

Fertilización con fósforo y azufre en dos variedades de alfalfa sobre un suelo deficiente de San Cristobal, Santa Fe

Hugo S. Vivas, Luis Romero y Juan Ibarlucea
INTA EEA Rafaela. Ruta 34. Km 227. Rafaela, Santa Fe.
*Contacto: hvivas@arnet.com.ar

INTRODUCCIÓN

La alfalfa es la leguminosa forrajera más productiva y nutritiva que se dispone en Argentina y en el mundo (Hijano y Basigalup, 1995; Russelle, 2001) y el centro de la provincia de Santa Fe participa con una gran superficie de la misma para la producción de leche y carne. La materia seca (MS) producida está en función de numerosos factores entre los cuales la nutrición del suelo a través de la fertilización es uno de los más relevantes. Otras variables agronómicas y ambientales que bajo sistemas de secano se pueden citar son la calidad de los suelos, donde la alfalfa se adapta a un amplio rango de clases, la distribución de las precipitaciones, el control de las malezas, variedades, enfermedades, etc.

En el año 2010 se detectaron suelos con valores inferiores a 25 mg kg^{-1} de fósforo extractable (Pe), considerados insuficientes para la producción de alfalfa (Knudsen y Rehm, 1977; Racca et al., 2001), en las cercanías de la localidad de San Cristóbal, en la periferia del domo occidental de la provincia. Si el área con dichas características se extiende, constituirá una amplitud de la señalada por Darwich (1983) y García (2001) para suelos deficientes de P dentro de la provincia de Santa Fe. La deficiencia de este nutriente constituye un grave problema para los sistemas productivos y es necesario investigar su magnitud para transferir las posibles soluciones a suelos con similares condiciones nutricionales.

En la región centro de Santa Fe se comenzó a investigar y generar información sobre fertilización de alfalfa en la campaña 1994/95 y los primeros resultados estimularon la continuidad a través de los años (Vivas, 1995; Vivas y Guaita, 1997a; b; Vivas y Quaino, 2000; Vivas y Romero, 2004). En los primeros años, el P fue el factor dominante por la evidencia de las respuestas. Deficiente en el centro y el este, pero suficiente en el oeste. Nutriente imprescindible para la transferencia energética, la planta lo absorbe del suelo como

elementos inorgánicos denominados iones ortofosfatos (H_2PO_4^- o HPO_4^{2-}) de buena efectividad para estimular un rápido sistema radicular. El H_2PO_4^- es la forma dominante a pH ligeramente ácido o neutro, por el contrario el HPO_4^{2-} lo es a pH más alcalinos. El P contribuye a la fijación del anhídrido carbónico y facilita la fijación del nitrógeno (N) atmosférico a través de la enzima nitrogenasa (Lanyon y Griffith, 1988). A diferencia del N, el P como fosfato (PO_4^{3-}) no puede ser fijado desde la atmósfera y su corrección solo es posible a través de la aplicación de fertilizantes (Culot, 1986). Como nutriente nativo se encuentra en la materia orgánica (MO) y en muy baja concentración en la solución inorgánica del suelo, desde donde las plantas lo absorben (Ozanne, 1980). Son necesarios valores apropiados de la fracción inorgánica, para lograr un rápido crecimiento y desarrollo de las plántulas y una adecuada producción de forraje. El P se recicla alrededor del 40% en los residuos y 60-70% a través del bosteo animal (Barrow, 1975). Se mantiene en superficie con muy poca movilidad y es incorporado por la microfauna o los procesos mecánicos de siembra. La deficiencia de P en alfalfa se manifiesta por la restricción del crecimiento y la altura de las plantas. Es un nutriente estratégico, pues no se produce en Argentina por ausencia de roca fosfórica.

Por la asociación del P con el azufre (S) y por estar igualmente relacionados a las proteínas de la alfalfa se decidió utilizar ambos como fertilizantes, por la respuesta encontrada en otros sitios por Vivas et al. (2001). En la planta, el S se absorbe bajo la forma de azufre de sulfatos (S-SO_4^{2-}). Por la relación de estructura química entre los fosfatos y los sulfatos en el suelo, la fertilización fosfatada contribuiría a liberar sulfatos (SO_4^{2-}) adsorbidos en las arcillas del suelo, aumentando su disponibilidad para la planta (Chao et al., 1962). Esta hipótesis luego fue constatada en laboratorio por Hoeft et al. (1973), quienes experimentaron y demostraron la capacidad del P en solución como

extractante del S. Los síntomas de deficiencia de S en la planta se manifiestan como clorosis o falta de N en las hojas superiores debido a que los SO_4^{2-} absorbidos no son suficientes y dada la escasa movilidad no migran a las hojas superiores más jóvenes.

