

CAPÍTULO 14

ESTOQUES DE CARBONO EM AGROFLORESTAS E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM SISTEMAS AGROPECUÁRIOS

Alan Figueiredo de Oliveira; Ângela Maria Quintão Lana; Lúcio Carlos Gonçalves; Matheus Anchieta Ramirez; Pamella Grossi de Sousa; Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Rafael Araújo de Menezes; Guilherme Lobato Menezes

RESUMO

A evolução da agropecuária mundial visou a sistemas altamente especializados, com processos padronizados e grande utilização de insumos industriais. Entretanto, os impactos negativos causados por esse modelo de desenvolvimento fizeram com que a comunidade científica buscasse modelos mais diversificados, eficientes e com menores impactos ambientais. Nesse contexto, as agroflorestas são os sistemas mais diversificados e complexos, que integram animais, árvores, gramíneas e/ou leguminosas. Do ponto de vista ambiental, as agroflorestas apresentam a grande vantagem de aumentar os estoques de carbono no solo e na biomassa aérea e utilizar, de forma mais eficiente, os recursos naturais. As análises de ciclo de vida e de cenários agropecuários procuram analisar as emissões de GEE e os efeitos de ações antrópicas nos sistemas produtivos. Essas análises são cruciais para entender como melhorias de manejo ou mudanças de estratégias produtivas podem impactar os indicadores ambientais dentro dos sistemas produtivos e, mais amplamente, a agropecuária nacional e a mundial.

INTRODUÇÃO

As agroflorestas podem ser caracterizadas como sistemas agropecuários formados por diferentes arranjos de espécies de árvores, de gramíneas, de leguminosas e de animais. Existem diferentes sistemas considerados agroflorestas, como silvipastoril, agrossilvopastoril, silviagrícola, cercas vivas, pousio melhorado, entre outros (Feliciano *et al.*, 2018). As agroflorestas são sistemas mais complexos que os monocultivos e, por isso, demandam grande expertise técnica e gerencial para o adequado funcionamento. As agroflorestas geralmente também são mais eficientes na utilização dos recursos naturais e apresentam melhores indicadores ambientais.

O sequestro de carbono nas agroflorestas ocorre no solo, pela maior deposição de liteira e pelo grande e profundo sistema radicular, e na biomassa aérea, pelo crescimento das árvores e forrageiras. As raízes das árvores são capazes de reciclar nutrientes de camadas mais profundas e aumentar a produção do sistema. O maior volume de liteira disponível para decomposição e o menor revolvimento do solo permitem maior formação de macro e de microagregados, maior formação de frações estáveis no solo e aumento dos estoques de carbono no solo. Além disso, o grande e profundo sistema radicular das árvores pode aumentar, de forma prolongada, o sequestro de carbono em camadas mais profundas do solo (Vicente *et al.*, 2016; Cardinael *et al.*, 2018; Nascimento *et al.*, 2019). Por outro lado, o grande volume da biomassa aérea, rica em carbono, permite aumentar ainda mais o sequestro de carbono no sistema, em comparação a sistemas mais simples como as monoculturas (Nair *et al.*, 2009A; Dube *et al.*, 2012; Lorenz e Lal, 2014).

As avaliações de ciclo de vida e as avaliações de cenários são metodologias utilizadas em diversas partes do mundo, com o objetivo de avaliar os indicadores ambientais de sistemas produtivos e de produtos comercializáveis. As avaliações de ciclo de vida (LCA – Life Cycle Assessment) geralmente são utilizadas para analisar todas as emissões de gases do efeito estufa (GEE) de um determinado produto. Essas avaliações consideram as emissões de toda a cadeia de produção de insumos, de transporte e de produção, gerando indicadores como a pegada de carbono (volume de CO₂ equivalente emitido por kg de produto produzido) e a pegada hídrica (volume de H₂O utilizado por kg de produto produzido). As avaliações de ciclo de vida também são utilizadas para determinar como algumas mudanças de manejo ou adoção de tecnologias influenciam nas emissões do sistema (Beauchemin *et al.*, 2010).

As avaliações de cenários permitem análises mais avançadas e amplas da agropecuária em diferentes níveis organizacionais. No local, os cenários permitem a análise dos impactos gerados por tecnologias ou por diferentes sistemas produtivos dentro das propriedades. De forma regional e nacional, as avaliações de cenários consideram o impacto de questões mais amplas, como crescimento populacional, crescimento do padrão de consumo, aumento de renda da população e impacto de políticas públicas nos indicadores ambientais dos países ou dos continentes.

No Brasil, a implantação de sistemas agroflorestais e o aumento dos índices produtivos por meio da melhoria do manejo e da intensificação dos sistemas são processos fundamentais para a melhoria dos indicadores ambientais. As avaliações de ciclo de vida e de cenários são metodologias importantes para a determinação do impacto ambiental

das mudanças implementadas nos sistemas produtivos. Objetivou-se com este capítulo analisar os estoques de carbono em sistemas agroflorestais e o impacto de mudanças nos sistemas de produção, por meio da avaliação de ciclo de vida e de cenários.

ESTOQUES DE CARBONO EM AGROFLORESTAS

Os solos agrícolas em todo o mundo já passaram por alterações em suas utilizações. A mudança da ocupação do solo de vegetação nativa do Cerrado brasileiro para áreas de lavouras com tratamentos culturais tradicionais é um exemplo disso. Essas mudanças na ocupação também modificam as relações entre solo, plantas, animais, ambiente e produtividade agrícola. Tais interações, por sua vez, influenciam diretamente os estoques de carbono do sistema, tanto no solo quanto na biomassa aérea. Em metanálise global com 385 estudos, Don *et al.* (2011) avaliaram como as mudanças no uso do solo afetam os estoques de carbono. As maiores perdas de carbono orgânico no solo foram causadas pela conversão de florestas em áreas de lavoura ou de pasto. Por outro lado, os maiores ganhos de carbono foram observados na conversão de área de lavoura em pasto, ou na conversão de áreas em florestas secundárias ou primárias.

Esses resultados mostram como o desmatamento ocorrido em várias partes do mundo, nas últimas décadas, afetou o balanço de carbono nos ecossistemas terrestres. Além disso, é possível verificar que a arborização dos sistemas produtivos é uma oportunidade de sequestrar grande quantidade de carbono e mitigar as emissões dos GEE. Em sistemas arborizados, o maior estoque de carbono no solo pode ocorrer em razão da proteção do solo contra erosão, da maior ciclagem de carbono pela queda de galhos e folhas, do maior conteúdo de raízes principalmente nas camadas mais profundas e da estabilização da matéria orgânica (Silveira *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2017).

Em outra metanálise baseada em 53 trabalhos, De Stefano e Jacobson (2017) também observaram redução nos estoques de carbono no solo na mudança do uso do solo de floresta para agrofloresta (25% na camada de 0 a 30 cm). A transição de ocupação de agricultura para agrofloresta aumentou o estoque de carbono no solo em 40% na camada de 0 a 100 cm. As conversões de pasto para agrofloresta e de área não cultivada para agrofloresta aumentaram os estoques de carbono no solo em 10 e 25%. Os sistemas silvipastoril, agropastoril e agrossilvopastoril mostraram-se capazes de aumentar os estoques de carbono no solo em comparação aos outros sistemas. Segundo os autores, as agroflorestas apresentam maior capacidade de aumentar os estoques de carbono e a persistência do carbono no solo. A maior produção de liteira, o denso e profundo sistema

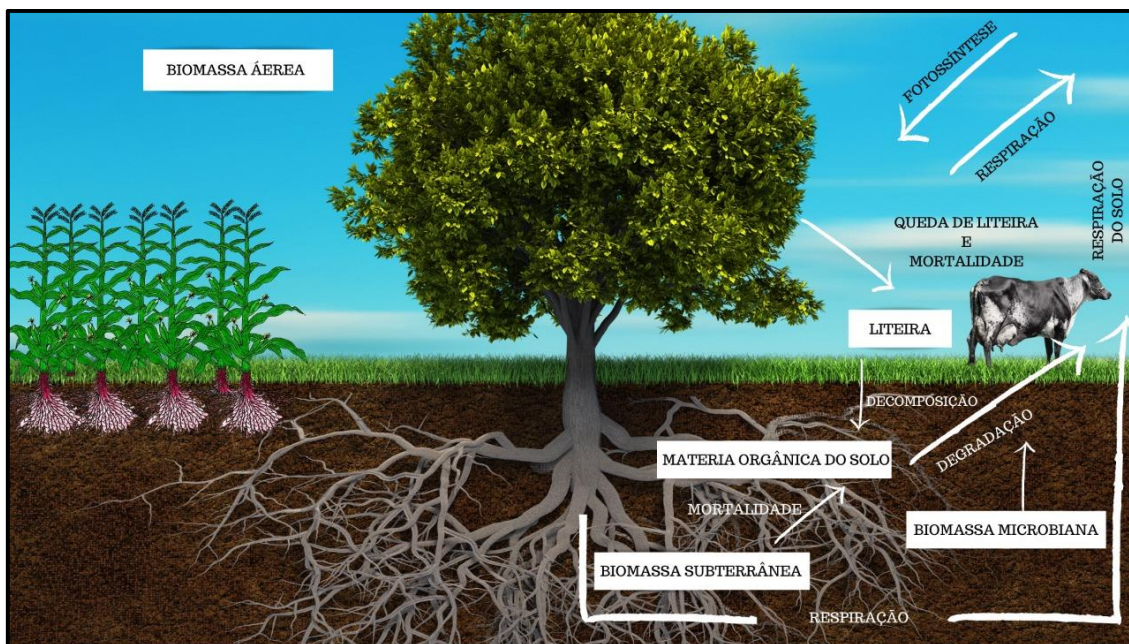
radicular, o melhor aproveitamento dos recursos naturais do sistema, a maior umidificação e agregação do solo, a maior ciclagem de nutrientes e o menor revolvimento do solo são os principais fatores que determinam o maior estoque de carbono no solo em sistemas arborizados.

