



Retorno de nitrogênio em um sistema integrado de produção agropecuária com irrigação e leguminosa forrageira

Nitrogen return in an integrated crop-livestock system with irrigation and forage legume

João de Assis Farias Filho¹ , Laércio Ricardo Sartor¹ , Caroline Amadori^{*1} , Mirella Danna¹ , Luís Fernando Glasenapp de Menezes¹ 

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Dois Vizinhos, Paraná, Brasil 

*autor correspondente: carolamadori@gmail.com

Recebido: 18 de fevereiro de 2025. Aceito: 26 de maio de 2025. Publicado: 13 de agosto de 2025. Editor: Rondineli P. Barbero

Resumo: Ampliar o uso de diferentes práticas em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) é essencial para compreender a dinâmica do retorno de nitrogênio (N). Este estudo avaliou a influência da leguminosa e da irrigação no retorno de N em SIPA. Os quatro tratamentos foram arranjos em esquema fatorial 2x2 (irrigação x consorciação), sendo eles, irrigado e não irrigado, consorciado com leguminosa e não consorciado, dispostos em delineamento de blocos ao acaso com três repetições. A área experimental foi cultivada no inverno com pastagem de aveia preta (*Avena strigosa*) mais azevém (*Lolium multiflorum*), e a ervilhaca (*Vicia sativa*), implantada nos tratamentos consorciados, com pastejo rotacionado. No verão, o milho (*Zea mays*) foi cultivado em toda área. Os dados foram submetidos à análise de variância (Teste F, $p > 0,05$). Não se observaram efeitos significativos da irrigação e da leguminosa no retorno de N pelas fezes, pela urina e pelos resíduos da pastagem. A produção de grãos, a palhada, a extração, a exportação e o retorno de N pelo milho foram semelhantes entre os tratamentos. O retorno médio total de N foi de 335,61 kg ha⁻¹. Após um ano de avaliação, a irrigação e o consórcio com leguminosa não influenciaram no retorno de N em SIPA.

Palavras-chave: agricultura sustentável; balanço de nutrientes; cultivo misto; rendimento de grãos.

Abstract: Expanding the use of different practices in integrated crop livestock system (ICLS) is essential to understanding the dynamics of nitrogen (N) return. This study evaluated the influence of legume and irrigation on nitrogen return in ICLS. The four treatments were: irrigated and non-irrigated x intercropped and not intercropped with legume, in a 2x2 factorial scheme in randomized blocks experimental design with three replications. The ICLS area was cultivated, in winter, with pasture of black oat (*Avena strigosa*) and ryegrass (*Lolium multiflorum*) overseeded in african star (*Cynodon* sp.), and vetch (*Vicia sativa*) in the intercropped paddocks, with rotational grazing method. And, in summer, with corn (*Zea mays*). Data were subjected to analysis of variance (F test, $p < 0.05$). There were no significant effects of irrigation and legumes on the return of N through feces, urine, and pasture residues. Grain yield, straw, extraction, export, and return of N by corn were similar among treatments. The average total N return was 335.61 kg ha⁻¹. Irrigation and intercropping with legumes did not influence N return in ICLS, after one-year evaluation.

Key-words: sustainable agriculture; nutrient balance; mixed cropping; grain yield.



1. Introdução

A crescente expansão do uso de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) é uma alternativa para a intensificação sustentável da produção agrícola, no atual cenário global de demanda por alimentos e de preservação ambiental, diante das mudanças climáticas ^(1,2). Nos SIPA, a ciclagem de nutrientes, devido à integração de animais com lavoura em rotação, pode levar a um maior aproveitamento dos recursos naturais no sistema solo-planta-animal-atmosfera ⁽³⁾, com aumento da lucratividade do sistema de produção ⁽⁴⁾. Os processos de mastigação e de digestão dos alimentos pelos animais em pastejo promovem um efeito catalítico sobre os nutrientes e aceleram a ciclagem dos nutrientes, que retornam ao solo, por meio de excreções urinárias e fecais, em formas disponíveis para serem absorvidas pelo sistema radicular da planta ⁽⁵⁾.

O uso de leguminosas em pastagens sob SIPA é uma tecnologia que pode reduzir insumos externos e favorecer maior produção de biomassa, consequentemente maior sustentabilidade do sistema de produção ⁽⁶⁾. Quando as leguminosas são utilizadas em sistemas pastoris, são observados benefícios, como fixação biológica de N₂, maior diversidade ecossistêmica e melhorias na dieta dos animais, ao promover aumento no teor de proteína bruta.

Da mesma forma, a adoção de sistema de irrigação pode ser considerada uma ferramenta importante para equilibrar a oferta e a qualidade da forragem, proporcionando aumento de produtividade, maior produção foliar, teor de proteína bruta e digestibilidade da forragem ⁽⁷⁾. Em relação à cultura subsequente, especificamente o milho, segundo Sah *et al.* ⁽⁸⁾, mesmo que haja água suficiente até o estágio vegetativo, o período mais crítico é do pré-florescimento ao enchimento de grãos, no qual o rendimento das culturas de milho pode ser afetado.

Nesse contexto, o uso de leguminosas forrageiras e de irrigação, quando utilizadas em conjunto ou separadamente em pastagens de inverno e em culturas de verão, pode causar influências significativas no retorno e no balanço de nutrientes, bem como na produção animal e vegetal em sucessão, no que se refere à fixação biológica de nitrogênio (N) pelas leguminosas e aos efeitos positivos dos suprimentos hídricos durante períodos de déficit hídrico, resultando em maior produção de biomassa no sistema.

Portanto, o objetivo do trabalho foi o de avaliar, em um sistema integrado lavoura-pecuária, se o retorno de nitrogênio, via resíduos do sistema, e a produção de milho são influenciados pelo uso de irrigação e de consórcio entre gramíneas e leguminosas.

