

EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE BIOMASA AEREA Y EXTRACCIÓN DE NUTRIENTES DE ALFALFA EN SUELOS CONTRASTANTES

Romina Fernández^{1,2,*}; Cristian Osvaldo Álvarez¹; Mauricio Gastón Uhaldegaray¹; Elke Johanna Noellemeyer²; Alberto Raúl Quiroga^{1,2}

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Anguil, Anguil, La Pampa.

² Universidad Nacional de la Pampa, Facultad de Agronomía, Santa Rosa, La Pampa.

RESUMEN

En pasturas base alfalfa (*Medicago sativa*), la fertilización con fósforo (P) y azufre (S) resulta clave para maximizar producción. La exportación de nutrientes y la escasa reposición preocupan en planteos mixtos de producción. El objetivo del trabajo fue i) evaluar el efecto de la fertilización con P y S, sobre la productividad y eficiencia de uso de agua (EUA) de la pastura, y ii) cuantificar la exportación de P, S, zinc (Zn) y cationes en pasturas establecidas en dos suelos diferenciados por su potencial de producción. La experiencia se llevó a cabo sobre un Haplustol Éntico (MD) y sobre un Paleustol Petrocálcico, (SM). En ambos suelos se sembró aproximadamente 10 kg ha⁻¹ de alfalfa. Se establecieron cuatro tratamientos de fertilización aplicados al voleo: Sin aporte de nutrientes (T); con 9 kg ha⁻¹ de P (P); sin P y con 40 kg de S ha⁻¹ (S) y con 9 kg ha⁻¹ de P y 40 kg de S ha⁻¹ (P+S). Durante 3 años se cortó biomasa aérea para determinar el forraje cosechado y se lo expresó como materia seca (MS). Las muestras fueron molidas, y se les determinó el contenido en biomasa aérea de N, P, S, Zn, calcio (Ca), potasio (K) y magnesio (Mg). La fertilización con P+S, aumentó la productividad de la pastura en SM (entre el 16% y 38%) y la EUA, mientras que en MD no hubo respuestas a la fertilización. En ambos sitios el aporte de S incrementó significativamente la extracción de P y Zn. La exportación de nutrientes fue función de la producción de biomasa aérea y no de la concentración de los mismos. Los resultados del trabajo demuestran la importante exportación de nutrientes durante 3 años de corte mecánico. Resultaría necesario trabajar en estrategias de reposición para conservar o aumentar los nutrientes del suelo.

Palabras clave: fósforo, azufre, pastura.

EFFECT OF FERTILIZATION ON AERIAL BIOMASS AND NUTRIENT EXTRACTION OF LUCERNE IN CONTRASTING SOILS

ABSTRACT

In lucerne-based pastures (*Medicago sativa*), phosphorus (P) and sulfur (S) fertilization is key to maximizing grass production and quality. Nutrient export and poor replacement are a concern in mixed production plans. The objectives of this work were i) to evaluate the effect of P and S fertilization on pasture productivity and water use efficiency, and ii) to quantify the export of P, S, zinc (Zn) and cations of pastures established on two soils differentiated by their production potential. The experiment was carried out on an Entic Haplustol (MD) and on a Petrocalcic Paleustol (SM). Approximately 10 kg ha⁻¹ of lucerne was sown in both soils. Four fertilization treatments were established and applied by broadcasting: no nutrient input (T); 9 kg ha⁻¹ of P (P); 40 kg of S ha⁻¹ (S), and 9 kg ha⁻¹ of P plus 40 kg of S ha⁻¹ (P+S). For 3 years, aboveground biomass was cut to determine the amount of harvested forage expressed as dry matter (DM). Aboveground biomass samples were ground, and the content of P, S, Zn, calcium (Ca), potassium (K) and magnesium

* Autor de contacto:
fernandez.romina@inta.gob.ar

Recibido:
10-06-24

Recibido con revisiones:
13-09-24

Aceptado:
13-09-24

(Mg) was determined. Fertilization with P+S increased pasture productivity in SM from 16% to 38%, whereas in MD there was no response to fertilization. In both sites, the contribution of S significantly increased the extraction of P and Zn. The export of cations ranged between 1804 and 1958 kg ha⁻¹ in MD and between 684 and 983 kg ha⁻¹ in SM. The results of the study demonstrate the significant export of nutrients from lucerne during 3 years of mechanical cutting. It would be necessary to work on replacement strategies to conserve or increase soil nutrient content.

Keywords: phosphorus, sulfur, pasture.

INTRODUCCIÓN

En la Región Semiárida Pampeana (RSP), gran parte de la producción ganadera se encuentra sobre pasturas perennes donde la alfalfa es el principal cultivo. Maximizar la cantidad y calidad de forraje de esta especie requiere suelos profundos (>1,2 m), bien aireados, pH 6,5 a 7,5 y cubrir altas demandas de agua y nutrientes. En lo referido a nutrientes, en términos generales, existe un balance negativo en planteos agrícolas, debido a las cosechas (grano-forraje) y a las bajas tasas de reposición lo que lleva a una disminución de la disponibilidad de nutrientes en suelos. Por ejemplo, en la campaña 2010/11 se extrajeron 3,93 millones de toneladas de nitrógeno, fósforo, potasio, azufre y calcio, siendo la reposición de 1,36 millones de toneladas, lo que representó un 35 % (Andrade et al., 2017). En el mismo sentido, sobre suelos agrícolas, Sainz Rozas et al. (2019) concluyeron que la concentración de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) disminuyó entre el 2011 al 2018 en un 10%, 34% y 18%, respectivamente. Por su parte, Larrea (2018) en un estudio sobre la disponibilidad y variabilidad espacial de cationes de intercambio informó que el K fue el catión que presentó la mayor variación espacial y reducción en su concentración en suelos agrícolas respecto a suelos prístinos.

