

Evaluación de daño de heladas en respuesta a prácticas de manejo del cultivo de trigo (genética, fertilización, densidad, cobertura de rastrojo)

Campaña 2025-2026

Informe de resultados

Ing. Agr. Bernardo Batlle

Dr. Diego Hernán Rotili

Introducción

Se llevó a cabo un ensayo en el campo experimental de América Agroinnova con el objetivo de evaluar el impacto de las heladas ocurridas a lo largo del ciclo del cultivo de trigo sobre su crecimiento y sobre los principales determinantes del rendimiento, en respuesta a distintas prácticas de manejo aplicadas a campo. En este marco, se buscó cuantificar el efecto de las heladas sobre el cultivo y generar evidencia acerca de los mecanismos asociados a una mayor tolerancia o capacidad de recuperación frente a este tipo de estrés, en función de las variables de manejo evaluadas. El ensayo se realizó bajo condiciones de campo, utilizando prácticas representativas de la región del oeste de Buenos Aires, donde las heladas constituyen una de las principales limitantes para alcanzar altos niveles de productividad en trigo. En particular, se analizó el efecto de la cobertura de rastrojo, la densidad, la genética y la fertilización nitrogenada como posibles herramientas de manejo para mitigar el daño ocasionado por las heladas.

Un objetivo adicional fue educar a estudiantes de grado y posgrado residentes en Agroinnova en la manera de llevar a cabo un experimento a campo en una colaboración entre investigadores de universidades, productores agropecuarios y representantes de empresas desarrolladoras de insumos para el agro.

Materiales y Métodos

- Descripción general del ensayo:

El ensayo se sembró en el Campo Experimental de América Agroinnova, América, Buenos aires (35°25'45"S, 62°59'64"O), sobre un suelo franco arenoso (Hapludol típico), en posición de media loma baja, con capacidad de uso IIes, cuyo horizonte superficial (0-20 cm) contaba con 60% de arena, un pH de 6,5, 2,5% de materia orgánica y 20 ppm de fósforo extractable (P-Bray) y con un nivel de cobertura elevado (antecesor Maíz).

La fecha de siembra fue el 28/5 y se realizó con una sembradora de grano fino a chorrillo con surcos distanciados a 17.5 cm. Se fertilizó con 100 kg/ha de fosfato monoamónico (MAP)

al voleo previo a la siembra. La fertilización nitrogenada se realizó en macollaje, al voleo y fue variable en función de los tratamientos. Se realizó un barbecho corto dos semanas previo a la siembra en el cual se aplicó Glifosato 2 l/ha + 2.4D Enlist 1.5 l/ha, además de una aplicación de Paraquat 2 l/ha, con el objetivo de dejar libre de malezas el sitio experimental. En postemergencia, se aplicó dicamba 200 cc/ha, en el periodo de macollaje para suprimir el efecto de nuevos nacimientos de malezas registrados. Se realizó una aplicación de fungicida el 9/11, con Amistar Top a una dosis de 500 cc/ha. Todas las aplicaciones se realizaron con mochila manual. Se realizaron repasos manuales para remover individuos de especies maleza en etapas avanzadas del cultivo.

- Tratamientos y diseño experimental:

El ensayo se realizó en 4 bloques, dentro de los cuales se evaluaron cuatro factores: cobertura de rastrojo, variedad, densidad de siembra y fertilización nitrogenada. Debido a limitaciones operativas asociadas a la imposibilidad de aleatorizar el factor rastrojo a escala de parcela individual, este se dispuso en módulos o parcelas principales, correspondiendo cada módulo a uno de los cuatro tratamientos de cobertura evaluados: sin rastrojo, rastrojo simple, rastrojo doble y rastrojo simple protegido. El tratamiento sin rastrojo correspondió a parcelas en las que el residuo superficial fue removido. Dicho rastrojo fue depositado en la parcela adyacente generado el tratamiento de doble rastrojo. El tratamiento rastrojo simple representó la condición actual del lote y el tratamiento rastrojo simple protegido consistió en parcelas con rastrojo simple en las cuales el cultivo fue protegido frente a eventos de helada. Dicha protección consistió en cubrir la parcela principal con una cubierta plástica al anochecer y retirarlo al amanecer, en los días con pronóstico de heladas.

Dentro de cada bloque se establecieron, por lo tanto, 4 módulos de rastrojo, y dentro de cada uno de ellos se distribuyeron las combinaciones de los otros tres factores evaluados. El factor variedad incluyó dos cultivares de ciclo largo: DM Araucaria y Baguette 750, esta última representando la variedad con mayor tolerancia a heladas en pasto disponible en el mercado. El factor densidad comprendió dos niveles de siembra: 220 plantas/m² y 440 plantas/m². Por su parte, el factor fertilización nitrogenada incluyó dos dosis de urea: 140 kg/ha y 350 kg/ha.

La combinación de variedad × densidad × nitrógeno constituyó un arreglo factorial interno implantado dentro de cada módulo de rastrojo. Para cada una de estas combinaciones se dispusieron 4 repeticiones dentro de cada módulo, organizadas como 2 pseudoréplicas. De este modo, la estructura general del ensayo correspondió a un esquema de bloques con parcelas principales y subparcelas, donde el rastrojo actuó como factor de parcela principal y la combinación variedad × densidad × nitrógeno como tratamiento en la subparcela. Cada unidad experimental contó con 6 surcos de ancho y 8 metros de largo.

- Mediciones y estimaciones:

Se registró la fenología en visitas semanales desde la emergencia del cultivo. Desde estadios vegetativos tempranos hasta el final del llenado de granos, se realizaron estimaciones quincenales de la intercepción de radiación en cada parcela mediante un sensor GreenSeeker. Los registros obtenidos se transformaron a fracción de radiación fotosintéticamente activa

interceptada (fPAR) mediante el modelo propuesto por Pellegrini et al. (2020). Posteriormente, se calculó el área bajo la curva de fPAR en función del tiempo (AUC), con el objetivo de integrar en una única variable la magnitud y duración de la intercepción de radiación del cultivo durante el período analizado. Se obtuvieron datos de radiación incidente a través del NASAPOWER. A partir de estos registros, se estimó la radiación fotosintéticamente activa (PAR) incidente durante el período evaluado. Luego, la radiación incidente diaria se multiplicó por el valor de fPAR correspondiente para estimar la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo. Dado que las determinaciones de fPAR se realizaron en fechas discretas, entre dos mediciones consecutivas se estimaron valores intermedios de fPAR mediante interpolación, de modo de ponderar la fracción de radiación interceptada en los días sin medición directa. Finalmente, la suma de los valores diarios permitió calcular la radiación interceptada acumulada por el cultivo durante el período analizado.