2. Material e métodos

O experimento foi conduzido na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Dois Vizinhos, Paraná (25°44" S, 54°04" W, 520 m de altitude). O solo local é Nitossolo Vermelho distroférrico ⁽⁹⁾ e o clima é subtropical úmido mesotérmico (Cfa) ⁽¹⁰⁾, com precipitação anual entre 1800 e 2000 mm. Há mais de quatro anos, a área do experimento foi cultivada com pastagem de estrela africana (*Cynodon* sp.), durante o verão, com aveia preta e azevém sobressemeados no inverno, sob pastejo de bovinos de corte.

Durante o inverno/primavera de 2016, a área foi subdividida em 12 unidades experimentais, com área de 0,072 ha. Os tratamentos foram compostos por dois fatores: uso ou não de irrigação e uso ou não de consórcio com leguminosas na pastagem de inverno. O delineamento experimental foi em blocos

casualizados em esquema fatorial (2x2) com três repetições. No inverno, a pastagem foi de aveia preta (*Avena strigosa*) e azevém (*Lolium multiflorum*), com e sem consórcio com ervilhaca (*Vicia sativa*), e com e sem irrigação. No verão, foi cultivado milho (*Zea mays* L.). Informações sobre as características químicas do solo estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Análise química do solo (0–20 cm) antes da instalação do experimento.

Atributos químicos do solo											
pH CaCl ₂	Índice SMP	MO	P	K	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	V	Saturação Al
		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	cmolc dm ⁻³						%	
4,76	5,93	39,76	5,21	0,57	0,13	5,32	4,70	2,33	7,60	58,87	1,78

MO: Matéria orgânica; SB: soma de bases.

O sistema de irrigação por aspersão foi constituído por 60 aspersores NY 25, com vazão de 597 L ha⁻¹ e taxa de aplicação de 2,2 mm h⁻¹, a uma altura de 2 m, com 18 m entre linhas e 15 m entre aspersores. O sistema foi acionado quando o potencial mátrico do solo atingiu valor igual ou superior a 10 kPa, determinado por tensiômetros na área. A temperatura do ar e a precipitação pluviométrica foram monitoradas na estação meteorológica da UTFPR (Figura 1).

A pastagem foi estabelecida no final de abril de 2016, com semeadura de aveia preta cv. BRS 139, em plantio direto, com densidade de sementes de 60 kg ha⁻¹ e 0,17 m entre linhas, e azevém cv. Fepagro São Gabriel, a lanço com sementes de 55 kg ha⁻¹. Em piquetes consorciados, a ervilhaca cv. Ametista foi semeada como aveia, utilizando 30 kg ha⁻¹, com linhas perpendiculares. A adubação de base foi de 300 kg ha⁻¹ de N-P-K (5-20-20) e a cobertura com ureia (45% N), aplicada a lanço com dose de 150 kg ha⁻¹ de N dividida em cinco aplicações.

O método de pastejo foi rotacionado com altura de entrada do pasto de 0,30 m, medida com régua em cinco locais do piquete. Foram alocados dois novilhos por unidade experimental (0,072 ha), totalizando 24 animais distribuídos entre os tratamentos. A saída dos animais foi baseada na altura de entrada do piquete seguinte com limite mínimo de 0,10 m. Caso o piquete seguinte não tivesse altura de entrada e o atual tivesse a altura limite, os animais eram removidos, pesados e mantidos em área similar até que a reentrada fosse possível, sendo esse período considerado nos cálculos para mensuração da taxa de lotação animal.

Foram utilizados 24 novilhos Angus e Charolês com peso inicial de 162±11,3 kg e idades entre 6 e 10 meses. Os animais passaram por um período de adaptação de 18 dias nos piquetes, onde permaneceram durante todo o inverno/primavera, totalizando 130 dias de pastejo. Ao final, os resíduos de pastagem foram dessecados com herbicida glifosato (3 L ha⁻¹). O comitê institucional de ética no uso de animais em experimentos da UTFPR – campus Dois Vizinhos – aprovou o estudo sob o protocolo de n.º 2016-015.

O milho foi semeado em meados de novembro em plantio direto, com 3,6 sementes/m linear do híbrido Pioneer 30F53vyh, com 0,45 m entre linhas. A adubação de base foi de 439 kg ha⁻¹ de N-P-K (8-20-10), e a cobertura com 90 kg ha⁻¹ de N, ureia (45% N) aplicada a lanço no estádio V6. O controle de pragas foi realizado no estádio V4, utilizando-se os inseticidas piretroide (lambda-cialotrina) e antranilamida (clorantraniliprole), na dose de 150 mL ha⁻¹, para controle da lagarta-do-cartucho.

Em relação às avaliações das pastagens, avaliou-se a taxa de acúmulo de matéria seca da pastagem na entrada (pré-pastejo) e na saída (pós-pastejo) dos animais, coletando-se todo o pasto em um gabarito quadrado (0,25 m²) em quatro pontos. Essas amostras foram pesadas e separadas, uma para análise botânica, porcentagem de material morto e porcentagem de ervilhaca, e a outra foi seca (55 °C por 72 h) para obter o teor de matéria seca. Com isso, foram calculadas as massas de forragem antes e após o pastejo. Com base nesses valores e no número de dias em que os animais retornaram ao piquete avaliado, foram calculadas a taxa de acúmulo diário e a produção total de matéria seca. No segundo dia após a entrada do animal no piquete, amostras de pasto foram coletadas por pastejo simulado ⁽¹¹⁾. Essas amostras foram secas e moídas (moinho tipo Willey - 1 mm) para determinação da digestibilidade *in vitro* ⁽¹²⁾ e para determinação do teor de N no pasto ingerido pelos animais, que, assim como as amostras de material morto, foram submetidas à análise do teor de N ⁽¹³⁾.

Em relação às avaliações dos animais, eles foram pesados a cada 28 dias, após jejum de 12h, para determinação do peso vivo (PV) e da taxa de lotação animal. Para avaliações de consumo e excretas, quatro novilhos do mesmo grupo genético foram mantidos em cada módulo por 7 dias de adaptação e por 12 dias de avaliação em delineamento quadrado latino 4 x 4 (4 tratamentos x 4 períodos). Cada um desses animais recebeu 10 g de dióxido de titânio diariamente às 10h, via sonda esofágica. Do 8º ao 12º dia, amostras fecais foram coletadas do reto dos animais duas vezes ao dia (às 10h e às 16h30), sendo, então, congeladas a -10 °C. As amostras fecais foram secas (ventilação forçada a 55 °C por 72 h) e moídas (moinho Willey - 1 mm) para concentração de titânio nas fezes, produção fecal e ingestão diária de matéria seca ⁽¹⁴⁾.

