

São Carlos, SP / Maio, 2024

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

Estratégias de recuperação de pastagens degradadas para aumento do sequestro de carbono no solo, incluindo o consórcio com o feijão-guandu – resultados parciais

Patricia Perondi Anção Oliveira⁽¹⁾, Althieres José Furtado⁽²⁾, Adibe Luiz Abdalla Filho⁽³⁾, Jaqueline Fernandes Bruno⁽⁴⁾, Flávio Perna Júnior⁽⁵⁾, Alberto Carlos de Campos Bernardi⁽¹⁾, Paulo Henrique Mazza Rodrigues⁽⁶⁾ e Ana Rita Araujo Nogueira⁽¹⁾

⁽¹⁾ Pesquisadores, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP. ⁽²⁾ Althieres José Furtado, Doutorando, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, FZEA-USP, Pirassununga, SP. ⁽³⁾ Bolsista PhD, Fundação Arthur Bernardes, Viçosa, MG. ⁽⁴⁾ Mestranda, Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Botucatu, SP. ⁽⁵⁾ Especialista em laboratório, Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, FMVZ/USP, Pirassununga, SP. ⁽⁶⁾ Professor, Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia (FMVZ/USP), Pirassununga, SP.

Resumo – O aumento no sequestro de carbono (C) é importante para melhorar a eficiência e sustentabilidade dos sistemas pastoris de produção pecuária. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar a recuperação de pastagem e o consórcio de braquiária (*Urochloa decumbens* cv. Basilisk) com feijão guandu (*Cajanus cajan* cv. Mandarin) como estratégia para aumentar o sequestro de carbono. Foram avaliados três sistemas de produção: pastagem degradada, pastagem recuperada, pastagem consorciada com feijão guandu, em delineamento inteiramente casualizado com três repetições (9 piquetes com aproximadamente 1,2 ha), tendo como referência a floresta estacional semidecidual. A pastagem recuperada recebeu correção e fertilização do solo com macro e micronutrientes e fertilização nitrogenada de 200 kg N/ha.ano⁻¹, a pastagem consorciada recebeu os mesmos tratamentos culturais, entretanto, a fertilização nitrogenada foi substituída pela fixação biológica de nitrogênio no consórcio com feijão guandu. A pastagem de braquiária foi estabelecida em 1996 e foi degradada, em 2010 iniciou-se a recuperação das pastagens. Em 2022 foram abertas seis trincheiras por tratamento, onde foram coletadas amostras de solo indeformadas para análise da densidade aparente e amostras deformadas ao redor das trincheiras para análise da concentração de N e C. Houve interação entre os tratamentos dentro do perfil do solo. A concentração de nitrogênio foi alterada até 40 cm, sendo maior no sistema consorciado e na floresta, já a de carbono variou até 10 cm, com maiores valores no sistema consorciado. A relação C:N foi menor no sistema consorciado e na floresta. A concentração de carbono foi explicada pela concentração de nitrogênio no solo. O consórcio com o feijão guandu e pastagens tropicais é uma tecnologia potencial para aumentar o sequestro de carbono no solo.

Termos para indexação: leguminosa, *Brachiaria*, nitrogênio, relação C:N, densidade aparente, *Cajanus cajan*.

Embrapa Pecuária Sudeste

Rod. Washinton Luiz, Km 234
13560-970, São Carlos, SP
www.embrapa.br/pecuaria-sudeste
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
Presidente

André Luiz Monteiro Novo

Secretário-executivo

Luiz Francisco Zafalon

Membros

Aisten Baldan, Gisele Rosso,

Maria Cristin-a Campanelli

Brito, Silvia Helena Picirillo Sanchez

Revisão de texto

Gisele Rosso

Normalização bibliográfica

Mara Angélica Pedrochi (CRB-8/6556)

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Maria Cristina Campanelli Brito

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados à Embrapa.

Recovery strategies to increase carbon sequestration in soil of degraded pastures, including intercropping with pigeon pea - partial results

Abstract – Increasing carbon sequestration is important for improving the efficiency and sustainability of pastoral livestock production systems. The objective of this research was to evaluate the recovery of pasture and the mix of signal grass pasture (*Urochloa decumbens* cv. Basilisk) with pigeon pea (*Cajanus cajan* cv. Mandarin) as a strategy to increase carbon sequestration. Three treatments were evaluated: degraded pasture, recovered pasture, pasture intercropped with pigeon pea, in a completely randomized design with three replications (9 paddocks with approximately 1.2 ha) and the semideciduous seasonal forest was the reference area. The recovered pasture received correction and soil fertilization with macro and micronutrients, and nitrogen fertilization of 200kg N/ha.year-1, the intercropped pasture received the same cultural treatments, however, nitrogen fertilization was replaced by biological nitrogen fixation in the mix with pigeon pea. The signal grass pasture was established in 1996 and was degraded, in 2010 the recovery of the pastures began. In 2022 six trenches per treatment were opened, where undisturbed soil samples were collected for bulk density analysis and deformed samples around the trenches for N and C concentration analysis. There was interaction between treatments within the soil profile. Nitrogen concentration was altered up to 40 cm, being higher in the intercropping system and in the forest, whereas carbon concentration varied up to 10 cm, with higher values in the intercropping system. The C:N ratio was lower in the intercropped system and in the forest. The carbon concentration was explained by the nitrogen concentration in the soil. The tropical pasture mixed with pigeon pea is a potential technology to increase soil carbon sequestration.

Index terms: legume, *Brachiaria*, nitrogen, C:N ratio, bulk density, *Cajanus cajan*.

Introdução

Os solos são o principal reservatório de carbono (C), após os oceanos (Stockmann et al., 2013). Os solos podem atuar como sumidouro ou fontes de emissão de gases do efeito estufa (GEE), dependendo do manejo a que são submetidos (IPCC, 2001). A degradação das pastagens pode

promover a perda dos estoques de C do solo e piorar o balanço de C dos sistemas de produção pecuários baseados em pastagens. Por outro lado, a recuperação das áreas de pastagens degradadas pode proporcionar aumento na concentração e nos estoques de carbono no solo, contribuindo para a mitigação das emissões de GEE dos sistemas pastoris pecuários (Segnini et al., 2019; Oliveira et al., 2021).

O manejo dos sistemas de produção com incremento no resíduo vegetal e na retenção do C constituem importantes alternativas para aumentar os sumidouros de CO₂ e a mitigação dos GEE, contribuindo para evitar o aquecimento global (Bayer et al., 2006).