Se midió la temperatura a partir de termómetros instalados a la altura del suelo en diferentes puntos de cada ensayo de cobertura de rastrojo. Para cada tratamiento de rastrojo, se dispusieron 2 termómetros. Cada termómetro incluía un datalogger que registró y guardó la temperatura cada 5 minutos. Adicionalmente, se instaló un termómetro en una casilla a 1,5 metros de altura para representar la diferencia de temperaturas que se suele registrar en casillas meteorológicas y las registradas al nivel del suelo (i.e. censadas por el cultivo). Se calculó la temperatura mínima diaria registrada para cada nivel de rastrojo como el valor más bajo dentro de las 24 hs entre los dos termómetros. A su vez, se sumó la cantidad de horas por debajo de los 3°C que presentó el cultivo en las distintas condiciones de rastrojo.

Luego de alcanzada la madurez fisiológica, se cosecharon todas las plantas contenidas en una superficie de 1,575 m² por parcela, correspondiente a 3 metros lineales de los tres surcos centrales. Cada muestra fue pesada con el fin de estimar la biomasa aérea total (BT). Para todas las muestras se asumió, de manera estandarizada, un contenido de materia seca del 95%. Posteriormente, las muestras fueron trilladas en una trilladora estacionaria; el grano obtenido fue pesado y se determinó su contenido de humedad para estimar el rendimiento en grano (RG). De cada muestra se tomó una submuestra de 200 granos, la cual fue pesada para estimar el peso de mil granos (PMG). Los valores de BT, RG y PMG fueron llevados a 0%HR para el posterior análisis. El número de granos por metro cuadrado (NG m⁻²) se calculó como el cociente entre el RG y PMG. A partir de los valores de BT y RG se estimó el índice de cosecha (IC). Asimismo, se calculó la eficiencia en el uso de la radiación para producción de biomasa (EURb) y para rendimiento (EURr), como el cociente entre la BT o RG de cada parcela, respectivamente, y la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (PAR acumulada) estimada previamente.

- Análisis de datos:

Para evaluar el efecto de los tratamientos sobre las variables medidas, se realizaron análisis de la varianza mediante modelos lineales mixtos. En todos los casos, los tratamientos se consideraron como efectos fijos y los bloques como efectos aleatorios. Se analizaron como variables el AUC, PAR acumulada, la BT, el RG, NG m⁻², el PMG, el IC, la EURb y la EURr. Cuando el efecto de los tratamientos resultó significativo, las medias se compararon mediante la prueba LSD de Fisher, con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Resultados

i) Descripción general de la fenología y condiciones ambientales

La emergencia del cultivo ocurrió el 17 de junio, momento en el cual las plantas se encontraban en Z1.0 según la escala de Zadoks, sin observarse diferencias de fecha de ocurrencia entre tratamientos. En cuanto a las densidades logradas, los tratamientos con doble rastrojo presentaron menores valores, con medias de 260 y 410 plantas m^{-2} para las densidades 1 y 2, respectivamente. En los restantes tratamientos de rastrojo, las densidades fueron superiores y no difirieron entre sí, con valores medios de 410 y 570 plantas m^{-2} para las densidades 1 y 2, respectivamente, superando en ambos casos las densidades objetivo planteadas. Así, el tratamiento de doble rastrojo causó una disminución de 37% de densidad lograda para la densidad 1 y de 28% para la densidad 2 (32% de disminución promedio del logro).

Las condiciones ambientales del ciclo se caracterizaron por un invierno más húmedo que el promedio histórico para la región, con una precipitación acumulada de 156 mm entre junio y agosto. En contraste, la primavera presentó precipitaciones inferiores al promedio, acumulando 171 mm entre septiembre y noviembre. De esta manera, la precipitación total registrada durante el ciclo del cultivo fue de 328 mm. La floración de ambas variedades se registró el 8 de octubre. En los días alrededor de esa fecha se observaron temperaturas máximas elevadas, con temperaturas máximas promedios para la semana posterior de 26,5°C, con máximas de 29,3 °C (datos obtenidos del NASAPOWER), junto con condiciones de fuertes vientos. Posteriormente, el 28 de octubre se registró una helada agronómica de 2 °C con una duración de 1 hora, la cual no tuvo efectos aparentes sobre el llenado de granos. El resto del período de llenado transcurrió bajo condiciones térmicas templadas favorables. Se registro la madurez fisiológica para ambas variedades el 21/11.

ii) Dinámica de las temperaturas mínimas

Las temperaturas mínimas registradas por los termómetros ubicados a nivel del suelo mostraron una dinámica diferencial entre tratamientos de rastrojo (Figura 2). En términos generales, para una misma fecha de medición, las mayores temperaturas mínimas se registraron en el tratamiento sin rastrojo, mientras que las menores correspondieron al tratamiento con doble rastrojo. Los tratamientos con rastrojo simple y rastrojo simple protegido presentaron valores intermedios, aunque con una dinámica más próxima al resto de los tratamientos con cobertura que al tratamiento sin rastrojo. Asimismo, las temperaturas registradas a nivel del suelo difirieron en general de las medidas en el abrigo meteorológico ubicado a 1,5 m de altura, siendo frecuente la ocurrencia de valores más bajos en los sensores próximos al suelo. Se registraron 19 heladas agronómicas en el abrigo, mientras que a nivel del suelo se contabilizaron 25, 27, 30 y 47 eventos para los tratamientos sin rastrojo, rastrojo simple, doble rastrojo y rastrojo simple protegido, respectivamente. La duración acumulada de temperaturas iguales o inferiores a 3 °C también fue mayor en los tratamientos medidos a nivel del suelo que en el abrigo, variando, además, en función de la cantidad de rastrojo en superficie. Se registraron 328 h en sin rastrojo, 355 h en rastrojo simple, 359 h en doble rastrojo y 269 h en el abrigo.