As agroflorestas têm impacto direto no desempenho dos sistemas produtivos devido aos efeitos das árvores no uso sustentável do solo e no manejo dos recursos naturais. A interação entre árvores, pasto, lavoura e animais forma sistemas mais complexos estrutural e funcionalmente. Esses sistemas complexos também se tornam mais eficientes pela maior capacidade de capturar e usar recursos (luz, nutrientes e água) e pela interação benéfica entre os ciclos biológicos dos componentes do sistema. Tais interações, junto à maior diversidade acima e abaixo do solo, aumentam a estabilidade e a resiliência do sistema. Portanto, as agroflorestas possibilitam uma interação mais sustentável e duradoura com os ambientes naturais em comparação às monoculturas (Nair *et al.*, 2009B; Schoeneberger, 2009; Soto-Pinto *et al.*, 2010).

A capacidade produtiva do ecossistema e sua habilidade de armazenar carbono dependem de fatores como as condições edafoclimáticas, as espécies utilizadas, os manejos utilizados, a densidade e a idade das plantas. Esses fatores alteram a interação e a disputa por nutrientes no solo, a profundidade e a distribuição das raízes, a qualidade e a quantidade de liteira e a entrada de carbono no sistema. De forma geral, considera-se que os estoques de carbono podem ser ranqueados em florestas nativas > agroflorestas > silvicultura > pastagens produtivas > integração lavoura-pecuária (ILP) > lavoura em plantio direto > pasto degradado > lavoura tradicional (Salton, 2005; Nair *et al.*, 2009B).

A integração pecuária-floresta (IPF) pode ser denominada como um tipo de agrofloresta em razão da integração de árvores, de animais e de plantas forrageiras em um mesmo local. No Brasil, a IPF é desenvolvida desde pequenas agroflorestas em propriedades familiares até grandes empreendimentos rurais. Um dos principais benefícios da IPF é a capacidade de armazenar grandes quantidades de carbono acima e abaixo do solo, em comparação com as pastagens e as lavouras. O sequestro de carbono é decorrente da retirada de CO₂ da atmosfera e de seu armazenamento nos tecidos vegetais ou no solo, por longo período. Na IPF, as principais formas de armazenar carbono acima do solo são na biomassa das pastagens e, sobretudo, na das árvores. O armazenamento de carbono abaixo do solo acontece na biomassa de raízes grossas e finas, nos microrganismos do solo e no carbono estável nas formas orgânica e inorgânica (Figura 1) (Nair *et al.*, 2009B).

Figura 1. Representação esquemática da dinâmica de entrada e saída de carbono em agroflorestas



Fonte: Desenvolvimento pessoal.

McGroddy *et al.* (2015) avaliaram os estoques de carbono em sistemas de IPF com espécies naturais em 100 fazendas, localizadas em quatro regiões do Equador. Os resultados mostraram que a maior parte do carbono armazenado no sistema está no solo. Entretanto, o carbono armazenado na biomassa aérea das árvores também compõe boa parte do carbono total do sistema (Tabela 1).

Tabela 1. Estoque de carbono (Mg/ha) por componente do sistema de IPF em quatro regiões do Equador

Componente do sistema	Sinai	Huamboya	Proano	Sta. Isabel
Biomassa viva acima do solo	31,4	25,3	17,1	6,1
Raízes grossas	9,4	7,6	5,1	1,8
Raízes finas na camada de 0 a 10 cm	1,9	1,7	2,9	2,1
Raízes finas na camada de 10 a 20 cm	1,0	1,0	1,5	1,3
Carbono no solo na camada de 0 a 10 cm	41,7	41,7	37,6	44,3
Carbono no solo na camada de 10 a 20 cm	53,0	45,2	47,4	53,3

Fonte: Adaptado de McGroddy *et al.* (2015).

Andrade *et al.* (2008) relataram o grande problema do desmatamento na Costa Rica, a partir da década de 1960, para a produção agropecuária, e a posterior perda da capacidade produtiva dessas áreas. Os sistemas de IPF com gramíneas melhoradas podem ser alternativas para aprimorar a produção agropecuária do país e aumentar os estoques de carbono dos sistemas. Os autores avaliaram os estoques de carbono da massa área e

das raízes em sistemas em pleno sol com as gramíneas *Urochloa brizantha* e *Hyparrhenia rufa*, ou essas gramíneas com as espécies arbóreas leguminosas *Pithecellobium saman*, *Diphysa robinoides* ou *Dalbergia retusa*, por três anos.

O estoque de carbono total variou de 3,5 Mg C/ha no pleno sol a 12,5 Mg C/ha na IPF. O total de carbono no solo aumentou 27, 38 e 43% quando *D. retusa*, *D. robinoides* e *P. saman* foram incluídas no sistema com *U. brizantha*, e nenhum efeito foi observado com o *H. rufa*. Esses resultados mostram a oportunidade de estocar carbono no sistema com adição de árvores. A biomassa das raízes das árvores no 0,6 m superficial foi significativamente maior ($p < 0,01$) associada com o pasto de *U. brizantha* (101 g m²) em comparação com a associada com o pasto de *H. rufa* (54 g m²).

Segundo os autores, a maior biomassa das raízes das árvores em associação com *U. brizantha* pode indicar maior estímulo ao crescimento das raízes em um ambiente com maior competição por água. Os canais formados pelas raízes das gramíneas após corte ou senescência podem ficar disponíveis para as raízes das árvores e melhorar o seu crescimento. Além disso, o aumento da disponibilidade de nitrogênio no solo pelas árvores leguminosas pode contribuir para maior crescimento e estoque de carbono pela *U. brizantha* e posterior inclusão no solo.

Xu *et al.* (2016) avaliaram os estoques de carbono acima e abaixo do solo em sistema com pastagem natural, com pastagem de *Paspalum notatum* manejada com aplicação de calcário e adubada e com IPF com *P. notatum* adubado e *Pinus elliottii*. Os autores observaram maior estoque de carbono na IPF (168 Mg/ha) em comparação com a pastagem manejada (121 Mg/ha) e com a pastagem natural (94 Mg/ha). Essa diferença ocorreu pelo maior acúmulo de carbono na parte aérea das árvores na IPF (59 Mg/ha) em comparação à pastagem manejada (2,1 Mg/ha) e à natural (3,8 Mg/ha). O carbono orgânico no solo foi responsável por 81 e 90% do carbono total do sistema na pastagem nativa e na melhorada e apenas 61% na IPF. Esses resultados demonstram que o manejo mais adequado das pastagens pode melhorar os estoques de carbono em comparação às pastagens nativas, principalmente se houver arborização das pastagens.

Resultados semelhantes foram observados por Haile *et al.* (2010), que encontraram maiores estoques de carbono no solo ocupado com IPF formada por *P. elliottii* e grama-batatais (*P. notatum*) em comparação ao pleno sol com *P. notatum*. Na IPF, houve maior participação de derivados de carbono C3, comparado com o pleno sol, em todas as camadas do solo, mas com maior amplitude nas camadas mais profundas. As árvores contêm sistema radicular mais profundo e volumoso em comparação com as

gramíneas. Além disso, a decomposição do carbono do solo é mais rápida nas camadas superficiais em relação às mais profundas e, por isso, a permanência do carbono nas camadas mais profundas pode ser maior. Portanto, além do estoque de carbono na parte aérea das árvores, o estoque de carbono no solo também é importante nesses sistemas.

Howlett *et al.* (2011) analisaram os estoques de carbono no solo em sistemas de IPF com *P. radiata* e *Betula pendula*, na região da Galícia, na Espanha. Os estoques de carbono no solo foram maiores no sistema com *B. pendula* em relação ao com *P. radiata* e os estoques em IPF foram maiores que em pastagem convencional, principalmente nas camadas mais profundas e na forma de macroagregados na camada superficial. Segundo os autores, a deterioração das raízes, a queda das folhas das árvores e a desestruturação profunda do solo são os principais fatores que aumentam a entrada de carbono e sua manutenção no solo por proteção contra a decomposição microbiana.

Em metanálise global, Chatterjee *et al.* (2018) revisaram 78 trabalhos e observaram que os estoques de carbono no solo até um metro de profundidade, nos sistemas agroflorestais, foram 27% maiores em áreas áridas e semiáridas, 26% em regiões tropicais úmidas, 5,8% em regiões mediterrâneas e 5,3% em regiões temperadas em comparação com áreas ocupadas com pasto ou agricultura. Na região de Alberta, no Canadá, Baah-Acheamfour *et al.* (2015) encontraram maior estoque de carbono no solo nas camadas de 0 a 10 e de 10 a 30 cm, em regiões com árvores (89 e 119 Mg C/ha) em comparação a regiões ocupadas apenas com estrato herbáceo (76 e 77 Mg C/ha). Nos ambientes em que havia árvores, o carbono estava mais disponível nas frações livres e oclusas e menos na fração mineralizada em relação às áreas com estrato herbáceo. Segundo os autores, esse fato pode ocorrer em razão da maior deposição de liteira e da incorporação de carbono no solo, bem como de mudanças na temperatura, na umidade e no manejo do solo que favorecem a mineralização do carbono.

