



## REVIEW

# Práticas conservacionistas do solo e emissão de gases do efeito estufa no Brasil

## Soil conservation practices and greenhouse gases emissions in Brazil

Marcos Renan Besen<sup>1,\*</sup>; Ricardo Henrique Ribeiro<sup>2</sup>; Alessandra Nardina Trícia Rigo Monteiro<sup>3</sup>; Guilherme Seiki Iwasaki<sup>4</sup>; Jonatas Thiago Piva<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Maringá, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Curitiba, Brasil

<sup>3</sup> Animine. Sillingy, França.

<sup>4</sup> Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. Timbó Grande, Brasil.

<sup>5</sup> Universidade Federal de Santa Catarina-Campus Curitibanos, Santa Catarina, Brasil.

Received April 5, 2018. September 1, 2018.

### Resumo

No Brasil, mais de 84% das emissões de N<sub>2</sub>O e 74% de CH<sub>4</sub> são resultantes da agropecuária, e aproximadamente 40% do CO<sub>2</sub> emitido tem origem do uso e mudança do uso da terra e florestas. Têm-se percebido uma preocupação em diversas instituições de pesquisa abordando essa temática, aprimorando o conhecimento da dinâmica e principais fatores que governam a emissão dos principais gases do efeito estufa (GEE). Nesse sentido, tecnologias sustentáveis que sigam as premissas da agricultura conservacionista apresentam potencial de mitigação na emissão de GEE, à poder citar o sistema de plantio direto (SPD), uso de plantas de cobertura, adoção de sistemas integrados, entre outras práticas edáficas. Em relação ao SPD, a retenção de CO<sub>2</sub> na matéria orgânica do solo justifica o balanço positivo em solos manejados sob esse sistema em comparação ao cultivo convencional. Normalmente solos não perturbados atuam como dreno de CH<sub>4</sub>, no entanto os sistemas de manejo SPD e convencional ainda carecem de mais estudos, a fim de averiguar seus efeitos na produção de N<sub>2</sub>O. A forma como o solo é manejado influencia diretamente na emissão de gases e balanço de carbono, logo práticas conservacionistas que visam a proteção do mesmo, são fundamentais para mitigação de GEE.

**Palabras clave:** Plantio direto; metano; manejo; carbono; sistemas integrados

### Abstract

In Brazil, more than 84% of N<sub>2</sub>O emissions and 74% of CH<sub>4</sub> are produced by agriculture, and approximately 40% of the CO<sub>2</sub> emitted originates from the use and change of land use and forest. It has been noticed a concern in several research institutions addressing this issue in order to improve the knowledge of the dynamics, as well as the main factors which drive the three main greenhouse gases (GHG) emissions. In this sense, sustainable technologies that follow the conservation agriculture premises show potential to mitigate the GHG emissions, as the no-tillage system (NTS), the use of cover crops, the use of integrated systems and other edaphic practices. Regarding the NTS, the CO<sub>2</sub> retention in soil organic matter justifies the positive balance in soils managed under this system compared to conventional tillage. Usually undisturbed soils act as sink of CH<sub>4</sub>, however, the management NTS and conventional tillage still need more studies in order to evaluate its effects in N<sub>2</sub>O production. How the soil is managed, strongly affects the gases emission and the carbon balance, showing that the adoption of soil conservation practices, aiming to soil protection, are essential to mitigate the GHG.

**Keywords:** No-tillage; methane; management; carbon; integrated systems.

\* Corresponding author  
E-mail: [marcos.besen@hotmail.com](mailto:marcos.besen@hotmail.com) (M. Besen).

## 1. Introdução

Estima-se que mundialmente, cerca de 19-23% das emissões antrópicas, que incluem óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e metano (CH<sub>4</sub>), sejam provenientes da produção agrícola e mudanças no uso da terra (IPCC, 2014). Juntamente com o gás carbônico (CO<sub>2</sub>), compreendem os principais gases de efeito estufa (GEE) e recebem tal denominação por reterem e redirecionarem a radiação infravermelha em excesso na superfície terrestre (Primavesi *et al.*, 2007). No Brasil, estima-se que 84,2% das emissões de N<sub>2</sub>O e 74,4% de CH<sub>4</sub> sejam resultantes do setor agropecuário, sendo que para o CO<sub>2</sub>, aproximadamente 40,2% das emissões são oriundas do uso e mudança do uso da terra e florestas (Brasil, 2016). A magnitude desses valores nos remete a necessidade de otimizar as informações referentes a práticas agrícolas que colaborem para a mitigação do efeito estufa.