A diferencia de los PO_4^- , muy poco móviles en el suelo, los SO_4^{2-} tienen movilidad equivalente al nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-) (Havlin et al., 1999). Un suelo se considera deficiente cuando contiene menos de 10 mg kg^{-1} de S-SO_4^{2-} . No obstante, algunas técnicas de análisis no tienen la precisión suficiente y existen muchas variaciones en los resultados. Por ello, la búsqueda de alternativas para mejorar el diagnóstico de suelos deficientes como el índice de deficiencia de S (IDS) ofrecido por Salvagiotti et al. (2012). Por la movilidad del S se observó que migra gradualmente y tiende a acumularse alrededor de los 60 cm de profundidad donde hay mayor concentración de arcillas (Vivas, et al., 2000; 2010, inédito). Según Spencer (1975), la alfalfa puede demandar rangos de $30\text{-}70 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de S o más. Entre las primeras respuestas positivas de la fertilización de alfalfa con S en el centro de Santa Fe se pueden mencionar, entre otras a Vivas et al. (2001) y Vivas y Romero (2004). El S como fertilizante, a diferencia del P no se destaca por tener un gran efecto arrancador.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la producción de forraje de dos variedades de alfalfa fertilizadas con P y S, separados y combinados, para un sitio del domo occidental con bajos niveles de Pe y sin antecedentes de fertilización.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se instaló en la localidad de San Cristobal, Departamento del mismo nombre, sobre un suelo Clase 3/4ws y un índice de aptitud 58. Corresponde a la Unidad Cartográfica PEA 31, serie Petronila 31 (Argiudol ácuico, arcillosa fina, mixta, térmica), integrado por los complejos: Petronila, PEA 40%, María Luisa, MLA 20%, Cululú, CUL 20%, Río Salado, RSA10% y Jacinto Arauz, JAZ10%.

El suelo fue muestreado con un barreno hidráulico en todo el perfil. La secuencia de horizontes fue: A= 0-16 cm, B21t= 16-32cm, B22t= 33-43cm, B23= 43-68cm, B31= 68-88cm, B32= 88-120cm y C= > a 120 cm. Se analizó el P por Bray I, la MO, la conductividad eléctrica (CE), el pH y el contenido de azufre como S-SO_4^{2-} por turbidimetría. El contenido de Pe, según el orden de los horizontes

fue 9.4, 3.2, 12.3, 23.6, 40.1, 40.1 y 50.5 mg kg^{-1} , respectivamente. Los valores de S-SO_4^{2-} fueron de 32.2, 30.7, 68.4, 111.5, 153, 118.5 y 85 mg kg^{-1} , respectivamente. Según los datos analíticos el contenido de Pe en los primeros cuatro horizontes fue inferior a los 25 mg kg^{-1} necesarios para una óptima producción de alfalfa.

En contraste, el nivel de S-SO_4^{2-} fue muy alto en todos los horizontes, superando los $10\text{-}15 \text{ mg kg}^{-1}$ considerados como referencia. Dada la poca certeza en la técnica de análisis para S-SO_4^{2-} , a la hora de establecer umbrales de respuesta, igualmente se decidió utilizar el S como tratamiento.

Referido al manejo del cultivo, posterior a la aplicación de glifosato (2.5 l ha^{-1}) como barbecho químico, el laboreo convencional a nivel productor comprendió pasajes de rastra de discos liviano y dientes. La fertilización con P y S se realizó al momento de la siembra (28-04-2010) aplicando al voleo con remoción del suelo e incorporación superficial. El P fertilizante se aplicó bajo la forma de superfosfato triple de calcio ($\text{P= } 20\%$) $\text{P40= } 40 \text{ kg P ha}^{-1}$ y el S bajo la forma de yeso agrícola ($\text{S= } 20\%$) $\text{S40= } 40 \text{ kg P ha}^{-1}$. Se utilizaron dos variedades de alfalfa: Supermonarca INTA-Produsem y GAPP 969+. Supermonarca es una variedad del Grupo 8 que según sus creadores supera a numerosas variedades tradicionales, tiene un porte semierecto y gran foliosidad. Por su parte GAPP 969+ es una variedad del Grupo 9, de porte erecto, muy foliosa y adaptada para sistemas de alta producción de leche o carne. Como herbicida preemergente se utilizó Preside ($0,4 \text{ l ha}^{-1}\text{-p.a.} = \text{flumetsulam}$) y como post-emergente en la primavera de cada año el gramínicida Select ($0,650 \text{ l ha}^{-1}\text{-p.a.} = \text{cletodim}$). Para la protección de insectos se hicieron 3 aplicaciones por año de Alstystin ($0.05 \text{ l ha}^{-1}\text{- p.a.} = \text{triflururon}$).

Se utilizó un diseño de parcelas divididas en bloques completos al azar con tres repeticiones. La gran parcela fueron las Variedades (Supermonarca INTA-Produsem y GAPP 969+) y como subparcelas los tratamientos: Testigo, P40, S40 y P40+S40 . A partir del 13-10-11 las dosis de P y S fueron repetidas. Las unidades experimentales fueron de $1 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, evaluándose el total de la parcela cuando la alfalfa se encontraba en el estado de botón floral o con rebrotes basales no mayores de 5 cm. Se evitó el efecto borduras mediante la siembra de parcelas extras con dicho propósito. Luego del 7° corte se analizó nuevamente el suelo (0-20 cm) para P de en todos los tratamientos. Como en su mayoría

no alcanzaban los valores recomendados, el 13-10-11 se repitieron las dosis iniciales de fertilizante tanto de P (40 kg P ha^{-1}) como de S (40 kg S ha^{-1}) solos y combinados. En este trabajo se evaluaron 19 cortes individuales y sus valores acumulados.

Los datos de la MS fueron estudiados mediante el análisis de la variancia para un nivel de significancia del 5% y para la comparación de medias se utilizó el test LSD, SAS (2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El factor ambiental que condiciona anualmente la producción de forraje de alfalfa, por defecto o por exceso, es la distribución de las precipitaciones. En la **Figura 1** se presentan los valores mensuales (siempre variables) e históricos disponibles en la AER San Cristóbal.

