

EFICIENCIA COMPARATIVA DE DIFERENTES FUENTES FOSFORADAS EN LA SECUENCIA TRIGO/SOJA

Ings Agrs Néstor González, Gustavo Ferraris y Carlos Devito.
INTA EEA Pergamino.

Introducción

Nuevas formulaciones y técnicas de aplicación para mejorar la fertilización se están adaptando en Argentina a partir de la introducción por parte de empresas fabricantes y distribuidoras de fertilizantes y de la respuesta del sector de maquinaria agrícola a la exigente demanda de productores líderes en siembra directa.

Las sembradoras de siembra directa son las máquinas que más vieron modificados todos los aspectos que hacen a la fertilización. La doble fertilización fue uno de los ejemplos de esta tendencia.

Paralelamente, se fueron introduciendo fertilizantes líquidos, principalmente nitrogenados, y se desarrollaron aplicadores adaptados a las sembradoras. En otros países como Estados Unidos se amplió la oferta de fertilizantes fosforados o mezclas, que al ser aplicados con la semilla pueden utilizarse como vehículo de otros agroquímicos, como insecticidas para control de insectos de suelo.

Los fertilizantes fosforados líquidos más comunes en EEUU son los polifosfatos de amonio, con contenidos similares de fósforo (P) y nitrógeno (N) a los fosfatos de amonio sólidos (granulados). También existen suspensiones líquidas de fosfatos de amonio. Entre las ventajas de los fertilizantes líquidos se pueden citar la facilidad de la aplicación y la uniformidad de la misma. En la actualidad, el mercado argentino dispone de soluciones y suspensiones líquidas, formuladas a partir de fosfato de amonio o ácido fosfórico.

Las plantas absorben la mayor parte del P del suelo como ión ortofosfato diácido H_2PO_4^- y en cantidades menores como ortofosfato monoácido $\text{HPO}_4^{=}$, la relación entre las cantidades absorbidas entre estas dos formas está fuertemente influenciado por el pH del suelo. Las plantas también pueden absorber P en otras formas, pero en pequeñas cantidades.

El objetivo de este experimento fue 1. Evaluar el efecto de dosis crecientes de fuentes fosforadas sólidas y líquidas sobre la emergencia y el rendimiento de trigo en siembra directa. 2. Cuantificar los efectos residuales de estas estrategias sobre soja de segunda. Hipotetizamos que 1. La emergencia de plantas es afectada por la dosis de P aplicada. 2. Nuevas formulaciones líquidas mejoran la eficiencia agronómica de los sólidos tradicionales y 3. La soja de segunda responde positivamente a la fertilización realizada en el cultivo de invierno, incrementado su productividad según la dosis de P aplicado.

Materiales y Métodos

Se realizó un experimento de campo en la localidad de Pergamino, sobre un suelo Serie Pergamino, Argiudol típico. El experimento fue conducido con un diseño en bloques completos al azar con cuatro repeticiones y tratamientos en arreglo factorial completo de 3 fuentes y 4 dosis de P. El detalle de los tratamientos se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: *Tratamientos evaluados en el ensayo.*

Tratamiento	Fertilizante	Dosis (kgP ha ⁻¹)	Dosis producto comercial (l o kg P ha ⁻¹)	localización
T1	P líquido	0	0	Localizado línea
T2	P líquido	10	264	Localizado línea
T3	P líquido	20	419	Localizado línea
T4	P líquido	30	600	Localizado línea
T5	SPS	0	0	Localizado línea
T6	SPS	10	111	Localizado línea
T7	SPS	20	222	Localizado línea
T8	SPS	30	333	Localizado línea
T9	SPT	0	0	Localizado línea
T10	SPT	10	50	Localizado línea
T11	SPT	20	100	Localizado línea
T12	SPT	30	150	Localizado línea

Las fuentes de fósforo evaluadas fueron, una suspensión líquida conteniendo 4%P (p/v), superfosfato Triple de Calcio (SPT, 0-20-0) y Superfosfato Simple de Calcio (SPS 0-9-0-12S). Todos los tratamientos fueron uniformados a igual dosis de N mediante la aplicación de Urea (0-46-0) 100 kg ha⁻¹ a la siembra, y UAN (32-0-0, densidad 1,32) 275 l ha⁻¹ en macollaje, totalizando 130 kg N ha⁻¹.

