

05

Efecto del mejoramiento de trigo en Argentina sobre la eficiencia del uso de los recursos

FACUNDO CURIN^{1,*}

MARÍA E. OTEGUI^{2,3} Y

FERNANDA GONZÁLEZ^{1,4}

¹Centro de Investigaciones y Transferencias del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (CITNOBA-CONICET-UNNOBA-UNSADA), Argentina.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Centro Regional Buenos Aires Norte. Estación Experimental Agropecuaria Pergamino. (Argentina).

³Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

⁴Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estación Experimental Agropecuaria Pergamino. (Argentina).

* curin.facundo@inta.gob.ar

El mejoramiento genético de trigo en Argentina ha incrementado el rendimiento producto de mejoras de las eficiencias del uso del agua y la radiación acompañadas por una mayor partición de biomasa a grano y una mayor producción de biomasa en cultivares de ciclo largo y corto, respectivamente, sin modificar sustancialmente la captura de agua y radiación.

Palabras clave: Evapotranspiración, Radiación Interceptada, Mejoramiento, Ciclo Largos, Ciclo Cortos.

Introducción

Los efectos indirectos del mejoramiento genético sobre la captura y eficiencia en el uso del agua han variado entre épocas y regiones del mundo. En Australia, el mejoramiento temprano (*i.e.* desde principio del siglo XX hasta promediar la década de 1980) produjo un aumento del rendimiento a través de una mejora de la eficiencia en el uso del agua evapotranspirada ($EUA_{R-G,ETC}$) sin cambios en la cantidad de agua evapotranspirada por el cultivo a lo largo de su ciclo (ET_C), ni la biomasa total producida a madurez fisiológica (BT_{MF}) (Siddique *et al.*, 1990). Mientras que, en otras regiones como México, la mejora del rendimiento estuvo asociada a la selección de cultivares con una mayor producción de BT_{MF} y una mayor ET_C . Sin embargo, trabajos recientes

en Australia (*i.e.*, desde mediados de siglo XX hasta promediar la década de 2000) registraron que el mejoramiento genético enfocado al rendimiento había traccionado la generación de cultivares de trigo con mayor BT_{MF} e igual captura de agua que sus antecesores (Sadras y Lawson 2013).

Diversos trabajos han reportado mejoras en cultivares modernos asociadas a una mayor eficiencia en el uso de la radiación para producir biomasa (EUR_{BT}) en lugar de cambios en su captura. En Argentina en particular, un trabajo previo identificó mejoras de EUR_{BT} durante el llenado de grano, asociadas principalmente a aumentos en el tamaño de los destinos, producto de un mayor número de granos, que generaron mejoras en la fuente de fotoasimilados (*i.e.*, capacidad fotosintética del canopeo, Calderini *et al.*, 1995). Sin embargo, esta mayor EUR_{BT} , y consecuentemente mayor producción de biomasa durante el llenado de grano, no tuvo efectos sobre la BT_{MF} debido a que solamente lograron compensar las reducciones en la producción de biomasa en el periodo pre-floración registradas en los cultivares modernos. Seguidamente, trabajos realizados en Australia reportaron mejoras en la EUR durante pre-floración en los genotipos modernos que resultaron en mayor producción de biomasa pre-floración y en consecuencia mayor BT_{MF} (Sadras y Lawson, 2011).

En Argentina, en un estudio previo dentro del grupo de trabajo se identificaron los efectos indirectos de la mejora genética en dos grandes grupos de cultivares: ciclo largo-CL, y ciclo corto-CC. La mejora del rendimiento estuvo acompañada de una mayor partición de la biomasa a granos (*i.e.*, mayor índice de cosecha-IC) en cultivares de CL y de mayor producción de biomasa, principalmente en etapas previas a la floración, en cultivares de CC. Por lo tanto, es posible especular que en ambos grupos hubo un aumento en $EUA_{RG,ETc}$ producto de (i) un aumento del IC sin cambios en la producción de biomasa y captura de recursos entre los cultivares de CL y (ii) una mayor producción de BT_{MF} en los cultivares de CC, generada en la etapa prefloración, que mejora la $EUA_{BT,ETc}$ debido a mayores EUR_{BT} . El objetivo del trabajo fue estudiar el efecto del mejoramiento genético reciente (últimos 50 años) sobre la eficiencia y captura de agua y radiación en un amplio rango de condiciones ambientales.