Como la siembra fue el 28-04-10, las lluvias próximas a la misma, facilitaron una buena emergencia de la alfalfa. Posteriormente, los 58 mm de mayo posibilitaron superar los meses de junio, julio y agosto, naturalmente más escasos y con menos evapotranspiración. Setiembre con 50 mm y la alfalfa con el sistema radicular bastante desarrollado se podría asumir que pudo superar la escasez de octubre y noviembre. Diciembre/2010 con 179 mm y enero/2011 con 244 mm superaron al promedio histórico. Luego desde marzo/11 hasta agosto/11 la recepción fue bastante pareja y comienzan las diferencias en setiembre/2011 con 241 mm con un extremo en diciembre/2011 con 17 mm. En la primavera del 2012, las precipitaciones fueron superiores o iguales a la histórica. De este modo se puede continuar la comparación de las precipitaciones hasta febrero de 2013.

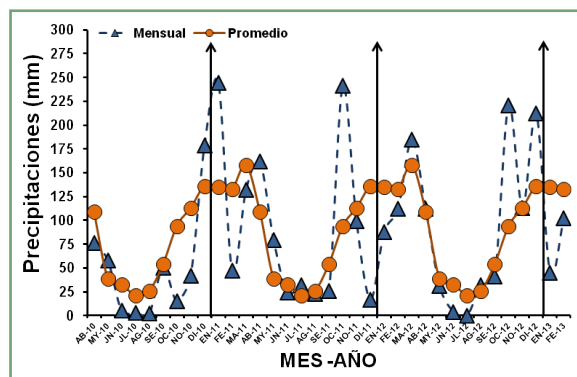


Figura 1. Distribución de precipitaciones en la localidad de San Cristóbal, promedio histórico (círculos, 1960-2013) y mensual (triángulos) ocurridos durante el período de evaluación del ensayo (Abril 2010-Febrero 2013).

Previo al ensayo se tomaron muestras del suelo en todo el perfil hasta 120 cm de profundidad y la descripción y distribución de los componentes químicos se pueden apreciar en las **Figuras 2 y 3**. En la primera se muestran los valores del P en superficie con un promedio de 9.4 mg kg^{-1} , que según la bibliografía son bajos para la producción de alfalfa (Racca et al., 2001; Knudsen y Rehm, 1977). Por lo tanto, la hipótesis de obtener respuestas a la fertilización fosfatada de alfalfa en dicho suelo fue consistente, al menos para los primeros cortes ya que luego de los 60 cm de profundidad la concentración de este índice superó los 25 mg kg^{-1} . Aunque el aumento fue positivo, posiblemente la absorción por las raíces a mayor profundidad podría no ser tan sencilla porque en dichos horizontes existe mayor cantidad de arcilla, que retiene demasiado a los aniones fosfatos.

La denominación de horizontes en la **Figura 2** solo se refiere al perfil de San Cristóbal. Contrastando los datos anteriores se observa otro perfil bien provisto correspondiente a la serie Rafaela, suelo de clase I, profundo y muy productivo para forraje de alfalfa, que en parte se justifica por los altos niveles de Pe, frecuente en el domo

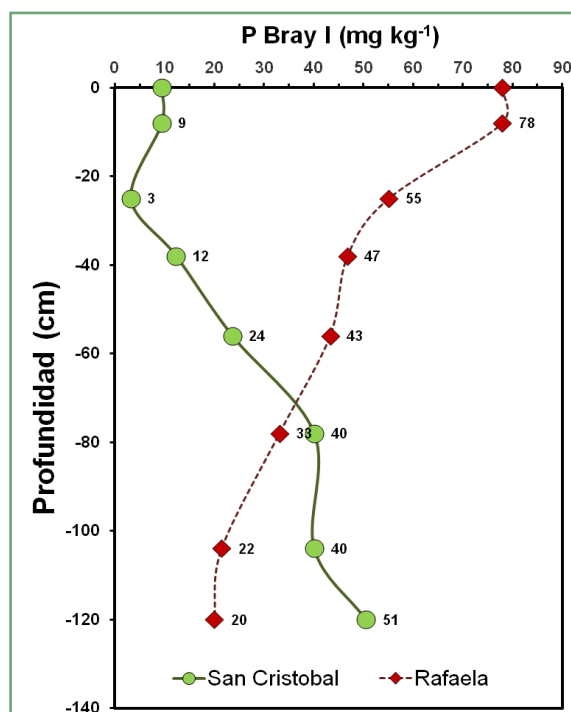


Figura 2. Distribución del Pe (Bray-I) en un suelo de San Cristóbal (círculos) comparado con otro muy bien provisto del domo occidental de la provincia como la Serie Rafaela (diamantes).

occidental de Santa Fe, aunque en los últimos años se registra una gradual disminución por la intensificación productiva.

Otras características químicas como la MO, la CE y el pH del suelo figuran en la **Figura 3**. Es importante el nivel de MO superficial porque a través de su mineralización provee los nutrientes necesarios que demanda la pastura, en este caso P y S.

Dado que el P no es aportado por las lluvias, el mismo debió ser corregido con la fertilización cada vez que sus niveles no se correspondieron con las exigencias de la alfalfa (Culot, 1986). La MO fue suficiente en el horizonte A, pero a partir del horizonte B la misma disminuyó abruptamente lo que posiblemente condicionó la capacidad de intercambio de nutrientes en profundidad, liberando dicha propiedad casi por entero a las arcillas.

