar muy por debajo de Yp (o Yw) debido a factores limitantes y reductores del rendimiento como las deficiencias de nutrientes, la competencia con malezas y los daños por insectos plaga y patógenos (Cassman, 1999; van Ittersum and Rabbinge, 1997). La diferencia entre Yp (o Yw) y el rendimiento promedio de los productores se denomina brecha de rendimiento. Sin embargo, alcanzar Yp (o Yw) no es realista para la población de productores, ya que requiere grandes cantidades de insumos y un alto grado de sofisticación en el manejo de los cultivos y del suelo. Como referencia, un productor con buen acceso a insumos, mercados y conocimiento técnico podría alcanzar aproximadamente el 80% de Yp (o Yw), lo que comúnmente se denomina “rendimiento alcanzable” (Cassman et al., 2003). Más allá de este nivel, sería difícil para un productor reducir las brechas de rendimiento con las tecnologías costo-efectivas existentes. A la diferencia entre el rendimiento alcanzable y el rendimiento promedio de los productores se le denomina “brecha de rendimiento explotable”.

En Uruguay, estos conceptos han sido aplicados en diversos estudios previos. Por ejemplo, Ernst et al. (2016) estimaron un rendimiento alcanzable promedio para trigo

de 4.9 Mg ha⁻¹. Por otro lado, Rizzo et al. (2021; <https://www.yieldgap.org>) aplicando el protocolo del Global Yield Gap Atlas para una secuencia temporal desde el 2000 al 2015, estimaron los rendimientos potenciales limitados por agua para soja, maíz y trigo. En ese estudio, que comprendió la primera aplicación de este protocolo en Uruguay, se estimó el Yw de soja en 3.5 Mg/ha, el de maíz en 8.1 Mg/ha y el de trigo en 6.1 Mg/ha. A nivel nacional, las brechas de rendimiento promedio en ese estudio fueron estimadas en 1.2, 3.0 y 3.1 Mg/ha, para soja, maíz y trigo, respectivamente.

Este artículo presenta una nueva actualización de las estimaciones de brechas de rendimiento de los cultivos de soja, maíz y trigo en Uruguay siguiendo el protocolo del Global Yield Gap Atlas.

2– METODOLOGÍA

2.1. Selección del área de estudio

Para la definición de la zona de estudio se contó con 22 estaciones meteorológicas provenientes del INIA (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias) e INUMET (Instituto Meteorológico del Uruguay).

Para seleccionar las estaciones meteorológicas de referencia (RWS) se creó para cada estación una zona buffer de 100 km de radio centrado en dicha estación. Luego se estimó el área cosechada de soja de cada zona buffer de las



Ensayo parcelario en campo de un productor de soja en Nebraska durante la zafra 2023. Los ensayos corresponden a la tesis de Doctorado de Luzviminda Sazon, realizada en la University of Nebraska-Lincoln.

RWS recortadas por las zonas agroclimáticas de Uruguay (SPAM, 2020; van Wart et al., 2013a). Se seleccionaron las RWS que cubrían más del 5% del área cosechada de soja, alcanzando un total de 7 RWSs cubriendo el 93% área cosechada nacional (van Bussel et al., 2015).

2.2. Datos climáticos

Para las RWS seleccionadas se tomaron los datos diarios de temperaturas máxima, mínima y precipitaciones para el período 2000 al 2023. Este período de estudio se considera lo suficientemente extenso para la estimación de Yp y Yw de manera robusta (Grassini et al., 2015). Los datos de radiación solar incidente para cada estación meteorológica se obtuvieron de NASA-POWER (<http://power.larc.nasa.gov/>) los cuales han mostrado ser una fuente confiable para regiones con topografía relativamente plana como es el caso de Uruguay (van Wart et al., 2015). Se realizó un control de calidad, llenado y correcciones de los datos climáticos colectados siguiendo el protocolo definido por van Wart et al. (2015). Con los registros completos para el período 2015-2023 se simuló Yp y Yw.