Materiales y Métodos

Durante las campañas 2016 y 2017 en el campo experimental de INTA Pergamino, 10 cultivares de trigo pan liberados al mercado durante 1971 y 2011 agrupados en cultivares de ciclo largo (CL) y cultivares

de ciclo corto (CC) fueron evaluados en diferentes condiciones ambientales generadas por la combinación no factorial de diferentes niveles disponibilidad hídrica. Dos regímenes hídricos (R: riego y S: seco)

en 2016 y tres en 2017 (R, S y RH: restricción hídrica), se establecieron para explorar un amplio rango de condiciones ambientales (Tabla 1). Las parcelas recibieron fertilización nitrogenada en macollaje e inicio de encañazón con el objetivo de alcanzar los 200 kg/ha de nitrógeno disponible entre lo aportado por el suelo a la siembra y el fertilizante.

Entre las mediciones realizadas se encuentran:

- La evolución de la captura de la radiación a través de mediciones instantáneas de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada incidente ($fRFA_i$) y así mediante interpolación de dichos valores y los valores de RFA_i diarios estimar la RFA_i acumulada ($IRFA_i$) durante el ciclo de acuerdo con la ecuación 1.

$$1. IRFA_c = \sum_{Z_{10}}^{Z_{91}} fRFA_i \times RFA_i$$

- El contenido de agua en el suelo mediante el uso de sonda de neutrones cada 15 – 20 días hasta 1,5 m de profundidad para la estimación de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) mediante balances hídricos de acuerdo con la ecuación 2 donde la escorrentía se estimó siguiendo la metodología propuesta por Andriani et al. (2016).

$$2. ET_c = \Delta AguaAlmacenada + Lluvia + Riesgos - Escorrentía$$

- Finalmente, a madurez fisiológica, en cada unidad experimental se determinó el rendimiento y sus determinantes fisiológicos. Esto permitió el cálculo de la EUA_{RG,ET_c} (cociente entre el rendimiento y ET_c), la EUA_{BT,ET_c} (cociente entre BT_{MF} y ET_c) y la EUR (cociente entre BT_{MF} e IRFAC).

Tabla 1. Descripción de los ambientes evaluados. Valores promedios de contenido de agua disponible en el suelo para el cultivo hasta 1,5 m (ADC), lluvias acumuladas, riego aplicado e índice ambiental.

Ambientes	ADC ^a (mm)	Lluvias (mm)	Riego (mm)	índice Ambiental ^b (g m ²)
2016 Riego	281-301	302-258	60	602
2017 Riego	283-278	302-284	67	552
2016 Secano	281-301	302-258	---	522
2017 Secano	283-278	309-291	---	492
2017 Restricción hídrica	283-278	42-25	---	252

a) Los primeros valores corresponden a los cultivares de CL mientras que los segundos a los de CC.

b) Índice ambiental calculado como el promedio de todos los cultivares evaluados en un ambiente en particular.

Los efectos de los tratamientos y la interacción de ellos para cada uno de los rasgos evaluados a nivel de cultivo fueron analizados mediante un ANOVA utilizando el programa estadístico INFOSTAT. El mismo fue realizado combinando AMBIENTE y CULTIVARES como variables de efectos fijos. Finalmente, los valores de cada rasgo evaluado fueron estandarizados de acuerdo con la ecuación 3 y mediante regresiones lineales de dichos valores estandarizados para cada cultivar y su año de liberación al mercado (ALM) se estimó el progreso genético calculado como la

pendiente de dicha regresión, el cual fue expresado en términos porcentuales.

$$3. Desvio Relativo = (Media Cultivar - Índice Ambiental) / Índice Ambiental^1$$

donde el Índice Ambiental corresponde al promedio de todos los cultivares en cada uno de los ambientes de evaluación.