El ensayo fue sembrado el día 1 de Julio, con una sembradora experimental de siembra directa que distancia las hileras a 0,20 m. El antecesor fue soja de primera, y el cultivar sembrado Nidera Baguette 18. Se detectaron desde temprano pústulas de Roya anaranjada de la hoja (*Puccinia recondita*) y una moderada incidencia de manchas foliares (*Septoria tritici* y *Pyrenophora tritici-repentis*), por lo cual el cultivo fue tratado con *Pyraclostrobin* + *Epoxiconazole* (13,5 + 5%), a la dosis de 1000 ml ha⁻¹ en hoja bandera visible (Z 37).

Previo a la siembra, se realizó un análisis químico de suelo por bloque, cuyos resultados promedio se expresan en la Tabla 2. El sitio contaba con una adecuada disponibilidad hídrica inicial, que alcanzó a 135 mm de agua útil (0-140 cm).

Tabla 2: *Análisis de físico-químico de suelo a la siembra.*

Identificación	Pergamino 2010			Humedad suelo (siembra)	Condición Física
Prof cm	0-20		20-40 40-60		
Muestras N°	11055		11056		
pH	5,8	lig ácido		135 mm (0-140 cm) Normal a húmedo	Sin Compactación Ni erosión
CE	0,084	baja			
MO %	2,57	baja			
N total (%)	1,29	bajo			
Pe	10,7	medio			
N-NO3	9		4 + 3		
N kg/ha	41,6	medio			
S-SO4 kg/ha 0-60	31,2	bajo			
Ca (meq)	8,4	muy alto			
Mg (meq)	2,4	muy alto			
K (meq)	1,5	muy alto			

Sobre el cultivo de trigo se recontaron plantas emergidas, macollos fértiles y espigas. Se cuantificó la materia seca total producida y los rendimientos de grano. Con estas variables, se determinó el índice de cosecha aparente

Inmediatamente de cosechado el trigo fue sembrada la soja de segunda, el día 20 de diciembre, con una sembradora de siembra directa, espaciando las hileras a 0,42 m. La variedad fue Nidera 4613 RG. Las parcelas de soja no fueron fertilizadas nuevamente. Durante el ciclo, se realizaron aplicaciones del herbicida Glifosato, insecticidas, y una aplicación de fungicida para mantener el cultivo libre de malezas, plagas y enfermedades. La cosecha de soja se realizó recolectando los tres surcos centrales de la parcela mediante una máquina experimental.

Resultados y discusión

A) Características climáticas de la campaña

Trigo

En 2010, la reserva inicial de agua en el suelo fue muy adecuada, abasteciendo las necesidades del cultivo sin restricciones hasta noviembre, cuando la escasez de lluvias provocó un déficit moderado sin demasiado impacto en los rendimientos (Figura 1).

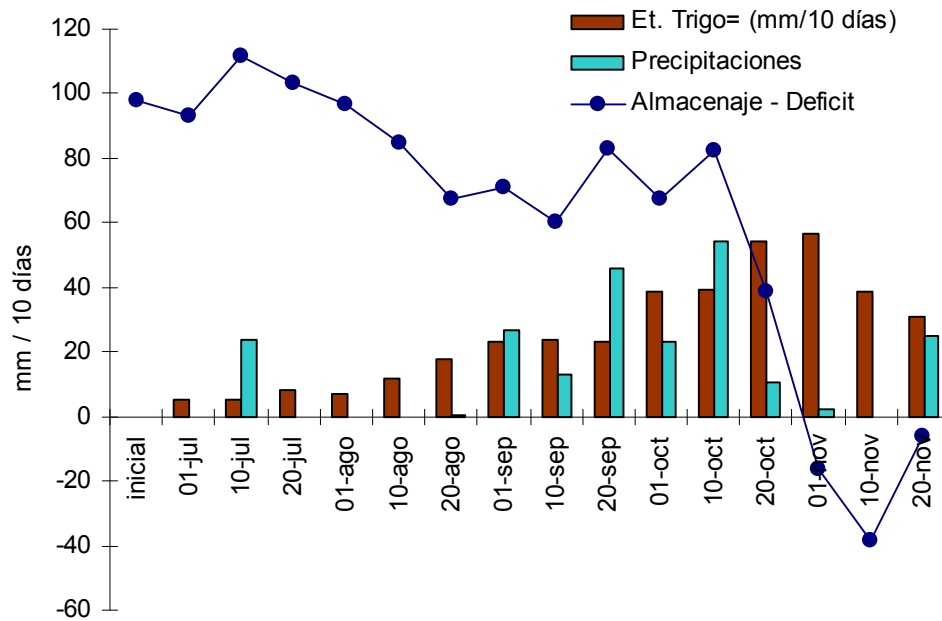


Figura 1: Evapotranspiración, precipitaciones y balance hídrico, expresados como lámina de agua útil (valores positivos) o déficit de evapotranspiración (valores negativos) para trigo en Pergamino. Valores acumulados cada 10 días en mm. Año 2010. Lámina de agua útil inicial (140 cm) 135 mm, déficit acumulado en el ciclo 61 mm.