Amostras de urina foram coletadas diariamente às 10h da manhã do 8º ao 12º dia, em forma de spot (uma única amostra diária). Uma alíquota de 10 mL de urina foi acidificada com 40 mL de ácido sulfúrico (0,036 N), para determinar o teor total de N, e outra alíquota de 50 mL foi mantida pura para determinar o teor de creatinina, usando um kit comercial (LABTEST), para determinar a produção diária de urina ⁽¹⁵⁾. Tanto as amostras compostas de urina quanto as amostras compostas de fezes foram analisadas quanto ao teor de N ⁽¹³⁾.

Em relação às avaliações do milho, para o estado nutricional, uma semana após o início da floração, foi coletada a primeira folha oposta abaixo da espiga principal de 20 plantas consecutivas de três fileiras. O rendimento de grãos foi determinado com a colheita das espigas em duas fileiras de 4 m, em quatro pontos. Todas as espigas coletadas foram debulhadas (batedor mecânico) e os grãos foram pesados para determinação da umidade e do rendimento de grãos, com umidade corrigida para 13%. Para resíduos da cultura do milho, plantas (sem grãos) de 2 linhas de 1 m foram coletadas e pesadas. Subamostras de folhas de milho, de grãos de milho e de resíduos vegetais foram secos (ventilação forçada a 55°C por 72 h), moídos (moinho Willey -1 mm) e analisados quanto ao teor de N ⁽¹³⁾.

Quanto à análise estatística, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), por meio do teste F, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Quando a interação entre os fatores não foi significativa, os efeitos principais foram avaliados separadamente. Em casos de interação significativa, foi realizado o desdobramento das médias, utilizando o teste t ($p < 0,05$), devido à limitação na aplicação do teste de Tukey em algumas situações, conforme as estruturas dos dados. As análises foram realizadas no programa SAS (Statistical Analysis System).

3. Resultados e discussão

O peso vivo médio, a taxa de lotação animal, a produção total de matéria seca e o resíduo do pasto ao final do ciclo não diferiram sob o efeito dos fatores avaliados (Tabela 2). Embora estudos sugiram que a irrigação aumenta a produção de matéria seca ⁽⁷⁾, no presente estudo, a distribuição regular de chuvas (132 mm/mês) foi suficiente para atender às necessidades hídricas das plantas, resultando em uso limitado do sistema de irrigação (Figura 1). Como resultado, a irrigação não teve impacto significativo na produção de matéria seca e na taxa de lotação animal. A concentração de N, nas amostras de simulação de pastejo e no resíduo do pasto antes da implementação da cultura, foi semelhante (Tabela 2). Quando necessário, o uso da irrigação pode acarretar aumento de N no pasto e, assim, em uma massa pastejada com maior teor de proteína bruta, devido à maior diferenciação na estrutura do pasto, causando maior produção de folhas ⁽⁷⁾.

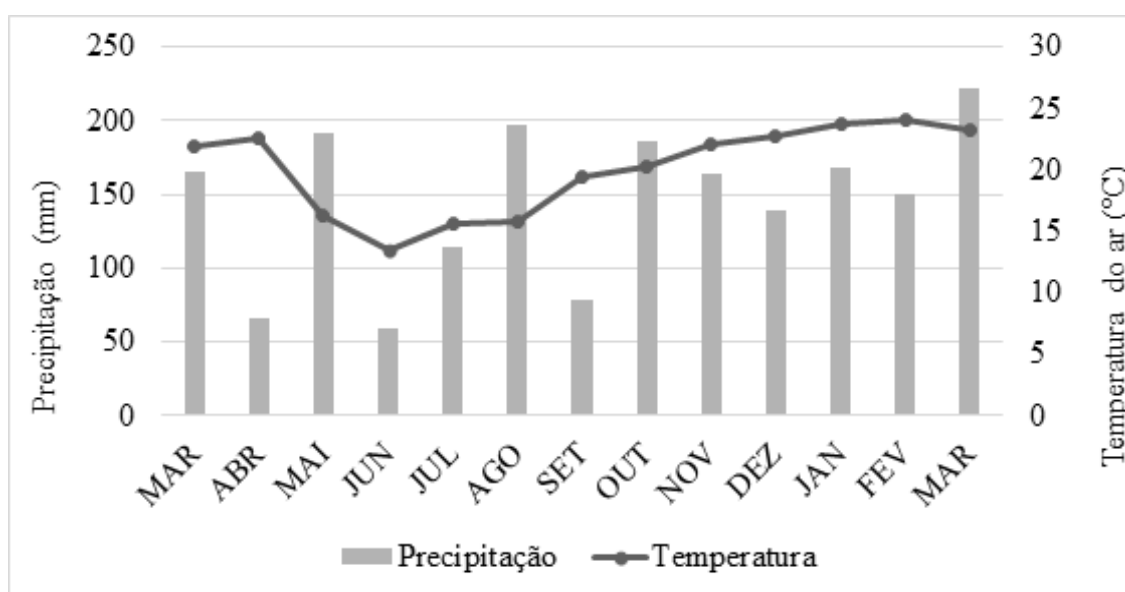


Figura 1. Precipitação acumulada e temperatura do ar média, de abril de 2016 a março de 2017, na área experimental. Dois Vizinhos, Paraná.

Da mesma forma, pastagens consorciadas com leguminosas, geralmente, apresentam maior teor de N, pois pode haver aumento na absorção, devido à fixação biológica de N_2 , via simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium*, aumentando o teor de proteína bruta ⁽¹⁶⁾. Isso não foi observado neste trabalho devido à baixa participação da ervilhaca no dossel forrageiro (2 a 5 %), o que pode estar relacionado ao efeito da competição entre essa espécie e gramíneas (aveia e azevém) ⁽¹⁷⁾.