Resultados y Discusión

La mayoría de las variables analizadas presentaron efectos significativos del AMBIENTE y de CULTIVAR, con excepción de $EUA_{RG,ETC}$ que solo presentó efectos significativos del CULTIVAR, mientras que efectos significativos de la interacción AMBIENTE \times CULTIVAR fueron detectados en la mayoría de los

caracteres evaluados con excepción de EUR_{BT} (Tabla 2). Entre los ambientes, las variaciones en la captura de recursos fueron de 137 y 200 % para $IRFA_C$ y ET_C respectivamente, mientras que para la generación de biomasa y su partición a granos (*i.e.* IC) fue de 225 y 123 % respectivamente. Finalmente, la combinación

Tabla 2. Promedio de los ambientes y cultivares y resultado del ANOVA para la biomasa total a madurez fisiológica (BT_{MF}), el rendimiento en grano (**RG**), el índice de cosecha (**IC**), la evapotranspiración del cultivo (**ETC**), la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada ($IRFA_C$), las eficiencias en el uso del agua para producir grano y biomasa ($EUA_{RG,ETC}$, $EUA_{BT,ETC}$) en base a evapotranspiración del cultivo y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR_{BT})

		TRATAMIENTOS	BT_{MF}	RG	IC	ET_C	$IRFA_C$	$EUA_{RG,ETC}$	$EUA_{BT,ETC}$	EUR_{BT}
AMBIENTE	2016	Riego	1450	602	0,41	470	590	3,09	1,28	2,51
		Secano	1238	522	0,42	426	546	2,91	1,23	2,29
	2017	Riego	1612	552	0,34	434	749	3,72	1,28	2,18
		Secano	1454	492	0,34	382	687	3,79	1,29	2,12
		RH	717	252	0,36	236	558	3,02	1,07	1,30
	CULTIVAR	Ciclo Largo	BP (1980)	1281	395	0,31	401	722	3,19	0,98
KC (1991)			1504	512	0,33	411	750	3,64	1,22	2,01
KP (1997)			1521	500	0,33	407	749	3,71	1,21	2,01
BP11 (2004)			1319	516	0,40	398	659	3,32	1,29	1,98
B601 (2011)			1407	589	0,41	392	664	3,56	1,47	2,14
Media			1406	502	0,36	402	709	3,48	1,23	1,98
Ciclo Corto		MJI (1971)	1096	433	0,40	379	520	2,87	1,13	2,09
		PIF (1990)	1173	431	0,37	364	532	3,22	1,18	2,20
		PIG (2000)	1139	481	0,42	451	506	2,51	1,06	2,24
		ACR (2005)	1154	494	0,43	373	509	3,07	1,31	2,26
		BSY (2010)	1274	520	0,41	378	554	3,38	1,38	2,32
		Media	1167	472	0,41	389	524	3,01	1,21	2,22
SIGNIFICANCIA		Ambiente		***		***	***	***	***	ns
	Cultivar		***	***	***	***	***	***	***	***
	Amb \times Cul		***	***	*	***	***	***	***	ns

Nota: ***, **, * t significancia al $P < 0,001$, $P < 0,05$ y $P < 0,10$, y ns: $P > 0,10$ no significativo.

de ambientes generaron una variación de 120, 130, y 193 % para la EUA_{RG,ET_c} , EUA_{BT,ET_c} y EUR_{BT} (Tabla 2). En general, los menores valores de las variables analizadas se registraron en el ambiente de menor disponibilidad hídrica de la campaña 2017 (*i.e.*, 2017-RH). En relación a los cultivares, es importante destacar que no se registraron diferencias en rendimiento entre ciclos largos y cortos pero sí hubo diferencias en producción de biomasa e IC (considerando todos los ambientes). Los cultivares de CL presentaron mayor BT_{MF} pero menor IC que los cultivares de CC. Esta mayor producción de biomasa no fue consecuencia de un mayor consumo de agua puesto que la ET_c entre ambos grupos no difirió marcadamente. En cambio, si se registraron diferencias en $IRFA_c$ entre grupos de cultivares siendo mayor en los de CL. Por otro lado, los cultivares de CL registraron una EUA_{RG,ET_c} y EUA_{BT,ET_c} entre un 2 y 14 % mayor, mientras que la EUR fue 12% menor que los cultivares de CC en promedio a través de todos los ambientes (Tabla 2).