Conforme o inventário brasileiro de emissões a agricultura e pecuária estão entre as atividades contribuintes com a geração de GEE no Brasil, sendo a fermentação entérica em ruminantes (CH<sub>4</sub>); a produção de dejetos de animais (CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O); o cultivo de arroz inundado (CH<sub>4</sub>); a queima de resíduos agrícolas (CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O) e a emissão de N<sub>2</sub>O em solos devido ao uso de fertilizantes nitrogenados, os principais processos geradores desses gases (MCTI, 2016).

Devido ao aumento crescente na emissão de GEE, vários países têm assumido metas visando à redução de tais emissões. A Conferência COP21, é um exemplo recente desta preocupação, na qual parceiros de vários países se comprometeram a preparar estratégias, planos e ações para mitigação da emissão de GEE (United Nations, 2015). No âmbito nacional, em 2010 foi proposto o Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono), com a finalidade de planejar ações para a adoção de tecnologias de produção agropecuárias sustentáveis (Brasil, 2012). Dessa maneira, torna-se fundamental a realização de estudos voltados às práticas agrícolas que possam colaborar com a mitigação do efeito estufa, através do sequestro de carbono (C), sumidouros de CH<sub>4</sub> e atenuação das emissões de N<sub>2</sub>O. No caso da agricultura, várias tecnologias sustentáveis podem ser adotadas para mitigar as emissões de GEE (Cordeiro *et al.*, 2011), à citar as que sigam os princípios da agricultura conservacionista.

O solo é um compartimento chave no processo de emissão de GEE e no balanço total de C (Carvalho *et al.*, 2009), por tanto a maneira como é manejado, incluindo a

adoção dos princípios conservacionistas, exemplificada pelo não revolvimento do solo, uso de plantas de cobertura e sistemas integrados que possibilitem maximizar o uso da terra, são estratégias fundamentais na busca de reduções nas emissões de GEE. O sistema plantio direto (SPD) e sistemas integrados de produção, como a integração lavoura pecuária (ILP), são caracterizados por agirem como dreno de CO<sub>2</sub>, resultando na redução das emissões desse gás, desde que sejam manejados corretamente (Carvalho *et al.*, 2009).

As melhorias em termos de qualidade do solo, propiciada pelas práticas conservacionistas, contribuem para elevar a resistência às mudanças climáticas (Parajuli *et al.*, 2016). A agricultura conservacionista está sendo promovida como uma forma de reforçar a sustentabilidade da produção agrícola, principalmente através da conservação de recursos naturais (Sapkota *et al.*, 2015). Entre 1980 e 2000, o avanço do SPD foi incentivado, tendo em vista a compreensão da importância dos microrganismos do solo na ciclagem de nutrientes e do papel dos resíduos culturais na recuperação da matéria orgânica (Sá e Ferreira, 2018). Ainda segundo os autores, o conhecimento da dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) e sua relação com a melhoria na agregação do solo consolidou o SPD como prática conservacionista e fundamental na mitigação de GEE.

Nesse sentido, a presente revisão de literatura tem como intuito elucidar aspectos relevantes sobre os principais GEE, bem como discutir práticas de manejo conservacionistas com potenciais de mitigação desses gases.