O consumo de matéria seca foi semelhante, representando 3,2 a 3,4 % do PV (Tabela 2). O consumo diário de N também não diferiu entre os tratamentos (Tabela 2). Da mesma forma, e devido à inexistência de diferença na taxa de lotação dos animais, o consumo diário e total de N por área foi semelhante sob efeito dos tratamentos (Tabela 2). Em média, 282,70 kg ha⁻¹ de N foram mobilizados pelos animais durante o período de avaliação, aumentando a ciclagem desse elemento no sistema, uma vez que de 5 a 20% do que o animal ingere é retido, sendo o restante excretado nas fezes e na urina ^(18,19).

Tabela 2. Parâmetros produtivos, concentração de nitrogênio e consumo animal durante o inverno/primavera (130 dias) em um sistema integrado de produção agropecuária usando irrigação e pastagem consorciada com leguminosa.

	ConSORCIADO	NÃO consorciado	Média	Pr>F Irr	Pr>F Cons	Pr>F Irr*Cons	CV (%)
Peso vivo (kg)							
Irrigado	215,33	227,65	221,49 ^{ns}				
Não Irrigado	221,00	223,19	222,10	0,8761	0,8097	0,8873	7,54
Média	218,17 ^{ns}	225,42					
Carga animal (kg PV ha ⁻¹)							
Irrigado	1782,77	2058,29	1920,53 ^{ns}				
Não Irrigado	2016,92	1941,01	1978,97	0,6111	0,3937	0,1536	9,23
Média	1899,90 ^{ns}	1999,65					
Produção total de matéria seca (kg ha ⁻¹ MS)							
Irrigado	11746,89	11180,50	11463,70 ^{ns}				
Não Irrigado	12203,13	11416,69	11809,91	0,7273	0,5010	0,9114	13,25
Média	11975,01 ^{ns}	11298,60					
Resíduo da pastagem no final do ciclo de pastejo (kg ha ⁻¹ MS)							
Irrigado	3621,00	3147,33	3384,16 ^{ns}				
Não Irrigado	2908,04	2950,76	2929,40	0,0952	0,4076	0,3240	15,91
Média	3264,52 ^{ns}	3049,04					
Concentração de N na simulação de pastejo (g kg ⁻¹ MS)							
Irrigado	34,38	32,56	33,47 ^{ns}				
Não Irrigado	34,11	34,31	34,21	0,3540	0,6457	0,5841	18,33
Média	34,25 ^{ns}	33,44					
Concentração de N no resíduo da pastagem (g kg ⁻¹ MS)							
Irrigado	25,45	26,40	25,93 ^{ns}				
Não Irrigado	26,14	24,95	25,55	0,7569	0,9220	0,3900	9,32
Média	25,80 ^{ns}	25,68					
Consumo diário de matéria seca (g kg ⁻¹ PV dia ⁻¹)							
Irrigado	33,79	33,32	33,56 ^{ns}				
Não Irrigado	32,10	32,65	32,38	0,8170	0,7987	0,7506	8,39
Média	32,95 ^{ns}	32,99					
Consumo diário de N (g kg PV ⁻¹ dia ⁻¹)							
Irrigado	1,16	1,09	1,13 ^{ns}				
Não Irrigado	1,09	1,12	1,11	0,8571	0,8571	0,6539	19,51
Média	1,13 ^{ns}	1,11					
Consumo diário de N por área (kg ha ⁻¹ dia ⁻¹)							
Irrigado	2,07	2,24	2,16 ^{ns}				
Não Irrigado	2,21	2,18	2,20	0,7547	0,5751	0,4377	9,08
Média	2,14 ^{ns}	2,21					
Consumo total de N por área (kg ha ⁻¹)							
Irrigado	269,08	291,20	280,14 ^{ns}				
Não Irrigado	287,30	283,40	285,35	0,7545	0,6095	0,4413	9,10
Média	278,05 ^{ns}	287,30					

^{ns} = não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade de erro.

A produção diária de fezes e de urina não foi significativamente influenciada pela irrigação e pelo consórcio com ervilhaca (Tabela 3). As concentrações de N na urina e nas fezes também não diferiram entre os tratamentos (Tabela 3). Observou-se que, em média, o teor de N nas fezes foi de 27,25 g kg MS⁻¹, valor próximo aos 27 a 32 g kg MS⁻¹ citados por Garcia *et al.* ⁽²⁰⁾. Na urina, a concentração média de N foi de 7,60 g L⁻¹, valor próximo aos 7,2 g L⁻¹ citados por Selbie *et al.* ⁽²¹⁾ como comuns na urina de bovinos de corte.

Tabela 3. Produção de nitrogênio e concentração de nitrogênio na excreta animal, durante o inverno/primavera (130 dias), em um sistema integrado de produção agropecuária, usando irrigação e pastagem consorciada com leguminosa.