Respecto a la CE (mS/cm), los valores estuvieron dentro del rango moderadamente salino (4-8 mS/cm) donde la alfalfa aún es tolerante y no condicionaría su desarrollo. En cambio el pH, si bien fue óptimo en el horizonte A, a partir del horizonte B los valores crecientes de alcalinidad por sobre 8.5 posiblemente hayan afectado la capacidad productiva de la alfalfa, USDA (1996).

Luego del 7° corte, el análisis del suelo reportó los valores de Pe residual indicados en la **Figura 4**. Los únicos tratamientos que superaron los 25 mg kg⁻¹ de P fueron S-P40S40 y G-P40. Por su parte, los tratamientos S-P40 y G-P40S40 registraron incrementos en el nivel de Pe pero no lo suficiente. Tanto los testigos como los tratamientos solo con S oscilaron entre Pe= 12 mg kg⁻¹ y Pe= 14.4 mg kg⁻¹, muy por debajo de lo deseable. Se demostró que el S no tuvo ninguna influencia sobre

los niveles de Pe. En cambio hubo una reacción inmediata cuando se fertilizó con P.

Esta condición determinó que se repitiera la fertilización inicial suponiendo que ocurrirían nuevos incrementos y que los testigos o aquellos solo con S se mantendrían en igual nivel. En la **Tabla 1** se expresan los resultados productivos correspondientes a cada corte.

En todos los cortes no hubo diferencias significativas entre las variedades (p>0.05) ni en la interacción Variedades*Tratamientos de fertilización (p>0.05). Esto indicó que para las alternativas de fertilización tanto Supermonarca INTA-Produsem como GAPP 969+ respondieron en el mismo sentido. El CV tuvo una tendencia a disminuir desde el corte 1 (24.9%) hasta el corte 11 (16%), posteriormente fue variando y en aumento hasta el corte 18 (24%). El análisis acumulado tuvo un CV de 7.2%. Fue importante haber encontrado respuestas significativas al S (p<0.05) respecto al testigo en 11 de los 19 cortes, interpretando que el análisis químico inicial del suelo para S, no pudo diagnosticar la respuesta.

En numerosas experiencias de la región pampeana ocurrieron casos similares y por ello todavía el mejor indicador es la planta. No obstante, existen en nuestro país algunos laboratorios más equipados y con técnicas más precisas que podrían guardar mayor relación con la respuesta.

En la emergencia de plántulas (42 días de la siembra), las parcelas con azufre (S40) se asimilaron a las testigos sin fertilizar. En cambio con P las alfalfas reaccionaron rápidamente, notándose a la vista mayor altura y crecimiento.

Con respecto a P, hubo respuesta significativa

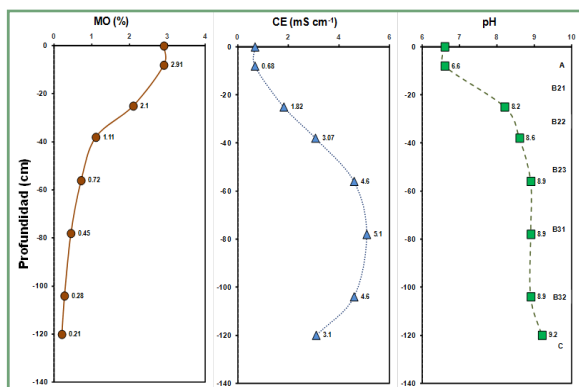


Figura 3. Distribución de la materia orgánica (MO), la conductividad eléctrica (CE) y el pH en un perfil de suelo de San Cristóbal.

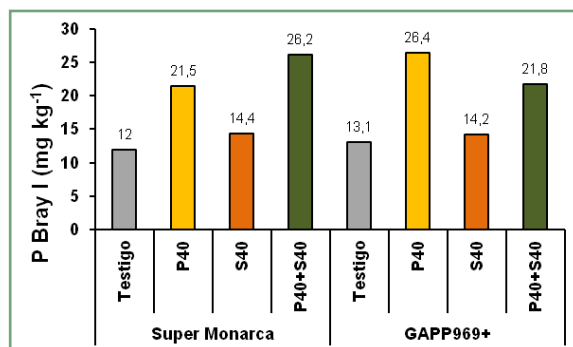


Figura 4. Análisis de P extractable (0-20 cm) realizado después del séptimo corte (13-10-11), promedio para cada tratamiento fertilizado y cada variedad de alfalfa. La "S" inicial o la "G" solo refieren al nombre de la variedad.

Tabla 1. Diferentes cortes de alfalfa, mes y año en que ocurrieron (Corte mes/año), la comparación de los tratamientos fertilizados con P y S (*), el de las variedades, la interacción de la fertilización con las variedades y el coeficiente de variación (CV, %) de cada corte. * C= Cortes Sucesivos. Tratamientos con igual letra no difieren entre sí. LSD al 5%.