La alfalfa es un cultivo de altos requerimientos nutricionales, tanto de macronutrientes, como de micronutrientes. Por ejemplo, la disponibilidad de fósforo (P) debe ser superior a 18 ppm para un adecuado crecimiento (Marino y Echeverría, 2018; Pautasso y Barbagelata, 2017) debido a que interviene en el desarrollo de la biomasa aérea y radical, otorgándole a la planta tolerancia al estrés hídrico. En lo referido al azufre (S), su demanda guarda relación con los niveles de producción de materia seca (Vivas et al., 2004), debido a la importancia que tiene en la formación de las proteínas. Sin embargo, el bajo contenido de materia orgánica condiciona la disponibilidad de este nutriente. Un estudio llevado a cabo por García et al. (2010) en cultivos agrícolas de la región pampeana, permitió establecer un umbral tentativo de 10 ppm de S-SO₄²⁻ (0-20 cm) para separar situaciones con y sin respuesta al agregado de S. No obstante, no existe un método de diagnóstico preciso para ser utilizado al momento de decidir una fertilización con S (Carciochi et al., 2016). Otro nutriente que está siendo estudiado es el Zinc (Zn), debido a que es el micronutriente que más ha disminuido su concentración en el suelo en estos últimos años, principalmente asociado al aumento de la productividad de los cultivos. Además, el déficit puede presentarse por condiciones naturales de pH alcalinos, bajos niveles de materia orgánica, bajas temperaturas en los suelos o por una interacción negativa con altos contenidos de P (Mortvedt, 1991; Sánchez-Rodríguez et al., 2017).

Con respecto los cationes intercambiables, es deseable para una adecuada producción de forraje una saturación del 65% de Ca, 10% de Mg 8% de K. En la medida que las condiciones descritas se alejen del marco ideal, el cultivo disminuye su rendimiento y su persistencia (Basigalup y Rossanigo, 2007). En general, los suelos de la RSP contienen valores óptimos de cationes de intercambio debido a su proceso de formación (suelos desarrollados sobre loess pampeano), no obstante, están empezando a aparecer algunos suelos con valores de bases por debajo de rangos óptimos para el adecuado crecimiento de la pastura, debido principalmente a la falta de reposición de cationes vía fertilización. La adecuada provisión de los nutrientes mejora el uso de los demás recursos, en este sentido, resultados de estudios en la RSP demostraron que la fertilización mejoró la EUA de cultivos anuales y también de pasturas perennes (Civalero et al., 2014; Fernández et al., 2017; Gaggioli, 2019).

En los planteos ganaderos de ambientes semiáridos, el uso de fertilizantes es escaso. En general, la fertilización con P se realiza a la siembra como arrancador y/o al voleo una vez instalada la pastura. Esta última opción no es común en la región pampeana, por la ausencia de información regional que demuestre sus beneficios, considerando además la escasa movilidad del P en el suelo (Fontanetto et al., 2010). No obstante, algunos trabajos demuestran resultados positivos por el agregado anual de fertilizantes en pasturas instaladas (Berardo, 1998; Fontanetto y Bianchini 2007). El aporte de S a través de fertilizantes podría im-

pactar positivamente en mayor producción y calidad del forraje (Fernández et al., 2022).

El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de la fertilización con P y S, sobre la productividad y eficiencia de uso de agua de la pastura. Otro propósito fue cuantificar la exportación de fósforo, azufre, zinc y cationes en pasturas establecidas en dos suelos diferenciados por su potencial de producción de la región semiárida pampeana.

MATERIALES Y MÉTODOS

La experiencia se llevó a cabo sobre dos suelos, un Haplustol Éntico localizado en el norte de la provincia de La Pampa (35°49'30.50" S y 63°43'41.27" O) denominado Módulo Dorila (MD) y un Paleustol Petrocálcico localizado en el centro de la provincia (36°36'48.6"S y 63°57'55.8"O) denominado Santa María (SM). En ambos sitios se realizó la siembra de aproximadamente 10 kg ha⁻¹ de Alfalfa (*Medicago Sativa*), el 31/3/2020 en MD y en SM el 9/4/2020. Se realizó un muestreo compuesto (20 piques) a 0-20 cm de profundidad a fin caracterizar el suelo en cuanto a textura, materia orgánica, pH, fósforo extractable (P), azufre (S-SO₄²⁻), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cationes (Tabla 1). Además, el contenido de S-SO₄²⁻ fue determinado cada 20 cm de profundidad, hasta los 200 cm en MD y hasta los 140 cm en SM. En el mes de agosto de 2020, marzo 2021 y febrero de 2022 se establecieron cuatro tratamientos de fertilización con un diseño en bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones. Los tratamientos fueron: sin aporte de nutrientes (T); con 9 kg ha⁻¹ de P (P); sin P y con 40 kg de S ha⁻¹ (S); y con 9 kg ha⁻¹ de P y 40 kg de S ha⁻¹ (P+S). En el experimento en MD, se determinó materia seca de la biomasa aérea a los 226, 290, 359, 413, 535, 606, 676, 889, 945 y 987 días desde la siembra (25/11/2020, 28/1/2021, 6/4/2021, 28/6/2021, 26/10/2021, 6/1/2022, 10/3/2022, 19/10/2022, 14/12/2022, 25/1/2023, respectivamente) y en SM a los 215, 284, 404, 548, 632, 673, 719, 898, 944, y 983 días desde la siembra (5/11/2020, 14/1/2021, 14/5/2021, 12/10/2021, 4/1/2022, 15/2/2022 y 31/3/2022, 19/10/2022, 5/12/2022, 13/1/2023, respectivamente). Los cortes se realizaron en una superficie de 0,25 m² en cada parcela a una altura de 5 cm del suelo en cada momento de corte y tratamiento de fertilización. Las muestras fueron secadas en estufa a 60 °C (hasta peso constante), pesadas y relacionadas a la superficie del muestreo para estimar la materia seca (MS) aérea por unidad de superficie (MS, Mg ha⁻¹). Posteriormente, una fracción de las muestras fue molida, y enviadas al laboratorio para determinar la concentración de nitrógeno (N, mediante LECO-TrueSpec®), P, S, Zn, Ca, K y Mg (digestión con ácido nítrico a 180 °C, durante 15 min, espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma de Acoplamiento Inductivo ICP-OES). Se calculó la acumulación de nutrientes en biomasa aérea como el producto entre los Mg ha⁻¹ de MS y la concentración del nutriente. Luego de cada momento de muestreo se realizó un corte de emparejamiento de todas las parcelas a 5 cm de altura.

En cada momento de corte de biomasa aérea se determinó el contenido de humedad del suelo (método gravimétrico) cada 20 cm de profundidad hasta los 200 cm en MD y 140 cm en SM, debido a la presencia de manto calcáreo a fin de calcular el uso consuntivo promedio (López y Arrue, 1997) y la eficiencia en el uso del agua (EUA) a partir de la siguiente ecuación, EUA (kg MS mm⁻¹ ha⁻¹) = Biomasa aérea (kg MS ha⁻¹) / UC (mm).

La temperatura media (promedio) de primavera, verano, otoño e invierno junto a las precipitaciones de cada año de producción en MD y SM se presentan en la Tabla 2.