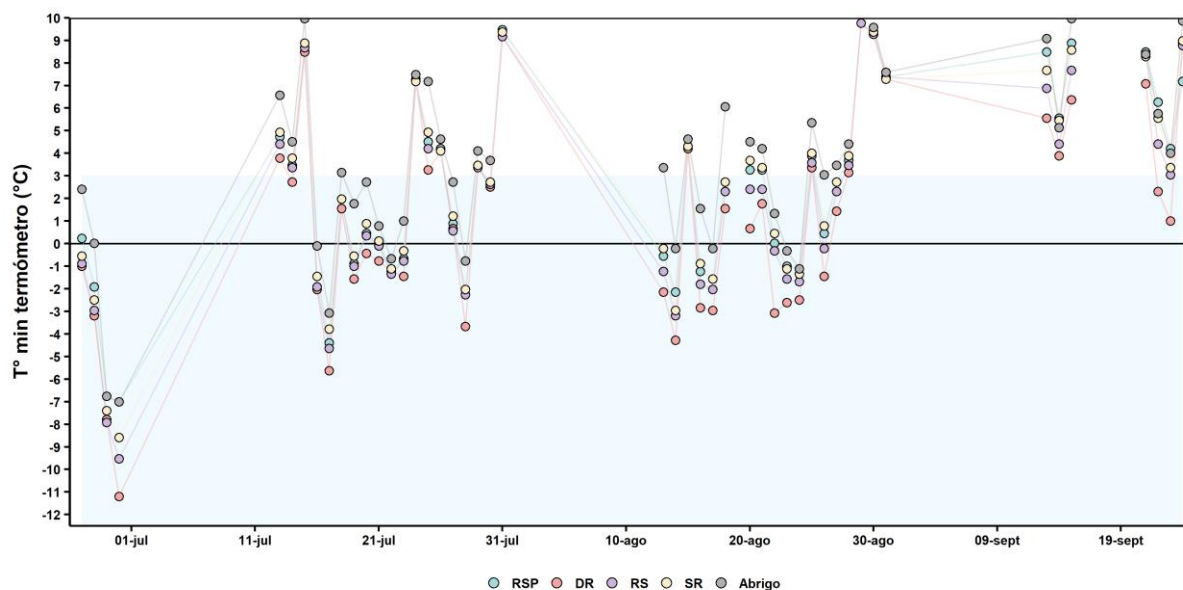


Figura 2. Dinámica de las temperaturas mínimas registradas por los termómetros ubicados próximos al suelo en los distintos tratamientos de rastrojo y en el abrigo meteorológico. Los puntos representan los valores mínimos diarios registrados en cada fecha. El área sombreada indica temperaturas iguales o inferiores a 3 °C, umbral considerado como helada agronómica. Referencias: RD = doble rastrojo; RS = rastrojo simple; RSP = rastrojo simple protegido; S/R = sin rastrojo; Abrigo = sensor ubicado a 1,5 m de altura.

iii) Estimación y comparación de la eficiencia de intercepción de la radiación

El área bajo la curva (AUC) del fPAR a lo largo del ciclo, expresada como una variable adimensional, presentó diferencias significativas para los factores rastrojo ($p < 0,001$), variedad ($p < 0,001$) y densidad ($p < 0,001$) (Tabla A1, Anexo). Los mayores valores de AUC se registraron en las parcelas sin rastrojo ($AUC = 68,28$), en la variedad Baguette 750 ($AUC = 65,09$) y en la densidad objetivo de 440 plantas m^{-2} ($AUC = 64,78$) (Figura 1). Las diferencias observadas en la AUC se explicaron principalmente por mayores valores de fPAR en los estadios iniciales del ciclo y en el período previo al período crítico. Al ingresar al período crítico, la mayoría de los tratamientos ya había alcanzado valores cercanos al 95% de intercepción, con excepción del tratamiento con doble rastrojo, que se mantuvo por debajo de ese umbral durante todo el ciclo.

En términos de dinámica, el tratamiento sin rastrojo presentó un crecimiento más rápido del fPAR al inicio del ciclo. Sin embargo, luego de alcanzar los valores máximos, mostró una caída más acelerada que el tratamiento con rastrojo simple protegido, el cual sostuvo valores elevados durante un período algo más prolongado. En el caso de la densidad, los mayores valores de AUC observados en la densidad objetivo de 440 plantas m^{-2} se debieron principalmente a una mayor intercepción de radiación al comienzo del ciclo y en la etapa previa al período crítico; posteriormente, durante el período crítico, las diferencias entre densidades tendieron a reducirse (Figura 1). Por su parte, la variedad Baguette 750 presentó mayores valores de fPAR durante prácticamente todo el ciclo, aunque la diferencia respecto de Araucaria se redujo en la segunda mitad del período crítico y en el llenado efectivo de granos (Figura 1).