	Conso- rariado	Não conso- rariado	Média	Pr>F Irr	Pr>F Cons	Pr>F Irr*Cons	CV (%)
Produção de fezes (g kg ⁻¹ PV dia ⁻¹)							
Irrigado	6,02	5,19	5,61 ^{ns}	0,2320	0,1213	0,0589	8,06
Não Irrigado	5,28	5,37	5,33				
Média	5,65 ^{ns}	5,28					
Produção de urina (mL kg ⁻¹ PV dia ⁻¹)							
Irrigado	60,44	68,58	64,51 ^{ns}	0,5068	0,6661	0,3809	19,30
Não Irrigado	61,79	58,98	60,39				
Média	61,12 ^{ns}	63,78					
Concentração de N nas fezes (g kg ⁻¹ MS)							
Irrigado	26,89	27,81	27,35 ^{ns}	0,9303	0,5846	0,8896	16,12
Não Irrigado	26,38	27,93	27,16				
Média	26,64 ^{ns}	27,87					
Concentração de N na urina (g L ⁻¹)							
Irrigado	7,76	7,43	7,60 ^{ns}	0,9793	0,1450	0,3463	14,90
Não Irrigado	8,33	6,88	7,61				
Média	8,05 ^{ns}	7,16					
Retorno diário de N pelas fezes (g kg ⁻¹ PV dia ⁻¹)							
Irrigado	0,16	0,15	0,16 ^{ns}	0,3707	0,9194	0,3707	16,33
Não Irrigado	0,14	0,15	0,15				
Média	0,15 ^{ns}	0,15					
Retorno diário de N pela urina (g kg ⁻¹ PV dia ⁻¹)							
Irrigado	0,47	0,51	0,49 ^{ns}	0,5384	0,5384	0,1113	17,66
Não Irrigado	0,51	0,41	0,46				
Média	0,49 ^{ns}	0,46					
Retorno diário de N pela excreta (g kg ⁻¹ PV dia ⁻¹)							
Irrigado	0,63	0,66	0,65 ^{ns}	0,4691	0,4691	0,2106	14,11
Não Irrigado	0,65	0,56	0,61				
Média	0,64 ^{ns}	0,61					
Retorno diário total de N pela excreta por área (kg ha ⁻¹ dia ⁻¹)							
Irrigado	1,12 Ba	1,36 Aa	1,24	0,6351	0,9093	0,0134*	9,54
Não Irrigado	1,31 Aa	1,09 Ab	1,20				
Média	1,22	1,23					
Retorno total de N por área durante o inverno (kg ha ⁻¹)							
Irrigado	237,96	258,16	248,06 ^{ns}	0,1928	0,5212	0,0754	9,87
Não Irrigado	247,20	207,65	227,43				
Média	242,58 ^{ns}	232,91					

^{ns} = não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade de erro. Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste T (p>0,05).

Além disso, o retorno de N diário das fezes e da urina foi semelhante (Tabela 3), devido à ausência de diferença no teor de proteína bruta da forragem consumida entre os tratamentos, uma vez que a excreção de N na urina e nas fezes depende da proteína bruta do alimento ⁽²²⁾. O retorno total de N, via excreções animais, foi, em média, 158,18 kg ha⁻¹ de N, dos quais 76% correspondem ao N excretado via urina e 24%, via fezes. Esses valores corroboram Lessa *et al.* ⁽²³⁾, que relatam que a maior parte do N excretado pelos bovinos retorna ao solo por meio da urina.

Na urina, 60 a 90% do N está na forma de ureia, que é convertida em amônia no solo pela urease, tornando o N mais suscetível a perdas ⁽²⁴⁾. Essas perdas dependem de fatores como temperatura, cobertura vegetal, umidade e textura do solo. Em pastagens, o N urinário pode ser perdido, principalmente por volatilização, mas também por escoamento superficial, e a desnitrificação também causa perdas, na forma de N₂ e N₂O ⁽²⁵⁾.

O retorno total de nitrogênio por hectare (Tabela 3) foi menor tanto no tratamento sem irrigação e sem leguminosa quanto no tratamento com irrigação e com leguminosa. Apesar de a hipótese inicial indicar maior retorno de nitrogênio no tratamento consorciado com leguminosa, observou-se uma baixa participação da leguminosa na pastagem (entre 5 e 10%), resultado da competição com as gramíneas, efeito de seleção natural e outros fatores de difícil controle ⁽²⁶⁾. Situação semelhante ocorreu com a irrigação, cuja efetividade foi reduzida pela boa distribuição das chuvas ao longo do período experimental (Figura 1), o que pode ter anulado o efeito esperado desses fatores. Durante o cultivo do milho de verão, as concentrações de N na folha bandeira não diferiram (Tabela 4). Segundo SBCS ⁽²⁷⁾, níveis de 2,7 a 3,5% de N nas folhas são adequados para o desenvolvimento do milho. Em relação ao teor de N nos grãos e na palha, não foram observadas diferenças (Tabela 4). A produtividade de grãos manteve-se, em média, em 9.497 kg ha⁻¹ e a produção de palha em 10.976 kg ha⁻¹, sendo que ambas as variáveis não foram influenciadas pelos fatores irrigação e consórcio com leguminosa no inverno (Tabela 4). Assim como ocorreu no inverno/primavera, a precipitação média mensal de 162 mm, distribuída regularmente (Figura 1), foi suficiente para suprir a demanda hídrica das plantas. A similaridade na produtividade de grãos entre o consórcio de gramíneas e de leguminosas pode ser decorrente da baixa participação de leguminosas na pastagem, não resultando em maior quantidade de N residual.

Tabela 4. Parâmetros do milho em um sistema integrado de produção agropecuária, usando irrigação e pastagem consorciada com leguminosa.

	Consortiado	Não consorciado	Média	Pr>F Irr	Pr>F Cons	Pr>F Irr*Cons	CV (%)
Concentração de N na folha bandeira (g kg MS ⁻¹)							
Irrigado	33,88	30,99	32,44 ^{ns}	0,2702	0,4726	0,1712	9,91
Não Irrigado	33,50	34,42	33,96				
Média	33,69 ^{ns}	32,71					
Concentração de N nos grãos (g kg MS ⁻¹)							
Irrigado	9,62	9,66	9,64 ^{ns}	0,0863	0,8312	0,7641	9,12
Não Irrigado	10,62	10,38	10,50				
Média	10,12 ^{ns}	10,02					
Concentração de N na palhada (g kg MS ⁻¹)							
Irrigado	10,44	9,42	9,93 ^{ns}	0,5048	0,5403	0,4115	15,81
Não Irrigado	9,38	9,53	9,46				
Média	9,91 ^{ns}	9,48					
Produtividade de grãos (kg ha ⁻¹)							
Irrigado	8683,34	9930,56	9306,95 ^{ns}	0,4733	0,1259	0,4391	11,45
Não Irrigado	9472,23	9900,01	9686,12				
Média	9077,79 ^{ns}	9915,29					
Produção de palhada (kg ha ⁻¹)							
Irrigado	10710,55	12182,81	11446,68 ^{ns}	0,2527	0,2418	0,5303	13,94
Não Irrigado	10275,15	10733,91	10504,53				
Média	10492,85 ^{ns}	11458,36					
Extração de N (kg ha ⁻¹)							
Irrigado	190,90	188,43	189,67 ^{ns}	0,3353	0,3381	0,2538	9,86
Não Irrigado	188,50	212,90	200,70				
Média	189,70 ^{ns}	200,67					

^{ns} = não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade de erro.