CORTES	C 1 (09/10)		C 2 (11/10)		C 3 (12/10)	
Fertilización	Materia Seca (kg ha ⁻¹) e Incrementos Porcentuales.					
Testigo	458 b *	(%)	802 b	(%)	1598 b	(%)
P40	596 ab	138 kg (30)	1226 a	424 kg (53)	2073 a	475 kg (30)
S40	717 a	259 kg (57)	1187 a	385 kg (48)	2078 a	480 kg (30)
P40S40	792 a	334 kg (73)	1511 a	709 kg (88)	2205 a	607 kg (25)
CV	24.9		23.9		18	
CORTES	C 4 (02/11)		C 5 (03/11)		C 6 (04/11)	
Fertilización	Materia Seca (kg ha ⁻¹) e Incrementos Porcentuales.					
Testigo	1637 b *	(%)	1637 b	(%)	1339 c	(%)
P40	2026 a	138 kg (30)	1992 a	96 kg (19)	1653 b	138 kg (30)
S40	2047 a	259 kg (57)	1995 a	217 kg (43)	1680 ab	259 kg (57)
P40S40	2144 a	334 kg (73)	2123 a	291 kg (58)	1909 a	334 kg (73)
CV	9.8		8.4		11	
CORTES	C 7 (10/11)		C 8 (11/11)		C 9 (12/11)	
Fertilización	Materia Seca (kg ha ⁻¹) e Incrementos Porcentuales.					
Testigo	2260 b *	(%)	2387 b	(%)	2083 b	(%)
P40	2690 a	430 kg (19)	2620 a	233 kg (10)	2652 a	569 kg (27)
S40	2475 ab	215 kg (9.5)	2564 ab	177 kg (7.4)	2420 a	337 kg (16)
P40S40	2576 a	316 kg (14)	2525 ab	138 kg (5.8)	2585 a	502 kg (24)
CV	9.4		5.8		8.9	
CORTES	C 10 (01/12)		C 11 (02/12)		C12 (04/12)	
Fertilización	MS (kg ha ⁻¹) e Incrementos Porcentuales.					
Testigo	2314 b *	(%)	1409 b	(%)	1067 a	(%)
P40	2976 a	662 kg (28.6)	1755 a	346 kg (24.6)	1050 a	
S40	2967 a	653 kg (28.2)	1530 ab	121 kg (8.6)	1307 a	240 kg (22.9)
P40S40	3056 a	742 kg (32)	1697 ab	288 kg (20.4)	1324 a	257 kg (24)
CV	11		16		20.3	
CORTES	C 13 (06/12)		C 14 (07/12)		C15 (09/12)	
Fertilización	MS (kg ha ⁻¹) e Incrementos Porcentuales.					
Testigo	787 b *	(%)	305 c	(%)	955 b	(%)
P40	812 ab	25 kg (3.2)	281 c		1162 ab	207 kg (21.7)
S40	972 a	185 kg (23.5)	374 b	69 kg (22.6)	1351 a	396 kg (41.5)
P40S40	992 a	205 kg (26)	449 a	144 kg (47.2)	1414 a	459 kg (48.1)
CV	16.2		12		17	
CORTES	C 16 (10/12)		C 17 (11/12)		C18 (01/13)	
Fertilización	MS (kg ha ⁻¹) e Incrementos Porcentuales.					
Testigo	1691 a *	(%)	1876 a	(%)	1300 b	(%)
P40	1930 a	239 kg (14.1)	1978 a	102 kg (5.4)	1473 ab	173 kg (13.3)
S40	1842 a	151 kg (8.9)	2343 a	467 kg (24.9)	1639 ab	339 kg (26.1)
P40S40	1959 a	268 kg (15.8)	2420 a	544 kg (28.9)	1807 a	507 kg (39)
CV	19		22		24	
CORTES	C 19 (02/13)		(C T)			
Fertilización	MS (kg ha ⁻¹) e Incrementos Porcentuales.					
Testigo	1241 b *	(%)	27 144 c	(%)		
P40	1370 ab	129 kg (10.4)	32 311 b	5167 kg (19)		
S40	1559 ab	318 kg (25.6)	33-046 ab	5902 kg (21.7)		
P40S40	1711 a	470 kg (37.9)	35 198 a	8054 kg (29.7)		
CV	22		7.2			

($p < 0.05$) respecto del testigo en 10 de los 19 cortes. Por último con la combinación P40+S40 la respuesta fue significativa ($p < 0.05$) en 14 de los 19 cortes. En este sentido, es importante tener en cuenta que luego del 7° corte hubo una refertilización. La combinación P×S fue la más importante y los nutrientes actuaron en forma conjunta y aditiva. La influencia positiva del S en forma de yeso agrícola no solo benefició la productividad de la alfalfa sino que dada su movilidad podría disminuir el pH de los horizontes más profundos, siempre que su aplicación no baje la acidez del horizonte A a menos de 5.5 (Figura 5).

Es necesario destacar que el S por sí mismo produjo aumentos de producción y por su bajo costo los productores podrían inclinarse únicamente hacia él. No es lo correcto porque la deficiencia de P continúa existiendo y de esa manera se acentuará. En consecuencia la mayor producción de forraje solo con S también extrajo P, pero en este caso totalmente del suelo y no del fertilizante. Si la decisión es solamente usar S el camino elegido es equivocado y no sustentable, porque la continua extracción de P sin el aplicación correspondiente de fertilizante provocará una continua degradación. En la Figura 4 se observa como los tratamientos con P mantienen niveles más adecuados de Pe además de mejorar la productividad de la alfalfa. Por ello se deberían utilizar ambos nutrientes P y S a la vez, cuyos resultados han demostrado la mayor significación y ser económicamente viables, **Tabla 1 y Figura 5**.