De acordo com Soussana e Lemaire (2014), a capacidade de sequestrar C nos solos da pastagem depende da produção primária líquida da pastagem, que determina os fluxos de C da atmosfera para a vegetação e o solo, e do tempo de residência desse C dentro dos diferentes compartimentos do ecossistema. Dentro do ecossistema de pastagem, os ciclos de C e Nitrogênio (N) são fortemente acoplados pela estequiometria elementar das plantas autotróficas e dos microrganismos heterotróficos do solo. Nesse sentido, a plasticidade das formas de plantas e suas funções, a diversidade de espécies de plantas e a regulação da fixação biológica de N (FBN) podem contribuir para estabilizar a relação C:N da matéria orgânica depositada nos sistemas de produção. A degradação do solo reduz a produção e qualidade da biomassa que retorna ao solo, causando redução nos estoques orgânicos de C.

Bai e Cotrufo (2022) enfatizam que a melhoria das práticas de manejo e a restauração da biodiversidade podem consistir, ao mesmo tempo, em opções de baixo custo e alto ganho de C, nas soluções sobre mudanças climáticas em pastagens e estimam que a semeadura de leguminosas nas pastagens pode gerar um potencial de sequestro anual de C de 147 megatoneladas (Mt) de CO₂eq.

A recuperação de pastagens atende ao “ODS 15 – Proteger a vida terrestre com o objetivo geral de proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, travar e reverter a degradação dos solos e travar a perda de biodiversidade. A recuperação de pastagens, além de ajudar a preservar as florestas, pois diminui a necessidade de área, atende diretamente uma das metas da ODS 15, que é, até 2030, combater a desertificação, restaurar a terra e o solo degradados, incluindo terrenos afetados pela desertificação, secas e inundações, e lutar para alcançar um mundo neutro em termos de degradação do solo, resultando

em impactos positivos na área social, ambiental e econômica, pois a recuperação de pastagens degradadas por meio do uso do guandu restaura o solo, evita erosão, preserva a água e aumenta os aportes de C e de N via FBN, diminuindo o uso de fertilizantes nitrogenados, trazendo benefícios econômicos e ambientais que impactam positivamente a vida das pessoas.

O experimento teve por objetivo avaliar se as tecnologias “Recuperação de pastagens degradadas para sistemas intensivos de produção de bovinos” (Oliveira; Corsi, 2004) e “Consortiação com guandu na recuperação de pastagens degradadas, uma tecnologia de duplo propósito: adubação verde e pastejo consorciado diferido” (Oliveira et al., 2017), que preconizam a correção e fertilização do solo, o adequado manejo da planta forrageira e o consórcio com leguminosas, respectivamente, têm o potencial de aumentar a concentração de C no solo de pastagens recuperadas.

Material e métodos

O estudo foi realizado na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos, SP (21°57'S, 47°50'W, 860 m de altitude). O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (Calderano Filho et al., 1998) e o clima como Cwa – clima subtropical úmido, segundo a classificação de Köppen-Geiger (Alvares et al., 2014), com os períodos de chuva e seca bem definidos.

Foram instalados três tratamentos (pastagem degradada, pastagem recuperada com corretivos e fertilizantes, pastagem recuperada com consórcio de guandu cultivar BRS Mandarin) em delineamento inteiramente casualizado com três repetições, distribuídos em nove piquetes com 1,25 ha cada um; numa área total de 11,25 ha. Foram coletadas amostras de solo para definir as características físicas e químicas do solo nas profundidades de 0 a 20 cm e de 20 a 40 cm (Tabelas 1 e 2). A textura do solo é franco argilosa arenosa na camada de 0 a 20 cm e argilo arenosa na camada de 20 a 40 cm.

A Floresta, usada como referência, é uma Floresta Estacional Semidecidual do bioma Mata Atlântica, próxima à área experimental, contendo o mesmo tipo de solo que o da área experimental.

As pastagens foram estabelecidas em 1996 com *Brachiaria decumbens* e submetidas a um processo de degradação por falta de correção e fertilização do solo e de manejo adequado da planta forrageira, conforme processo descrito por Oliveira e Corsi (2004).

A recuperação dessas pastagens iniciou-se há 12 anos, em 2010, quando se instalaram os três tratamentos. As pastagens foram recuperadas, de acordo com Oliveira et al. (2008), recebendo anualmente calagem e fertilização corretiva com P, K e micronutrientes a lanço em área total na superfície do solo. Na pastagem recuperada com corretivos e fertilizantes, foram realizadas, anualmente na época das águas, três coberturas nitrogenadas com ureia em um total de 225 kg ha⁻¹ de N por ano. A pastagem recuperada com guandu (consorciada) recebeu os mesmos tratos culturais que a pastagem recuperada com exceção da fertilização nitrogenada, que foi substituída pelo consórcio com o guandu. Amostras de solo foram coletadas e analisadas anualmente para a realização da recomendação da calagem e das fertilizações. A pastagem degradada não recebeu nem calagem e nem fertilização.

O plantio do guandu BRS Mandarin foi realizado em janeiro de 2011 em plantio direto sobre a pastagem de *Brachiaria decumbens* após roçada do relvado a 10 cm de altura. O espaçamento utilizado foi de 40 cm e taxa de semeadura foi de nove sementes de guandu por metro, com uma taxa de semeadura de 33 kg ha⁻¹. No início da época das chuvas de cada ano (novembro), o remanescente de forragem do guandu era roçado entre 25 e 30 cm de altura e permanecia na superfície do solo como adubação verde. O estande de plantas do guandu BRS Mandarin vai diminuindo com o passar dos anos, sendo necessário novo plantio, processo que ocorreu em média a cada 3 anos (Oliveira et al., 2017).

Os piquetes foram manejados a partir de 2010 sob pastejo contínuo com ajuste de lotação pela técnica do ‘put and take’ (Mott; Lucas, 1952; Petersen, 1994). Foram usados animais traçadores e reguladores, e altura do resíduo pós-pastejo do capim-marandu de 20 cm (Costa; Queiroz, 2017), realizando-se anualmente recria e engorda de lotes de bovinos de corte. Não foi possível garantir a recomendação técnica para a altura de resíduo pós-pastejo na pastagem degradada, visto que, na maioria dos anos, a produção de forragem da pastagem na época seca do ano não era suficiente para manter os animais reguladores, sendo necessário o consumo do resíduo da pastagem por esses animais, incorrendo em superpastejo.

A lotação animal anual média obtida dos diferentes manejos de pastagem foram 3 unidade animal (UA) em que 1 UA equivale a 450 kg de peso vivo, para o sistema recuperado; 2,6 UA por hectare para o sistema consorciado com feijão-guandu e 1,5 UA por hectare para o sistema degradado (Furtado, 2022).

Tabela 1. Características químicas do solo (macronutrientes) nos sistemas de produção no ano de 2022.