En la Figura 2 se presenta el cociente fototermal (Q) (Fisher, 1985) el cual representa la relación existente entre la radiación efectiva diaria en superficie y la temperatura media diaria, y es una medida del potencial de crecimiento por unidad de tiempo térmico de desarrollo. Sin alcanzar los valores excepcionales de 2009, este índice fue favorable durante el ciclo 2010 (Tabla 3). Los rendimientos superiores del ciclo 2010 con relación a 2009 se explican en una mejor condición hídrica, producto de mayor almacenaje de agua al momento de sembrar el cultivo.

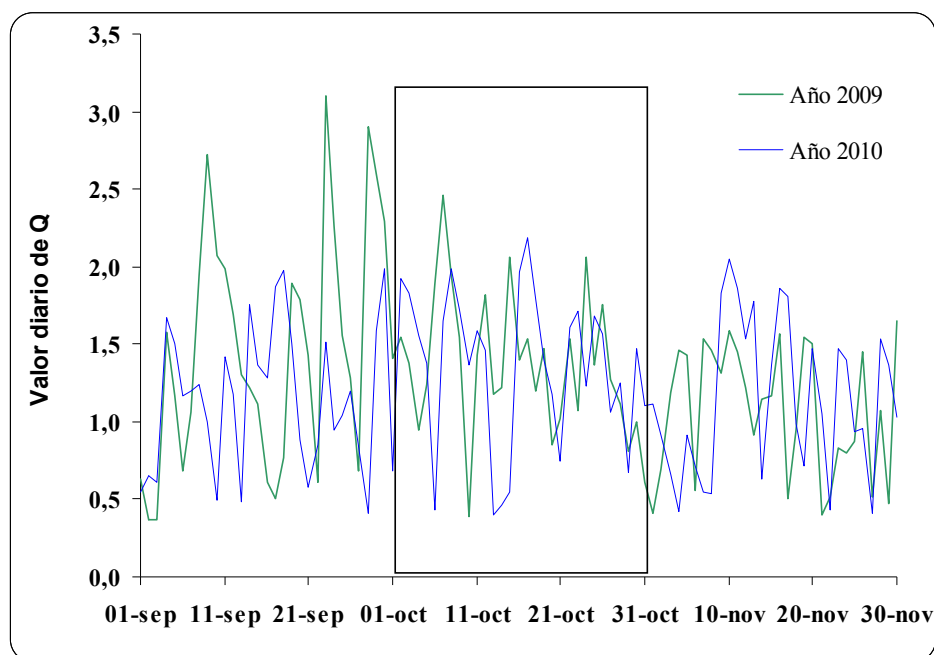


Figura 2: Coeficiente fototermal (Q) durante el ciclo de cultivo de trigo. La etapa abarcada por el rectángulo representa el período crítico para la definición del rendimiento. Pergamino, años 2009 y 2010.

Tabla 3: Insolación efectiva (hs), Temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) y Cociente fototermal Q (T base 0°C) para el período crítico del cultivo de Trigo en la localidad de Pergamino. Se tomó entre 15 de setiembre al 15 de Octubre durante los años 2005 a 2009, y del 1 al 30 de Octubre en 2010, por encontrarse las etapas desfasadas en el tiempo durante esta campaña.

Condiciones ambientales	Año 2005	Año 2006	Año 2007	Año 2008	Año 2009	Año 2010
Insolación Efectiva media (hs)	7,2	7,1	5,9	6,9	8,3	7,45
T media del período $^{\circ}\text{C}$	15,1	17,1	15,0	16,4	13,4	14,8
Cociente fototermal (Q) ($\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	1,24	1,10	1,12	1,10	1,56	1,34

Soja de segunda

En la Figura 3 se presentan las precipitaciones determinadas en el sitio experimental y la evapotranspiración del cultivo, así como el balance hídrico decádico. Aunque se partió con una escasísima reserva inicial, las precipitaciones fueron abundantes alcanzando a 583 mm en el ciclo de cultivo. Esto permitió recomponer las reservas a partir de enero, lo que posibilitó que el cultivo sólo experimentara 6 mm déficit durante su ciclo.