Os ambientes arborizados podem aumentar os estoques de carbono no solo devido à deposição constante de liteira e ao revolvimento limitado do solo. Além disso, os estoques de carbono do sistema podem ser aumentados em virtude da biomassa aérea das árvores e do profundo e amplo sistema radicular. O carbono no solo está disponível na fração livre, na fração protegida pela oclusão em agregados e na fração estável quimicamente pela associação com superfícies de minerais (Silva *et al.*, 2011; Tonucci *et al.*, 2011; Casals *et al.*, 2014; Cárdenas *et al.*, 2018).

Na Inglaterra, Upson *et al.* (2016) observaram maior estoque de carbono no solo coberto por pasto (59,6 Mg/ha) em comparação à IPF (59,4 Mg/ha) e à floresta (46,2

Mg/ha), possivelmente em razão da menor cobertura do solo com forragem nas agroflorestas. Entretanto, quando se considerou o estoque de carbono na biomassa superior, a IPF apresentou 63,4 Mg/ha de carbono, valor muito superior ao apresentado pelo pasto. De acordo com os autores, a combinação de árvores e de pastagem possibilita maior incorporação de carbono no solo em decorrência da maior produção de raízes e da maior decomposição de liteira em comparação aos sistemas de monocultivo.

Os estoques de carbono na biomassa aérea nas agroflorestas representam um importante reservatório de carbono. Muller *et al.* (2009) avaliaram os estoques de carbono na parte aérea de um sistema de IPF formado por árvores de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*, com linhas duplas com três metros entre linhas e plantas e 30 metros entre renques (60 árvores de eucalipto e 45 de acácia por hectare), e pasto de *U. decumbens*. O estoque de carbono no eucalipto foi de 11,17 Mg/ha e na acácia, de 3,12 Mg/ha, com total de carbono no componente arbóreo de 14,29 Mg/ha. No resíduo do pasto, foi estimado 0,58 Mg/ha de carbono.

No Brasil, Torres *et al.* (2017) estudaram o balanço de carbono em quatro sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). O primeiro foi composto por milho (*Zea mays*), no primeiro ano, e pasto de *U. decumbens*, no segundo ano, em integração com *Eucalyptus saligna*, com três metros entre plantas e oito metros entre renques. O segundo foi composto por feijão (*Phaseolus vulgaris*), no primeiro ano, e pasto de *U. decumbens*, no segundo ano, em integração com *E. urophylla* x *E. grandis*, com três metros entre plantas e oito metros entre renques. O terceiro foi composto por pasto de *U. decumbens* e *E. urophylla* x *E. grandis*, com 1 metro entre plantas e nove metros entre renques. O quarto foi composto por pasto de *U. decumbens* e *E. urophylla* x *E. grandis*, com três metros entre plantas e 12 m entre renques. Em todos os sistemas, a pastagem foi pastejada por bovinos de corte com 1 UA/ha. Todos os sistemas apresentaram balanço positivo de carbono, ou seja, estocaram mais carbono do que emitiram. Esses resultados demonstram como os sistemas de IPF mais utilizados no Brasil (arranjos entre eucalipto e *Urochloa*) são capazes de mitigar as emissões de GEE e ainda funcionar como dreno de carbono da atmosfera.

Os sistemas de integração lavoura-floresta (ILF) também são reconhecidos por estocarem mais carbono que as monoculturas. Wotherspoon *et al.* (2014), no Canadá, observaram maior estoque de carbono no solo e na biomassa aérea em sistemas produtores de soja consorciados com até 111 árvores/ha de *Populus deltoides*, *Picea abies*, *Quercus*

rubra, *Juglans nigra* ou *Thuja occidentalis*. Os estoques totais de carbono variaram de 91,3 a 113,4 Mg/ha nos sistemas com árvores e 71,1 Mg/ha no monocultivo de soja.

O plantio de árvores leguminosas em consórcio com pastagens e culturas pode aumentar os estoques de carbono no solo devido à maior produção de biomassa aérea e à posterior incorporação desse carbono no solo. Beedy *et al.* (2010) encontraram aumentos de 12% na matéria orgânica do solo, de 40% na matéria orgânica particulada, de 62% no carbono ligado à matéria orgânica particulada e de 86% no nitrogênio ligado à matéria orgânica particulada em sistema com plantio de milho (*Zea mays*) consorciado com *Gliricidia sepium* em comparação ao monocultivo de milho. Por outro lado, a fertilização nitrogenada de até 92 kg/ha aumentou apenas 15% na matéria orgânica particulada no plantio consorciado e 27% na monocultura de milho. Os resultados indicam a possibilidade de utilizar espécies arbóreas ricas em nitrogênio como estratégia para melhorar a qualidade e os estoques de carbono no solo e reduzir as emissões de GEE em razão da menor utilização de fertilizantes nitrogenados inorgânicos.

Coser *et al.* (2018) avaliaram os estoques de carbono no solo de uma área, durante quatro anos, sob transição de pastagem de baixa produtividade para um sistema de ILF (*Zea mays* + *G. sepium* + *Megathyrsus maximum* cv. *Massai*) no Distrito Federal. O carbono orgânico total, o associado a mineral e a matéria orgânica do solo particulada aumentaram após os anos de implementação do sistema. Os estoques de carbono na camada de 0 a 40 cm aumentaram de 52,6 Mg ha⁻¹, no primeiro ano, para 66,5 Mg ha⁻¹, no último ano. Os autores ressaltaram a importância do plantio direto e da decomposição dos resíduos da gliricídia na melhoria dos estoques de carbono do solo, principalmente das frações mais estáveis. Além disso, a ciclagem de nutrientes pelas raízes da gliricídia aumenta a produção de biomassa da lavoura e da forragem e pode aumentar a produção de palhada e a inclusão de carbono no solo.

Outro benefício dos sistemas agroflorestais é a menor emissão de óxido nitroso pelo solo. Franzluebbbers *et al.* (2016) observaram, no estado da Carolina do Norte, nos EUA, que as emissões de N₂O foram menores sob a copa de *Pinus* sp. em relação ao meio do renque. As menores temperatura e conteúdo de água do solo foram os principais fatores responsáveis pelas menores emissões de CO₂ e N₂O. Segundo os autores, a menor fertilização nitrogenada demandada também reduz as emissões de óxido nitroso pelo sistema.

No Canadá, Baah-Acheamfour *et al.* (2016) observaram maior captura de metano e menor emissão de óxido nitroso no solo em áreas arborizadas em comparação a áreas

comuns, fato que pode reduzir as emissões de GEE em sistemas de IPF. Oliveira *et al.* (2020) também avaliaram o fluxo de metano e de óxido nitroso no solo em duas áreas com plantações de eucalipto e em uma área de cerrado nativo, por 26 meses, no Distrito Federal. O fluxo de metano foi de -22,48, -8,38 e -1,31 $\mu\text{g CH}_4/\text{m}^2/\text{h}$ nos sistemas com eucalipto e no Cerrado, respectivamente. Esses resultados sugerem que, em sistemas de IPF, o solo pode funcionar como um dreno de metano, principalmente pela ação de bactérias metanotróficas. O fluxo de óxido nitroso foi de 5,45, 4,85 e 3,85 $\mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ nos sistemas com eucalipto e Cerrado nativo, respectivamente. Os autores ressaltaram que a mudança de Cerrado para eucalipto não alterou significativamente o fluxo de GEE em comparação ao Cerrado nativo. Portanto, os aumentos dos estoques de carbono no solo e na biomassa aérea podem ser grandes benefícios dos sistemas arborizados para mitigar o efeito estufa.

Carvalho *et al.* (2017) compararam o fluxo de óxido nitroso no solo entre os sistemas de ILP, de ILPF, de pastagem contínua e de Cerrado nativo. A ILP teve fluxo acumulado de óxido nitroso de 2,84 kg N/ha e a ILPF teve fluxo de 2,05 kg N/ha, enquanto o Cerrado teve fluxo negativo de 0,05 kg N/ha. Segundo os autores, a menor emissão de óxido nitroso na ILPF pode ocorrer em razão da presença de compostos fenólicos na liteira do eucalipto, que podem inibir as bactérias do solo produtoras de óxido nitroso (nitrificantes e desnitrificantes).

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E DE CENÁRIOS EM SISTEMAS AGROPECUÁRIOS

As avaliações de ciclo de vida e de cenários são metodologias utilizadas pela comunidade científica mundial. Essas avaliações são importantes na determinação dos indicadores ambientais gerais de produtos, de sistemas, de cadeias produtivas, de países e do mundo. Além disso, essas avaliações permitem determinar o impacto de mudanças de manejo e da utilização de tecnologias em sistemas produtivos nos âmbitos local, regional e nacional (De Vries *et al.*, 2015). As determinações dos indicadores ambientais, como a pegada de carbono dos produtos agropecuários produzidos em várias partes do mundo, também são fundamentais na determinação da visibilidade internacional e influenciam diretamente o desempenho econômico de diversos países (Desjardins *et al.*, 2012; Ruviaro *et al.*, 2012).