## 2. Dinâmica do CO<sub>2</sub>

As plantas absorvem o CO<sub>2</sub> atmosférico, convertendo-o em C orgânico, o qual poderá ser estocado no solo ou ser utilizado no ciclo de Calvin como substrato para a produção de carboidratos (Nelson e Cox, 2013). O aporte de resíduos vegetais com elevados níveis de C e nitrogênio (N), proporciona o aumento da MOS, fazendo com que o solo se torne dreno de CO<sub>2</sub> em longo prazo (Bayer *et al.*, 2006). Por outro lado, a mudança do uso da terra e a atividade agrícola podem alterar potencialmente a dinâmica da MOS (Lal, 2003), contribuindo de forma significativa para a elevação nas emissões de CO<sub>2</sub>, assim como de outros gases do solo para a atmosfera (Shuman *et al.*, 2002). A adoção de práticas de manejo menos agressivas, à exemplo do SPD substituindo o sistema convencional, somada a colheita de cana-

de-açúcar de forma mecanizada ao invés da queima da palha, contribuem juntas para a mitigação total de 10,55 Mt C ano<sup>-1</sup>, cuja 9 Mt C ano<sup>-1</sup> são referentes à adoção do SPD e 1,55 Mt C ano<sup>-1</sup> devido a colheita mecanizada da cana-de-açúcar (Cerri e Cerri, 2007).

Perdas relevantes de C pelo solo, ocorrem através da lixiviação, escoamento superficial e erosão, contudo a maioria dos estudos tem dado ênfase aos processos de emissão para a atmosfera, oriundos da respiração de microorganismos, produzindo CO<sub>2</sub> ou CH<sub>4</sub> (Sposito, 2008). O efeito da erosão do solo na liberação de CO<sub>2</sub>, influi de forma negativa sobre as mudanças climáticas (Lal, 2004). Dessa forma, práticas relacionadas ao cultivo em nível e implantação de terraços, que integram as práticas mecânicas conservacionistas contribuem para redução das perdas de solo, podendo resultar na mitigação da emissão de CO<sub>2</sub>.

Omonode *et al.* (2007) apontam que os efeitos das operações de manejo do solo sobre o fluxo de CO<sub>2</sub>, bem como de CH<sub>4</sub>, tendem a ser relativamente de curta duração. Os autores citam que os sistemas de rotação aparentam ser mais importantes em relação a dinâmica sazonal de fluxos na superfície do solo. No tocante ao manejo do solo, é importante o entendimento que além do sequestro de C e conservação do solo proporcionado pelo SPD, a economia do consumo de combustível, cerca de 60 a 70%, colabora na redução de GEE em relação ao cultivo convencional (Carvalho *et al.*, 2009).

A adoção de plantas de cobertura é outro método que proporciona proteção ao solo. Dessa forma quanto mais rápido for a cobertura do solo por determinada espécie, potencializam-se os benefícios inerentes ao seu uso no sistema. Nesse sentido, em estudo realizado por Bertol *et al.* (2007), foi observado que o plantio direto, devido a maior taxa de cobertura do solo, reduziu em 88% as perdas de solo quando comparado ao preparo convencional. De forma similar, Dechen *et al.* (2015) observaram que em solo com 90% de cobertura, comparado a um solo sem cobertura, foi possível reduzir as perdas de solo em 54,44%, e as perdas de matéria orgânica em 54,89%. Isso torna evidente a eficácia do emprego de plantas de cobertura em reduzir as perdas de solo e MOS. De tal forma, que a adoção dessa medida é fator importante no cenário agrícola, onde se busca a redução da emissão de gases concomitante com a proteção e otimização dos recursos, principalmente, nutrientes

disponíveis no sistema solo.

É válido ressaltar que o uso de plantas de cobertura não somente reduz as perdas de MOS, como a longo prazo aumenta os níveis de C no solo, devido a quantidade de fitomassa que é inserida, seja via matéria seca radicular, como pela adição da matéria seca da parte aérea. De acordo com Albuquerque *et al.* (2012) há evidências de que exista uma relação estreita entre adição de fitomassa por meio de raízes e sequestro de C, em virtude da maior estabilidade proporcionado ao C adicionado via sistema radicular no perfil do solo.

Uma série de variáveis podem influenciar a emissão de CO<sub>2</sub>. Nesse sentido, sob as condições de Cerrado, Siqueira Neto *et al.* (2011) verificaram que a umidade do solo foi a variável que apresentou maior correlação com o fluxo desse gás. Esses autores observaram também correlações positivas entre nitrato (N-NO<sub>3</sub>) no solo e as emissões de CO<sub>2</sub>. De acordo com Kuzyakov *et al.* (2000) a presença do N no solo beneficia a decomposição de resíduos, assim como a mineralização da matéria orgânica.