Los resultados fueron analizados mediante modelos lineales mixtos con medidas repetidas en el tiempo para cada pastura. La comparación de medias se realizó mediante Test de Fischer ($P \leq 0,1$). Además, se realizó análisis de regresión. Para estos análisis se utilizó el software estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2017).

Tabla 1: Arcilla más limo (A+L), materia orgánica (MO), fósforo extractable (P), pH, azufre de sulfato (S-SO₄²⁻), capacidad de intercambio catiónico (CIC), calcio (Ca), potasio (K) y magnesio (Mg) en Modulo Dorila (MD) y en Santa María (SM) a 0-20 cm de profundidad. Profundidad del perfil (Prof.) S-SO₄²⁻ (kg ha⁻¹) a 200 cm y 140 cm para MD y SM, respectivamente.

Table 1: Clay and silt (A+L), organic matter (MO), extractable phosphorus (P), pH, sulphate sulfur (S-SO₄²⁻), cation exchange capacity (CEC), calcium (Ca), potassium (K) and magnesium (Mg) in Modulo Dorila (MD) and Santa María (SM) at 0-20 cm soil depth. Profile depth (Prof.) S-SO₄²⁻ (kg ha⁻¹) at 200 cm and 140 cm in MD and SM, respectively.

Sitio	A+L (g kg ⁻¹)	MO (g kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	pH 1:2,5	S-SO ₄ ²⁻ (mg kg ⁻¹)	CIC	Ca (c molc kg ⁻¹)	K	Mg	Prof. (cm)	S-SO ₄ ²⁻ (kg ha ⁻¹)
MD	430	20	50,2	6,2	13	10,5	6,2	1,8	0,8	>200	198
SM	330	16	27,9	6,8	14	8,9	7	1,7	0,1	140	92

Tabla 2: Temperatura media promedio de primavera (P), verano (V), otoño (O) e invierno (I). Precipitaciones durante el 1^{er}, 2^{do} y 3^{er} año de producción de materia seca, en Modulo Dorila (MD) y Santa María (SM).

Table 2: Mean temperatures in spring (P), summer (V) fall (O), and winter (I). Rainfall during the first, second and third year of production at Modulo Dorila (MD) and Santa María (SM).

Sitio	Temperatura media (C°)			
	P	V	O	I
MD	16,6	22,7	15,7	9,0
SM	16,3	22,9	15,7	8,4

Sitio	Precipitaciones (mm)			
	1 er año	2 do año	3 er año	Total
MD	522	886	257	1665
SM	370	958	402	1730

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La producción de MS acumulada en MD desde la siembra hasta los 1093 días (10 cortes) se presenta en la Figura 1 (a). La respuesta a la fertilización con respecto al T fue del 4%; 6,5% y 8% para S, P y P+S, respectivamente, pero no se encontraron diferencias estadísticas significativas en la producción de biomasa aérea acumulada entre los diferentes tratamientos ($p=0,475$). Este comportamiento podría deberse a los elevados contenidos de P en 0-20 cm y S-SO₄²⁻ en el perfil de suelo (200 cm de profundidad), donde se cuantificaron 198 kg S-SO₄²⁻ ha⁻¹ (Tabla 1). Por otra parte, el suelo en MD presenta el nivel freático entre los 250 y 300 cm de profundidad, lo cual posiblemente contribuye por ascenso capilar al uso consuntivo de la pastura y, por ende, al elevado rendimiento observado en este sitio. En la Región Pampeana se ha observado que el cultivo puede aprovechar con efectividad el agua proveniente de nivel freático ubicado entre 2,25 y 6 m de profundidad (Collino et al., 2007). La calidad del suelo en MD junto a la profundidad del perfil (> 200 cm) sin limitación física y la presencia del nivel freático parecen los principales factores que expliquen la mayor producción de biomasa aérea con respecto a SM. Si bien el sitio MD presenta mayor precipitación anual promedio histórica (810 mm) que SM (750 mm), las precipitaciones acumuladas en los 3 años de evaluación fueron similares entre los dos sitios. No obstante, durante el primer año, las mismas fueron mayores en el sitio MD (+152 mm), mientras que en el segundo y tercer año fueron mayores en el sitio SM (+72 y +145 mm, respectivamente). La temperatura media promedio fue similar entre los dos sitios en cada estación del año (Tabla 2). La baja relación entre precipitaciones y producción de biomasa aérea, $R^2=0,14$ para el T y $R^2=0,22$ para el tratamiento P+S, (datos no mostrados) coinciden con un estudio llevado adelante por Fernández et al. (2017) en la RSP. Estos autores, no encontraron relación entre la producción de materia seca por corte y las precipitaciones ocurridas entre cada corte. Lo que reflejó la importancia de considerar el suelo, su textura y especialmente la profundidad del perfil, como factores importantes en la capacidad de almacenaje y transferencia del agua de las precipitaciones entre distintos periodos.

En el sitio SM, la respuesta a la fertilización con respecto al T fue del 33; 16% y 38% para S, P y P+S, respectivamente (Figura 1, b), con diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,0001$). La respuesta en la producción acumulada de MS por el uso del S tendría implicancias en estimular la capacidad de nodulación

y en consecuencia la fijación biológica del nitrógeno. Ambos suelos se encontraron cercanos al valor umbral establecido entre 10-12 ppm de $S-SO_4^{2-}$ como límite de deficiencia de este elemento para la mayoría de los cultivos (García et al., 2010; Rivero et al., 2006). No obstante, en SM la disponibilidad de $S-SO_4^{2-}$ en el perfil (120 cm de profundidad) fue de 92 kg ha⁻¹. Este valor corresponde a un 53% de $S-SO_4^{2-}$ menos que el encontrado en MD lo que podría explicar la respuesta positiva del agregado de S en los tratamientos T y P, donde se encontraron diferencias estadísticas significativas.

Las recomendaciones de fertilización con S se realizan en base a experiencias regionales/locales porque aún no se han desarrollado métodos de análisis de suelo para el diagnóstico de necesidades de este elemento. Además, hasta el momento no se han establecido relaciones entre el contenido de $S-SO_4^{2-}$ del suelo y las respuestas de las leguminosas forrajeras a la aplicación de fertilizantes azufrados (Barbazán et al., 2007).