O retorno total de N, via resíduo do pasto, antes da fase de cultivo, foi semelhante entre os tratamentos (Figura 2B), pois não houve diferença significativa na quantidade nem no teor de N dos resíduos, com média de 79,56 kg ha⁻¹ de N. Entretanto, o retorno de N urinário por hectare apresentou interação significativa (Figura 2B), com menores valores nos tratamentos irrigado com leguminosa e não irrigado sem leguminosa. Embora o retorno diário de N pela urina por unidade de peso vivo não tenha apresentado interação significativa (Tabela 3), essa diferença pode estar relacionada à taxa de lotação, que influencia diretamente o retorno de N por área. Assim, mesmo com excreção proporcional semelhante entre os tratamentos, a quantidade total de N excretado por hectare foi distinta. Como o N urinário representa, em média, 76% do N total excretado, essa diferença foi refletida também no retorno total de N (urina + fezes), explicando os menores valores observados nesses dois tratamentos.

Em média, o retorno total de N no inverno/primavera foi de 237,7 kg ha⁻¹ de N, dos quais 67% correspondem ao N devolvido via fezes e urina e 33% correspondem ao N proveniente do resíduo do pasto.

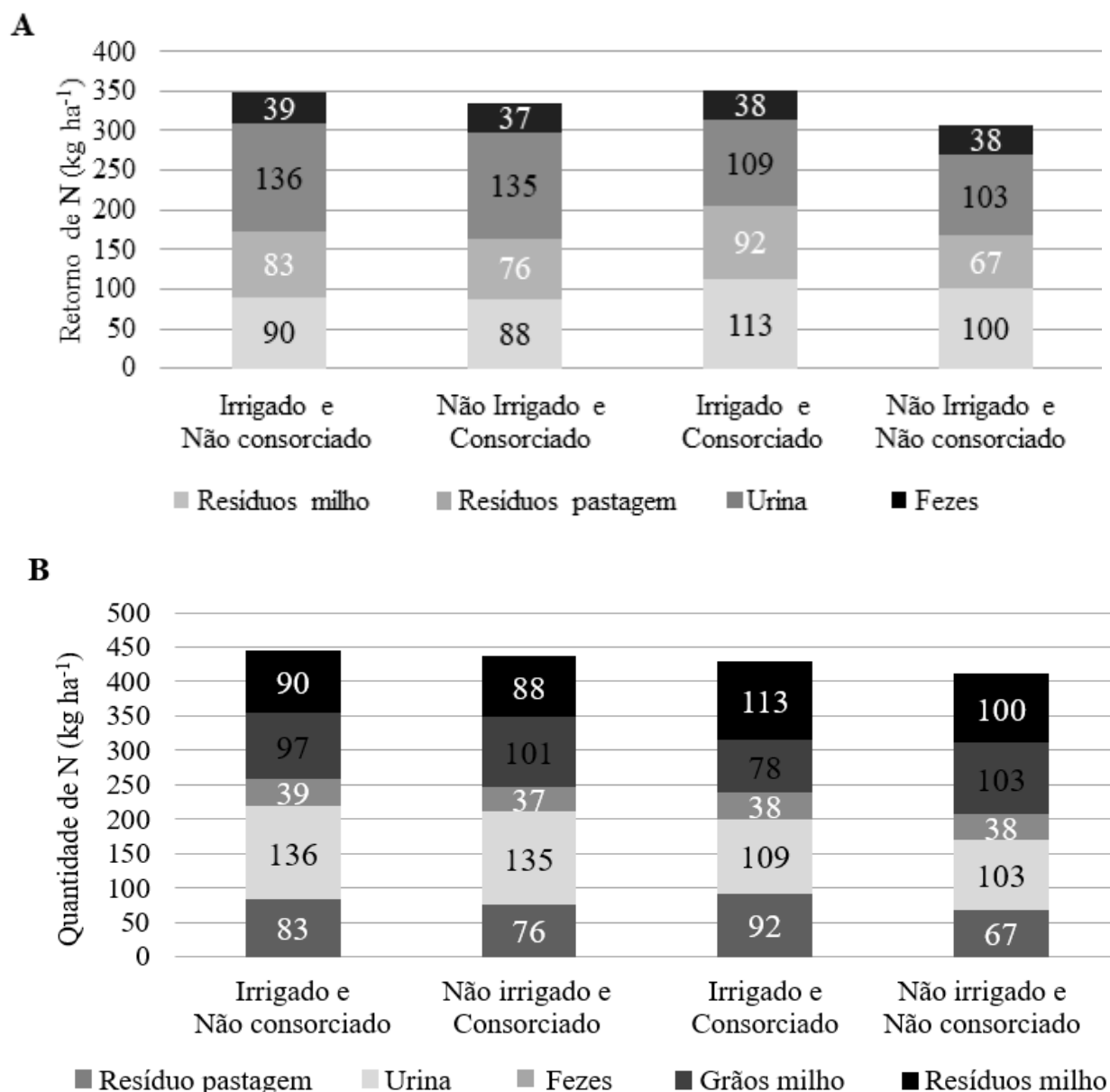


Figura 2. (A) Retorno total de nitrogênio e (B) quantidade de N medida em um sistema integrado de produção agropecuária, usando irrigação e pastagem consorciada com leguminosa.

Considerando as práticas agrícolas, a exportação média de N foi de $94,69 \text{ kg ha}^{-1}$ em grãos ($p=0,3490$) e $97,87 \text{ kg ha}^{-1}$ em palha ($p=0,4115$), sem diferença entre os fatores e os tratamentos. A relação com a produtividade de grãos e de massa seca da palha resultou em médias de $9,95 \text{ kg ton}^{-1}$ de N em grãos e $8,97 \text{ kg ton}^{-1}$ de N na palha. A soma da exportação de grãos e do retorno da palha foi de $195,18 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, sem diferença entre os tratamentos. O total de N retornado ao sistema foi de aproximadamente 336 kg ha^{-1} , composto, principalmente, por N de resíduos de milho (29 %), N de resíduos de pastagem (24 %), N urinário (36 %) e N fecal (11 %) (Figura 2). Do retorno total, 71 % ocorreram durante o inverno/primavera, com a maioria proveniente de excretas animais.