El tratamiento P40S40 difiere del tratamiento

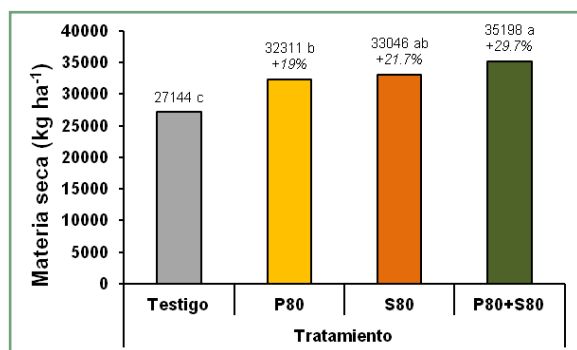


Figura 5. Producción de materia seca de 19 cortes promedio para dos variedades de alfalfa (Supermarca-INTA-Produsem y GAPP 969+) con iguales tratamientos de fertilización de fósforo (P), azufre (S) y su combinación (P×S). La fertilización fue en dosis dividida entre siembra y séptimo corte. Medias con distinta letra difieren entre sí, LSD al 5%. Localidad de San Cristóbal, 2010-2013.

P40 y el Testigo y los tratamientos S40 y P40 difieren del testigo según la prueba del LSD (Figura 5).

La producción de MS de alfalfa mediante doble aplicación de 40 unidades de P= P40 produjo 32 311 kg ha⁻¹ de MS, con doble aplicación de 40 unidades de S= S40 fue de 33 046 kg ha⁻¹ de MS y con la combinación doble P40S40 alcanzó 35 198 kg ha⁻¹ de MS. Los porcentajes de aumento correspondientes fueron de 19%, 21.7% y 29.7% respecto al testigo sin fertilizar, con 27 144 kg ha⁻¹ de MS y los incrementos correspondientes fueron de 5167 kg ha⁻¹, 5902 kg ha⁻¹ y 8054 kg ha⁻¹, respectivamente, (Figura 5).

Fue evidente el aumento que incluyó la doble aplicación de fertilizantes. La relación P y S ya fue caracterizada en otros ensayos conducidos por Vivas (2005) y por Vivas et al. (2007) en estudios con alfalfa y secuencias agrícolas. Como la movilidad de los SO_4^{2-} se la puede asimilar a la de los nitratos (Havlin et al. 1999), es importante destacar lo mencionado por Chao et al. (1962) quienes particularizaron las estructuras químicas de los dos aniones, fosfatos y sulfatos, que permitieron a los PO_4^- liberar a los SO_4^{2-} adsorbidos en las arcillas y aumentar el disponible para la planta. Posteriormente, Hoefft et al. (1973) constataron en laboratorio la capacidad del P en solución como extractante del S.

Dado la ausencia de diferencias significativas entre las variedades y la no interacción significativa variedades*tratamientos fertilizados ($p > 0.05$), a continuación se puede observar la evolución de los cortes conjuntos de las variedades a través de todos los tratamientos (Figura 6).

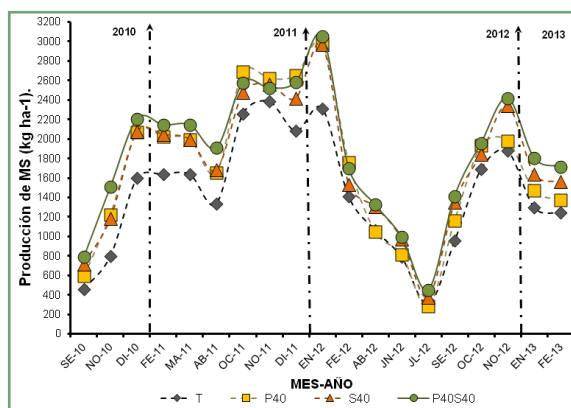


Figura 6. Evolución de la producción de materia seca (MS) a través de los cortes sucesivos. Valores promedio de las dos variedades de alfalfa a través de los tratamientos con doble fertilización: T (testigo ♦), P (fósforo ■), S (azufre ▲) y fósforo + azufre (P+S ●). Localidad de San Cristóbal, 2010-2013.

Todos los tratamientos fertilizados produjeron más forraje de alfalfa que el testigo. El T comenzó produciendo un promedio de 458 kg ha⁻¹ de MS y finalizó con 1241 kg ha⁻¹ de MS, Su máximo ocurrió el 11/2011 con 2386 kg ha⁻¹ de MS. La combinación P*S que resultó la más productiva y se inició con 792 kg ha⁻¹ de MS y finalizó con 1711 kg ha⁻¹ de MS. Su máximo sucedió durante 01/2012 con 3056 kg ha⁻¹ de MS.

Interpretación Económica

Se puede observar en la **Tabla 2** la producción de MS de los 19 cortes y los nutrientes expresados como doble fertilización (P80, S80 y P80+S80), los costos de cada tratamiento, lo disponible para diferentes porcentajes de aprovechamiento, los litros de leche producidos y los beneficios económicos de cada tratamiento respecto al testigo, con su respectivo valor porcentual.