Em estudo realizado por Siqueira Neto *et al.* (2009), foi observado que a temperatura do solo também influenciou as emissões de CO<sub>2</sub>, havendo aumento nos fluxos em períodos de temperaturas mais elevadas. Omonode *et al.* (2007) relataram que condições de maiores temperatura e umidade do solo nos 10 cm superficiais, relacionaram-se significativamente com as emissões de CO<sub>2</sub>. Em trabalho realizado por Torres *et al.* (2006) observou-se que o SPD reduziu a temperatura do solo em relação ao sistema convencional, além de observado acúmulo de calor no solo onde houve menor produção de matéria seca. Baseado nessas informações e tendo conhecimento da correlação existente entre o aumento da temperatura com a emissão de CO<sub>2</sub> é possível inferir que a produção de fitomassa, devido ao uso de adubos verdes, aliada à uma maior cobertura do solo, apresenta potencial para atenuar a emissão de CO<sub>2</sub>.

Nesse sentido, Amado *et al.* (2001) estimaram que a sucessão pousio/milho ocasionou uma liberação líquida de 4,32 Mg ha<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>, quando comparado ao campo natural em um Argissolo Vermelho distrófico arênico, no estado do Rio Grande do Sul, porém, quando empregado o uso da sucessão milho + mucuna, houve um sequestro de 15,5 Mg ha<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>. Os autores enfatizam que o uso de sistemas conservacionistas no cultivo de milho é

eficaz em acumular CO<sub>2</sub> atmosférico no solo. Esses resultados são relevantes, visto que grande percentual de terras ainda são mantidas em pousio na estação fria do ano na região sul do país e conforme apontado por [Batjes \(1998\)](#), a substituição do pousio por plantas de cobertura apresenta-se como importante prática na busca por melhorias na qualidade ambiental.

O uso do SPD associado a sistemas de culturas com potencial de alto aporte de resíduos, aliado a disponibilidade de N pelas leguminosas, possibilita acelerar o aumento dos teores de MOS, e diminuir a emissão de CO<sub>2</sub> do solo para atmosfera ([Bayer \*et al.\*, 2000](#)). Assim, a relação existente entre a MOS e a fração mineral do solo, exemplifica que solos com carga variável apresentam potencial para intervir no sequestro de C ([Bayer \*et al.\*, 2001](#)). Segundo os autores, isso ocorre devido ao aumento da concentração de óxidos de ferro e caulinita ocasionando diminuição na taxa de decomposição da MOS.

Ao estudar a influência do manejo do solo em clima tropical e subtropical, [Briedis \*et al.\* \(2018\)](#) observaram que as frações de C foram influenciadas pelo sistema de manejo do solo, no entanto o efeito foi mais pronunciado nas frações lábeis comparativamente ao C associado aos minerais. Ainda, segundo os autores a adoção do plantio direto em solos altamente intemperizados é uma alternativa para proteção física das frações lábeis, sendo que esses processos contribuem para estabilização bem como acúmulo do C.

Em estudo realizado num Cambissolo Húmico por [Wolschick \*et al.\* \(2018\)](#), sob condições subtropicais, constatou-se que as maiores proporções do C orgânico particulado, ácido húmico e ácido fúlvico foram encontradas em sistemas conservacionistas, tais como plantio direto, lavoura sobre rotação e cultivo mínimo, por sua vez, a maior proporção das espécies mais recalcitrantes, como o C ligado aos minerais foi encontrada no sistema de cultivo convencional. Os autores ressaltam que o aumento no estoque de C depende da intensificação de um sistema conservacionista com entrada contínua de C por meio do aporte de biomassa.