Embora o retorno total de N por hectare tenha apresentado interação significativa entre irrigação e consórcio com leguminosa, com menores valores observados nos tratamentos irrigado com leguminosa e não irrigado sem leguminosa, é importante destacar que essas práticas, quando bem estabelecidas,

ainda possuem potencial para contribuir com a sustentabilidade do sistema. A irrigação pode melhorar a distribuição e a absorção de nutrientes pelas raízes, além de reduzir as perdas por volatilização, especialmente em condições de déficit hídrico. Da mesma forma, a inclusão de leguminosas pode diminuir a necessidade de fertilizantes nitrogenados, favorecendo a fixação biológica de N e reduzindo o N suscetível a perdas. Assim, mesmo que os resultados do presente estudo não tenham demonstrado esse efeito, as vantagens agronômicas dessas práticas podem ser mais evidentes em sistemas com maior participação da leguminosa no dossel e com uso mais intensivo da irrigação ⁽²⁸⁾. Além do retorno durante o inverno/primavera, 29% do total de N devolvido veio dos resíduos da cultura do milho, o que representa 98 kg ha⁻¹ de N que permaneceram no solo em 10.976 kg ha⁻¹ de palha, disponíveis para decomposição e mineralização para a cultura sucessora. Nesse caso, pode-se inferir que, tanto na produção de carne durante o inverno/primavera quanto na produção de milho no verão, a quantidade de N que entrou via fertilizantes foi suficiente para atender às demandas da perspectiva da fazenda. No entanto, o real balanço só pode ser quantificado quando se considera o N presente no solo e nos resíduos, que é o que permanecerá no sistema para ser disponibilizado e utilizado pela próxima cultura em SIPA.

O N exportado pelo milho foi semelhante entre os tratamentos. Somando o N exportado pelo milho ao N devolvido ao solo, é possível obter a quantidade total de N medida no sistema, que foi, em média, 430 kg ha⁻¹ de N. Apesar de não ser a quantidade real de átomos de N que passaram pelo sistema, devido à dinamicidade do nutriente, esses valores permitem avaliar a forma como o nutriente foi utilizado e comparar diferentes situações sobre a eficiência de uso desse nutriente. Para os 430 kg ha⁻¹ de N total medido no sistema, 18 % correspondem ao N via resíduos de pastagem, 28 % via urina, 9 % via fezes, que juntos representam o N total durante o inverno (237 kg ha⁻¹), correspondendo a 55 % do N total no sistema durante todo o período de avaliação (Figura 2).

Considerando o total de N aplicado de fertilizantes, durante todo o período experimental (pasto + lavoura), 290 kg ha⁻¹, e a quantidade total de N devolvida, aproximadamente 335 kg ha⁻¹, é possível destacar a importância do uso eficiente e da manutenção do nutriente no sistema como um todo, pois o N devolvido é maior que o N aplicado, fato que ocorre, principalmente, pela influência do animal atuando na mobilização do N do pasto através do processo de pastejo e da reciclagem desse nutriente nas excretas. Isso permite que o N seja reciclado múltiplas vezes no sistema, aumentando sua eficiência. No entanto, há também um risco maior de perdas, pois o N, nas fezes e na urina, é mais suscetível a ser perdido do que quando retido nas plantas.

4. Conclusão

A ingestão de nitrogênio (N) pelos animais durante o inverno não é afetada pela irrigação nem pelo consórcio com leguminosas. Da mesma forma, o retorno de N, por meio dos resíduos pós-pastejo, a excreção fecal e a excreção urinária por unidade de peso vivo não sofrem influência dos tratamentos. No entanto, o retorno de nitrogênio via urina por hectare é menor nos tratamentos com irrigação associada à leguminosa e naqueles sem irrigação e sem leguminosa. A produtividade de grãos de milho permanece semelhante entre áreas irrigadas e não irrigadas, bem como entre áreas com e sem consórcio durante o inverno. Assim, conclui-se que o uso de irrigação e o consórcio com ervilhaca não alteram significativamente a quantidade total de N retornado e ciclado no sistema, que apresenta um valor médio de 335,61 kg ha⁻¹.

Declaração de conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Declaração de disponibilidade de dados

O conjunto completo de dados que suporta os resultados deste estudo está disponível mediante solicitação ao autor correspondente.

Contribuições do autor

Conceituação: J.A. Farias Filho e L.R. Sartor; Investigação: J.A. Farias Filho; Metodologia: J.A. Farias Filho; Gestão de projeto: L.R. Sartor; Visualização: C. Amadori e M. Danna; Redação (rascunho original): J.A. Farias Filho; Redação (revisão e edição): L.R. Sartor, C. Amadori, M. Danna e L.F.G. Menezes.