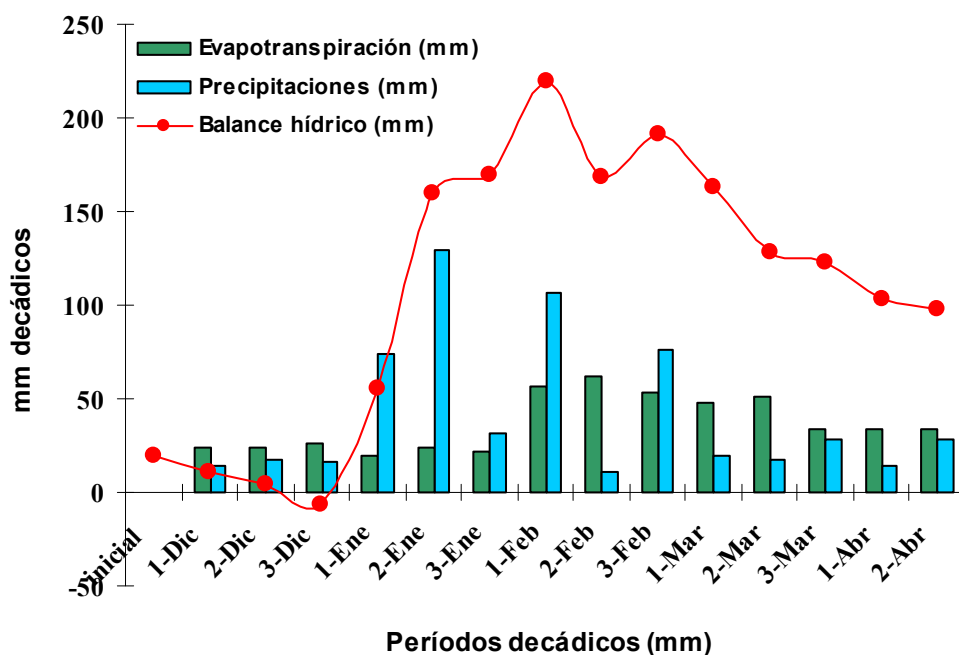


Figura 3: Precipitaciones, evapotranspiración y balance hídrico decádicos considerando 2 m de profundidad. Valores expresados como lámina de agua útil (valores positivos) o déficit de evapotranspiración (valores negativos) en mm. Pergamino, Bs As, campaña 2010/11. Precipitaciones totales 583 mm.

El 29 de julio se efectuó el recuento de plantas. Se tomaron las determinaciones en dos metros lineales en cada parcela. Los valores obtenidos aparecen en el siguiente cuadro:

b) Resultados del experimento: Variables de cultivo

Tabla 4: Número de plantas logradas/m²

Fuente de P	-----Dosis de P -----				Promedio Fuentes
	0	10	20	30	
P líq.	185,6	174,4	169,4	158,8	172,0
SPS	187,5	175,6	160,0	152,5	168,9
SPT	184,4	171,9	146,2	141,9	161,1
Promedio Dosis	185,8	174,0	158,5	151,0	

En la Tabla 4 se observa una clara disminución de la densidad de plantas a medida que aumenta la dosis de P, esto es por efecto de la fitotoxicidad del fertilizante aplicado en la línea de siembra junto a la semilla. La pendiente de caída de rendimiento fue menor en el P líquido, probablemente a causa de la mayor difusión de un fertilizante fluido, mientras que resultó máxima en SPT, evidenciando su mayor índice salino (Figura 4).