Finalmente, los efectos significativos de la interacción AMBIENTE x CULTIVAR en el rendimiento y la producción de biomasa ($P < 0,01$, Tabla 2) fueron evidentes debido a las mayores reducciones registradas en los cultivares de CC en estos dos caracteres en los ambientes más restrictivos (datos no mostrados). En lo que respecta a la captura de recursos, en general los cultivares de CC presentaron las mayores reducciones en la captura de radiación y agua (13 y 25 % para $IRFA_c$ y ET_c) en los ambientes de máxima restricción hídrica que los de CL (2 y 7 % para $IRFA_c$ y ET_c respectivamente). Finalmente, para las EUAs en general los cultivares de CC fueron los

que mayores valores registraron bajo condiciones potenciales mientras que lo contrario sucedió bajo condiciones de restricciones hídricas (datos no mostrados). Cuando los efectos ambientales fueron eliminados mediante el empleo de los desvíos relativos, efectos significativos del proceso de mejora fueron detectados en el rendimiento en ambos grupos de cultivares. Los valores de progreso del rendimiento fueron de 1,11 y 0,46 %/año para los cultivares de CL y CC, respectivamente. Dicha mejora estuvo acompañada de un incremento del IC en los cultivares de CL y de la producción de biomasa en los cultivares de CC (Figura 1). Por otro lado, es importante destacar que no se observaron efectos significativos del mejoramiento en la captura de agua y radiación entre los cultivares de CC pero sí en los de CL. Una reducción del 0,16 %/año de la ET_c durante todo el periodo analizado y del 1,11 %/ año a partir de 1997 para $IRFA_c$ fueron registrados entre los cultivares de CL (Figura 1). Esta reducción en la captura de agua coincide con lo observado en Australia desde principio de siglo XX hacia mediados de la década de los '80 (Siddique *et al.*, 1990). Esta reducción en ET_c registrada estaría asociado a una reducción de la longitud del ciclo en los cultivares modernos de CL que se registró en condiciones potenciales (Curin *et al.*, 2021). Es importante destacar que se registraron efectos significativos en las EUA_{RG,ET_c} y EUR_{BT} en ambos grupos de cultivares (para este último entre los cultivares de CC $P < 0,10$). Finalmente se detectaron efectos significativos sobre de la EUA_{BT,ET_c} sólo entre los grupos de cultivares de CC (Figura 1) lo cual coincidiría con lo registrado en Australia recientemente (Sadras y Lawson, 2013).

Conclusiones

El mejoramiento del trigo tuvo un efecto marcado en las EUAs, que no se pudo atribuir a variaciones en el consumo de agua de los cultivares (*i.e.*, ET_c)

y parecería estar exclusivamente relacionado con las variaciones registradas en EUR. Las mejoras observadas en las EUAs resultaron en mayor RG

sin cambios en la captura de agua, producto de una mayor partición de biomasa en los cultivares de CL y mayor producción de biomasa en los cultivares de CC. De esta forma validamos la hipótesis inicial planteada en la introducción de este trabajo.