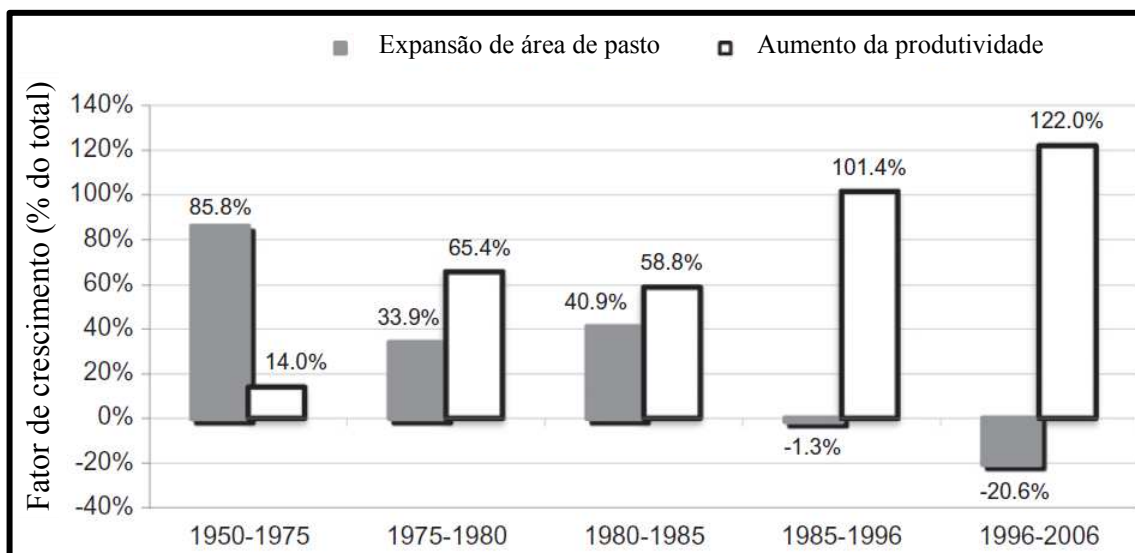
A produção pecuária no Brasil é heterogênea quanto à eficiência da transformação de recursos naturais em produtos comerciais. Em razão disso, a pecuária nacional é muitas

vezes caracterizada, pelo mercado internacional, como atrasada e causadora de degradação ambiental. Essa visão pode ser encontrada no trabalho publicado por Cederberg *et al.* (2009), do Instituto Sueco para Agricultura e Biotecnologia, os quais avaliaram o ciclo de vida da produção de carne brasileira para a Europa e concluíram que a produção de GEE na produção de carne brasileira é pelo menos 30 a 40% maior que a produzida na Europa. Segundo os autores, a alta emissão de metano pelos animais e a alta ocorrência de pastagens degradadas são os principais fatores que geram essa alta emissão. As principais ações citadas como mitigadoras dessa emissão é a intensificação dos sistemas de produção e a redução da idade ao abate. Cederberg *et al.* (2011) afirmaram que a pegada de carbono da carne brasileira produzida em áreas desmatadas na Amazônia pode ser altíssima. De acordo com Cohn *et al.* (2016), fatores como infraestrutura, disponibilidade de tecnologias, relações com outros produtores, nível de conhecimento dos produtores vizinhos estão ligados à sustentabilidade da agricultura no Brasil.

Com base nos dados reais de 22 fazendas que produzem gado de corte extensivamente, Cerri *et al.* (2015) observaram que 89 a 98% das emissões de GEE eram provenientes dos animais. Dessas emissões, 67 a 79% eram decorrentes da fermentação entérica e 20 a 33% provinham da decomposição de esterco. Esses resultados mostram que, nas fazendas manejadas extensivamente no Brasil, há a necessidade e a oportunidade de melhorar o manejo geral do rebanho e reduzir as emissões dos GEE. Algumas das medidas capazes de melhorar os sistemas produtivos nacionais e reduzir as emissões de GEE são a melhoria da qualidade da forrageira, a suplementação proteico-energética, a utilização de rebanhos melhorados, a melhoria do *status* sanitário dos rebanhos, a redução da morbidade e da mortalidade e o uso de aditivos.

Entretanto, Martha Jr. *et al.* (2012) avaliaram a evolução da pecuária de corte no Brasil desde 1950 e observaram que os padrões produtivos nacionais passaram por intensa transformação até os dias atuais. No período de 1950 a 1975, o crescimento da pecuária de corte no Brasil ocorreu principalmente com sistemas extensivos e pouco preocupados com os índices produtivos da produção pecuária, sobretudo em razão da política pública de expansão agrícola e crédito subsidiado. Porém, de 1975 até 2006, o aumento da produtividade animal, por meio do melhoramento genético e de manejos, foi o principal responsável pelo crescimento da produção de carne no país (Figura 2).

Figura 2. Evolução das áreas ocupadas com pastagens e do aumento da produtividade da agropecuária brasileira de 1950 a 2006



Fonte: Adaptado de Martha Jr. *et al.* (2012).

Portanto, é necessário incentivar ações de *marketing* e divulgação de informações que demonstrem que a agropecuária nacional está mudando e não deve continuar sendo tachada como atrasada e insustentável. Em outro levantamento mais recente do período de 2000 a 2010, Zomer *et al.* (2016) constataram que o Brasil tinha 6.790 milhões de toneladas de carbono em biomassa aérea em 2000 e, em 2010, 7.729 milhões de toneladas de carbono, ou seja, acumulou 938,8 milhões de toneladas de carbono na biomassa nesse período. Além disso, os autores afirmaram que o Brasil é um dos países que mais estocaram carbono na biomassa aérea no mundo no mesmo período. Portanto, fica evidente que a agropecuária nacional ainda tem que melhorar muito seus indicadores produtivos e ambientais. Porém, a agropecuária nacional vem melhorando seus indicadores ao longo dos últimos anos, principalmente em razão da utilização de tecnologias mais sustentáveis, como os sistemas integrados.

Crosson *et al.* (2011) avaliaram 31 trabalhos sobre avaliação de ciclo de vida em gado de leite e corte e observaram que medidas para melhorar a produtividade por área e por animal e a fertilidade dos rebanhos podem reduzir as emissões de GEE por kg de produto. Além disso, o sequestro de carbono nos solos agrícolas tem potencial de compensar boa parte das emissões dos animais criados em pasto. Nesse contexto, Sá *et al.* (2016) discutiram as oportunidades de mitigação das emissões de GEE na América Latina e destacaram a necessidade de intensificar os sistemas por meio de recuperação de pastagens (correção de acidez, utilização de sementes melhores e adubações com N:P:K), utilização de forrageiras com alta qualidade e produtividade e aumento da capacidade de

suporte dos pastos; tratamento e reuso de dejetos animais e industriais para produção de energia e fertilização do solo; aumento das áreas e da utilização adequada de plantio direto (revolvimento mínimo do solo e limitado à linha de plantio, cobertura permanente do solo com palhada e diversificação das culturas por meio de rotação); promoção de fixação biológica de nitrogênio por meio do plantio de leguminosas; implantação de sistemas de ILPF e maximização dos efeitos sinérgicos entre os componentes, bem como plantio de florestas e utilização de madeira em construção civil e em móveis.

Cardoso *et al.* (2016) estudaram a pegada de carbono de sistemas produtores de carne em cinco cenários: o um foi caracterizado por pasto de *U. decumbens* degradado e sem manejo; o dois foi constituído por pasto de *U. brizantha* cv. Marandu renovada a cada 10 anos e oferta de sal mineral esporadicamente; o três foi caracterizado por pasto composto por gramínea e a leguminosa *Stylosanthes* spp., renovação do pasto a cada cinco anos, adubações de 100 kg de fósforo e potássio e melhor manejo animal; o quatro foi composto por pasto de *M. maximum* cv. Tanzânia renovado a cada cinco anos, adubado e com bom manejo animal; e o cinco foi formado por pasto de *M. maximum* cv. Tanzânia renovado a cada cinco anos, adubado e com bom manejo animal e utilização de confinamento por 75 dias antes do abate.

Entre o cenário um e cinco, o aumento da digestibilidade da forragem reduziu o consumo e a emissão de metano por ganho de peso vivo. As emissões de óxido nitroso aumentaram com a aplicação de adubos nitrogenados. As emissões de CO₂ aumentaram principalmente em razão do maior uso de máquinas. Porém, a pegada de carbono (kg CO₂ eq./kg carcaça) foi de 58,3 no cenário um, de 40,9 no dois, de 29,6 no três, de 32,4 no quatro e de 29,4 no cinco. Segundo os autores, a intensificação da produção do rebanho bovino reduz as emissões dos GEE por unidade de produto, o uso de rebanhos melhorados pode reduzir ainda mais as emissões em sistemas intensificados, e a redução da área para produção animal pode liberar área para outras atividades ou reflorestamento e sequestro de carbono.

Com objetivo semelhante, Strassburg *et al.* (2014) avaliaram como a intensificação do manejo das pastagens no Brasil poderia atender à demanda por alimento, reduzir as emissões de GEE e reduzir o desmatamento no país. Os resultados mostraram que as pastagens atuais produzem apenas de 32 a 34% da sua capacidade total e poderiam suprir a demanda por produtos agropecuários até 2040, sem a conversão de ecossistemas naturais, com o aumento da produtividade da pastagem para 49 a 52%. De acordo com os autores, a baixa produtividade das pastagens no Brasil pode ser atribuída ao baixo nível

tecnológico utilizado nos sistemas produtivos, à especulação fundiária e à posse insegura da terra, bem como à falta de serviços de assistência técnica e extensão rural.