El tratamiento testigo siempre produjo menos que cualquier otro fertilizado y el incremento económico total debido al mayor porcentaje de aprovechamiento también fue evidente (**Tabla 2**). Para el Testigo los beneficios económicos crecientes según el 60 %, 65 % o 70 % de aprovechamiento fueron 59 438 \$ ha⁻¹, 64 666 \$ ha⁻¹ y 69 894 \$ ha⁻¹, respectivamente. Los beneficios económicos de

los tratamientos con P, S o P+S respecto a su correspondiente testigo oscilaron desde 9937 \$ ha⁻¹ (16.7 %) para una eficiencia de cosecha del 60% hasta un aumento de 18 986 \$ ha⁻¹ (27.2 %) si se alcanza el 70% de aprovechamiento.

CONCLUSIONES

- ❖ Las variedades Supermonarca INTA-Produsem y GAPP 969+ respondieron de forma similar y significativa a la fertilización con P, S y P+S.
- ❖ El análisis del P extractable fue conducente para el diagnóstico pero no así el S. Para el caso, la alfalfa fue el mejor indicador.
- ❖ La respuesta al factor P fue significativa en 10 ocasiones, la del S en 11 y la combinación P+S en 14 de los 19 cortes, lo cual demostró la importancia de la fertilización conjunta P+S para alcanzar mayor producción de forraje y a su vez mantener mejor la fertilidad del suelo.
- ❖ El incremento de MS con P fue de 5167 kg ha⁻¹ (19%), con S de 5902 kg ha⁻¹ (21.7%) y con la combinación P+S de 8054 kg ha⁻¹ (29.7%) por sobre el testigo sin fertilizar.
- ❖ Hubo aumentos crecientes de forraje en función del porcentaje de aprovechamiento, que en nuestro estudio contempló un máximo de 70%, pero que otros productores más tecnificados podrían aumentarlo y hacer más eficiente la

Tabla 2. Producción de Materia Seca, gastos variables según tratamiento de fertilización, aprovechamiento según varios criterios, litros de leche producidos, beneficio económico como margen obtenido en cada estrategia y margen adicional respecto al testigo. Nota: para los cálculos económicos se consideró el fertilizante superfosfato triple de calcio como fuente de P= US\$ 580 t⁻¹ y yeso agrícola como fuente de S = US\$ 210 t⁻¹; el precio del litro de Leche = \$ 3.21; y una tasa de cambio de US\$ 1 = \$ 8.64. Valores al mes de Enero 2015. Se utilizó una equivalencia de 1 kg MS de alfalfa (en dieta equilibrada) = 1.2 litros de leche.

Fertilización	MS Total. (kg ha ⁻¹)	Gastos (\$ ha ⁻¹)	Aprovechamiento (%)			Litros de Leche			
			60	65	70	60	65	70	
			MS (kg ha ⁻¹)			(l ha ⁻¹)			
Testigo	27 144	3297	16 286	17 644	19 001	19 544	21 172	22 801	
P80	32 311	5302	19 387	21 002	22 618	23 264	25 203	27 141	
S80	33 046	4023	19 828	21 480	23 132	23 793	25 776	27 759	
P80+S80	35 198	6028	21 119	22 879	24 639	25 343	27 454	29 566	
	Margen	Margen adicional sobre Testigo							
Aprovecha- miento (%)	60	65	70	60	65	70			
	\$ ha ⁻¹			\$ ha ⁻¹	%	\$ ha ⁻¹	%	\$ ha ⁻¹	%
Testigo	59 438	64 666	69 894	-	-	-	-	-	-
P80	69 375	75 598	81 821	9937	16.7	10 932	16.9	11 927	17.1
S80	72 353	78 728	85 082	12 915	21.7	14 051	21.7	15 188	21.7
P80+S80	75 322	82 101	88 880	15 883	26.7	17 435	27	18 986	27.2

tecnología de fertilización.

- ❖ Decidir utilizar la tecnología de fertilización implica la responsabilidad de ser eficiente en el porcentaje de aprovechamiento. En esta experiencia, según el porcentaje de utilización del forraje, los beneficios económicos del P, S y el P+S respecto de su correspondiente testigo oscilaron de 9937 \$ ha⁻¹ (17.1%) para el P con aprovechamiento del 60%, hasta 18 986 \$ ha⁻¹ (27.2%) para la combinación P+S con el 70 % de aprovechamiento.
- ❖ Como el sitio estudiado participa de un área con suelos acomplejados y es intermedio entre el domo oriental (deficiente en P y en S) y el occidental (suficiente por ahora en ambos nutrientes), se recomienda el uso del análisis de suelo en forma periódica, tanto para mejorar las recomendaciones de fertilización como para monitorear los efectos del manejo de nutrientes.
- ❖ Los resultados aquí obtenidos no necesariamente se comportarán de igual modo en todos los lotes, por lo que el análisis de suelos de cada caso es fundamental.
- ❖ El área de San Cristóbal, Santa Fe, tiene posibilidades de aumentar la producción de forraje de alfalfa a través de mayores estudios con los nutrientes P, S y sus combinaciones.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los Srs. Roberto, Claudio y Jorge Manganeli propietarios del campo donde se llevó a cabo el estudio y al Sr. Cleomar Tomatis, auxiliar técnico de la EEA INTA Rafaela, quien fue el encargado de realizar los cortes. Al igual que a técnicos de la AER San Cristóbal por el cuidado del ensayo.