Sistemas de Produção	pH	M.O.	P res	K res	Ca	Mg	Al	SB	CTC	V	m	S-SO ₄	
	(CaCl ₂)	(g dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)			(mmolc dm ⁻³)		(mmolc)	(dm ⁻³)	(%)		(mg dm ⁻³)	
Profundidade 0 a 20 cm													
Consoiciado	5,6	35,0	8,7	1,7	42,3	19,3	0,0	18,3	63,7	82,0	77,3	0,0	5,3
Recuperado	5,6	28,0	6,3	2,0	42,7	20,3	0,0	18,3	65,0	83,3	78,0	0,0	5,0
Degradado	5,0	28,0	3,7	1,6	20,7	9,7	0,7	27,7	32,0	59,7	53,7	2,0	5,7
Floresta	5,1	24,8	9,4	1,4	21,9	11,0	0,4	28,1	34,3	62,4	54,5	1,4	2,9
Profundidade 20 a 40 cm													
Consoiciado	5,5	21,0	3,3	1,1	30,3	13,7	0,0	18,0	45,0	63,0	71,0	0,0	12,7
Recuperado	5,2	20,3	2,3	1,4	22,0	10,3	0,0	22,7	34,0	56,7	59,7	0,0	9,3
Degradado	4,9	19,3	2,0	0,9	17,0	7,7	1,3	31,7	25,7	57,3	44,7	5,0	12,7
Floresta	4,8	14,5	5,0	1,0	15,9	7,4	1,1	31,0	24,4	55,3	44,0	4,7	3,4

* pH = potencial hidrogeniônico; M.O. = matéria orgânica; P res = fósforo extraído em resina; K res = potássio extraído em resina; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Al = alumínio; H+Al = hidrogênio + alumínio; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V = saturação por base, m= saturação por alumínio; S-SO₄ = enxofre.

Tabela 2. Características químicas do solo (micronutrientes) nos sistemas de produção no ano de 2022 e físicas no ano de 2021.

Sistemas de produção	B	Cu	Fe	Mn	Zn	areia	argila	silte	classe textural
	(mg dm ⁻³)					(g kg ⁻¹)			
Profundidade 0 a 20 cm									
Consoiciado	0,3	1,4	42,3	4,8	1,0	596,7	335,7	67,7	franco argiloso arenoso
Recuperado	0,3	1,1	28,0	6,8	1,0	610,0	326,7	63,3	franco argiloso arenoso
Degradado	0,4	2,0	33,7	3,4	1,2	591,3	354,0	54,7	franco argiloso arenoso
Floresta	0,3	1,1	37,8	5,7	0,9	688,1	249,7	62,1	franco argiloso arenoso
Profundidade 20 a 40 cm									
Consoiciado	0,2	3,5	24,7	2,8	0,8	584,3	356,7	59,0	argilo arenoso
Recuperado	0,2	1,1	16,0	5,9	0,8	581,0	368,3	50,7	argilo arenoso
Degradado	0,2	1,3	22,0	2,4	1,0	569,7	382,0	48,3	argilo arenoso
Floresta	0,3	1,1	19,6	4,4	0,7	696,5	239,8	63,7	franco argiloso arenoso

* B = boro; Cu = Cobre; Fe = ferro; Mn = manganês; Zn = zinco

No período de outubro de 2022 até janeiro de 2023, foram abertas duas trincheiras em cada repetição de área (piquetes), totalizando seis trincheiras por tratamento (sistema de produção) e seis trincheiras na floresta. Em seguida, foram colhidas amostras indeformadas de solo para a realização da densidade aparente e amostras deformadas para análise de carbono nas profundidades de 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–60 e 80–100 cm, em três faces da trincheira.

Ao redor das trincheiras, em cada vértice, foram traçados quatro transectos, onde foram coletadas três amostras indeformadas de solo distantes entre si em 5 metros nas mesmas profundidades da coleta realizada nas faces das trincheiras (Oliveira, 2014).

Os resultados parciais da pesquisa referem-se às amostras indeformadas de dois transectos adjacentes, que foram compostas por profundidade e encaminhadas para a determinação de C e N, em analisador elementar Gerhardt DUMATHERM C/N.

As amostras indeformadas das faces das trincheiras foram secas a 105 °C até peso constante e pesadas, sendo o valor total de massa seca dividido pelo volume do cilindro, para a determinação da densidade aparente. A relação C/N foi obtida pela divisão da concentração de C pela concentração de N.

A análise estatística foi realizada utilizando-se o software Statistical Analysis Systems – SAS 9.4 (SAS Institute, 2015). Previamente, os dados foram avaliados quanto à presença de informações discrepantes (“outliers”). A suposição de normalidade dos resíduos foi avaliada por meio do teste de Shapiro–Wilk. As análises foram feitas de acordo com o procedimento misto (PROC MIXED) e o modelo incluiu o efeito fixo de sistemas e profundidades do solo (0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–60 e 60–80 cm), bem como a interação entre os fatores. Os efeitos das repetições foram considerados como fator aleatório.

Para este modelo, os módulos de produção foram elencados como unidade experimental e, quando apropriado, as trincheiras e as profundidades foram consideradas como subunidades experimentais (slip-pot).

Um total de 15 diferentes estruturas de covariância foram testadas e a escolhida foi baseada no menor valor do Critério de Informação de Akaike Corrigido (AICC) (Wang; Goonewardene, 2004). Na presença de interação, os efeitos do fator sistema de produção dentro de profundidade do solo foi avaliado utilizando-se o comando SLICE do Procedimento Misto.

Todas as médias foram apresentadas como médias de mínimos quadrados, e os efeitos de sistema e da estação foram separados pela opção PDIFF do SAS. Todos os efeitos foram considerados significativos em $p \leq 0,10$.

Foi realizada análise estatística para determinação dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis e, em vista do resultado, foi realizada análise estatística para determinação da curva de regressão entre concentração de carbono e nitrogênio.

Resultados e discussão

Foi observada interação entre os sistemas de produção adotados e a profundidade do solo na análise de variância das concentrações de C e N, relação carbono:nitrogênio e densidade aparente em função dos sistemas de produção e profundidade do solo (Tabela 3). Para melhor entender o comportamento dessas variáveis nos

diferentes sistemas de produção no perfil do solo, foi realizado o desdobramento da interação entre sistemas de produção e profundidade do solo para todas as variáveis avaliadas (Tabelas 4, 5, 6 e 7).

A concentração de nitrogênio foi alterada pelos sistemas de produção adotados até a profundidade de 40 cm. De forma geral, o sistema consorciado e a floresta apresentaram concentrações de nitrogênio superiores aos tratamentos recuperado e degradado. Na camada de zero a cinco centímetros, o sistema de produção consorciado com feijão guandu apresentou concentração de nitrogênio maior que a floresta, que foi superior aos sistemas degradado e recuperado. Na camada de cinco a 10 cm, o sistema consorciado e a floresta apresentaram concentração de nitrogênio maior que os tratamentos recuperado e degradado. Na camada de 10 a 20 cm, a floresta apresentou maior concentração de nitrogênio que os demais tratamentos. Na camada de 20 a 30 cm, o tratamento consorciado apresentou concentração de nitrogênio semelhante à floresta e ao tratamento degradado e superior ao tratamento recuperado. Na camada de 30 a 40 cm, os tratamentos degradado e recuperado apresentaram concentrações de nitrogênio menores que a floresta, enquanto o tratamento consorciado apresentou valores intermediários (Tabela 4, Figura 1).