2.3. Suelos dominantes, secuencias y manejo de los cultivos

Se seleccionaron dos a tres suelos dominantes dentro de cada zona buffer. Esta selección se realizó estimando el área de cultivo de soja dentro de cada unidad de mapeo de la Carta de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000

(<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/carta-reconocimiento-suelos-del-uruguay-escala-11000000>). Seleccionando los dos a tres suelos con mayor superficie de soja dentro de cada buffer, se logró cubrir del 55 al 85% del área de cultivo dentro de cada RWS. Para realizar las simulaciones de Yp y Yw se seleccionaron la descripción de un perfil dominante con aptitud agrícola según la categorización realizada por Molino (2013). Para cada perfil seleccionado se extrajeron los parámetros de suelo necesarios para las simulaciones se obtuvieron de las descripciones de suelos disponibles en el Compendio de Suelos del Uruguay (<http://www.cebra.com.uy/renare/biblioteca-digital/>). La profundidad de enraizamiento se fijó en 1.5 m dado que no hay datos precisos de este parámetro para los suelos del país.

Para cada zona buffer se definieron las dos a tres secuencias dominantes según régimen hídrico. Las rotaciones de cultivos dominantes y su proporción respecto del total del área de cosecha fueron definidas en base a las secuencias reportadas en los Planes de Uso de Suelos (información aportada por Dirección General de Recursos Naturales, MGAP). Para la simulación de Yp y Yw de cada cultivo en cada rotación se emplearon las fechas de siembra, densidad de plantas, largo de ciclo para trigo, grupo de madurez para soja e híbridos para maíz, según las recomendaciones de expertos locales para cada zona buffer.



Cultivo de maíz en campo de un productor de la localidad de Soriano, durante la zafra 2025-2026.

2.4. Estimaciones de rendimientos potenciales y rendimientos potenciales limitados por agua

Las simulaciones fueron realizadas usando los modelos de simulación CROPGRO-Soybean, CERES-Maizey CERES-Wheat, para soja, maíz y trigo, respectivamente anclados en el software DSSAT v 4.8 (Jones et al., 2003). Los coeficientes genéticos fueron previamente derivados y validados por Monzon et al. (Monzon et al., 2012, 2007) y Aramburu et al. (2015) basados en datos de experimentos en secano y riego en Argentina. Se simuló cada combinación de rotación de cultivos por tipo de suelos, para cada combinación de cultivo por RWS. Luego fueron ponderadas por su proporción relativa para estimar un Y_p y Y_w promedio a nivel de zona buffer, para soja de primera y soja de segunda, maíz de primera y de segunda, y trigo. La brecha de rendimiento fue calculada como la diferencia de Y_w promedio en el largo plazo y la media del rendimiento actual reportado por los productores.

2.5. Estimaciones de rendimientos promedio de los productores y brechas de rendimiento

Se estimaron los rendimientos promedios logrados por los productores a escala departamental a partir de la base de datos de las Encuestas Agrícolas de invierno y primavera proporcionadas por DIEA desde 2015 al 2023. Para cada departamento se estimó el área sembrada y el rendimiento promedio de soja, maíz y trigo. Con los mapas de Ya a nivel departamental se estimaron los rendimientos reales para cada zona buffer ponderando el Ya de cada departamento por la proporción del área de cultivo que corresponde a cada departamento dentro de cada zona buffer (Grassini et al., 2015^a).

3- RESULTADOS

A nivel nacional el rendimiento potencial estimado para soja fue de 6.3 Mg/ha, el rendimiento limitado por agua de 4.3 Mg/ha, el rendimiento logrado por los productores en 2.1 Mg/ha, y una brecha de rendimiento de 2.2 Mg/ha. En el caso del maíz se estimó un rendimiento potencial de 17.1 Mg/ha, el rendimiento limitado por agua fue de 11.7 Mg/ha, el rendimiento logrado por los productores en 5.1 Mg/ha, y una brecha de rendimiento de 6.6 Mg/ha. En el caso del trigo el rendimiento potencial estimado fue de 6.9 Mg/ha, el rendimiento limitado por agua de 6.7 Mg/ha, el rendimiento logrado por los productores en 3.8 Mg/ha, y una brecha de rendimiento de 2.9 Mg/ha.