A intensificação das pastagens poderia mitigar 14,3 Gt CO₂ eq. em razão do menor desmatamento, da menor emissão de metano e de óxido nitroso pela redução do rebanho e do aumento do estoque de carbono no solo sob pastagens melhoradas. Os autores ressaltaram que, junto à intensificação das pastagens, é necessário que haja políticas públicas para evitar a nova expansão da pecuária extensiva em terras desmatadas. Além disso, é necessário prover subsídios para a agricultura familiar para que esse grupo de agricultores não seja excluído do processo de intensificação.

Kamali *et al.* (2016) avaliaram a pegada de carbono e o lucro operacional de quatro sistemas: pastagem natural (pastagem sem adubação e com baixos índices produtivos) – PN, pastagem melhorada (pastagem adubada e consorciada com gramíneas de inverno) – PM, pastagem natural e pastejo de palhada de soja no inverno – PNS, e pastagem natural e confinamento por 120 dias – PNC. A pastagem melhorada teve menor pegada de carbono (18,7 kg CO₂ eq. kg⁻¹ PV) e ocupação de terra (37,0 m² kg⁻¹ PV) em comparação aos demais sistemas. O sistema com pastejo de palhada de soja no inverno teve o maior custo operacional (R\$ 1.567.800/fazenda), seguido do sistema com pastagem melhorada (R\$616.400/fazenda). Segundo os autores, o sistema com pastagem melhorada é promissor para reduzir a pegada de carbono da pecuária de corte no Brasil em razão da menor emissão de GEE e ocupação de terra.

Considerando-se os indicadores produtivos, é possível observar que a capacidade de suporte do pasto foi maior com a pastagem melhorada (2,2 cabeças/ha) em relação aos outros sistemas (0,5 cabeças/ha): a idade ao abate dos animais na pastagem melhorada foi de 24 meses, enquanto nos sistemas com pastagem natural foi de 36 meses, a eficiência alimentar foi de 33,6 kg PV/t MS no sistema com pastagem melhorada e de 31,8 kg PV/t MS no sistema com pastagem natural, e a ocupação da terra foi de 37,0 m²/kg PV na pastagem melhorada e de aproximadamente 200,0 m²/kg PV na pastagem natural. Esses resultados mostram que a intensificação dos sistemas que utilizam pastagens é capaz de aumentar a capacidade produtiva nacional e a taxa de desfrute com maior eficiência alimentar e menor ocupação de área. Esse fato possibilita reduzir a pressão para o desmatamento e a abertura de novas áreas e libera novas áreas para reflorestamento.

A mesma tendência foi encontrada por Dick *et al.* (2015) em sistemas extensivo e intensivo comumente encontrados no sul do Brasil. As emissões de GEE, o uso da terra, a eutrofização de recursos hídricos, o esgotamento de recursos hídricos e o esgotamento

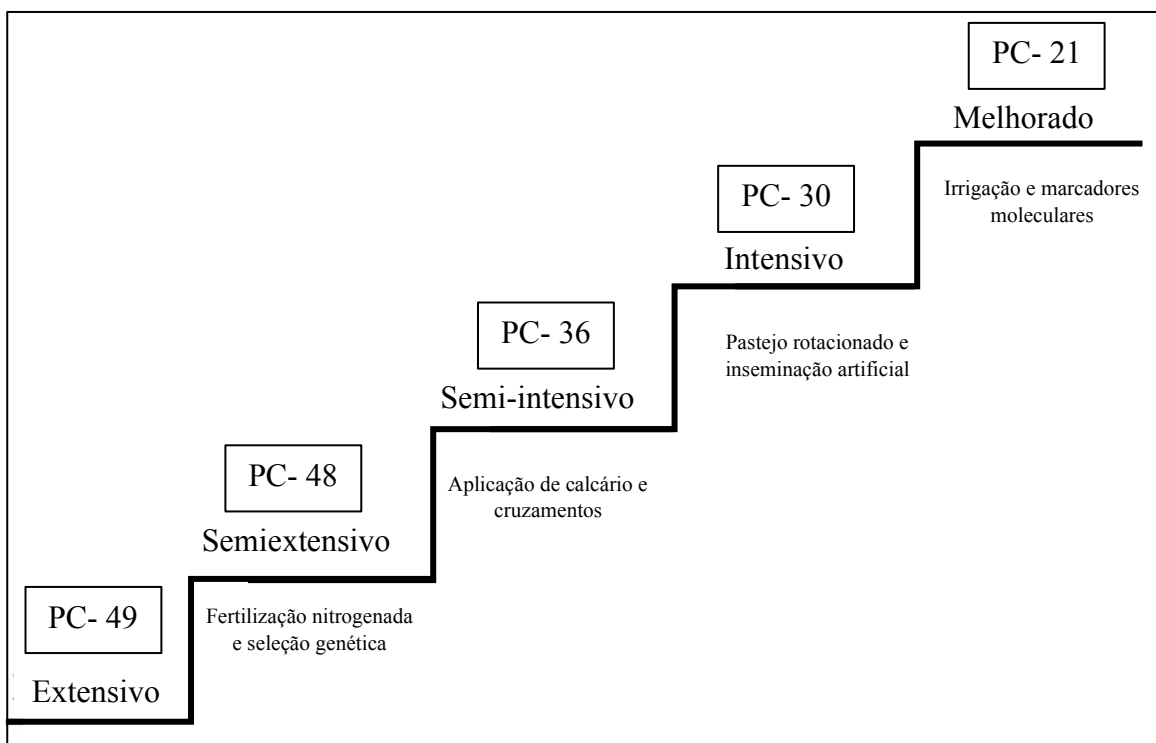
de recursos fósseis por unidade de produto produzido foram menores no sistema intensivo. Por outro lado, o sistema extensivo causou menor esgotamento de minerais e acidificação do solo.

Stanley *et al.* (2018), no meio-oeste dos EUA, avaliaram o balanço de carbono de sistemas de terminação de gado de corte em um sistema intensivo com manejo rotacionado e em um sistema com confinamento com dados de fazendas e da literatura. O desempenho animal foi melhor e as emissões de carbono foram menores no confinamento (6,09 kg CO₂ eq. kg de carcaça) em relação ao pastejo rotacionado (9,62 kg CO₂ eq. kg de carcaça). Houve uma taxa de sequestro de carbono de 3,59 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ no pastejo rotacionado, que, quando adicionado à estimativa da pegada de carbono, reduziu a pegada de carbono para -6,65 kg CO₂ eq. kg de carcaça⁻¹. Esses resultados indicam o potencial de dreno de carbono da atmosfera com a utilização de pastagens bem manejadas e com manejo rotacionado. Entretanto, o confinamento requer menos da metade de terra para a produção de carne. Os dois sistemas apresentam a capacidade de mitigar os efeitos causados pelas emissões de carbono na pecuária de corte.

No Canadá, Beauchemin *et al.* (2011) analisaram 11 estratégias (cenários) de mitigação da pegada de carbono da produção de gado de corte em comparação ao sistema normalmente utilizado (Referência), e algumas estratégias foram eficientes na redução da pegada de carbono. O sistema considerado referência no Canadá apresenta alta eficiência produtiva, e, possivelmente por isso, algumas estratégias aumentaram as emissões de GEE.

Já no Brasil, Mazzetto *et al.* (2015) avaliaram a pegada de carbono em sistema produtivo de gado de corte, com a utilização de quatro etapas de intensificação do sistema, com estratégias de melhoria de produção de pasto e manejo animal, em comparação ao sistema extensivo. O sistema mais intensificado reduziu 92% da área de pastagem utilizada, em comparação com o sistema extensivo. A intensificação aumentou o número de bezerros, de novilhos e novilhas e diminuiu o tempo do ciclo produtivo e a idade ao abate. A pegada de carbono também foi reduzida com a intensificação do sistema (Figura 3). A menor pegada de carbono e a menor área requerida mostram que a melhoria do manejo dos animais e a melhoria produtiva das pastagens podem reduzir as emissões de GEE pelos sistemas, liberar a área para reflorestamento, diminuir a pressão para o desmatamento e melhorar a imagem da pecuária nacional.

Figura 3. Evolução na intensificação do sistema produtivo e suas respectivas pegadas de carbono (PC) em kg CO₂ eq./kg carcaça



Fonte: Adaptado de Mazzetto *et al.* (2015).

Essas avaliações de cenários mais restritos ao âmbito produtivo facultam inferir como o manejo das propriedades interfere no balanço de carbono. Porém, avaliações mais amplas sobre o impacto de possíveis ações públicas sobre a mitigação dos GEE possibilitam entender como cada bioma pode ser manejado para reduzir o processo de intensificação do efeito estufa. Além disso, esses estudos mais amplos permitem compreender como determinadas tecnologias podem impactar as emissões nacionais de acordo com a possibilidade de sua implementação em cada bioma brasileiro.