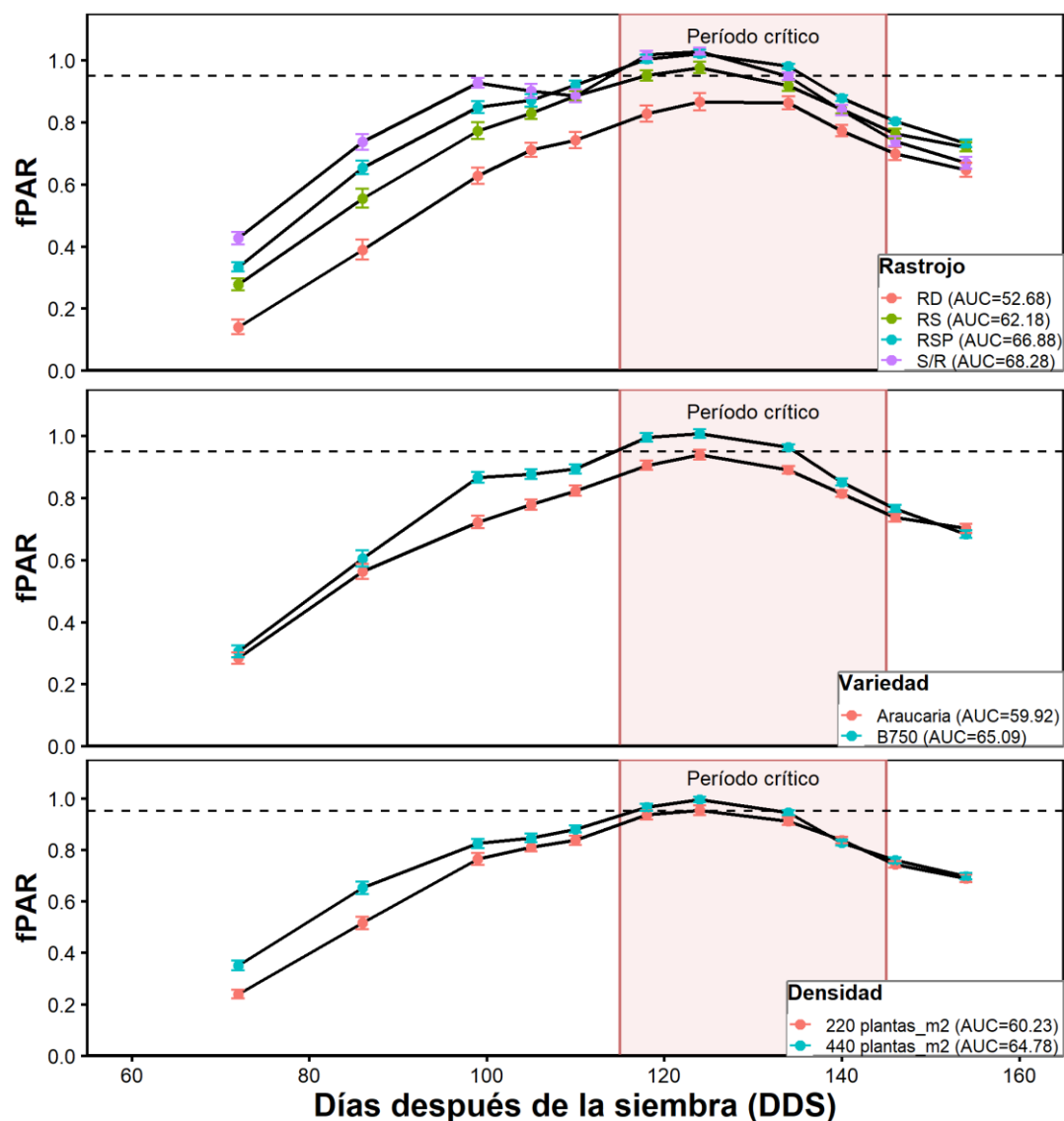


Figura 1. Dinámica de la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (fPAR) a lo largo del ciclo del cultivo en respuesta a los factores rastrojo, variedad y densidad. El área sombreada indica el período crítico y la línea punteada horizontal representa el 95% de intercepción. Referencias: RD = doble rastrojo; RS = rastrojo simple; RSP = rastrojo simple protegido; S/R = sin rastrojo.

La radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada durante el período evaluado presentó diferencias significativas para los factores rastrojo ($p < 0,0001$), variedad ($p = 0,0017$) y densidad ($p = 0,0008$) (Tabla 1), sin detectarse efectos significativos del nitrógeno ni de las interacciones entre factores (Tabla A1, Anexo). En términos generales, la PAR interceptada acumulada siguió el mismo patrón observado para la dinámica del fPAR a lo largo del ciclo, lo cual resulta esperable dado que su estimación deriva directamente de la radiación incidente diaria ponderada por los valores de fPAR.

Los mayores valores de PAR interceptada acumulada se registraron en las parcelas sin rastrojo (667) y con rastrojo simple protegido (661), sin diferencias entre ambos tratamientos, seguidos por rastrojo simple (619) y, finalmente, doble rastrojo (526). A su vez, la variedad Baguette 750 presentó una mayor PAR interceptada acumulada que Araucaria (638 vs. 598),

mientras que la densidad de 440 plantas m^{-2} superó a la de 220 plantas m^{-2} (640 vs. 597) (Tabla 1). Estos resultados indican que los tratamientos que alcanzaron mayores niveles de interceptación en las etapas iniciales y previas al período crítico fueron también los que acumularon una mayor cantidad de radiación interceptada durante el ciclo.

Tabla 1. Análisis de la varianza y comparación de medias (LSD Fisher; $\alpha = 0,05$) del efecto del rastrojo, la variedad y la densidad sobre la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (PAR acumulada) durante el período evaluado. Se indica el p-valor correspondiente al análisis de la varianza para cada factor. Letras diferentes dentro de cada factor indican diferencias significativas entre medias. Referencias: S/R = sin rastrojo; RSP = rastrojo simple protegido; RS = rastrojo simple; RD = doble rastrojo; V1 = Araucaria; V2 = Baguette 750; D1 = 220 plantas m^{-2} ; D2 = 440 plantas m^{-2} .

Rastrojo	PARacumulada	Variedad	PARacumulada	Densidad	PARacumulada
S/R	667 A	V2	638 A	D2	640 A
RSP	661 A	V1	598 B	D1	597 B
RS	619 B				
RD	526 C				
<i>p-valor</i>	<0,0001		0,0017		0,0008

iv) Biomasa, Rendimiento e IC

La Bt y el RG presentaron una interacción significativa rastrojo $\times$ variedad $\times$ densidad ($p = 0,0253$ y $p = 0,0196$, respectivamente) (Tabla 2 y 3). En Bt, los valores más altos se asociaron principalmente a combinaciones con rastrojo simple y sin rastrojo, mientras que los menores valores se registraron en combinaciones con rastrojo simple protegido y doble rastrojo. Los valores observados variaron entre 8.369 y 13.564 $kg\ ha^{-1}$ (Tabla 2). En RG, los mayores valores se asociaron principalmente a combinaciones con Araucaria y 440 plantas m^{-2} , mientras que los menores se registraron en combinaciones con Baguette 750, particularmente bajo alta densidad y en tratamientos con cobertura. Los valores observados oscilaron entre 3.032 y 5.693 $kg\ ha^{-1}$ (Tabla 3), con un valor promedio del ensayo de 4117 $kg\ ha^{-1}$.

Tabla 2. Comparación de medias (LSD Fisher; $\alpha = 0,05$) de la interacción rastrojo $\times$ variedad $\times$ densidad para biomasa aérea total. Los valores de biomasa se expresan en $kg\ ha^{-1}$; 0%HR. Se indica el p-valor correspondiente al análisis de la varianza para la interacción. Letras diferentes indican diferencias significativas entre combinaciones de tratamientos. Ref: S/R = sin rastrojo; RSP = rastrojo simple protegido; RS = rastrojo simple; RD = doble rastrojo; V1 = Araucaria; V2 = Baguette 750; D1 = 220 plantas m^{-2} ; D2 = 440 plantas m^{-2} .