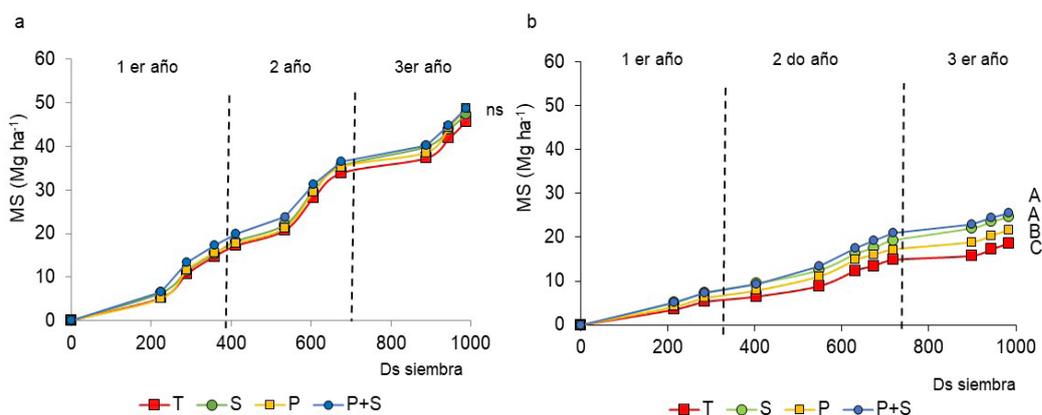


Figura 1: Producción de materia seca (MS) en el testigo sin fertilización (T), y en los tratamientos con azufre (S), con fósforo (P) y con fósforo + azufre (P+S), en a) sitio MD y b) sitio SM. Días desde la siembra (Ds siembra). Letras distintas en MS indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0,10$). Sin diferencias estadísticas significativas (ns).

Figure 1: Production of dry matter (MS) in the control treatment (T), and in the treatments with sulfur (S), with phosphorus (P), and with phosphorus + sulfur (P+S), in a) MD site and b) SM site. Days after sowing (Ds siembra). Different letters in MS indicate significant statistical differences ($P < 0,10$). No significant statistical differences (ns).

En la Región Pampeana, la alfalfa requiere entre 1.100 y 1.550 mm de agua para lograr una producción potencial de forraje (Collino et al., 2007; Quiroga et al., 2021b). En la RSP y sobre suelos con tosca a los 120 cm se han reportado valores entre 600 a 900 mm (Fernández et al., 2017). Los resultados del presente trabajo indicaron que en el primer año de la pastura en MD el uso consuntivo fue de 673 mm, en el segundo año de 788 mm y en el tercer año 405 mm, y para SM de 729, 849 y 436 mm para el primer, segundo y tercer año, respectivamente (datos no mostrados).

La EUA promedio de los tres años en MD fueron altas y no se encontraron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos (Figura 2, a). Los datos obtenidos en este sitio fueron similares a los que se encuentran en Región Pampeana (Collino et al., 2007) posiblemente debido al aporte del agua del nivel freático. En SM se comprobó un aumento de la EUA con la aplicación de S presentando diferencias significativas (Figura 2, b). No obstante, la EUA a lo largo de una campaña presenta importante variación entre cortes (Collino et al., 2007) en MD se encontró un rango de 18 a 39 kg MS ha⁻¹ mm⁻¹, y en SM de 8 a 19 kg MS ha⁻¹ mm⁻¹. Rangos en la EUA entre 12,9 a 25,4 kg ha⁻¹ mm⁻¹, 9 a 23,9 kg ha⁻¹ mm⁻¹ y 11,9 a 29,1 kg mm⁻¹ ha⁻¹ han sido citados por López et al. (1997), Collino et al. (2007) y Bolger y Matches (1990), respectivamente. Según estos autores, una de las razones de esta variabilidad es la diferencia de la demanda atmosférica a lo largo del año, que juntamente con otras variables meteorológicas como por ejemplo la orientación del viento junto a su velocidad modifican la demanda transpiratoria.

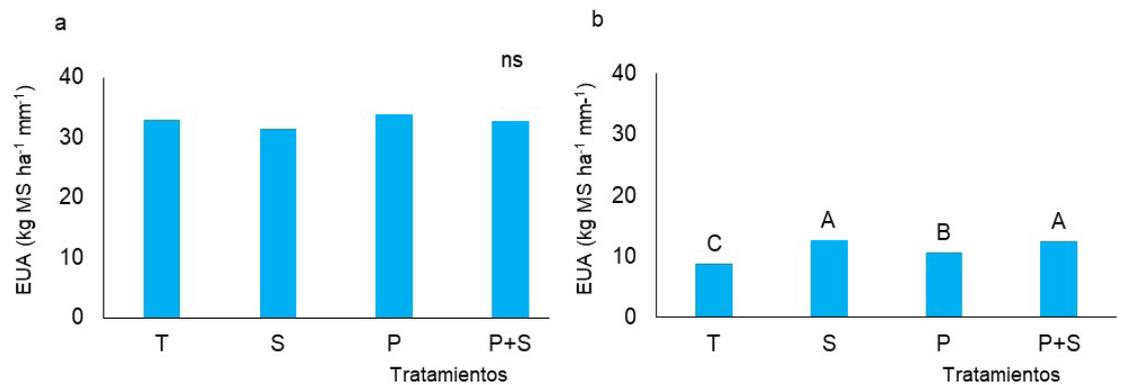


Figura 2: Eficiencia en el uso del agua (EUA) promedio en el testigo sin fertilización (T), y en los tratamientos con azufre (S), con fósforo (P) y con fósforo + azufre (P+S), en a) sitio MD y b) sitio SM. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0,10$). Ns: sin diferencias estadísticas significativas.

Figure 2: Water use efficiency (EUA) in the control treatment (T), and in the treatments with sulfur (S), with phosphorus (P), and with phosphorus + sulfur (P+S), at a) MD site and b) SM site. Different letters indicate significant statistical differences ($P < 0,10$). ns: not significant statistical differences.

En MD la concentración de P en la biomasa varió entre $2,2 \text{ g kg}^{-1}$ en el tratamiento S y $2,4 \text{ g kg}^{-1}$ en los tratamientos T y P sin presentar diferencias estadísticamente significativas. En SM se encontró $2,2 \text{ g kg}^{-1}$ en el tratamiento con S y $2,3 \text{ g kg}^{-1}$ en los demás tratamientos (Tabla 3). La adecuada concentración de P en la biomasa aérea es importante ya que no solo impacta positivamente en el crecimiento de la alfalfa, sino que estaría relacionada con la tolerancia al estrés (Jung y Smith, 1959; Volenec et al., 2021). Además, afecta positivamente al crecimiento de la raíz principal durante la aclimatación de otoño y posterior rebrote en la primavera (Berg et al., 2021).