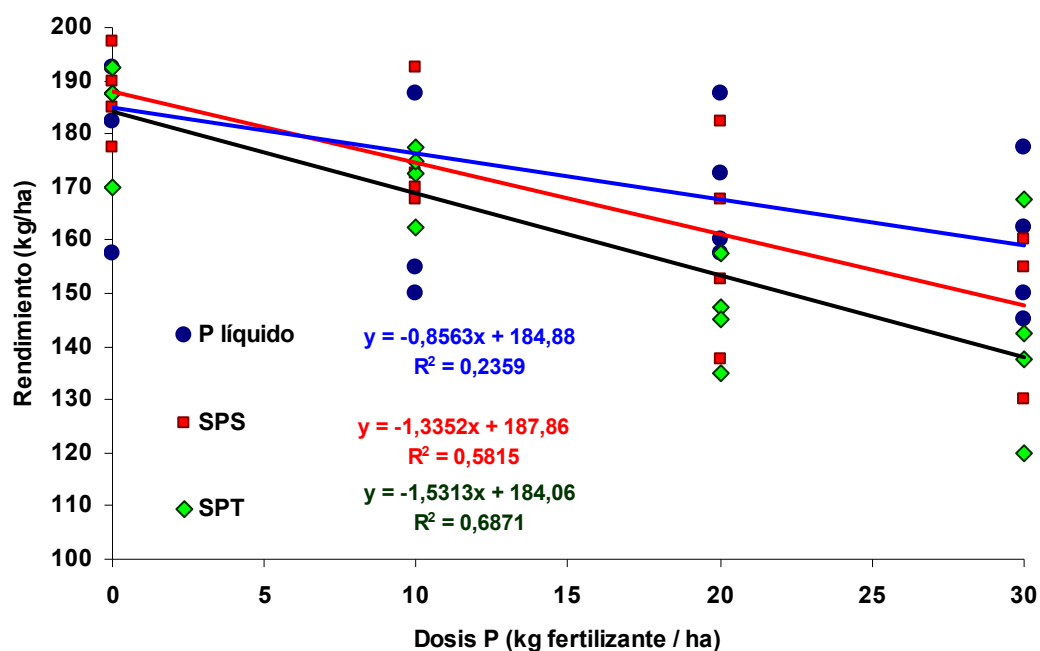


Figura 4: Emergencia de plantas según fuente y dosis de fertilizante fosforado en trigo. INTA EEA Pergamino, campaña 2010/11.

La cantidad de plantas logradas incluso en la parcelas de mayor dosis son suficientes para lograr un cultivo de alto rendimiento. Lo que ocurre en estos casos es que las parcelas con mayor dosis crecen más vigorosamente, macollan más y finalmente tienen mayor número de espigas y rendimiento final. En una situación extrema, tal es el caso que se hubiera aplicado una dosis mayor aún, y disminuyera drásticamente el número de plantas es probable que en estos tratamientos las plantas no podrían compensar la baja densidad con mayor macollaje y consecuentemente los rendimientos caerían.

Durante todo el ciclo del cultivo las condiciones climáticas fueron muy buenas para el desarrollo y crecimiento del cultivo, el agua acumulada en el perfil también contribuyó.

Durante el período de macollaje las parcelas con fertilizante fosforado mostraron un color verde más intenso y mayor crecimiento, desde encañazón en adelante las parcelas no mostraron diferencias apreciables a la vista.

Tabla 5: Número de espigas/m² a cosecha

Fuente de P	Dosis de P				Promedio Fuentes
	0	10	20	30	
P líq.	786	809	839	866	825
SPS	804	815	840	871	833
SPT	800	812	842	867	830
Promedio Dosis	797	812	840	868	

El número de espigas a cosecha mostró una tendencia a incrementarse con las dosis crecientes de P (Tabla 5). Las diferencias entre las fuente fosforadas fueron pequeñas.

Tabla 6: *Macollos Fértiles. Número de espigas/planta*

Fuente de P	.-----Dosis de P -----.				Promedio Fuentes
	0	10	20	30	
P líq.	4,2	4,6	5,0	5,5	4,8
SPS	4,3	4,6	5,3	5,7	5,0
SPT	4,3	4,7	5,8	6,1	5,2
Promedio Dosis	4,3	4,7	5,3	5,8	

Dividiendo el número de espigas por metro cuadrado por las plantas logradas en el estado de 2 hojas se calculó el número espigas por planta (Tabla 6). El número de macollos por planta aumentó con las dosis de P y no mostró diferencias notables entre fuentes. Los tratamientos con P más que compensaron las pérdidas de plantas por fitotoxicidad a la siembra, originando hasta 6 macollos fértiles (espigas) por planta.

Tabla 7: *Biomasa Total. Materia seca por hectárea.*

Fuente de P	.-----Dosis de P -----.				Promedio Fuentes
	0	10	20	30	
P líq.	17613	18504	19179	21309	19151
SPS	18414	19710	19872	21519	19879
SPT	17991	18927	19017	21897	19458
Promedio Dosis	18006	19047	19356	21575	

La biomasa total fue muy alta en todos los tratamientos (Tabla 7), esto se explica no sólo por lo altos rendimientos sino porque el Cultivar Baguette 18 utilizado en el ensayo tiene un gran porte y particularmente en este ensayo una altura de alrededor de 90 cm, muy pareja en todos los tratamientos. La biomasa total se incrementó con las dosis crecientes de P con alguna diferencia entre fuentes.