Tratamiento	Biomasa	
RS V1 D2	13563	A
RS V2 D1	13492	A
S/R V2 D2	13400	A
S/R V2 D1	12950	A B
RD V1 D2	12712	A B
S/R V1 D1	12343	A B C
S/R V1 D2	11960	A B C D
RS V2 D2	11773	A B C D E
RD V2 D1	11470	A B C D E
RSP V1 D2	11140	B C D E
RS V1 D1	11010	B C D E
RD V1 D1	10970	B C D E
RSP V1 D1	10380	C D E F
RSP V2 D1	10004	D E F
RSP V2 D2	9720	E F
RD V2 D2	8370	F
<i>p-valor</i>	0,0253	

Tabla 3. Comparación de medias (LSD Fisher; $\alpha = 0,05$) de la interacción rastrojo $\times$ variedad $\times$ densidad para rendimiento en grano. Los valores de rendimiento se expresan en kg ha⁻¹; 0% HR. Se indica el p-valor correspondiente al análisis de la varianza para la interacción. Letras diferentes indican diferencias significativas entre combinaciones de tratamientos. Ref: S/R = sin rastrojo; RSP = rastrojo simple protegido; RS = rastrojo simple; RD = doble rastrojo; V1 = Araucaria; V2 = Baguette 750; D1 = 220 plantas m⁻²; D2 = 440 plantas m⁻².

Tratamiento	Rendimiento	
RS V1 D2	5693	A
S/R V1 D2	4913	B
RD V1 D2	4809	B C
RS V2 D1	4570	B C D
RD V2 D1	4416	B C D
S/R V1 D1	4371	B C D
RSP V1 D2	4280	B C D E
RS V2 D2	4233	B C D E
RS V1 D1	4170	C D E
S/R V2 D2	4152	C D E
S/R V2 D1	3979	D E F
RD V1 D1	3605	E F G
RSP V1 D1	3382	F G
RSP V2 D1	3181	G
RD V2 D2	3086	G
RSP V2 D2	3032	G
<i>p-valor</i>	0,0196	

El índice de cosecha presentó interacciones significativas rastrojo $\times$ variedad ($p = 0,0276$) y variedad $\times$ densidad ($p = 0,0167$) (Tabla 4). Considerando la interacción rastrojo $\times$ variedad, los mayores valores se asociaron a Araucaria bajo rastrojo simple y sin rastrojo,

mientras que los menores correspondieron a Baguette 750 en sin rastrojo y rastrojo simple protegido. A su vez, en la interacción variedad $\times$ densidad, el mayor índice de cosecha se observó en Araucaria con 440 plantas m^{-2} , mientras que las restantes combinaciones presentaron valores inferiores y no difirieron entre sí. Los valores observados variaron entre 0,31 y 0,41 (Tabla 4).

Tabla 4. Comparación de medias (LSD Fisher; $\alpha = 0,05$) para las interacciones rastrojo $\times$ variedad y variedad $\times$ densidad del índice de cosecha (IC). Se indican los p-valores correspondientes al análisis de la varianza para cada interacción. Letras diferentes indican diferencias significativas entre combinaciones de tratamientos. Referencias: S/R = sin rastrojo; RSP = rastrojo simple protegido; RS = rastrojo simple; RD = doble rastrojo; V1 = Araucaria; V2 = Baguette 750; D1 = 220 plantas m^{-2} ; D2 = 440 plantas m^{-2} .

Tratamiento		IC	
R X V	RS V1	0,41	A
	S/R V1	0,40	A B
	RD V2	0,38	A B
	RD V1	0,36	A B C
	RSP V1	0,36	B C
	RS V2	0,35	B C
	RSP V2	0,32	C
	S/R V2	0,31	C
<i>p-valor</i>		0,0276	
V X D	V1 D2	0,41	A
	V1 D1	0,35	B
	V2 D1	0,34	B
	V2 D2	0,34	B
<i>p-valor</i>		0,0167	

v) Componentes del rendimiento

El NG m^{-2} presentó una interacción significativa rastrojo $\times$ variedad $\times$ densidad ($p = 0,0240$) (Tabla A1, Anexo). En términos generales, los valores más altos se asociaron

principalmente a combinaciones con Araucaria y 440 plantas m^{-2} , mientras que los menores valores se registraron en combinaciones con Baguette 750, particularmente bajo alta densidad y en tratamientos con cobertura. Los valores observados variaron entre 8.951 y 16.409 granos m^{-2} (Tabla A1, Anexo). El número de granos fue el componente que explicó en mayor medida la variación en el rendimiento, evidenciando una estrecha asociación lineal entre ambas variables. El modelo lineal ajustado entre RG y NG presentó un coeficiente de determinación de 0,93 (Figura 3).

Por su parte, el P1000 presentó efectos significativos de rastrojo ($p = 0,0040$) y variedad ($p = 0,0212$) (Tabla 5), sin interacciones significativas entre factores (Tabla A1, Anexo). En este caso, los mayores valores se registraron en los tratamientos con rastrojo simple y doble rastrojo, mientras que los menores correspondieron al tratamiento sin rastrojo. A su vez, Baguette 750 presentó un mayor P1000 que Araucaria (Tabla 5). Los valores observados oscilaron entre 26,61 y 38,65 g (Figura 3).