En ambos sitios, la fertilización con azufre (tratamientos S y P+S) se asoció con una mayor concentración del nutriente en la biomasa aérea, presentando diferencias estadísticas significativas respecto al tratamiento sin S ($P < 0,10$). Con respecto a la concentración de Zn, en ambos sitios, se comprobó que los tratamientos fertilizados con P presentaron menor concentración de Zn con respecto a los tratamientos no tratados con P, con diferencias estadísticas significativas ($P < 0,10$).

En los dos sitios evaluados, la cantidad de P exportado en el forraje en los 3 años de estudio dependió principalmente de la producción de biomasa asociada al sitio/suelo y luego a los planteos de fertilización de P y S. En MD la cantidad exportada de P fue alta y presentó un rango entre 100 y 119 kg ha^{-1} , la fertilización incidió en un 12, 10 y 19 % más de P exportado para S, P y P+S, respectivamente, con respecto al testigo (Tabla 3). Los contenidos de S en biomasa también fueron altos y se encontraron entre los 105 y 115 kg ha^{-1} , sin presentar diferencias estadísticas significativas. Para el caso del Zn, el mismo varió entre $0,94$ y $1,00 \text{ kg ha}^{-1}$ presentando diferencias estadísticas significativas (Tabla 3).

Para el sitio SM, la cantidad exportada de P presentó un rango entre 48 y 63 kg ha^{-1} , la fertilización incidió en un 20, 10 y 31 % más de P exportado para S, P y P+S, respectivamente, con respecto al testigo, con diferencias estadísticas significativas (Tabla 3). Los contenidos de S exportados en biomasa se encontraron entre los 36 y 54 kg ha^{-1} , donde también la fertilización tuvo un fuerte impacto, incidiendo en un 48, 12 y 43 % más de S exportado para S, P y P+S, respectivamente, con respecto al testigo, con diferencias estadísticas significativas. Para el caso del Zn, el mismo varió entre $0,38$ y $0,47 \text{ kg ha}^{-1}$ donde la exportación se encontró en un 23, 7,8 y 23 % más para los tratamientos S, P y P+S, respectivamente, también presentando diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Tabla 3).

Tabla 3: Concentración y acumulación de fósforo (P), azufre (S) y zinc (Zn) exportados en el forraje en Módulo Dorila (MD) y Santa María (SM).

Table 3: Phosphorus (P), sulfur (S) and zinc (Zn) accumulation and content in the forage at the modulo Dorila (MD) and Santa María (SM) site.

Sitio	Tratamiento	Concentración			Acumulación		
		P (g kg ⁻¹)	S (g kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	P (kg ha ⁻¹)	S (kg ha ⁻¹)	Zn (kg ha ⁻¹)
MD	T	2,4	2,2 B	19,99 A	100,8 B	107	0,94 B
	S	2,2	2,4 A	20,66 A	113,7 A	105	1,0 A
	P	2,4	2,2 B	18,65 B	111,2 A	115	0,97 B
	P+S	2,3	2,4 A	19,68 B	119,8 A	115	1,0 A
SM	T	2,3	1,9 B	20,37 A	48,1 C	36,5 C	0,38 B
	S	2,2	2,2 A	19,55 A	57,6 AB	54,0 A	0,47 A
	P	2,3	1,9 B	19,13 B	53,1 B	40,7 B	0,41 B
	P+S	2,3	2,1 A	18,77 B	63,2 A	52,1 A	0,47 A

Letras diferentes en cada columna indica diferencias estadísticas significativas ($P < 0,10$).

Different letters in each column indicate significant statistical differences ($P < 0.10$).

De los valores de CIC y cationes intercambiables presentados en la Tabla 1 se observa que el suelo del sitio MD presentó valores de Ca y Mg por debajo de los valores considerados óptimos para obtener alta producción de forraje en base alfalfa (65% Ca, 8% K y 10% Mg, Basigalup y Rossanigo, 2007). En MD la saturación con bases fue del 59% de Ca y 7,6% de Mg, en cambio el K se encuentra dentro del rango óptimo (17% K). En el suelo del sitio SM los valores se encontraron dentro de los rangos óptimos. Esto puede ser debido a que el suelo en el sitio MD por ubicarse en una zona más húmeda y tener mayor profundidad de perfil presenta mayor historia agrícola con respecto a SM. Esto trae aparejado mayor participación de cultivos agrícolas en la rotación y rendimientos medios a altos (Quiroga et al., 2021a; Noellemeyer et al., 2013) que en consecuencia exportaron en los últimos 25 años altos contenidos de Ca y no se repuso este nutriente mediante fertilización. No obstante, Larrea (2018) determinó que el contenido de cationes intercambiables y la relación entre ellos puede presentar una elevada variabilidad sitio-específica generada por el tipo de suelo y por la actividad antrópica.

En el sitio MD la exportación de cationes se encontró entre 1804 y 1958 kg ha⁻¹ en T y P+S, respectivamente (Tabla 4). En cambio, en el sitio SM el rango de exportación fue menor, con valores entre 684 y 983 kg ha⁻¹ en T y P+S. Se puede observar en la Tabla 4 que la exportación de Ca por parte de la pastura en MD fue mayor entre un 2 y 10% en los tratamientos de fertilización con respecto al T, donde se encontraron diferencias significativas. En cambio, para el K y Mg la fertilización tendió a aumentar la exportación de estos cationes, pero las diferencias no fueron estadísticamente significativas.

Para el sitio SM, en los tratamientos S y P+S, la exportación de Ca, K y Mg fue mayor en un 19 %, 49% y 37%, respectivamente, con respecto al T, presentando diferencias estadísticas significativas.

En términos generales, del total de bases exportadas, el 26% correspondió al Ca, 68% a K y 6% a Mg; y la fertilización con S y P causó una mayor exportación de bases de intercambio. En el sitio MD comienzan a encontrarse deficiencias de Ca y desbalances entre el Ca y Mg, lo que coincide con la disminución en los valores de pH (0,18 unidades, datos no mostrados) en los últimos 20 años. En cambio, en SM los valores de bases y sus relaciones aún se encuentran dentro de rangos óptimos, posiblemente por la menor historia agrícola de este sitio y por la presencia del manto calcáreo a menor profundidad que contribuiría con bases como Ca y Mg.

Tabla 4: Acumulación de calcio (Ca), potasio (K) y magnesio (Mg) exportados en el forraje en sitio Módulo Dorila (MD) y Santa María (SM).