Cerri *et al.* (2018) analisaram a influência de oito cenários de possíveis ações, nos estados de Rondônia e Mato Grosso, sobre os estoques de carbono nos biomas Amazônia e Cerrado. Os cenários foram: 1- recuperação de 9% das pastagens degradadas nos dois estados de acordo com o plano ABC; 2- recuperação de 100% das pastagens degradadas nos dois estados; 3- conversão de 100% das pastagens degradadas em ILP; 4- conversão de 100% das áreas com cultivo tradicional em plantio direto; 5- conversão de 100% da área de plantio direto em ILP; 6- conversão de 100% da área em cultivo convencional em ILP; 7- conversão de 100% da área de cultivo tradicional em plantio direto e de 100% da área de plantio direto em ILP e 8- conversão da área de plantio convencional e de plantio direto em ILP. Os autores demonstraram que as emissões de carbono na conversão da

Amazônia em pasto e em lavoura foi 4 a 5,5 vezes maior que no Cerrado. Além disso, os autores mostraram que a intensificação da agricultura no Cerrado, a preservação da floresta e o reflorestamento na Amazônia seriam as ações mais eficientes para mitigar as emissões de carbono para a atmosfera. Portanto, fica claro que, além de desenvolver novas tecnologias, é necessário entender como cada tecnologia pode impactar a mitigação das emissões de carbono de cada bioma nacional.

Palermo *et al.* (2014) avaliaram o efeito de quatro cenários para a pecuária de corte no Brasil nas emissões de GEE. O piqueteamento e a rotação da pastagem tiveram o maior potencial de mitigação de GEE, com redução de 17,7 Gt CO₂ eq., enquanto o consórcio de leguminosas com pastagens teve o menor potencial, com 7,1 Gt CO₂ eq. A utilização de confinamento foi capaz de mitigar 8,3 Gt CO₂ eq., e o cenário que avaliou a conjunção de todos os três cenários acima foi capaz de reduzir 13,1 Gt CO₂ eq. Segundo os autores, a intensificação dos sistemas, a redução de áreas de pastagem e a diminuição da pressão por abertura de novas áreas são fundamentais para reduzir as emissões de GEE e regenerar os biomas nacionais. Além disso, o cenário de intensificação dos sistemas baseado em pastagens melhoradas e a mescla de todos os cenários foram os melhores cenários e mais factíveis para a realidade brasileira. A continuação da produção animal extensiva é o pior cenário do ponto de vista ambiental, e a utilização de confinamento, embora reduza as emissões de GEE, não é factível em todo o Brasil devido ao alto custo do investimento.

Em países como os EUA, onde a cadeia produtiva é mais tecnificada e o confinamento é utilizado, a produção de bovinos em pastagens, mesmo que intensivamente, pode não ser a melhor opção produtiva do ponto de vista ambiental. Capper *et al.* (2012) avaliaram a pegada de carbono de três sistemas norte-americanos, e a produção animal em pastagens, do nascimento ao abate, gerou a maior pegada de carbono e os piores índices ambientais em comparação aos sistemas que utilizam confinamento. O manejo de animais com maior eficiência alimentar, estratégias nutricionais mais adequadas e diminuição da idade ao abate reduz o tamanho do rebanho e melhora a eficiência deles em converter o alimento em carcaça. Do ponto de vista metabólico, o maior ganho de peso diário e a redução da idade ao abate reduzem a conversão do alimento ingerido em energia gasta para manutenção. Esses efeitos são capazes de diminuir drasticamente as emissões de GEE do setor produtivo e atingir a meta de aumentar a produção mundial de carne.

Dick *et al.* (2014) mostraram, com dados produtivos do sul do Brasil e por meio de avaliação de cenários, que é possível promover a intensificação da produção agropecuária conjuntamente com a preservação ambiental e a mitigação dos GEE. Nesse trabalho, a utilização de melhorias produtivas gerou impactos positivos na redução das emissões de GEE, no uso de terra e de combustíveis fósseis. A melhoria das pastagens com a introdução de gramíneas melhoradas em pastejo rotacionado, a intensificação do uso de pastagens, a introdução de leguminosas nos pastos, o aumento na taxa de desmama e a utilização de estratégias que aumentam os estoques de carbono no solo foram eficientes em reduzir os impactos negativos da produção agropecuária, mesmo que por vias distintas. Ruviaro *et al.* (2014) também mostraram reduções nas emissões de GEE em diferentes sistemas com pastagens melhoradas e diferentes estratégias de suplementação em comparação ao sistema com pastagem natural (Tabela 2).

Tabela 2. Emissões médias de CO₂ equivalente de diferentes sistemas de produção, de acordo com a pastagem utilizada

Sistema de produção	Emissões de CO ₂ eq.
Pastagem natural	42,6
Pastagem natural melhorada	20,2
Pastagem natural com azevém	29,6
Pastagem natural melhorada com sorgo	23,4
Pastagem de azevém com sorgo	20,0
Pastagem natural suplementada com sal proteinado	33,3
Pastagem natural suplementada com sal proteico e energético	23,4

Fonte: Adaptado de Ruviaro *et al.* (2014).

Figueiredo *et al.* (2016) avaliaram o balanço dos GEE e a pegada de carbono por meio da avaliação de cenários da produção de bovino em pastagem degradada, em pastagem manejada intensivamente e em pastagem em ILPF. As emissões de GEE por área foram maiores no sistema com manejo intensivo do pasto (84.541 kg CO₂ eq./ha) em relação à ILPF (64.519 kg CO₂ eq./ha) e à pastagem degradada (8.004 kg CO₂ eq./ha), principalmente devido à maior emissão de metano dos animais em pastagem intensivamente manejada. Entretanto, devido ao maior estoque de carbono no solo com pasto com manejo intensivo e ao estoque no solo e na madeira na ILPF, a pegada de carbono foi maior nos animais criados em pasto degradado (18,5 kg CO₂ eq./kg PV) em relação à ILPF (-28,1 kg CO₂ eq./kg PV) e ao pasto com manejo intensivo (7,6 kg CO₂ eq./kg PV).

Esses resultados demonstram que a conversão de pastagens degradadas em pastagem com manejo intensivo e, principalmente, em ILPF é uma ferramenta para reduzir as emissões de GEE e a pegada de carbono da carne brasileira. A silvicultura de

eucalipto com população de 250 a 350 árvores/ha tem o potencial de sequestrar por volta de 5,0 a 5,3 Mg C/ha/ano em ciclo de produção de 10 anos. Entretanto, o principal fator ligado a esse vultoso estoque de carbono é a destinação final da madeira. Em situações em que a madeira é usada em cercas, na construção civil ou em telhados, esse estoque de carbono é mais prolongado. Todavia, quando a madeira é convertida em carvão e queimada, o carbono volta para a atmosfera.

Os debates sobre preservação ambiental no Brasil e no mundo envolvem diversos fatores, como padrões de consumo das populações, hábitos alimentares das pessoas, distribuição de renda e produção de alimentos. Silva *et al.* (2016) avaliaram o impacto de aumentar ou reduzir o consumo de carne no Brasil em 10, 20 ou 30% associado ou não ao desmatamento. No cenário com desmatamento controlado, a redução da demanda por carne pode aumentar as emissões de GEE em razão do aumento dos sistemas ineficientes e da maior intensidade de emissão por sistema. Nesse cenário com menor demanda, poderá haver menor demanda por pastagens produtivas e menor interesse pela intensificação dos sistemas, fato que pode tornar mais pastagens degradadas e aumentar as emissões de carbono do solo para a atmosfera. No cenário com maior demanda, poderá haver maior incentivo para intensificar e aumentar a eficiência dos sistemas, o que poderá reduzir a pegada de carbono da carne e aumentar os estoques de carbono no solo, principalmente do sistema radicular das pastagens. Por outro lado, no cenário com a continuação do desmatamento, as emissões de GEE foram maiores que no cenário sem desmatamento. Essas emissões seriam provenientes principalmente do desmatamento e dos animais criados em sistemas pouco intensificados.