A roçada do material remanescente do pastejo de guandu preconizada por Oliveira et al. (2017), deposita cerca de 200 kg de N por hectare anualmente, devido à FBN (Valarini; Godoy, 1994), que proporciona resíduo pós-pastejo bem mais rico em N do que o resíduo pós-pastejo de gramíneas. Tal fato pode explicar o aumento da concentração de N nas camadas mais superficiais do solo do sistema consorciado. Era esperado que a fertilização mineral com N, realizada no sistema de recuperação de pastagem convencional, proporcionasse aumento de N no solo em relação ao sistema degradado, entretanto esse fato não ocorreu. A concentração de carbono no solo foi modificada até a camada de 10 cm em função dos sistemas de produção adotados, sendo que as estratégias de manejo não foram capazes de alterar as concentrações de carbono nas camadas mais profundas do solo. Na camada de zero a cinco centímetros de solo, o sistema de produção consorciado apresentou valor de concentração de carbono superior aos demais sistemas de produção e a floresta, enquanto o sistema recuperado foi superior ao sistema degradado; já a floresta apresentou concentração de carbono intermediária entre os sistemas degradado e recuperado (Tabela 5, Figura 2).

Tabela 3. Análise de variância das variáveis concentração de C e N, relação carbono:nitrogênio e densidade aparente em função dos sistemas de produção e profundidade do solo.

Item	Variáveis			
	Concentração de N (%)	Concentração de C (%)	Relação C:N	Densidade Aparente (g cm ⁻³)
Média	0,0965	1,3605	14,4720	1,3148
Erro Padrão da Média	0,0041	0,0569	0,1861	0,0095
Probabilidade estatística (valor de P)				
Sistemas de produção	0,0002	0,1538	<,0001	0,0016
Profundidade	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
Sistemas de produção*	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
Profundidade				
Probabilidade estatística (valor de P) para interação sistema de produção dentro de profundidade				
Sistema produção * profundidade 0–5 cm	<,0001	<,0001	<,0001	0,6513
Sistema produção * profundidade 5–10 cm	0,0011	0,0605	0,0785	0,0353
Sistema produção * profundidade 10–20 cm	<,0001	0,809	<,0001	<,0001
Sistema produção * profundidade 20–30 cm	0,0053	0,6988	<,0001	<,0001
Sistema produção * profundidade 30–40 cm	0,0653	0,831	<,0001	0,0002
Sistema produção * profundidade 40–60 cm	0,2289	0,9721	<,0001	0,0054
Sistema produção * profundidade 60–80 cm	0,3846	0,9232	<,0001	0,0492
Sistema produção * profundidade 80–100 cm	0,2426	0,9775	<,0001	0,0964

* = interação entre os fatores sistema de produção e profundidade do perfil do solo.

O aumento de C nos sistemas de produção que adotaram recuperação de pastagens já foi observado por Segnini et al. (2019) em condições do bioma Mata Atlântica. Sarkar et al. (2018), constataram aumento no estoque de C tanto em pastagens com gramíneas, quanto para pastagem com a leguminosa amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) em relação ao plantio de milho (*Zea mays* L.). Nesse experimento, observa-se que o consórcio com pastagens pode incrementar ainda mais o sequestro de C, possivelmente pelo sinergismo entre a leguminosa e a gramínea na mesma pastagem.

A relação C:N no solo foi alterada pelos tratamentos em todas as profundidades. De forma geral, a floresta e o tratamento consorciado apresentaram as menores relações C:N. Nas camadas mais superficiais, o tratamento consorciado e a floresta apresentaram relações C:N mais baixas, e o tratamento degradado mais alta. Nas camadas mais profundas, a floresta apresentou a menor relação C:N, sempre superior ao tratamento degradado, enquanto os tratamentos recuperado e consorciado apresentaram valores intermediários (Tabela 6, Figura 3).

Tabela 4. Desdobramento da interação entre sistemas de produção e profundidade do solo para a concentração de nitrogênio no solo.

Profundidade (cm)	Sistemas de Produção			
	Consoiciado	Degradado	Recuperado	Floresta
	Concentração de N (%)			
0 a 5	0,25 a	0,16 c	0,17 c	0,21 b
5 a 10	0,16 a	0,13 b	0,13 b	0,15 a
10 a 20	0,11 b	0,10 b	0,10 b	0,14 a
20 a 30	0,09 ab	0,08 bc	0,07 c	0,10 a
30 a 40	0,08 ab	0,07 b	0,07 b	0,09 a
40 a 60	0,06 ns	0,06 ns	0,06 ns	0,07 ns
60 a 80	0,04 ns	0,05 ns	0,05 ns	0,06 ns
80 a 100	0,03 ns	0,03 ns	0,03 ns	0,05 ns

*Médias seguidas por letras diferentes dentro de uma mesma profundidade (linha) diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

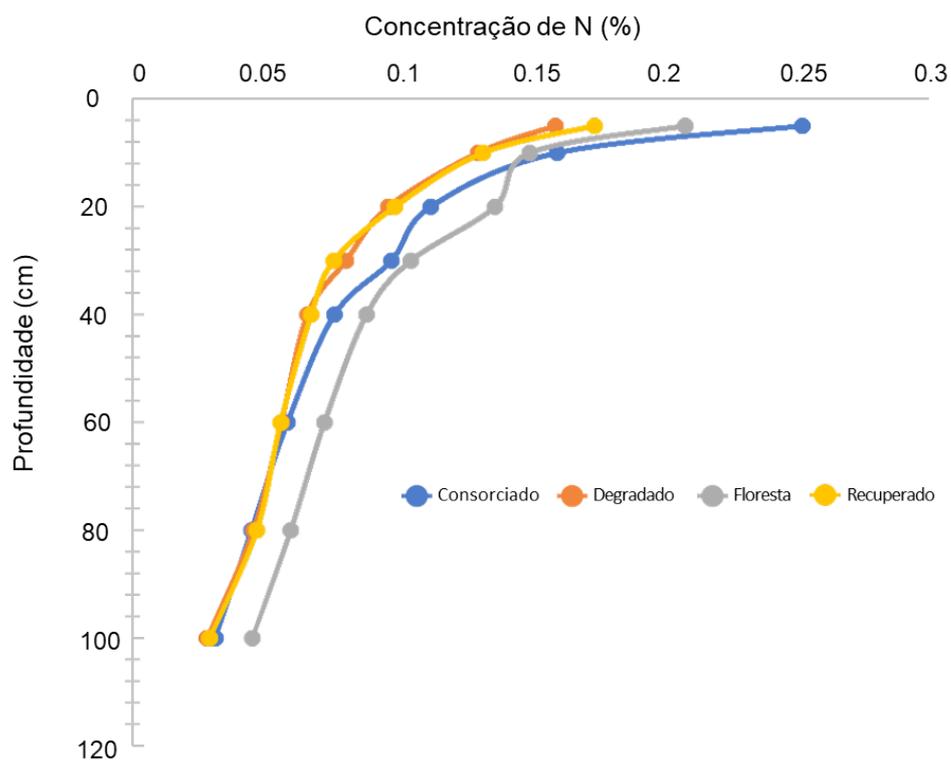
**Figura 1.** Concentração de nitrogênio no perfil do solo em função dos diferentes sistemas de produção pastoris e de floresta.