Referências

1. Carvalho PCF, Souza ED, Denardin LGO, Kunrath TR, Machado DR, Souza Filho W, Martins AP, Tiecher T. Reconnecting nature and agricultural production: mixed cropping systems as a way forward sustainable intensification. *Boletim de Indústria Animal*. 2021; 78. <http://dx.doi.org/10.17523/bia.2021.v78.e11496>
2. Franzluebbers AJ, Hendrickson JR. Should we consider integrated crop–livestock systems for ecosystem services, carbon sequestration, and agricultural resilience to climate change? *Agronomy Journal*. 2024; 116: 415–432. <http://dx.doi.org/10.1002/agj2.21520>
3. Szymczak LS, Carvalho PCF, Lurette A, Moraes A, Nunes PAA, Martins AP, Moulin CH. System diversification and grazing management as resilience-enhancing agricultural practices: The case of crop-livestock integration. *Agricultural Systems*. 2020; 184. 102904. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102904>
4. Nunes PAA, Laca EA, Carvalho PCF, Souza Filho W, Kunrath TR, Martins AP, Gaudin A. Livestock integration into soybean systems improves long-term system stability and profits without compromising crop yields. *Scientific reports*. 2021; 11, 1649. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-021-81270-z>
5. Iteba JO, Hein T, Singer GA, Masese FO. Livestock as vectors of organic matter and nutrient loading in aquatic ecosystems in African savannas. *PLoS ONE*. 2021; 16. e0257076. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0257076>
6. Assmann TS, Soares AB, Assmann AL, Huf FI, Lima RCD. Adubação de sistemas em integração lavoura-pecuária. In: Jahmour J, Assmann TS (Orgs.). *I Congresso Brasileiro de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária e IV Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil*. Pato Branco: UTFPR Câmpus Pato Branco, 2017. p. 67-84.
7. Sanches AC, Gomes EP, Rickli ME, Fasolin JP, Soares MRC, Goes RHTB. Produtividade e valor nutritivo do capim Tifton 85 irrigado e sobressemeado com aveia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2015; 19. 126-133. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p126-133>
8. Sah RP, Chakraborty M, Prasad K, Pandit M, Tudu VK, Chakravarty MK, Narayan SC, Rana M, Moharana D. Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components. *Scientific reports*. 2020; 10. 2944. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-59689-7>
9. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5.ed. Brasília (DF): Embrapa; 2018. 355p.
10. Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. 2013; 22. 711–728. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
11. Euclides VPB, Macedo MCM, Oliveira MP. Avaliação de diferentes métodos de amostragem [para se estimar o valor nutritivo de forragens sob pastejo]. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 1992; 21. 691-702.
12. Tilley JMA, Terry RA. A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *Grass and Forage Science*. 1963; 18. 104-111. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2494.1963.tb00335.x>
13. Myazawa M, Pavan MM, Muraoka T, Carmo CAFS, Melo WJ. Análise química de tecido vegetal. In: Silva FC (Ed.). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. p.199-233.
14. Myers WD, Ludden PA, Nayigihugu V, Hess BW. Technical Note: A procedure for the preparation and quantitative analysis of samples for titanium dioxide. *Journal Of Animal Science*. 2004; 82. 179-183. <http://dx.doi.org/10.2527/2004.821179x>
15. Chizzotti ML, Valadares Filho SC, Valadares RFD, Chizzotti FHM, Tedeschi LO. Determination of creatinine excretion and evaluation of spot urine sampling in Holstein cattle. *Livestock Science*. 2008; 113. 218-225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2007.03.013>
16. Raza A, Zahra N, Hafeez, MB, Ahmad M, Iqbal S, Shaukat K, Ahmad G. Nitrogen fixation of legumes: Biology and Physiology. In: Hasanuzzaman M, Araújo S, Gill S. (Eds). *The Plant Family Fabaceae: Biology and Physiological Responses to Environmental Stresses*. Springer; p.43-74, 2020. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-4752-2_3

17. Farias Filho JÁ, Moraes PVD, Artuso VA, Chiavon JAD, Silva DW, Kunz AG, Zanini WR. Competitive effect between bristle oat (*Avena strigosa*) and common vetch (*Vicia sativa*) plants in consortium under diverse populational densities. *Journal of Agronomy*. 2016,15. 184-190. <http://dx.doi.org/10.3923/ja.2016.184.190>
18. Koenig KM, Beauchemin KA. Nitrogen metabolism and route of excretion in beef feedlot cattle fed barley-based backgrounding diets varying in protein concentration and rumen degradability^{1,2}. *Journal of Animal Science*. 2013, 91. 2295–2309. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2012-5652>
19. Angelidis A, Crompton L, Misselbrook T, Yan T, Reynolds CK, Stergiadis S. Evaluation and prediction of nitrogen use efficiency and outputs in faeces and urine in beef cattle. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2019, 280. 1–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2019.04.013>
20. Garcia L, Dubeux JR JCB, Sollenberger LE, Vendramini JMB, Dilenzo N, Santos ERS, Jaramillo DM, Moreno MR. Nutrient excretion from cattle grazing nitrogen-fertilized grass or grass–legume pastures. *Agronomy Journal*. 2021, 113. 3110-3123. <http://dx.doi.org/10.1002/agj2.20675>
21. Selbie DR, Buckthought LE, Shepherd M.A. The challenge of the urine patch for managing nitrogen in grazed pasture systems. *Advances in Agronomy*. 2015, 129. 229-292. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.agron.2014.09.004>
22. Chadwick DR, Cardenas LM, Dhanoa MS, Donovan N, Misselbrook T, Williams JR, Thorman RE, McGeough KL, Watson CJ, Bell M, Anthony SG, Rees RM. The contribution of cattle urine and dung to nitrous oxide emissions: Quantification of country specific emission factors and implications for national inventories. *Science of The Total Environment*. 2018, 635. 607–617. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.152>
23. Lessa ACR, Madari BE, Paredes DS, Boddey RM, Urquiaga S, Jantalia CP, Alves BJR. Bovine urine and dung deposited on Brazilian savannah pastures contribute differently to direct and indirect soil nitrous oxide emissions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2014,190. 104-111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2014.01.010>
24. Gao J, Luo J, Lindsey S, Shi Y, Wei Z, Wang L, Zhang L. Effects of boric acid on urea-N transformation and 3,4-dimethylpyrazole phosphate efficiency. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021, 6. 1091-1099. <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.10719>
25. Simon PL, Klein CAM, Zanatta JA, Van der Weerden TJ, Ramalho B, Bayer C. Nitrous oxide emission factors from cattle urine and dung, and dicyandiamide (DCD) as a mitigation strategy in subtropical pastures. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2018, 267. 74–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2018.08.013>
26. Ledgard, SF.; Steele, KW. Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. *Plant and soil*, v. 141, p. 137-153, 1992.
27. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS). Fertilidade do Solo: manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 10.ed. Porto Alegre: Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004.
28. Kakraliya SK, Singh U, Bohra A, Choudhary KK, Kumar S, Meena RS, Jat ML. Nitrogen and legumes: a meta-analysis. In: Meena R, Das A, Yadav G, Lal R. (Eds). *Legumes for soil health and sustainable management*, Springer, p. 277-314, 2018. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-0253-4_9