Table 4: Calcium (Ca), potassium (K) and magnesium (Mg) content exported in forage, at the modulo Dorila (MD) and Santa María (SM) site.

Sitio	Tratamiento	Acumulación		
		Ca (kg ha ⁻¹)	K (kg ha ⁻¹)	Mg (kg ha ⁻¹)
MD	T	465	1231	101
	S	472	1246	102
	P	513	1308	105
	P+S	513	1337	108
SM	T	205 B	436 C	43 C
	S	243 A	650 A	59 A
	P	216 B	625 B	52 B
	P+S	244 A	650 A	59 A

Letras diferentes en cada columna indica diferencias estadísticas significativas ($P < 0,10$)

Different letters in each column indicate significant statistical differences ($P < 0.10$)

Los resultados del trabajo demostraron que a mayor producción de biomasa aérea de la pastura de alfalfa la concentración de todos los nutrientes analizados fue similar (Figura 3). Los valores promedio para N, P, K, S, Ca, Mg, K fueron de 31,7; 2,4; 25,5; 2,1; 10,6 y 2,2 g kg⁻¹, respectivamente y 19 mg kg⁻¹ de Zn.

En cambio, la acumulación de nutrientes (kg ha⁻¹) presentó estrecha relación en función a la producción de biomasa aérea ($R^2 = 0,91; 0,89; 0,90; 0,87; 0,82, 0,89; y 0,87$ para N, P, K, S, Ca, Mg y Zn, respectivamente, Figura 4). De la pendiente de la ecuación de regresión entre la acumulación de nutrientes en función a la biomasa se desprende que para producir 1 Mg ha⁻¹ de biomasa aérea de alfalfa se necesitan 30,5 kg N; 2,5 kg P; 28,2 kg K; 2,24 kg S; 9,43 kg Ca; 1,95 kg Mg y 21,6 g de Zn. Estos resultados son similares a los reportados por García et al. (1999) y Lemaire y Gastal (2009) para N (28-33 kg Mg⁻¹) y P (2,8 kg Mg⁻¹), en cambio, Blackwood, (2007) reportó valores mayores para los nutrientes como S (2,8-3,3 kg Mg⁻¹), Ca (13-16 kg Mg⁻¹), Mg (2,6-3,3 kg Mg⁻¹) y Zn (24-27 kg Mg⁻¹). Mientras que para K (22-25 kg Mg⁻¹) los requerimientos encontrados en el nuestro estudio fueron un poco más altos.

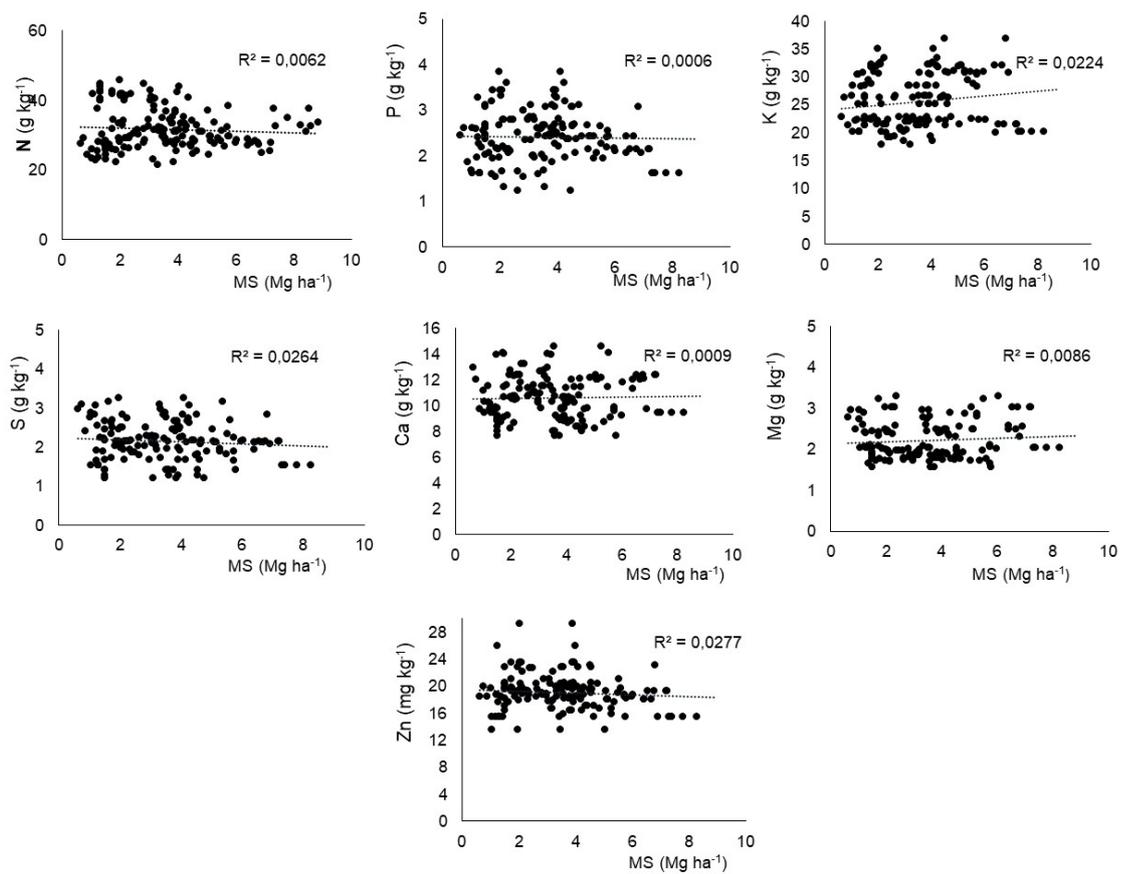


Figura 3: Concentración de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca), magnesio (Mg) y zinc (Zn) en función de la materia seca de la biomasa aérea (MS)

Figure 3: Nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), sulfur (S), calcium (Ca), magnesium (Mg) and zinc (Zn) content as a function of dry matter (MS).