Tabela 5. Desdobramento da interação entre sistemas de produção e profundidade do solo para a concentração de carbono no solo.

Profundidade (cm)	Sistemas de Produção			
	Consoiciado	Degradado	Recuperado	Floresta
0 a 5	3,49 a	2,46 c	2,75 b	2,69 bc
5 a 10	2,27 a	1,97 b	1,95 b	2,03 ab
10 a 20	1,57 ns	1,43 ns	1,48 ns	1,48 ns
20 a 30	1,31 ns	1,17 ns	1,19 ns	1,19 ns
30 a 40	1,06 ns	0,99 ns	1,00 ns	0,94 ns
40 a 60	0,80 ns	0,84 ns	0,85 ns	0,80 ns
60 a 80	0,62 ns	0,66 ns	0,71 ns	0,65 ns
80 a 100	0,61 ns	0,58 ns	0,65 ns	0,62 ns

*Médias seguidas por letras diferentes dentro de uma mesma profundidade (linha) diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

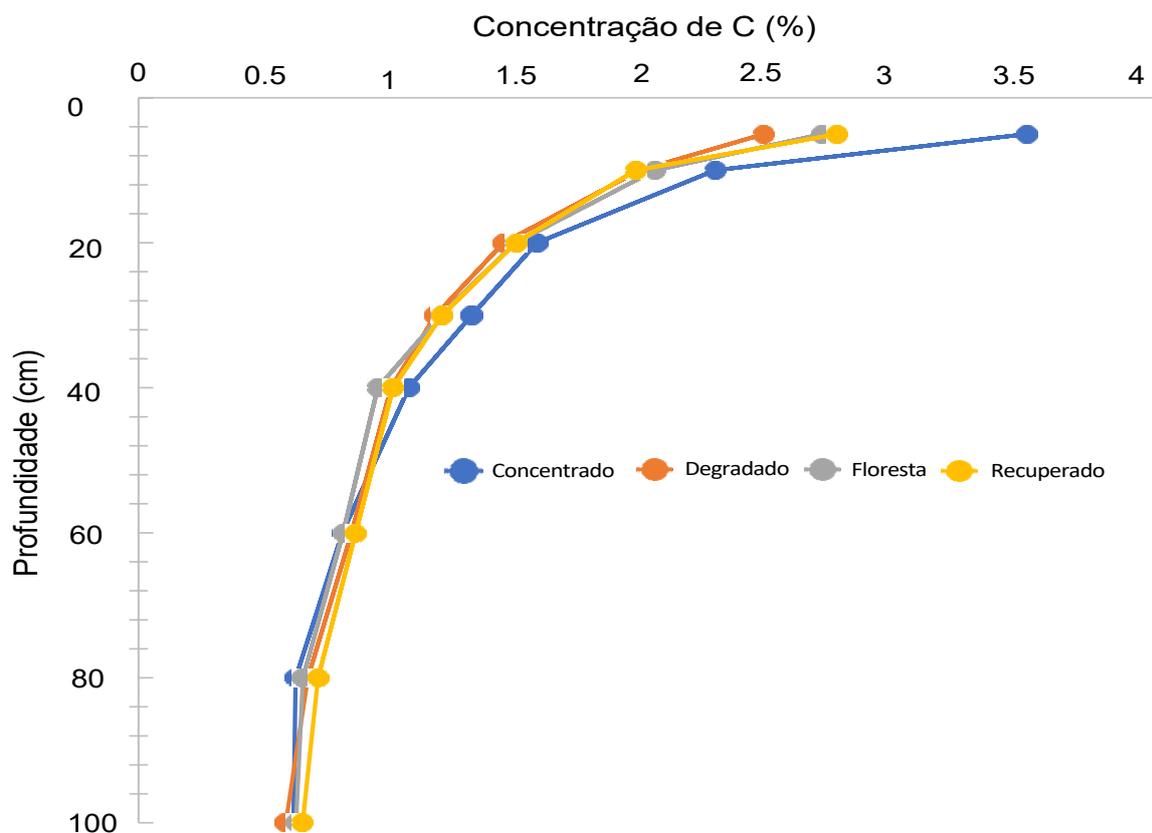


Figura 2. Concentração de carbono no perfil do solo em função dos diferentes sistemas de produção pastoris e a floresta.

O N aportado pela FBN depositado nas camadas mais superficiais do solo foi capaz de tornar a relação C:N do consórcio do guandu mais parecida com a da floresta. Apesar da diferença entre o CO₂ e o N inorgânico liberado pela mineralização, existe uma estreita relação entre o C e o N na matéria orgânica (MO) do solo devido às necessidades dos microrganismos. Durante a fase inicial de decomposição, há um aumento na biomassa microbiana, e tanto o C quanto o N são necessários para a síntese dos constituintes das células microbianas, chegando a uma relação

C:N próxima a 10. Apenas o N inorgânico excedente a esta necessidade é liberado como N mineralizado líquido e, se a concentração de N no material orgânico em decomposição for baixa, não haverá excedente (Withthead, 1995), aumentando a relação C:N. Assim, os sistemas de produção com a relação C:N mais estreita tiveram menos restrição para acumular carbono no solo, enquanto os tratamentos com a relação C:N mais alta tiveram limitações quanto ao teor de N para os processos de decomposição e mineralização da MO.

Tabela 6. Desdobramento da interação entre sistemas de produção e profundidade do solo para a relação carbono:nitrogênio no solo.