Cohn *et al.* (2014) utilizaram diferentes cenários e mostraram que políticas públicas no Brasil, como taxar os produtores de rebanhos bovinos produzidos em pastagem convencional ou subsidiar os produtores de rebanhos produzidos em pastagem mais intensiva, podem ser eficientes em melhorar o balanço de carbono no Brasil e poupar terra do desmatamento. Buller *et al.* (2014) também mostraram que a produção animal intensiva integrada ao tratamento de dejetos por biodigestor, a produção de energia elétrica, a implantação de fertilização orgânica e a utilização de sistemas integrados, como ILP e ILPF, podem reduzir as emissões de carbono equivalente para o ambiente, aumentar a ciclagem de insumos dentro do sistema, minimizar os efeitos da utilização de combustíveis fósseis, facilitar a entrada em mercados mais exigentes e minimizar os efeitos do setor agropecuário no aquecimento global.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas agrofloretais integram diferentes espécies animais e vegetais, e essa interação resulta em modificações nos estoques de carbono dos sistemas agropecuários. As agroflorestas possibilitam maior estoque de carbono tanto no solo quanto na biomassa aérea em comparação aos monocultivos. Esses maiores estoques de carbono propiciam a melhoria dos indicadores ambientais dos sistemas agrofloretais. Portanto, esses sistemas poderiam ser utilizados em larga escala no Brasil, com o intuito de melhorar a visibilidade nacional nos mercados globais. As avaliações de ciclo de vida e de cenários são metodologias importantes na determinação dos indicadores ambientais de produtos, de sistemas, de cadeias produtivas e de países. No Brasil, a intensificação dos sistemas produtivos e a melhoria dos indicadores produtivos são as principais formas reconhecidas de aumentar a sustentabilidade da agropecuária nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, H. J.; Brook, R.; Ibrahim, M. 2008. Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *Plant and soil*, v. 308, n. 1-2, p. 11-22, doi: 10.1007/s11104-008-9600-x.
- Baah-Acheamfour, M.; Chang, S. X.; Carlyle, C. N.; Bork, E. W. 2015. Carbon pool size and stability are affected by trees and grassland cover types within agroforestry systems of western Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 213, p. 105-113, doi: 10.1016/j.agee.2015.07.016.
- Baah-Acheamfour, M.; Carlyle, C. N.; Lim, S. S.; Bork, E. W.; Chang, S. X. 2016. Forest and grassland cover types reduce net greenhouse gas emissions from agricultural soils. *Science of the total Environment*, v. 571, p. 1115-1127, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.106.
- Beauchemin, K. A.; Janzen, H. H.; Little, S. M.; McAllister, T. A.; McGinn, S. M. 2010. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from beef production in western Canada: A case study. *Agricultural Systems*, v. 103, n. 6, p. 371-379, doi: 10.1016/j.agry.2010.03.008.
- Beauchemin, K. A.; Janzen, H. H.; Little, S. M.; McAllister, T. A.; McGinn, S. M. 2011. Mitigation of greenhouse gas emissions from beef production in western Canada—Evaluation using farm-based life cycle assessment. *Animal Feed Science and Technology*, v. 166, p. 663-677, doi: 10.1016/j.anifeedsci.2011.04.047.
- Beedy, T. L.; Snapp, S. S.; Akinnifesi, F. K.; Sileshi, G. W. 2010. Impact of *Gliricidia sepium* intercropping on soil organic matter fractions in a maize-based cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 138, n. 3-4, p. 139-146, doi: 10.1016/j.agee.2010.04.008.
- Buller, L. S.; Bergier, I.; Ortega, E.; Moraes, A.; Bayma-Silva, G.; Zanetti, M. R. 2014. Soil improvement and mitigation of greenhouse gas emissions for integrated crop–livestock systems: case study assessment in the Pantanal savanna highland, Brazil. *Agricultural systems*, v. 137, p. 206-219, doi: 10.1016/j.agry.2014.11.004.
- Capper, J. L. 2012. Is the grass always greener? Comparing the environmental impact of conventional, natural and grass-fed beef production systems. *Animals*, v. 2, n. 2, p. 127-143, doi: 10.3390/ani2020127.
- Cárdenas, A.; Moliner, A.; Hontoria, C.; Ibrahim, M. 2018. Ecological structure and carbon storage in traditional silvopastoral systems in Nicaragua. *Agroforestry systems*, v. 93, n. 1, p. 229-239, doi: 10.1007/s10457-018-0234-6.
- Cardinael, R.; Guenet, B.; Chevallier, T.; Dupraz, C.; Cozzi, T.; Chenu, C. 2018. High organic inputs explain shallow and deep SOC storage in a long-term agroforestry system—combining experimental and modeling approaches. *Biogeosciences*, v. 15, p. 297–317, doi:10.5194/bg-15-297-2018.
- Cardoso, A. S.; Berndt, A.; Leytem, A.; Alves, B. J. R.; de Carvalho, I. D. N. O.; de Soares, L. H. B.; Urquiaga, S.; Boddey, R. M. 2016. Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. *Agricultural Systems*, v. 143, p. 86-96, doi: 10.1016/j.agry.2015.12.007.
- Carvalho, A. M.; de Oliveira, W. R. D.; Ramos, M. L. G.; Coser, T. R.; de Oliveira, A. D.; Pulrolnik, K.; Souza, K. W.; Vilela, L.; Marchão, R. L. 2017. Soil N₂O fluxes in integrated production systems, continuous pasture and Cerrado. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 108, n. 1, p. 69-83, doi: 10.1007/s10705-017-9823-4.
- Casals, P.; Romero, J.; Rusch, G. M.; Ibrahim, M. 2014. Soil organic C and nutrient contents under trees with different functional characteristics in seasonally dry tropical silvopastures. *Plant and soil*, v. 374, n. 1-2, p. 643-659, doi: 10.1007/s11104-013-1884-9.
- Cederberg, C.; Meyer, D.; Flysjö, A. 2009. Life cycle inventory of greenhouse gas emissions and use of land and energy in Brazilian beef production. *SIK Institutet för livsmedel och bioteknik*.
- Cederberg, C.; Persson, U. M.; Neovius, K.; Molander, S.; Clift, R. 2011. Including carbon emissions from deforestation in the carbon footprint of Brazilian beef. *Environmental Science & Technology*, v. 45, p. 1773–1779, doi: 10.1021/es103240z.

- Cerri, C. E. P.; Cerri, C. C.; Maia, S. M. F.; Cherubin, M. R.; Feigl, B. J.; Lal, R. 2018. Reducing Amazon deforestation through agricultural intensification in the Cerrado for advancing food security and mitigating climate change. *Sustainability*, v. 10, n. 4, p. 989, doi: 10.3390/su10040989.
- Cerri, C. C.; Moreira, C. S.; Alves, P. A.; Raucci, G. S.; Castigioni, B. A.; Mello, F. F. C.; Cerri, D. G. P.; Cerri, C. E. P. 2015. Assessing the carbon footprint of beef cattle in Brazil: a case study with 22 farms in the State of Mato Grosso. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 2593-2600, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.072.
- Chatterjee, N.; Nair, P. R.; Chakraborty, S.; Nair, V. D. 2018. Changes in soil carbon stocks across the Forest-Agroforest-Agriculture/Pasture continuum in various agroecological regions: a meta-analysis. *Agriculture, ecosystems & environment*, v. 266, p. 55-67, doi: 10.1016/j.agee.2018.07.014.
- Cohn, A. S.; Mosnier, A.; Havlík, P.; Valin, H.; Herrero, M.; Schmid, E.; O'Hare, M.; Obersteiner, M. 2014. Cattle ranching intensification in Brazil can reduce global greenhouse gas emissions by sparing land from deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 20, p. 7236-7241, doi: 10.1073/pnas.1307163111.
- Cohn, A. S.; Gil, J.; Berger, T.; Pellegrina, H.; Toledo, C. 2016. Patterns and processes of pasture to crop conversion in Brazil: Evidence from Mato Grosso State. *Land Use Policy*, v. 55, p. 108-120, doi: 10.1016/j.landusepol.2016.03.005.
- Coser, T. R.; Figueiredo, C. C.; Jovanovica, B.; Moreira, T. N.; Leite, G. G.; Cabral Filho, S. L. S.; Katoa, E.; Malaquias, J. V.; Marchão, R. L. 2018. Short-term buildup of carbon from a low-productivity pastureland to an agrisilviculture system in the Brazilian savannah. *Agricultural Systems*, v. 166, p. 184-195, doi: 10.1016/j.agsy.2018.01.030.
- Crosson, P.; Shalloo, L.; O'Brien, D.; Lanigan, G. J.; Foley, P. A.; Boland, T. M.; Kenny, D. A. 2011. A review of whole farm systems models of greenhouse gas emissions from beef and dairy cattle production systems. *Animal Feed Science and Technology*, v. 166, p. 29-45, doi: 10.1016/j.anifeedsci.2011.04.001.
- De Stefano, A.; Jacobson, M. G. 2017. Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. *Agroforestry systems*, v. 92, n. 2, p. 285-299, doi: 10.1007/s10457-017-0147-9.
- De Vries, M. D.; Van Middelaar, C. E.; De Boer, I. J. M. 2015. Comparing environmental impacts of beef production systems: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*, v. 178, p. 279-288, doi: 10.1016/j.livsci.2015.06.020.
- Desjardins, R. L.; Worth, D. E.; Vergé, X. P.; Maxime, D.; Dyer, J.; Cerkowniak, D. 2012. Carbon footprint of beef cattle. *Sustainability*, v. 4, n. 12, p. 3279-3301, doi: 10.3390/su4123279.
- Dick, M.; Silva, M. A.; Dewes, H. 2014. Mitigation of environmental impacts of beef cattle production in southern Brazil—Evaluation using farm-based life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 87, p. 58-67, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.10.087.
- Dick, M.; Silva, M. A.; Dewes, H. 2015. Life cycle assessment of beef cattle production in two typical grassland systems of southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 96, p. 426-434, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.01.080.
- Don, A.; Schumacher, J.; Freibauer, A. 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks—a meta-analysis. *Global Change Biology*, v. 17, n. 4, p. 1658-1670, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x.
- Dube, F.; Espinosa, M.; Stolpe, N. B.; Zagal, E.; Thevathasan, N. V.; Gordon, A. M. 2012. Productivity and carbon storage in silvopastoral systems with *Pinus ponderosa* and *Trifolium* spp., plantations and pasture on an Andisol in Patagonia, Chile. *Agroforestry systems*, v. 86, n. 2, p. 113-128, doi: 10.1007/s10457-011-9471-7.
- Feliciano, D.; Ledo, A.; Hillier, J.; Nayak, D. R. 2018. Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions?. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 254, p. 117-129, doi: 10.1016/j.agee.2017.11.032.
- Figueiredo, E. B.; Jayasundara, S.; Bordonal, R. O.; Berchielli, T. T.; Reis, R. A.; Wagner-Riddle, C.; La Scala Junior, N. 2016. Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting

- pasture-management systems in Brazil. *Journal of cleaner production*, v. 142, p. 420-431, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.03.132.
- Franzluebbers, A. J.; Chappell, J. C.; Shi, W.; Cubbage, F. W. 2016. Greenhouse gas emissions in an agroforestry system of the southeastern USA. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 108, n. 1, p. 85-100, doi: 10.1007/s10705-016-9809-7.
- Haile, S. G.; Nair, V. D.; Nair, P. R. 2010. Contribution of trees to carbon storage in soils of silvopastoral systems in Florida, USA. *Global Change Biology*, v. 16, n. 1, p. 427-438, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.01981.x.
- Howlett, D. S.; Mosquera-Losada, M. R.; Nair, P. K.; Nair, V. D.; Rigueiro-Rodríguez, A. 2011. Soil carbon storage in silvopastoral systems and a treeless pasture in northwestern Spain. *Journal of environmental quality*, v. 40, n. 3, p. 825-832, doi: 10.2134/jeq2010.0145.
- Kamali, F. P.V.; Van Der Linden, A.; Meuwissen, M. P.; Malafaia, G. C.; Lansink, A. G. O.; Boer, I. J. 2016. Environmental and economic performance of beef farming systems with different feeding strategies in southern Brazil. *Agricultural Systems*, v. 146, p. 70-79, doi:10.1016/j.agry.2016.04.003.
- Lorenz, K.; Lal, R. 2014. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 34, n. 2, p. 443-454, doi: 10.1007/s13593-014-0212-y.
- Martha Junior, G. B.; Alves, E.; Contini, E. 2012. Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. *Agricultural Systems*, v. 110, p. 173-177, doi: 10.1016/j.agry.2012.03.001.
- Mazzetto, A. M.; Feigl, B. J.; Schils, R. L.; Cerri, C. E. P.; Cerri, C. C. 2015. Improved pasture and herd management to reduce greenhouse gas emissions from a Brazilian beef production system. *Livestock Science*, v. 175, p. 101-112, doi: 10.1016/j.livsci.2015.02.014.
- McGroddy, M. E.; Lerner, A. M.; Burbano, D. V.; Schneider, L. C.; Rudel, T. K. 2015. Carbon stocks in silvopastoral systems: a study from four communities in southeastern Ecuador. *Biotropica*, v. 47, n. 4, p. 407-415, doi: 10.1111/btp.12225.
- Muller, M. D.; Fernandes, E. N.; Castro, C. R. T.; Paciullo, D. S. C.; Alves, F. F. 2009. Estimativa de acúmulo de biomassa e carbono em sistema agrossilvipastoril na Zona da Mata Mineira. *Pesquisa Florestal Brasileira*, n. 60, p. 11, doi: 10.4336/2009.pfb.60.11.
- Nair, P. R.; Nair, V. D.; Kumar, B. M.; Haile, S. G. 2009A. Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environmental Science & Policy*, v. 12, n. 8, p. 1099-1111, doi: 10.1016/j.envsci.2009.01.010.
- Nair, P. K. R.; Kumar, B. M.; Nair, V. D. 2009B. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of plant nutrition and soil science*, v. 172, n. 1, p. 10-23, doi: 10.1002/jpln.200800030.
- Nascimento, D. M.; Cavalieri-Polizeli, K. M. V.; Silva, A. H.; Favaretto, N.; Parron, L. M. 2019. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. *Soil and Tillage Research*, v. 186, p. 292-299, doi: 10.1016/j.still.2018.08.016.
- Oliveira, A. D. D.; Ribeiro, F. P.; Ferreira, E. A. B.; Malaquias, J. V.; Gatto, A.; Zuim, D. R.; Pinheiro, L. A.; Pulrolnik, K.; Soares, J. P. G.; Carvalho, A. M. D. 2020. CH₄ and N₂O fluxes from planted forests and native Cerrado ecosystems in Brazil. *Scientia Agricola*, v. 78, n. 1, doi: 10.1590/1678-992X-2018-0355.
- Oliveira, M. O.; Madari, B. E.; Carvalho, M. T. M.; Assis, P. C. R.; Silveira, A. L. R.; Lima, M. L.; Wruck, F. J.; Medeiros, J. C.; Machado, P. L. O. A. 2017. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. *Regional environmental change*, v. 18, n. 1, p. 105-116, doi: 10.1007/s10113-017-1146-0.
- Palermo, G. C.; Avignon, A. L. A.; Freitas, M. A. V. 2014. Reduction of emissions from Brazilian cattle raising and the generation of energy: Intensification and confinement potentials. *Energy Policy*, v. 68, p. 28-38, doi: 10.1016/j.enpol.2014.01.041.
- Ruviaro, C. F.; Gianezini, M.; Brandão, F. S.; Winck, C. A.; Dewes, H. 2012. Life cycle assessment in Brazilian agriculture facing worldwide trends. *Journal of Cleaner Production*, v. 28, p. 9-24, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.10.015.

- Ruviaro, C. F.; Léis, C. M.; Lampert, V. D. N.; Barcellos, J. O. J.; Dewes, H. 2014. Carbon footprint in different beef production systems on a southern Brazilian farm: a case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 96, p. 435-443, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.01.037.
- Sá, J. C. M.; Lal, R.; Cerri, C. C.; Lorenz, K.; Hungria, M.; Carvalho, P. C. F. 2016. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environment international*, v. 98, p. 102-112, doi: 10.1016/j.envint.2016.10.020.
- Salton, J.C. Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical. 158p. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Schoeneberger, M. M. 2009. Agroforestry: working trees for sequestering carbon on agricultural lands. *Agroforestry systems*, v. 75, n. 1, p. 27-37, doi: 10.1007/s10457-008-9123-8.
- Silva, G. L.; Lima, H. V.; Campanha, M. M.; Gilkes, R. J.; Oliveira, T. S. 2011. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma*, v. 167, p. 61-70, doi: 10.1016/j.geoderma.2011.09.009.
- Silva, R. O.; Barioni, L. G.; Hall, J. A. J.; Matsuura, M. F.; Albertini, T. Z.; Fernandes, F. A.; Moran, D. 2016. Increasing beef production could lower greenhouse gas emissions in Brazil if decoupled from deforestation. *Nature Climate Change*, v. 6, n. 5, p. 493-497, doi: 10.1038/NCLIMATE2916.
- Silveira, M. L.; Xu, S.; Adewopo, J.; Franzluebbers, A. J.; Buonadio, G. 2014. Grazing land intensification effects on soil C dynamics in aggregate size fractions of a Spodosol. *Geoderma*, v. 230, p. 185-193, doi: 10.1016/j.geoderma.2014.04.012.
- Soto-Pinto, L.; Anzueto, M.; Mendoza, J.; Ferrer, G. J.; Jong, B. 2010. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*, v. 78, n. 1, p. 39, doi: 10.1007/s10457-009-9247-5.
- Stanley, P. L.; Rowntree, J. E.; Beede, D. K.; DeLonge, M. S.; Hamm, M. W. 2018. Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in Midwestern USA beef finishing systems. *Agricultural Systems*, v. 162, p. 249-258, doi: 10.1016/j.agsy.2018.02.003.
- Strassburg, B. B.; Latawiec, A. E.; Barioni, L. G.; Nobre, C. A.; Da Silva, V. P.; Valentim, J. F.; Vianna, M.; Assad, E. D. 2014. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. *Global Environmental Change*, v. 28, p. 84-97, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001.
- Tonucci, R. G.; Nair, P. K.; Nair, V. D.; Garcia, R.; Bernardino, F. S. 2011. Soil carbon storage in silvopasture and related land-use systems in the Brazilian Cerrado. *Journal of environmental quality*, v. 40, n. 3, p. 833-841, doi: 10.2134/jeq2010.0162.
- Torres, C. M. M. E.; Jacovine, L. A. G.; de Olivera Neto, S. N.; Fraisse, C. W.; Soares, C. P. B.; de Castro Neto, F.; Ferreira, L. R.; Zanuncio, J. C.; Lemes, P. G. 2017. Greenhouse gas emissions and carbon sequestration by agroforestry systems in southeastern Brazil. *Scientific reports*, v. 7, n. 1, p. 1-7, doi:10.1038/s41598-017-16821-4.
- Upton, M. A.; Burgess, P. J.; Morison, J. I. L. 2016. Soil carbon changes after establishing woodland and agroforestry trees in a grazed pasture. *Geoderma*, v. 283, p. 10-20, doi: 10.1016/j.geoderma.2016.07.002.
- Vicente, L. C.; Gama-Rodrigues, E. F.; Gama-Rodrigues, A. C. 2016. Soil carbon stocks of Ultisols under different land use in the Atlantic rainforest zone of Brazil. *Geoderma Regional*, v. 7, n. 3, p. 330-337, doi: 10.1016/j.geodrs.2016.06.003.
- Wotherspoon, A.; Thevathasan, N. V.; Gordon, A. M.; Voroney, R. P. 2014. Carbon sequestration potential of five tree species in a 25-year-old temperate tree-based intercropping system in southern Ontario, Canada. *Agroforestry systems*, v. 88, n. 4, p. 631-643, doi: 10.1007/s10457-014-9719-0.
- Xu, S.; Silveira, M. L.; Inglett, K. S.; Sollenberger, L. E.; Gerber, S. 2016. Effect of land-use conversion on ecosystem C stock and distribution in subtropical grazing lands. *Plant and soil*, v. 399, n. 1-2, p. 233-245, doi: 10.1007/s11104-015-2690-3.

Zomer, R. J.; Neufeldt, H.; Xu, J.; Ahrends, A.; Bossio, D.; Trabucco, A.; Van Noordwijk, M.; Wang, M. 2016. Global Tree Cover and Biomass Carbon on Agricultural Land: The contribution of agroforestry to global and national carbon budgets. *Scientific reports*, v. 6, n. 1, p. 1-12, doi: 10.1038/srep29987.