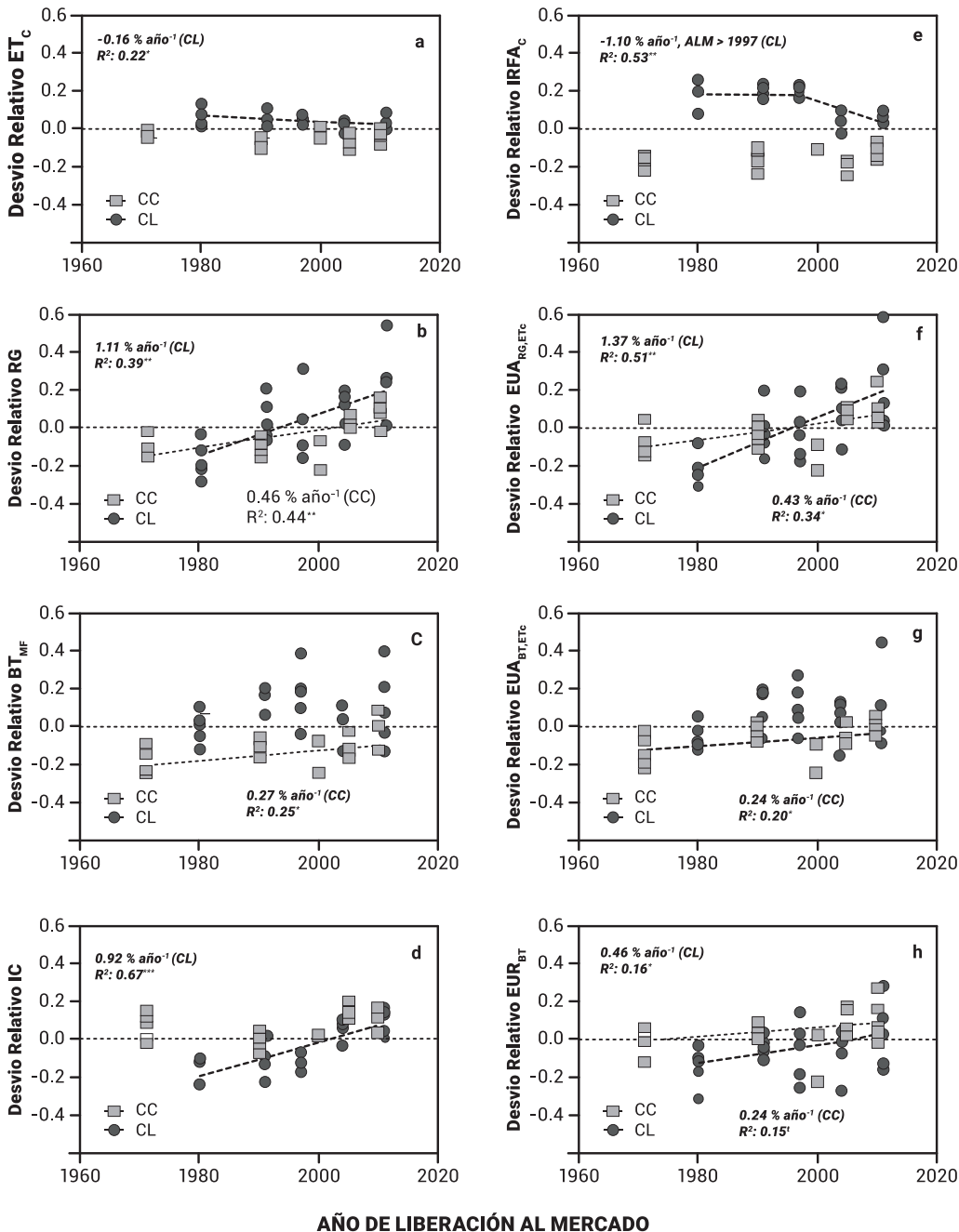


Figura 1. Respuesta de los desvíos relativos al año de liberación de los cultivares. Los datos corresponden a (a) evapotranspiración del cultivo (ET_c), (b) rendimiento en grano (RG), (c) biomasa total a madurez fisiológica (BT_{MF}), (d) índice de cosecha (IC), (e) radiación fotosintéticamente activa incidente acumulada ($IRFA_c$), (f) eficiencia en el uso del agua para producir grano (EUA_{RG,ET_c}), (g) eficiencia en el uso del agua para producir biomasa (EUA_{BT,ET_c}), (h) eficiencia en el uso de la radiación (EUR_{BT}). Los círculos y cuadrados representan a los cultivares de ciclo largo y ciclo corto respectivamente, Las líneas cortadas representan los modelos lineales significativos ajustados para los cultivares de CL y las líneas punteadas para los cultivares de CC

Bibliografía

Andriani, J. M.; Magnano, L.; Sanmartí, N. 2016. *Modelo "cuanti-cualitativo" de escurrimiento superficial del agua en suelos agrícolas de la Región Pampeana Argentina*. En: Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo 34 : 293–301.

Calderini, D. F.; Dreccer, M. F.; Slafer, G. A. 1997. *Consequences of breeding on biomass, radiation interception and radiation-use efficiency in wheat*. En: Field Crops Research. 52, 271–281.

Sadras, V. O.; Lawson, C. 2011. *Genetic gain in yield and associated changes in phenotype, trait plasticity and competitive ability of South Australian wheat varieties released between 1958 and 2007*. En: Crop Pasture Sci 62 : 533–549.

Sadras, V. O.; Lawson, C. 2013. *Nitrogen and water-use efficiency of Australian wheat varieties released between 1958 and 2007*. En: European Journal of Agronomy 46: 34–41.

Siddique, K. H. M.; Tennant, D.; Perry, M. W.; Belford, R. K. 1990. *Water use and water use efficiency of old and modern wheat cultivars in a Mediterranean-type environment*. En: Australian Journal Agricultural Research 41: 431–447.