Profundidade (cm)	Sistemas de Produção			
	Consortiado	Degradado	Recuperado	Floresta
	Relação Carbono:Nitrogênio			
0 a 5	13,88 b	15,57 a	15,89 a	12,82 b
5 a 10	13,96 ab	15,16 a	14,83 ab	13,57 b
10 a 20	13,87 a	14,85 a	14,95 a	10,80 b
20 a 30	13,47 b	14,47 ab	15,62 a	11,30 c
30 a 40	13,99 a	15,26 a	14,74a	10,59 b
40 a 60	13,65 b	14,80 ab	15,19 a	11,09 c
60 a 80	13,74 a	14,81 a	14,88 a	10,92 b
80 a 100	19,45 a	20,40 a	20,57 a	13,79 b

*Médias seguidas por letras diferentes dentro de uma mesma profundidade (linha) diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

A densidade aparente do solo foi igual entre os sistemas de produção na camada de 0 a 5 cm e na camada de 80 a 100 cm. Nas camadas entre 5 e 30 cm, a floresta apresentou densidade menor que os sistemas de produção, que não diferiram entre si. Na camada de 30 a 80 cm, o tratamento consorciado apresentou a densidade aparente maior que a floresta, e os sistemas de produção degradado e recuperado apresentaram valores intermediários entre os tratamentos consorciado e floresta. Na profundidade de 80 a 100 cm, o tratamento consorciado apresentou densidade maior que o recuperado, sendo que o sistema degradado e a

floresta não difeririam desses tratamentos e apresentaram resultados médios entre eles (Tabela 7, Figura 4). Esperava-se que o consorciado, pela atuação do guandu BRS Mandarin como biodescompactador de solo (Embrapa Pecuária Sudeste, 2012), pudesse diminuir a densidade aparente do solo, tornando-a parecida com a da floresta. Fatores que podem ter interferido nessa resposta são os teores um pouco mais elevados de argila e silte (Tabela 2) e o maior pisoteio em decorrência da maior lotação animal obtida no tratamento consorciado.

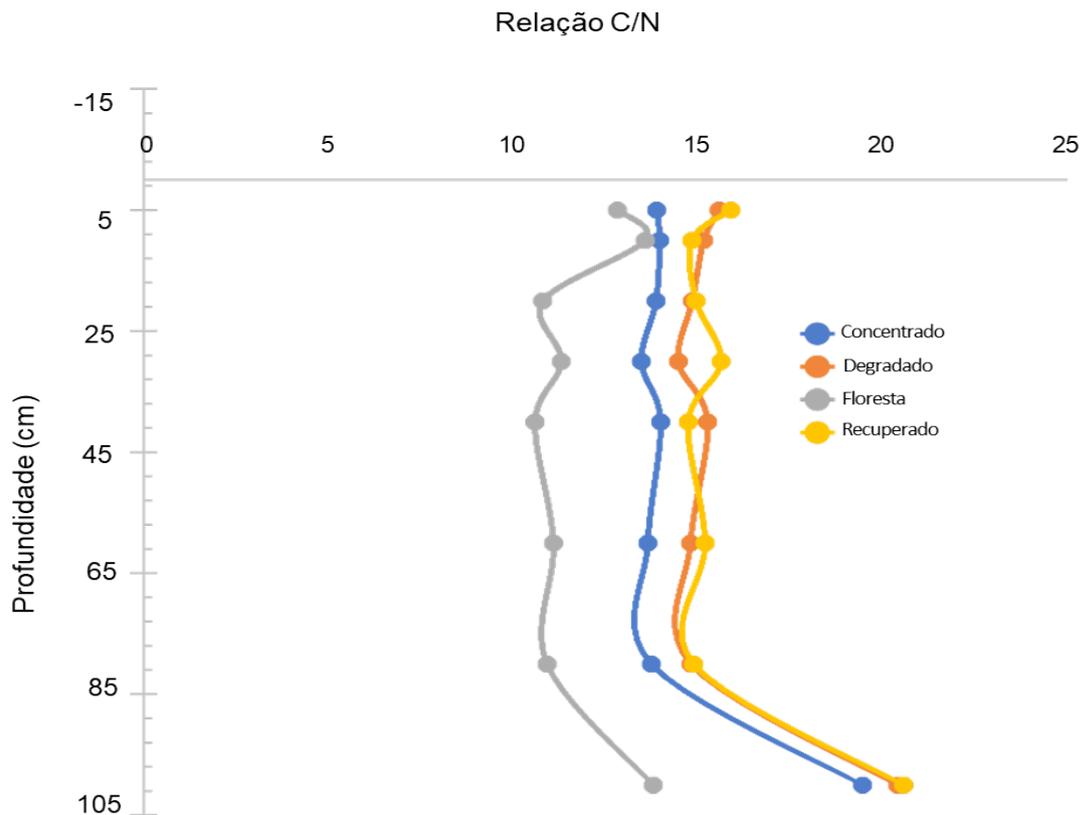


Figura 3. Relação entre a concentração de carbono e nitrogênio no perfil do solo em função dos diferentes sistemas de produção pastoris e a floresta.

Tabela 7. Desdobramento da interação entre sistemas de produção e profundidade do solo para a densidade aparente do solo (g cm^{-3}) no solo.

Profundidade (cm)	Sistemas de Produção			
	Consortiado	Degradado	Recuperado	Floresta
	Densidade aparente (g cm^{-3})			
0 a 5	1,15 ns	1,19 ns	1,16 ns	1,13 ns
5 a 10	1,40 a	1,36 a	1,32 ab	1,25 b
10 a 20	1,53 a	1,46 a	1,45 a	1,24 b
20 a 30	1,49 a	1,42 a	1,40 a	1,22 b
30 a 40	1,47 a	1,37 b	1,32 bc	1,24 c
40 a 60	1,42 a	1,34 b	1,28 bc	1,25 b
60 a 80	1,37 a	1,31 ab	1,25 b	1,25 b
80 a 100	1,32 a	1,28 ab	1,20 b	1,22ab

*Médias seguidas por letras diferentes dentro de uma mesma profundidade (linha) diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