Respecto de los rendimientos, en trigo se determinó interacción efecto significativo de dosis ($P < 0,05$), tendencia diferente entre fuentes ($P < 0,10$), y ausencia de interacción fuente x dosis ($P > 0,10$). Esto significa que la respuesta a dosis fue similar entre fuentes: Los rendimientos se incrementaron conforme lo hiciera la dosis de P, de igual manera para los tres fertilizantes (Tabla 8, Figura 4). En soja, se determinó interacción significativa fuente x dosis, sugiriendo que la respuesta residual a dosis de P es diferente según la fuente utilizada (Tabla 8 y Figura 5).

Tabla 8: *Significancia estadística de los efectos de fuentes, dosis y su interacción.*

	Trigo	Soja 2da
Dosis (P=)	0,000	0,000
Fuente (P=)	0,082	0,026
Interacción Fuente *dosis (P=)	0,876	0,002
CV (%)	3,0 %	1,8 %

Tabla 9: Rendimiento en grano de Trigo (kg/ha)

Fuente de P	-----Dosis de P-----				Promedio Fuentes
	0	10	20	30	
P líq.	5655	5913	6146	6400	6028
SPS	5720	6045	6250	6663	6170
SPT	5640	5854	6142	6570	6052
Promedio Dosis	5672	5938	6179	6544	

Los rendimientos en grano al igual que la biomasa total tuvieron un fuerte incremento a medida que aumentaba la cantidad de P aplicado (Tabla 9). Escasas diferencias se encontraron entre fuentes, se esperaban rendimientos algo mayores en las parcelas con P líquido ya que aunque la cantidad de fosfatos disponibles para las plantas debería ser la misma en los tres casos, la mejor distribución en el surco y el mayor volumen de suelo con fertilizante deberían significar alguna ventaja para la fuente líquida.

Tabla 10: Respuestas al agregado de P (kg/ha).

Fuente de P	-----Dosis de P-----			Promedio Fuentes
	10	20	30	
P líq.	258	491	744	497
SPS	326	530	943	600
SPT	214	502	930	549
Promedio Dosis	266	508	872	

Las respuestas se calcularon restándole al rendimiento en grano de cada tratamiento el rendimiento del testigo correspondiente (Tabla 10). Las respuestas fueron altas en todas las dosis y no se detectaron incrementos decrecientes en las dosis altas. El índice de cosecha (Tabla 11) en general fue bajo, aunque estuvo en el rango esperable para cultivares de ciclo largo, y se podría explicar por dos factores: En primer lugar el cultivar de gran porte y en segundo lugar debido a que la mayoría de la espigas fueron originadas por macollos primarios y secundarios y el índice de cosecha individual de los macollos es menor al del tallo principal.

Tabla 11: Índice de Cosecha (%). Rendimiento en grano/Biomasa total aérea x 100

Fuente de P	-----Dosis de P-----				Promedio Fuentes
	0	10	20	30	
P líq.	32,1	32,0	32,0	32,9	32,2
SPS	31,1	30,7	31,5	31,0	31,0
SPT	31,3	30,9	32,3	30,0	31,1
Promedio Dosis	31,5	31,2	31,9	31,3	

En trigo, la pendiente, ordenada al origen y el modelo completo de respuesta no difirió entre fuentes ($P>0,10$). De acuerdo con las funciones ajustadas, el SPS fue la fuente de mayor pendiente, evidenciando efecto azufre (S) complementario al P (Figura 5). Sin embargo, la eficiencia residual dada por la pendiente de los incrementos en soja de 2da fue la menor de todas las fuentes (Figura 6). La pendiente de P líquido fue significativamente diferente de la correspondiente a las restantes fuentes ($P<0,01$), las cuales a su vez no difirieron entre sí ($P>0,10$) (Figura 6).