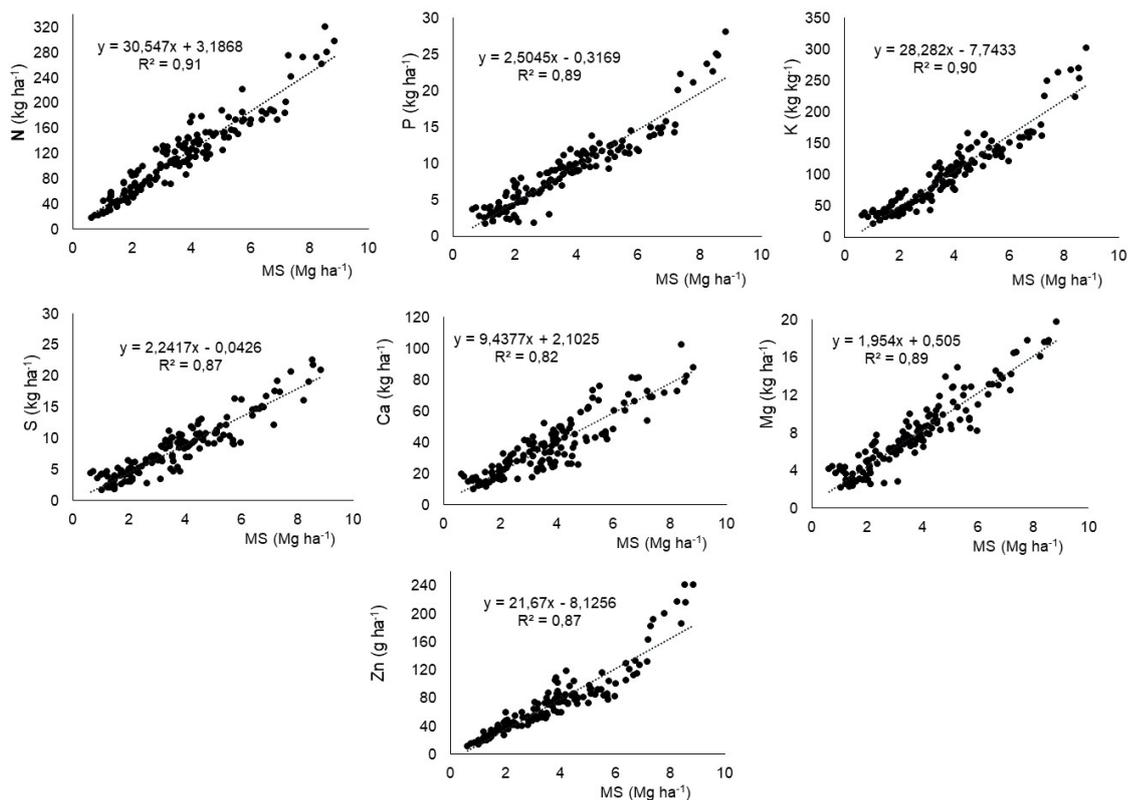


Figura 4: Acumulación de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca), magnesio (Mg) y zinc (Zn) en función de la materia seca de la biomasa aérea (MS).

Figure 4: Nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), sulfur (S), calcium (Ca), magnesium (Mg) and zinc (Zn) accumulation as a function of the dry matter (MS).

Estos resultados aportan datos relevantes acerca de cuán importante es la extracción de nutrientes en aquellos sistemas donde la reposición vía heces y orina es nula. Resultaría necesario en el corto a mediano plazo considerar una estrategia de fertilización a fin de reponer los nutrientes exportados para evitar que se generen condiciones predisponentes a deficiencias de nutrientes que conduzcan a mermas del rendimiento.

CONCLUSIONES

La respuesta a la fertilización en términos de producción de biomasa aérea y eficiencia de uso del agua fue diferente entre sitios, y respondió al contenido de los nutrientes en el perfil del suelo y a la disponibilidad de agua. Por otra parte, la exportación de nutrientes fue función de la producción de biomasa aérea y no fue afectada por la concentración de nutrientes. Esto permite mejorar la estimación de requerimientos de fertilización fosforada y azufrada para un determinado rendimiento objetivo. Los resultados también alertan sobre las pérdidas de estos nutrientes y de los cationes intercambiables del suelo con el consecuente peligro de acidificación, cuando se cosecha la producción de forraje y no se consideran planteos de reposición de estos elementos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de los establecimientos "La Nueva Escocia" de la localidad de Anguil-La Pampa y "Don Jesús" en Dorila-La Pampa, quienes nos permiten trabajar allí en experiencias de larga duración.

Deseamos agradecer a la Región CREA "Oeste Arenoso", quien priorizó la línea de investigación y que junto a los proyectos del INTA (PE I009, PE I008, RIST I-503) financiaron la experiencia.