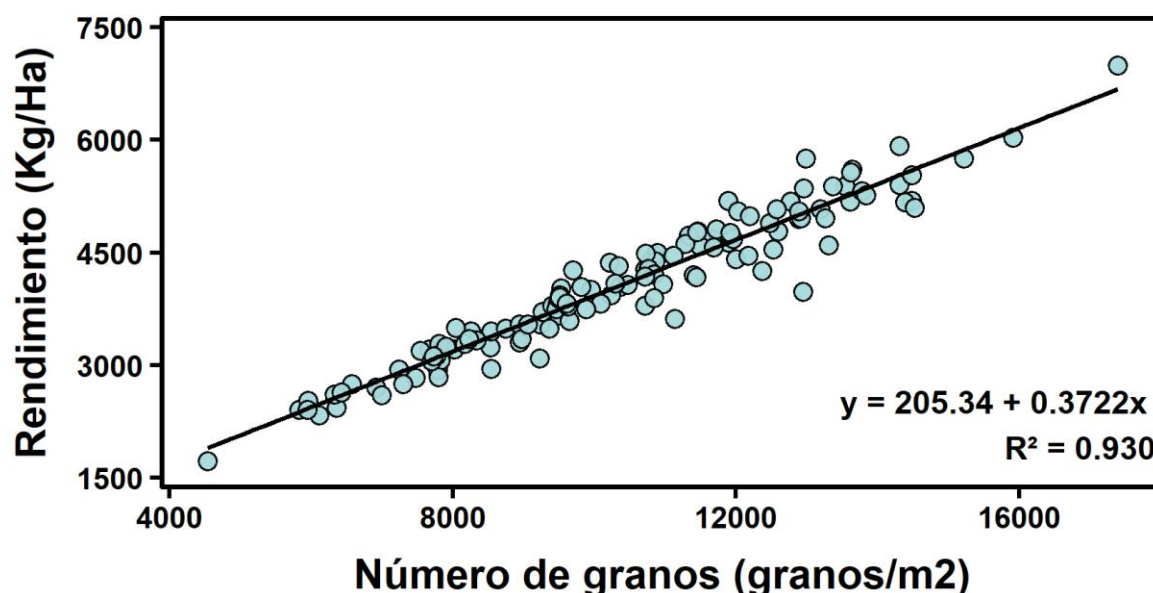


Figura 3. Relación entre el rendimiento en grano y el número de granos por unidad de superficie. Los puntos representan observaciones individuales y la línea indica la recta de regresión lineal ajustada entre ambas variables. En el gráfico se presenta la ecuación del modelo y el coeficiente de determinación (R^2).

Tabla 5. Comparación de medias (LSD Fisher; $\alpha = 0,05$) para el peso de mil granos (P1000) según los factores rastrojo y variedad. Se expresan los valores en g/0%HR. Se indican los p -valores correspondientes al análisis de la varianza para cada factor. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada factor. Ref: S/R = sin rastrojo; RSP = rastrojo simple protegido; RS = rastrojo simple; RD = doble rastrojo; V1 = Araucaria; V2 = Baguette 750.

Tratamiento	P1000	
RS	34,82	A
RD	34,37	A B
RSP	33,54	B C
S/R	33,23	C
<i>p-valor</i>		0,0040

Tratamiento	P1000	
V2	34,39	A
V1	33,59	B
<i>p-valor</i>		0,0212

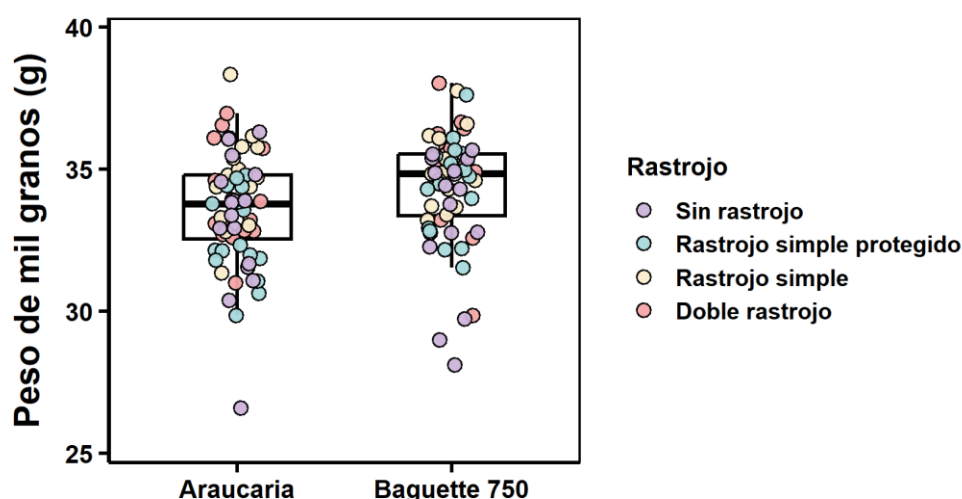


Figura 4. Boxplot para el peso de mil granos (P1000) en las variedades Araucaria y Baguette 750. Los puntos representan observaciones individuales y se colorean según el tratamiento de rastrojo.

vi) Eficiencia en el uso de la radiación

La eficiencia en el uso de la radiación para producción de biomasa (EURb) y para producción de rendimiento (EURr) presentaron una interacción significativa rastrojo $\times$ variedad $\times$ densidad ($p = 0,0225$ y $p = 0,0219$, respectivamente) (Tabla 5). En EURb, los valores más altos se asociaron principalmente a combinaciones con doble rastrojo y rastrojo simple, mientras que los menores valores se registraron en combinaciones con rastrojo simple protegido, particularmente cuando se combinaron con Baguette 750. Los valores observados variaron entre 1,38 y 2,36 g MJ⁻¹. Por su parte, la EURr mostró un patrón similar, aunque con mayor asociación de los valores más altos a combinaciones con Araucaria y 440 plantas m⁻² (Tabla 6). En este caso, los mayores valores correspondieron a combinaciones con rastrojo simple y doble rastrojo, mientras que los menores se registraron nuevamente en tratamientos con rastrojo simple protegido y Baguette 750. Los valores de EURr oscilaron entre 0,43 y 0,95 g MJ⁻¹.

Tabla 6. Comparación de medias (LSD Fisher; $\alpha = 0,05$) de la interacción rastrojo $\times$ variedad $\times$ densidad para la eficiencia en el uso de la radiación para producción de biomasa (EURb). Los valores de EURb se expresan en g MJ⁻¹. Se indica el p-valor correspondiente al análisis de la varianza para la interacción. Letras diferentes indican diferencias significativas entre combinaciones de tratamientos. Ref: S/R = sin rastrojo; RSP = rastrojo simple protegido; RS = rastrojo simple; RD = doble rastrojo; V1 = Araucaria; V2 = Baguette 750; D1 = 220 plantas m⁻²; D2 = 440 plantas m⁻².