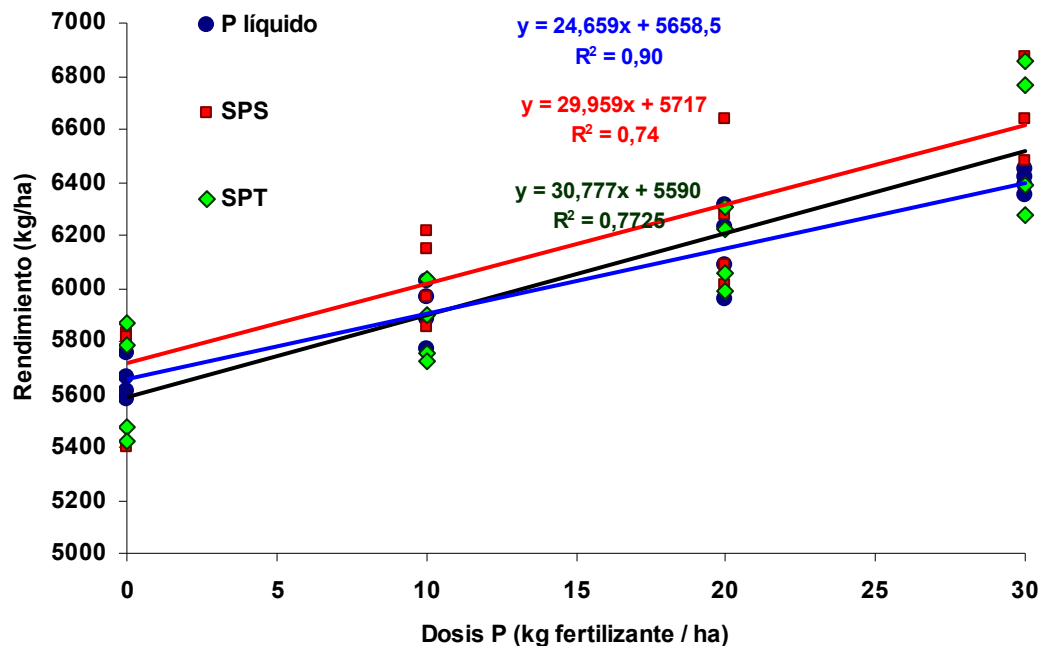


Figura 5: Rendimiento de grano de trigo (kg/ha) según fuente y dosis de P agregado a la siembra del cultivo. INTA EEA Pergamino, campaña 2010/11.

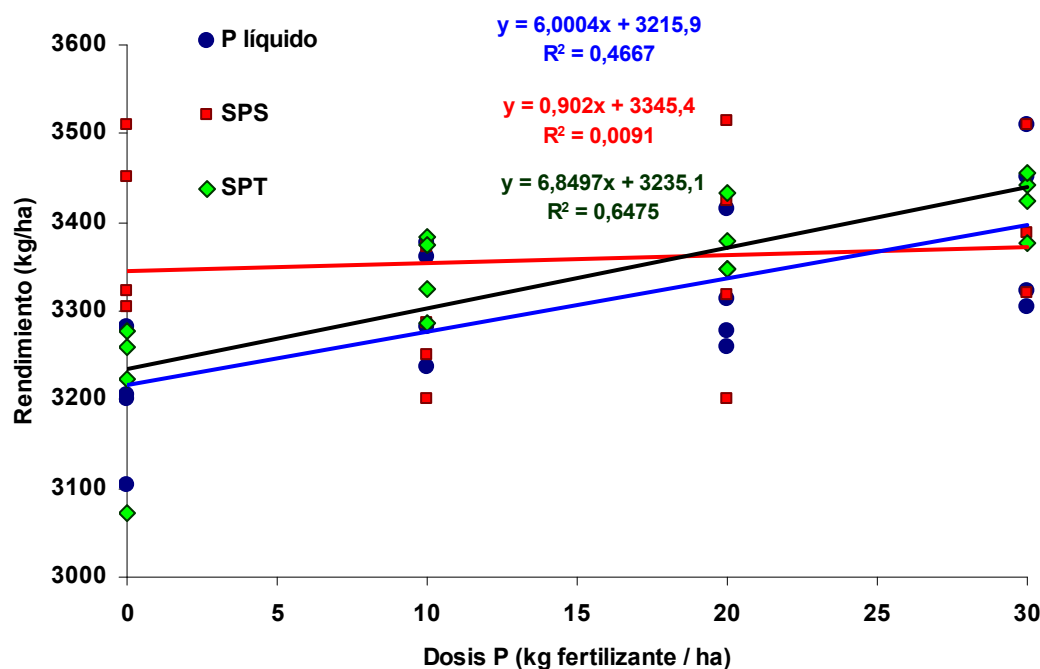


Figura 6: Rendimiento de grano de soja (kg/ha) según fuente y dosis de P agregado en el cultivo de trigo antecesor. INTA EEA Pergamino, campaña 2010/11.