BIBLIOGRAFÍA

- Chao, T.T., M.E. Harward, y S.C. Fang.** 1962. Movement of 35S tagged sulfate through soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 26:27-32.
- Barrow, N.J.** 1975. Chemical form of inorganic phosphate in sheep feces. *Aust. J. Soil Res.* 13:63-67.
- Culot, J.P.** 1986. Nutrición mineral y fertilización en el ambiente de la región pampeana. En: *Investigación, Tecnología y Producción de Alfalfa*. Colección científica del INTA. pp. 81-117.
- Darwich, N.** 1983. Niveles de P disponible en suelos pampeanos. *IDIA.* 409-412: 1-5. INTA Buenos Aires, Argentina
- García, F.O.** 2001. Balance de fósforo en los suelos de la región pampeana. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur.* N° 9. INPOFOS. Potash and Phosphate Institute of Canada.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, y W.L. Nelson.** 1999. *Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management.* Sulfur, Calcium and Magnesium. Chapter 7. p 217-244.
- Hijano, E.H. y D.H. Basigalup.** 1995. El cultivo de la alfalfa en la República Argentina. En. *La Alfalfa en la Argentina*. INTA. Subprograma Alfalfa. 282 p.
- Hoef, R.G., L.M. Walsh, y D.R. Keeney.** 1973. Evaluation of varios extractants for available soil sulfur. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37:401-404.
- Knudsen, D. and G. Rehm.** 1977. *Fertilizer Management for Alfalfa.* NebGuide G 73-2. Cooperative Extension Service. Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska. Lincoln.
- Lanyon, L.E. and W.K. Griffith.** 1988. Nutrition and Fertilizer Use. In. *Alfalfa and Alfalfa improvement.* ASA-CSSA-SSA, Madison, Wisconsin. Agronomy Monograph 29. 333-372.
- Ozanne, P.G.** 1980. Phosphate Nutrition of Plants. A General Treatise. Chapter 20. In. *The Role of Phosphorus in Agriculture.* Ed. Khasawneh, F. E.; Sample, E. C. and Kamprath, E. J. ASA-CSSA-SSA. Madison, WI.
- Racca, R., D. Collino, J. Dardanelli, D. Basigalup, N. González, E. Brenzoni, N. Hein y M. Balzarini.** 2001. Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a la nutrición nitrogenada de la alfalfa en la región pampeana. Proyecto Nacional PRONALFA. Ediciones INTA. 56 p.
- Russelle, M.P.** 2001. Alfalfa. After 8,000-year journey, the "Queen of Forages" stands poised to enjoy renewed popularity. *American Scientist* (89) 252-261.
- Salvagiotti, F., G. Ferraris, A. Quiroga, M. Barraco, H. Vivas, P. Prystupa, H. Echeverría y F.H. Gutiérrez Boem.** 2012. Identifying sulfur deficient fields by using sulfur content; N:S ratio and nutrient stoichiometric relationships in soybean seeds. *Field Crops Research.* 135:107-115.
- SAS Institute Inc.** 2004. SAS OnlineDoc® 9.1.3. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Spencer, K.** 1975. Sulphur requirements of plants. p. 98-116. In. K. D. McLachlan (ed.) *Sulphur in Australasian agriculture.* Sydney University Press, Sydney.
- USDA.** 1996. *Soil Survey Laboratory methods manual.* Soil Survey Investigation Report N° 42. Version 3.0. Washington DC, USA. 693p.
- Vivas, H.S.** 1995. Fertilización de pasturas base alfalfa en la región central de Santa Fe. *Información Técnica Para Productores.* INTA EEA Rafaela.
- Vivas, H.S. y M.S. Guaita.** 1997 a. Respuesta a la fertilización fosfatada de alfalfa en un año caracterizado por estrés hídrico. *Temas de Producción Lechera.* SAPyA, INTA, Centro Regional Santa Fe, EEA Rafaela. Publicación Miscelánea N° 84. p 16-19.
- Vivas, H.S. y M.S. Guaita.** 1997 b. Alfalfa Yield Response to Applied P in the Central Area of Santa Fe Province, Argentina. Poster N°139. Div. S-4. *Soil Fertility and Plant*

Nutrition. Los Angeles, Anaheim Convention Center. USA. Exhibit Hall C, First Floor. 89 th Annual Meeting, Anaheim, California. Octubre 26-30, 1997.

Vivas, H.S. y O. Quaino. 2000. Fósforo y enmienda cálcica para la producción de alfalfa en dos suelos del centro este de Santa Fe. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata.

Vivas, H.S.; J.C. Alesso y O. Quaino. 2001. Producción de alfalfa fertilizada con fósforo y azufre en el centro este de Santa Fe. 24° Congreso Argentino de Producción Animal (AAPA). Rafaela, 19 al 21 de setiembre de 2001.

Vivas, H.S. y L. Romero. 2004. Fósforo y azufre en la producción de alfalfa en el centro de Santa Fe. Planteos Ganaderos en Siembra Directa. Revista de la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID). p 58-61.

Vivas, H.S. 2005. Fósforo, Azufre y estrategias de fertilización para incrementar la materia seca de Alfalfa. En. XXI Curso Internacional de Lechería para Profesionales de América Latina. Temas claves para una producción de leche bovina eficiente y de calidad. Ediciones INTA. p 80-91.

Vivas, H.S., R. Albrecht, A. Oliveira Ferreira y J. L. Hotián. 2007. Fertilización compuesta (N-P-S) de trigo en una rotación. Respuesta productiva y desarrollo radicular. INTA EEA Información Técnica de trigo y otros cultivos de invierno. Campaña 2007. Publicación Miscelánea N° 107. p 68-77. ■

[volver al índice](#)