REFERENCIAS

- Aramburu Merlos, F.; Monzon, J. P.; Mercau, J. L.; Taboada, M. A.; Andrade, F. H.; Hall, A. J.; Jobbagy, E.; Cassman, K. G.; Grassini, P., 2015. *Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps*. Field Crops Res.
- Cassman, K.G. 1999. *Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture*. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 96, 5952–5959.
- Cassman, K. G.; Dobermann, A.; Walters, D. T.; Yang, H., 2003. *Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality*. Annu. Rev. Environ. Resour. 28, 315–358. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.040202.122858>
- Cassman, K. G.; Grassini, P. 2020. *A global perspective on sustainable intensification research*. Nat. Sustain. 3, 262–268. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0507-8>
- Ernst, O. R.; Kemanian, A. R.; Mazzilli, S. R.; Cadenazzi, M.; Dogliotti, S. 2016. *Depressed attainable wheat yields under continuous annual no-till agriculture suggest declining soil productivity*. Field Crops Res. 186, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.11.005>
- Evans, L. T. 1993. *Crop Evolution, Adaptation and Yield*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Grassini, P.; Van Bussel, L. G. J.; Van Wart, J.; Wolf, J.; Claessens, L.; Yang, H.; Boogaard, H.; De Groot, H.; Van Ittersum, M. K.; Cassman, K. G. 2015. *How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis*. Field Crops Res. 177, 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.004>
- Jones, J. W.; Hoogenboom, G.; Porter, C. H.; Boote, K. J.; Batchelor, W. D.; Hunt, L. A.; Wilkens, P. W.; Singh, U.; Gijsman, A. J.; Ritchie, J. T., 2003. *The DSSAT cropping system model*. Eur. J. Agron. 18, 235–265.
- Molfinio, J. H. 2013. *Potencial Agrícola, algunos cálculos para agricultura en secano*.
- Monzon, J. P.; Sadras, V. O.; Abbate, P. A.; Caviglia, O. P. 2007. *Modelling management strategies for wheat–soybean double crops in the south-eastern Pampas*. Field Crops Res. 101, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.09.007>
- Monzon, J. P.; Sadras, V. O.; Andrade, F. H. 2012. *Modelled yield and water use efficiency of maize in response to crop management and Southern Oscillation Index in a soil-climate transect in Argentina*. Field Crops Res. 130, 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.02.001>
- Pretty, J.; Bharucha, Z. P. 2014. *Sustainable intensification in agricultural systems*. Ann. Bot. 114, 1571–1596. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu205>
- Rizzo, G., 2021. *Cropping system-imposed yield gap: Proof of concept on soybean cropping systems in Uruguay*. Field Crops Res. 9.
- SPAM, 2020. *Global Spatially-Disaggregated Crop Production Statistics Data for 2020 Version 1.0*. <https://doi.org/10.7910/DVN/SWPENT>
- United Nations, D. of E. and S.A., 2019. *World Population Prospects 2019*, Online Edition. Rev. 1.
- van Bussel, L. G. J.; Grassini, P.; Van Wart, J.; Wolf, J.; Claessens, L.; Yang, H.; Boogaard, H.; De Groot, H.; Saito, K.; Cassman, K.G.; Van Ittersum, M. K. 2015. *From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates*. Field Crops Res. 177, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.005>
- van Ittersum, M. K.; Cassman, K. G.; Grassini, P.; Wolf, J.; Titttonell, P.; Hochman, Z. 2013. *Yield gap analysis with local to global relevance—A review*. Field Crops Res. 143, 4–17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- van Ittersum, M. K.; Rabbinge, R. 1997. *Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations*. Field Crops Res. 52, 197–208.
- van Wart, J.; Grassini, P.; Yang, H.; Claessens, L.; Jarvis, A.; Cassman, K. G. 2015. *Creating long-term weather data from thin air for crop simulation modeling*. Agric. For. Meteorol. 209–210, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.020>
- van Wart, J.; Kersebaum, K. C.; Peng, S.; Milner, M.; Cassman, K. G. 2013. *Estimating crop yield potential at regional to national scales*. Field Crops Res. 143, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.018>