Tratamiento	EURb	
RD V2 D1	2,36	A
RD V1 D2	2,34	A B
RS V1 D2	2,28	A B C
RD V1 D1	2,23	A B C D
RS V2 D1	2,15	A B C D E
S/R V2 D1	1,98	B C D E F
S/R V1 D1	1,94	C D E F
RS V1 D1	1,94	C D E F
S/R V2 D2	1,88	D E F
S/R V1 D2	1,82	E F G
RS V2 D2	1,79	E F G
RSP V1 D2	1,71	F G H
RSP V1 D1	1,69	F G H
RSP V2 D1	1,5	G H
RD V2 D2	1,48	G H
RSP V2 D2	1,38	H
<i>p-valor</i>	0,0225	

Tabla 7. Comparación de medias (LSD Fisher; $\alpha = 0,05$) de la interacción rastrojo $\times$ variedad $\times$ densidad para la eficiencia en el uso de la radiación para producción de rendimiento (EURr). Los valores de EURr se expresan en g MJ⁻¹. Se indica el p-valor correspondiente al análisis de la varianza para la interacción. Letras diferentes indican diferencias significativas entre combinaciones de tratamientos. Ref: S/R = sin rastrojo; RSP = rastrojo simple

protegido; RS = rastrojo simple; RD = doble rastrojo; V1 = Araucaria; V2 = Baguette 750; D1 = 220 plantas m⁻²; D2 = 440 plantas m⁻².

Tratamiento	EURr	
RS V1 D2	0,95	A
RD V2 D1	0,92	A
RD V1 D2	0,89	A B
RD V1 D1	0,76	B C
S/R V1 D2	0,74	C D
RS V2 D1	0,73	C D
RS V1 D1	0,73	C D
S/R V1 D1	0,69	C D E
RSP V1 D2	0,66	C D E
RS V2 D2	0,65	C D E
S/R V2 D1	0,61	D E F
S/R V2 D2	0,58	E F
RSP V1 D1	0,55	E F G
RD V2 D2	0,55	E F G
RSP V2 D1	0,48	F G
RSP V2 D2	0,43	G
<i>p-valor</i>	0,0219	

Conclusiones

La campaña se desarrolló con una oferta hídrica inicialmente favorable, sostenida por buenas recargas otoñales y un invierno más húmedo que el promedio, con 156 mm acumulados entre junio y agosto. Sin embargo, durante el trimestre septiembre-noviembre las precipitaciones fueron inferiores al promedio histórico y totalizaron 171 mm, generando un escenario de menor provisión hídrica hacia la etapa reproductiva. El rendimiento medio del ensayo fue de 4.117 kg ha⁻¹, inferior a los valores regionales de la campaña 25/26, que superaron los 6.000 kg ha⁻¹. Esta diferencia resulta consistente con la localización del ensayo en una posición de media loma, donde una menor capacidad de retención de agua del perfil y una probable mayor distancia a la napa habrían limitado la oferta hídrica respecto de la media regional.

Desde el punto de vista térmico, los registros obtenidos muestran que la temperatura medida en abrigo meteorológico no representó adecuadamente el ambiente térmico efectivamente explorado por el cultivo en el estrato próximo al suelo. Mientras que en el abrigo se registraron 19 heladas agronómicas y 269 h acumuladas con temperaturas ≤ 3 °C, a nivel del suelo se registraron 25, 27 y 30 eventos para sin rastrojo, rastrojo simple y doble rastrojo, respectivamente, con 328, 355 y 359 h acumuladas por debajo de ese umbral. En consecuencia, la caracterización térmica basada sólo en temperaturas de abrigo subestimó la intensidad, la frecuencia y la duración de las heladas en el estrato explorado por el cultivo.

La cobertura de rastrojo modificó de manera consistente las temperaturas mínimas medidas a nivel del suelo. En general, el tratamiento sin rastrojo presentó las temperaturas mínimas más altas, mientras que el doble rastrojo registró las más bajas, con una condición intermedia para el rastrojo simple y protegido. Este comportamiento indica que la presencia de cobertura alteró el intercambio térmico entre el suelo y el aire cercano al canopeo. Sin embargo, esa modificación del ambiente térmico no se tradujo por sí sola en una ventaja agronómica clara. En particular, el tratamiento con rastrojo simple protegido no mostró mejoras consistentes de rendimiento respecto de los restantes tratamientos, lo que indica que la atenuación parcial del enfriamiento no fue suficiente para generar una respuesta productiva favorable bajo las condiciones de esta campaña.

La interpretación agronómica de las heladas requiere considerar no sólo la temperatura mínima, sino también la duración de la exposición y el estado fenológico del cultivo. En este ensayo, la mayor parte de los eventos ocurrió antes de encañazón, es decir, en una fase en la que el cultivo presenta comparativamente mayor tolerancia a bajas temperaturas. A su vez, no se registraron cambios térmicos bruscos previos a los eventos que sugirieran procesos marcados de desaclimatación. En ese marco, no hubo evidencia de un escenario de heladas tardías severas ni de pérdida abrupta de tolerancia que permitiera esperar daños irreversibles generalizados sobre la definición del rendimiento. Por lo tanto, aunque el régimen térmico a nivel del suelo difirió entre tratamientos, el impacto de las heladas en pasto sobre la respuesta final del cultivo fue limitado.

Las principales diferencias entre tratamientos se expresaron con mayor claridad en la implantación, en el crecimiento inicial y en la dinámica de interceptación de radiación. El tratamiento sin rastrojo presentó una cobertura temprana más rápida, mayores valores iniciales de fPAR, mayor AUC y mayor PAR interceptada acumulada. Del mismo modo, las mayores densidades incrementaron la interceptación al inicio del ciclo, aunque luego esas diferencias tendieron a atenuarse. No obstante, estos contrastes tempranos no explicaron por sí solos la

respuesta final. Al aproximarse el período crítico, la mayoría de los tratamientos alcanzó niveles de intercepción cercanos al 95%, mientras que el doble rastrojo se mantuvo por debajo de ese valor durante todo el ciclo.

La menor intercepción observada en el doble rastrojo no puede atribuirse únicamente a diferencias térmicas. Frente a otros tratamientos con cobertura no se registraron contrastes de helada de magnitud suficiente como para explicar por sí solos esa respuesta. En cambio, los resultados de implantación indican que este tratamiento presentó sistemáticamente menores densidades logradas, lo que sugiere que la elevada cobertura condicionó el establecimiento del cultivo desde etapas tempranas. En ese sentido, una parte importante del efecto del rastrojo sobre la captura de radiación y sobre la productividad estuvo asociada a su impacto sobre la implantación y no exclusivamente a un efecto térmico directo.