REFERENCIAS

- Andrade, F., Taboada, M., Lema, D., Maceira, N., Echeverría, H., Posse, G., Prieto, D., Sánchez, E., Ducasse, D., Bogliani, M., Gamundi, J., Trumper, E., Frana, J., Perotti, E., Fava F. y Mastrángelo, M. (Eds.) (2017). *Los desafíos de la agricultura Argentina Satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental*. Ediciones INTA.
- Barbazán, M., Ferrando, M. y Zamalvide, J. (2007). Estado nutricional del *Lotus corniculatus* en Uruguay. *Agrociencia*, 11(1), 22 – 34.
- Basigalup, D. y Rossanigo, R. (2007). *Panorama actual de la alfalfa en la Argentina* (pp. 15-24). En D. Basigalup (Ed.), *El cultivo de la alfalfa en la Argentina*. Ediciones INTA.
- Berardo, A. (3-4 de agosto de 1998). *Fertilización de pasturas* [Conferencia]. Invernada: Planteos de Alta Producción. 5to Seminario de Actualización Técnica. Buenos Aires, Argentina.
- Berg, K. S., Brouder, S. M., Cunningham, S. M. y Volenec, J. J. (2021). Potassium and phosphorus fertilizer impacts on alfalfa taproot carbon and nitrogen reserve accumulation and use during fall acclimation and initial growth in spring wheat. *Plant Science* 12, 715936. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.715936>.
- Blackwood, I. (2007). Mineral content of common ruminant stockfeeds, crops and pastures. NSW Department of primary industries. Primefact 522
- Bolger, T. P. y Matches A. G. (1990). Water-use efficiency and yield of sainfoin and alfalfa. *Crop Science*. 30, 143-148. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010032x>.
- Carciochi, W., Wyngaard, N., Divito, G., Reussi Calvo, N., Cabrera, M. y Echeverría, H. (2016). Diagnosis of sulfur availability for corn based on soil analysis. *Biology Fertility of Soil* 52, 917-926.
- Civalero A., Kolman, G., Fernández, R. y Noellemeyer, E. (2014). Efecto del sistema de labranza y la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en un Haplustol Éntico de la región semiárida pampeana. *Semiárida* 24, 43-52.
- Collino, D., Dardanelli, J. y De Luca, M. (2007). Uso del agua y la radiación para la producción de forraje. En D. Basigalup (Ed.), *El cultivo de la alfalfa en la Argentina* (pp. 47-63). Ediciones INTA.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M., y Robledo, C. (2017). *Infostat – Software estadístico*. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina [WWW Document]. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Fernández, R., Álvarez, C., Saks, M. y Quiroga, A. (15-18 de noviembre de 2022). *Fertilización de pastura de alfalfa en suelos de la Región Semiárida Pampeana*. [Presentación de trabajo]. XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/13873>
- Fernández, R., Frasier, I., Uhaldegaray, M., Oderiz, A., Scherger, E. y Quiroga, A. (2017). Eficiencia en el uso del agua en pasturas en un molisol de la región semiárida pampeana. *Semiárida* 27, 19-25.
- Fontanetto, H. y Bianchini, A. (2007). *Fertilización fosfatada y azufrada de alfalfa a la siembra y al año de implantación en el centro-este de Santa Fe*. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 36, 22-25.
- Fontanetto, H., Keller, O., Gambaudo, S., Albrecht, J. y Boschetto, H. (2010). *Fertilización balanceada para la alfalfa en la región centro-este de Santa Fe* (Planteos Ganaderos). AAPRESID.
- Gaggioli, C. (2019). *Alternativas de cultivos tendientes a mejorar la sustentabilidad de los sistemas de producción de la Región Semiárida Pampeana*. Tesis Doctoral. Departamento de Agronomía UNSur. 306p. <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/5197>
- García, F., Boxler, M., Berardo, A., Ciampitti, I., Correndo, A., Reussi Calvo, N., Bauschen, F., Firpo, I., Minteguiaga, J. y Pozzi, R. (2010). La red de nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009, IPNI-CREA-ASP. Segunda Edición. 63 p.
- García, F., Rufo, M., y Daverede, I. (1999). *Fertilización de pasturas y verdeos*. INPOFOS. *Informaciones Agronómicas de Cono Sur* 1, 2-11.
- Jung, G. A. y Smith, D. (1959). Influence of soil potassium and phosphorus content on the cold resistance of alfalfa. *Agronomy Journal* 51, 585–587. <https://doi.org/10.2134/agronj1959.00021962005100100004x>
- Larrea, G. (2018). *Disponibilidad y variabilidad espacial de calcio, magnesio y potasio en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana*. [Tesis de Maestría, Fac. Cs. Agrarias, Univ. Nac. Mar del Plata]. Balcarce, Buenos Aires. 62 p.
- Lemaire, G. y Gastal, F. (2009). Quantifying crop responses to nitrogendeficiency and avenues to improve nitrogen use efficiency. In: *Crop physiology. Application for genetic improvement and agronomy* 171-211. Edited by: V. Sadras and D Calderini. ISBN: 978-0-12-374431-9.
- López, M. y Arrúe, J. (1997). Growth, yield and water use efficiency of winter barley in response to conservation tillage in a semi-arid region of Spain. *Soil & Tillage Research* 44, 35-54. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00030-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00030-5)
- López, J., Dardanelli, L., Collino, D., Sereno, R. y Racca, R. W. (1997). Efecto del grado de reposo invernal sobre la producción, consumo y eficiencia en el uso del agua en alfalfa cultivada bajo riego. *RIA* 28(2), 41-48.
- Marino, M. y Echeverría, H. (2018). Diagnóstico de requerimiento de fósforo para alfalfa (*Medicago sativa* L.) en argiudoles. *AGRISCI-ENTIA*, 35: 11-24.
- Mortvedt, J. J. (1991). Micronutrient fertilizer technology. En J. J. Mortvedt, F. R. Cox, L. M. Shuman y R. M. Welch (Eds.), *Micronutrients*

- in Agriculture, Book Series No. 4* (pp. 89–112). Soil Science Society of America.
- Noellemeyer, E., Fernández, R. y Quiroga, A. (2013). Crop and tillage effects on water productivity of dryland agriculture in Argentina. *Agriculture* 3, 1-11. <https://doi.org/10.3390/agriculture3010001>
- Pautasso, J. y Barbagelata, P. (2017). Actualización del umbral de fósforo Bray para el cultivo de alfalfa en Entre Ríos (Argentina). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 26, 13-16.
- Quiroga, A., Ormeño, O., Fernández, R., Álvarez, C., Frasier, I. y Noellemeyer, E. (2021a). Efecto de la labranza y la ganadería sobre propiedades edáficas y eficiencia en el uso del agua en un Molisol franco arenoso. En: *Ensayos de larga duración. Relación estratégica INTA-CREA, hacia una producción sostenible*. A. Quiroga A, R. Fernández y C. Álvarez C. (Eds.) (pp.22-34). Ediciones INTA.
- Quiroga, A., Ormeño, O., Saks, M. y Fernández, R. (2021b). Evaluación del aporte de distintos nutrientes y del riego complementario en la secuencia trigo-soja-maíz-soja. En: *Ensayos de larga duración. Relación estratégica INTA-CREA, hacia una producción sostenible*. A. Quiroga A, R. Fernández y C. Álvarez C. (Eds.) (pp.35-44). Ediciones INTA.
- Rivero, E., Cruzate, G. A. y Turati, R. (19-22 septiembre de 2006). *Azufre, boro y zinc: mapas de disponibilidad y reposición en suelos de la región pampeana*. Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. I Reunión de Suelos de la Región Andina.
- Sainz Rozas, H., Eyherabide, M., Larrea, G., Martínez Cuesta, N., Angelini, H., Reussi Calvo, N. y Wyngaard, N. (mayo de 2019). *Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana*. Simposio Fertilidad 2019. Fertilizar, Rosario, Santa Fe.
- Sánchez-Rodríguez, R. A., del Campillo, M.C. y Torrent, J. (2017). Phosphorus reduces the zinc concentration in cereals pot grown on calcareous Vertisols from southern Spain. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 97, 3427–3432. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8195>
- Vivas, H., Quintero, C., Boschetti, G., Fontanetto, H y Albrecht, R. (22-25 de junio de 2004). *Fertilización con Fósforo y Azufre para la producción de Alfalfa en el centro de Santa Fe*. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Volenc, J. J., Brouder, S. M. y Murrell, T. S. (2021). Broadening the objectives of future potassium recommendations. En *Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops*. T. S. Murrell, R. L. Mikkelsen, G. Sulewski, R. Norton, y M. L. Thompson (Eds.), (pp. 385–415). Cham, Switzerland: Springer Nature.