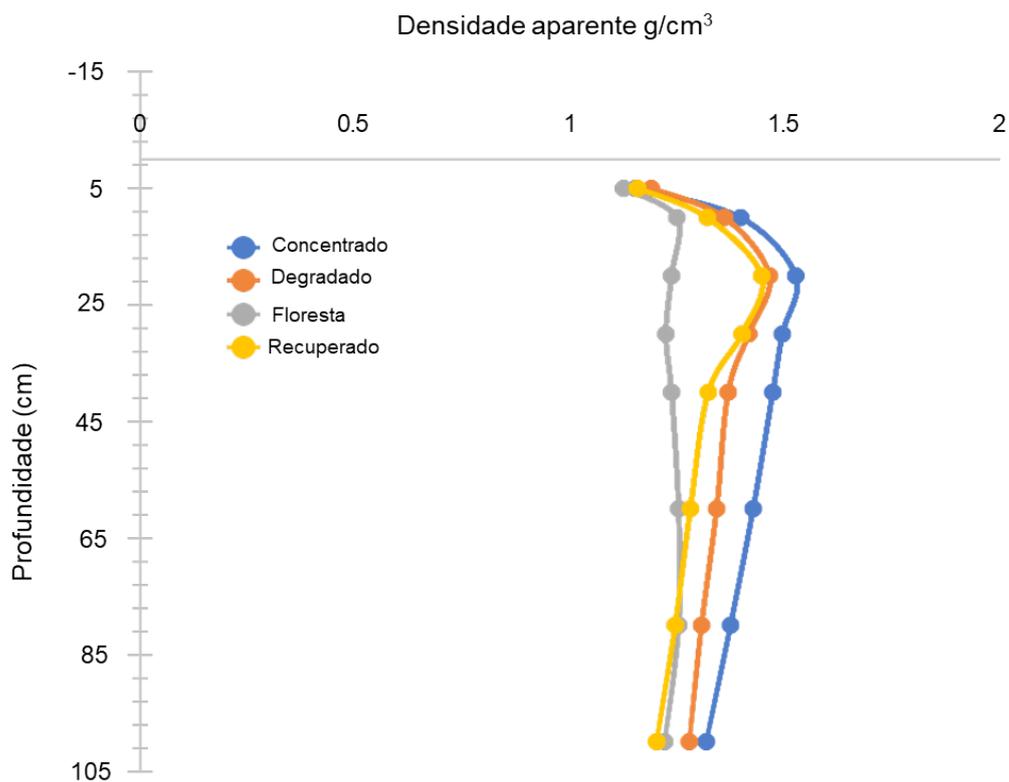


Figura 4. Densidade aparente no perfil do solo em função dos diferentes sistemas de produção pastoris e a floresta.

O coeficiente de correlação de Pearson mostrou forte interação positiva entre a concentração de N e C ($r=0,96864$ $p<0,001$) (Tabela 8), apontando para uma correlação linear positiva, evidenciando que, quando se aumenta a concentração de N no solo, há aumento na concentração de carbono. Apesar de

significativas, as relações entre o teor de carbono e a densidade aparente foram fracas e negativas, ao redor de $-0,3$, demonstrando que a variável teor de C não pode ser explicada com segurança pela variável densidade aparente. A correlação entre as variáveis teor de C e relação C:N não foi significativa.

Tabela 8. Coeficientes de correlação de Pearson, $n=192$.

Características do solo	N	C	C:N	DA
N	1	0,96864 <.0001	-0,27803 <.0001	-0,29813 <.0001
C	0,96864 <.0001	1	-0,07355 0,3106	-0,29166 <.0001
C:N	-0,27803 <.0001	-0,07355 0,3106	1	-0,05055 0,4862
DA	-0,29813 <.0001	-0,29166 <.0001	-0,05055 0,4862	1

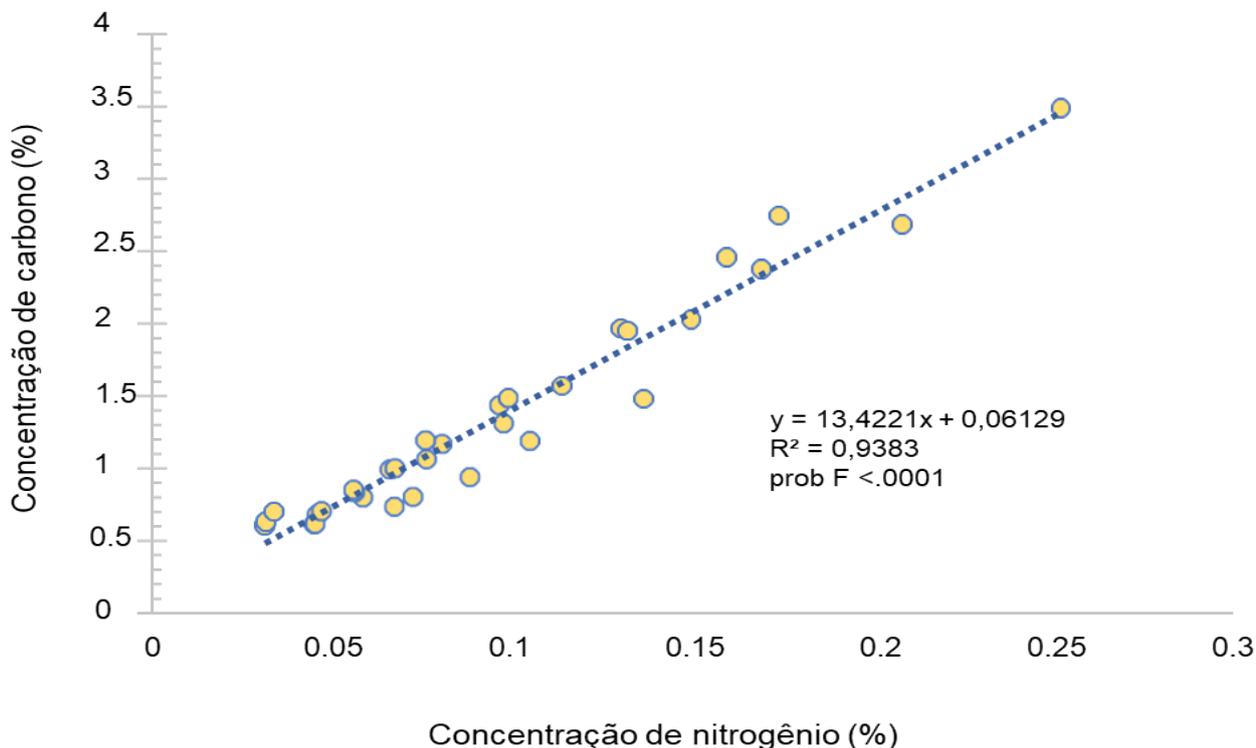


Figura 5. Regressão entre a concentração de nitrogênio e a concentração de carbono na floresta e em pastagens degradadas e recuperadas de capim-brachiaria (*Brachiaria decumbens*).

Houve uma regressão linear entre a concentração de carbono e de nitrogênio ($R^2=0,9383$ $p<0,0001$). A equação que explica a resposta na concentração de C em função da concentração de N no solo está apresentada na Figura 5.

Essas correlações enfatizam os relatos de Soussana e Lemaire (2014) de que os ciclos de C e N são fortemente acoplados pela estequiometria elementar das plantas autotróficas e dos microrganismos heterotróficos do solo dentro do ecossistema de pastagem. Nesse sentido, o aporte de N pela fertilização ou FBN pode contribuir para estabilizar a relação C:N da matéria orgânica depositada nos sistemas de produção, contribuindo para atingir o potencial de sequestro de C. Já a degradação do solo reduz a produção e qualidade da biomassa que é retornada ao solo, causando redução nos estoques orgânicos de C e limitação de N para que seja aumentado o sequestro de C. Bai e Cotrufo (2022), também enfatizam o potencial da fixação biológica de nitrogênio em contribuir com o sequestro de C no solo.