El número de granos fue el componente que explicó en mayor medida las diferencias de rendimiento. Este resultado indica que la variación productiva estuvo determinada principalmente por los procesos ocurridos durante el período crítico, etapa en la que la tasa de crecimiento del cultivo adquiere un papel central en la definición del número de granos por unidad de superficie. En términos fisiológicos, una mayor tasa de crecimiento durante ese intervalo favorece la asignación de recursos a las estructuras reproductivas y aumenta la probabilidad de generación y supervivencia de granos, mientras que restricciones en ese momento se traducen en penalidades directas sobre este componente. En consecuencia, las diferencias observadas entre tratamientos durante las fases iniciales del ciclo no pueden interpretarse como determinantes del rendimiento por sí mismas, sino en función de su contribución a sostener una elevada intercepción de radiación y una alta tasa de crecimiento durante el período crítico. El peso de mil granos, en cambio, presentó diferencias entre tratamientos, pero con una capacidad explicativa menor respecto del rendimiento.

En este marco, las condiciones registradas alrededor de la floración (temperaturas máximas elevadas, viento y ausencia de precipitaciones significativa) pudieron haber restringido la tasa de crecimiento del cultivo en torno al período crítico. A ello se suma que, en aquellos tratamientos donde una mayor fracción del agua del sistema se habría perdido por evaporación directa del suelo, la eficiencia de uso del agua podría haber sido menor, debido a una menor proporción del consumo hídrico destinada a transpiración. Esta condición resulta consistente con una menor tasa de crecimiento durante la etapa de definición del número de granos y, en forma complementaria, con reducciones en el peso de mil granos. En conjunto, los resultados refuerzan que la respuesta del rendimiento se determinó principalmente por la capacidad de sostener crecimiento durante el período crítico.

La respuesta productiva observada estuvo explicada principalmente por la interacción entre rastrojo, variedad y densidad, y no por efectos aislados de los factores. Tanto la biomasa aérea total como el rendimiento en grano presentaron interacción significativa rastrojo $\times$ variedad $\times$ densidad, al igual que la eficiencia en el uso de la radiación para biomasa y para rendimiento. Esto indica que las diferencias entre tratamientos deben interpretarse a partir de combinaciones particulares de manejo y genotipo. En términos generales, los mayores rendimientos se asociaron a combinaciones con rastrojo simple, la variedad Araucaria y 440 plantas m^{-2} , mientras que los menores valores tendieron a corresponder a combinaciones con Baguette 750, especialmente en situaciones con cobertura y alta densidad. En la misma línea, el índice de cosecha presentó interacciones significativas rastrojo $\times$ variedad y variedad $\times$

densidad, reforzando que la respuesta del cultivo no quedó explicada adecuadamente por factores independientes.

Baguette 750 presentó, en general, mayores niveles de interceptación de radiación a lo largo del ciclo y también mayores valores de peso de mil granos. No obstante, esta variedad tendió a integrar las combinaciones de menor rendimiento. En consecuencia, los resultados indican que ni una mayor captura de radiación ni un mayor peso individual de grano fueron suficientes para compensar una menor generación de granos por unidad de superficie, que fue el componente que explicó en mayor medida la variación del rendimiento. Bajo esta interpretación, el mejor desempeño productivo de Araucaria se asocia a una mayor eficiencia en el uso de la radiación interceptada, tanto para la producción de biomasa como para el rendimiento.

Por otra parte, el nitrógeno no mostró efectos significativos sobre las variables evaluadas, por lo que no constituyó una fuente relevante de variación en la respuesta observada. En las condiciones de este ensayo, esto sugiere que la disponibilidad de N habría sido suficiente para sostener los niveles de rendimiento alcanzados aun con la dosis correspondiente al tratamiento de menor fertilización. En este marco, es razonable plantear que el aporte de esa dosis, sumado al N disponible en el suelo, habría alcanzado para cubrir los requerimientos del cultivo. El elevado contenido de materia orgánica del sitio y una campaña que presentó buenas precipitaciones invernales, son condiciones que podrían haber favorecido la mineralización y, en consecuencia, el aporte de N desde el suelo.

En conjunto, los resultados indican que, para las condiciones del oeste de Buenos Aires y en una campaña sin eventos severos de desaclimatación ni una intensidad o frecuencia inusualmente alta de heladas en pasto, las heladas tienen una incidencia limitada sobre la definición final del rendimiento. Las diferencias productivas observadas estuvieron asociadas principalmente a factores que condicionaron la implantación, la cobertura al inicio del período crítico, la conservación del agua y la capacidad del cultivo para sostener la tasa de crecimiento y definir número de granos en esa etapa. En este marco, no surge evidencia que justifique reorientar el manejo con el objetivo principal de mitigar heladas tempranas si ello compromete variables de mayor peso agronómico. Por el contrario, los resultados jerarquizan prácticas orientadas a asegurar una buena implantación y a definir combinaciones adecuadas de rastrojo, variedad y densidad que permitan sostener el crecimiento del cultivo durante el período crítico. Bajo campañas térmicamente cercanas al promedio, la elección de materiales de menor potencial productivo únicamente por una mayor tolerancia a heladas en pasto no aparece como una estrategia eficiente para maximizar producción.

Tabla A1. Medias de biomasa aérea total, rendimiento en grano, índice de cosecha (IC), número de granos (NG m^{-2}), peso de mil granos (P1000), PAR acumulada, AUC, eficiencia en el uso de la radiación para biomasa (EUR b) y para rendimiento (EUR r) para las distintas combinaciones de rastrojo, variedad, densidad y nitrógeno. En la sección inferior se indican los niveles de significancia del análisis de la varianza correspondiente a los efectos principales y a sus interacciones. ns = no significativo; * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$. Referencias: S/R = sin rastrojo; RSP = rastrojo simple protegido; RS = rastrojo simple; RD = doble rastrojo; V1 = Araucaria; V2 = Baguette 750; D1 = 220 plantas m^{-2} ; D2 = 440 plantas m^{-2} ; N1 = menor dosis de nitrógeno; N2 = mayor dosis de nitrógeno.

Tratamiento	Biomasa	Rendimiento	IC	NG m^{-2}	P1000	PAR acumulada	AUC	EUR b	EUR r
-------------	---------	-------------	----	--------------------	-------	------------------	-----	-------	-------