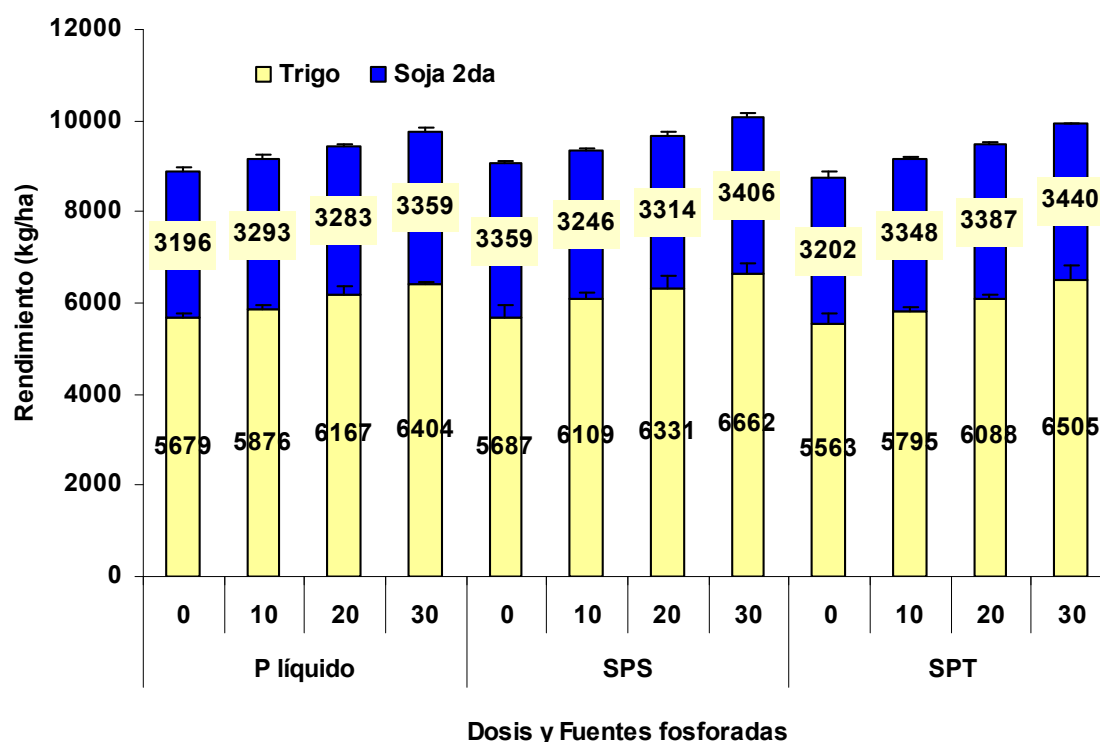
Tabla 12: *Efecto residual. Rendimiento en grano de soja de segunda (kg/ha)*

Fuente de P	Dosis de P				Promedio Fuentes
	0	10	20	30	
P líq.	3197	3314	3316	3397	3306
SPS	3194	3277	3364	3434	3317
SPT	3241	3342	3377	3424	3346
Promedio Dosis	3211	3311	3352	3419	

Los rendimientos en grano de soja de segunda tuvieron un leve incremento a medida que aumentaba la cantidad de P aplicado en trigo, aunque la pendiente de respuesta dependió de la dosis aplicada. Escasas a nulas diferencias se encontraron entre fuentes. La producción media acumulada siguió igualmente un efecto de dosis, sin diferencias entre fuentes (Figura 7).

Tabla 13: *Efecto residual en soja. Respuestas al agregado de P en Trigo (kg/ha).*

Fuente de P	Dosis de P			Promedio Fuentes
	10	20	30	
P líq.	117	119	200	145,3
SPS	83	170	240	164,3
SPT	101	136	183	140,3
Promedio Dosis	100,3	141,7	207,7	

**Figura 7:** *Rendimientos acumulados en la secuencia trigo-soja de segunda. Las barras de error representan la desviación standard de la media.*

Conclusiones

Los resultados obtenidos sugieren una respuesta directa en trigo, y considerable respuesta residual en soja de segunda, manifestando efecto de dosis en trigo y soja de segunda.

De acuerdo con estos resultados:

Se acepta la hipótesis 1, puesto que la emergencia fue menor al aumentar la dosis de P, y a su vez difirió entre fuentes, siendo menor en los líquidos a causa de su potencial de difusión-

La hipótesis 2 no es aceptada, considerando que la eficiencia para producir rendimiento fue similar entre fuentes.

La hipótesis 3 es aceptada, al comprobarse que dosis crecientes de P incrementan la respuesta residual en soja de segunda, siendo inferior cuando la fuente utilizada fue SPS.