Com os resultados parciais de concentração de carbono e densidade aparente obtidos, pode-se

inferir que os estoques de carbono (não corrigido pela área de referência = floresta) para o sistema consorciado seriam de 80,02 e de 151,47 t/ha, para o sistema recuperado de 66,98 e de 136,43 t ha⁻¹ e para o sistema degradado de 65,57 e de 135,62 t ha⁻¹, respectivamente nas camadas de zero a 30 cm e de 0 a 100 cm de profundidade.

Conclusões

Os resultados parciais evidenciam que a tecnologia “Consociação com guandu na recuperação de pastagens degradadas, uma tecnologia de duplo propósito: adubação verde e pastejo consorciado diferido” tem o potencial de aumentar a concentração de carbono no solo de pastagens nas camadas superficiais e de nitrogênio até 40 cm de profundidade. A “Recuperação de pastagens degradadas para sistemas intensivos de produção de bovinos” somente aumentou a concentração de C na camada de 0 a 5 cm do perfil do solo e não foi capaz de aumentar o teor de N, apesar da fertilização nitrogenada mineral realizada anualmente.

A concentração de carbono no solo depende do aumento da concentração de N no sistema, sugerindo que sistemas com maior capacidade de aporte de N, como os que tem inclusão de leguminosas, são mais indicados para o aumento do teor de carbono no solo.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, projetos de pesquisa números 2017/20084-5 e 2022/08165-8.

Referências

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, p. 711-728, 2014. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- BAI, Y.; COTRUFO, M. F. Grassland soil carbon sequestration: current understanding, challenges, and solutions. *Science*, v. 377, p. 603-608, 2022. DOI: 10.1126/science.abo2380.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two brazilian cerrado soils under no-till. *Soil & Tillage Research*, v. 86, n. 2, p. 237-245, 2006. DOI: 10.1016/j.still.2005.02.023.
- CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H. G. dos; FONSECA, O. O. M. da; SANTOS, R. D. dos; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. **Os solos da Fazenda Canchim, Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP:** levantamento semidetalhado, propriedades e potenciais. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS; São Carlos, SP: EMBRAPA-CPPSE, 1998. 95 p. il. (EMBRAPA-CNPS. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 7; EMBRAPA-CPPSE. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 2). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/44746>. Acesso em: 21 fev. 2022.
- COSTA, J. A. A. da; QUEIROZ, H. P. de. **Régua de manejo de pastagens:** edição revisada. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2017. 7 p. (Embrapa Gado de Corte. Comunicado técnico, 135).
- EMBRAPA PECUÁRIA SUDESTE. **Guandu BRS Mandarim, uma tecnologia:** várias alternativas de uso. São Carlos, 2012. 6 p.
- FURTADO, A. J. **Pigeon pea intercropping with pastures as mitigation strategy for emissions of greenhouse gases (GHG).** 2022. 75 f. Dissertação. Dissertação (Mestrado em Nutrição e Produção Animal) - Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo, Pirassununga.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [IPCC]. **Climate change 2001: the scientific basis.** Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- MOTT, G. O.; LUCAS, H. L. The design, conduct, and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 6., 1952, Pennsylvania. **Proceedings...** Pennsylvania: State College, 1952. v. 2, p. 1380-1385.
- OLIVEIRA, P. P. A. (ed.). **Protocolo para quantificação dos estoques de carbono do solo da rede de pesquisa Pecus.** São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2014. 20 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Série Documento, 116).
- OLIVEIRA, P. P. A.; CORSI, M. **Recuperação de pastagens degradadas para sistemas intensivos de produção de bovinos.** São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2004. 23 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Circular técnica, 38).
- OLIVEIRA, P. P. A.; MATTA, F. de P.; GODOY, R. **Consortiação com guandu na recuperação de pastagens degradadas, uma tecnologia de duplo propósito:** adubação verde e pastejo consorciado diferido. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2017. 6 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Circular técnica, 75).
- OLIVEIRA, P. P. A.; PENATI, M. A.; CORSI, M. **Correção do solo e fertilização de pastagens em sistemas intensivos de produção de leite.** São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2008. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 86).
- OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M.; PRAES, M. F. F. M.; PEDROSO, A. de F.; OLIVEIRA, B. A.; SPERANÇA, M. A.; BOSI, C.; FERNANDES, F. A. Soil carbon dynamics in Brazilian Atlantic forest converted into pasture-based dairy production systems. *Agronomy Journal*, v. 113, n. 2, p. 1136-1149, 2021. DOI: 10.1002/agj2.20578.
- PETERSEN, R G. **Agricultural field experiments:** design and analysis. New York: Marcel Dekker, 1994. 409 p.

SARKAR, D.; MEITEI, C. B.; DAS, A.; GHOSH, P. K.; MANDAL, B. Changes in soil organic carbon pools in a long-term trial with perennial fodder crops in acid soils of northeast India. **Grass and Forage Science**, v. 73, n. 2, jun. 2018. DOI: 10.1111/gfs.12311S.

SAS INSTITUTE. **Statistical Analysis Software, SAS/STAT**: user's guide: 9.4. Cary, NC, 2015.

SEGNINI, A.; XAVIER, A. A. P.; OTAVIANI-JUNIOR, P. L.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. de F.; PRAES, M. F. F. M.; RODRIGUES, P. H. M.; MILORI, D. M. B. P. Soil carbon stock and humification in pastures under different levels of intensification in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 1, p. 33-40, 2019. DOI: 10.1590/1678-992x-2017-0131.

SOUSSANA, J. F.; LEMAIRE, G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, n. 1, p. 9-17, 2014. DOI: 10.1016/j.agee.2013.10.012.

STOCKMANN, U.; ADAMS, M. A.; CRAWFORD, J. W.; FIELD, D. J.; HENAKAARCHCHI, N.; JENKINS, M.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; COURCELLES, V. DE R. DE; SINGH, K.; WHEELER, I.; ABBOTT, L.; ANGERS, D. A.; BALDOCK, J.; BIRD, M.; BROOKES, P. C.; CHENU, C.; JASTROW, J. D.; LAL, R.; LEHMANN, J.; O'DONNELL, A. G.; PARTON, W. J.; WHITEHEAD, D.; ZIMMERMANN, M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 164, p. 80-99, 2013. DOI 10.1016/j.agee.2012.10.001.

VALARINI, M. J.; GODOY, R. Contribuição da fixação simbiótica de nitrogênio na produção de guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp). **Scientia Agricola**, v. 51, n. 3, p. 500-504, 1994.

WANG, Z.; GOONEWARDENE, L. A. The use of MIXED models in the analysis of animal experiments with repeated measures data. **Canadian Journal of Animal Science**, v. 84, n. 1, mar. 2004. DOI: 10.4141/A03-123.



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA E
PECUÁRIA