Em estudo realizado por [Redin \*et al.\* \(2018\)](#), utilizando 26 espécies anuais, foi constatado menor produção de matéria seca radicular de espécies leguminosas, sendo que maiores valores de biomassa, C e nitrogênio foram alocados no sistema radicular das gramíneas. Segundo os autores, observou-se diferentes características funcionais entre as culturas

avaliadas, salientando a importância da rotação, bem como do cultivo consorciado, para que além da produtividade satisfatória possa se obter a manutenção da fertilidade do solo e armazenamento do C.

Em Latossolos cultivados por longo tempo em SPD no Sul do Brasil, os fatores predominantes para recuperação do C orgânico do solo são a alta entrada de C via rotação de cultura, aliada ao correto manejo da fertilidade do solo ([Ferreira \*et al.\*, 2018](#)). Ainda segundo [Ferreira \*et al.\* \(2018\)](#) em áreas onde predomina o cultivo de soja, altos teores de alumínio trocável aliado a baixos teores de magnésio e fósforo culminam na lenta recuperação de C. Sistemas de rotação de cultivos com elevada produção de palhada, à exemplo da integração lavoura-pecuária em SPD, apresentam taxas elevadas de sequestro de C no solo ([Carvalho \*et al.\*, 2009](#)). Os sistemas de produção integrados proporcionam sinergismo entre os diferentes componentes do sistema ([Cordeiro \*et al.\*, 2015](#)), sendo preconizado a conservação do solo e da água, sequestro de C, redução nas emissões de CO<sub>2</sub>, entre outros ([Balbino \*et al.\*, 2011](#)), o que demonstra a necessidade e importância da adoção desses sistemas nas mais diversas modalidades.

Em estudo realizado no Cerrado brasileiro, [Sant-Anna \*et al.\* \(2017\)](#) verificaram que após 22 anos de experimento, maiores estoques de C orgânico do solo foram encontrados nos tratamentos conduzidos sob ILP, todavia nem todos os tratamentos avaliados sob ILP ocasionaram maior acúmulo de C no solo. Segundo os autores, as iniciativas governamentais, que visam a substituição do cultivo convencional pelo plantio direto, bem como intensificar a produção de gado de corte em ILP contribuirão modestamente para o acúmulo de C no solo em curto prazo. Por sua vez, [Pontes \*et al.\* \(2018\)](#) salientam que os sistemas de integração lavoura pecuária floresta (ILPF) aumentam a capacidade de sequestro de C pela biomassa lenhosa, sendo uma estratégia para mitigação de CO<sub>2</sub> em regiões subtropicais.

De modo geral, o balanço de GEE tem prevalecido positivo no SPD em relação ao plantio convencional. Isso condiz com a capacidade do plantio direto em mitigar a emissão desses gases, de tal modo que a retenção de CO<sub>2</sub> na MOS justifica o balanço positivo em solos sob SPD ([Bayer e Dieckow, 2014](#)).

### 3. Fluxos de N<sub>2</sub>O

O N<sub>2</sub>O é um gás traço com grande importância para o efeito estufa, apre-

sentando o maior potencial de aquecimento global entre os GEE, correspondendo a 298 moléculas de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2013), consequência de sua natureza química e do longo período de residência na atmosfera, com meia vida estimada em 114 anos (Montzka *et al.*, 2003; IPCC, 2007).

Aliado à isso, a concentração desse gás tem aumentado linearmente à uma taxa de 0,26% ao ano (Smith *et al.*, 2010). No Brasil, a principal via de emissão de N<sub>2</sub>O é a deposição de dejetos animais em pastagens, em virtude, principalmente, da pecuária extensiva (MCTI, 2016), bem como a aplicação de adubos nitrogenados nas culturas. Contudo, devido às características desse gás, é necessário o melhor entendimento de sua dinâmica em solos cultiváveis.

A emissão de N<sub>2</sub>O ocorre através de processos de nitrificação e desnitrificação. No primeiro caso ocorre em ambientes aerados, onde as bactérias quimioautotróficas oxidam o amônio produzindo N<sub>2</sub>O (Bateman e Baggs, 2005). Contudo é a desnitrificação que mais contribui para a emissão desse gás, ocorrendo por intermédio de bactérias heterotróficas anaeróbias facultativas (Aita e Giacomini, 2007), sendo essa atividade controlada por uma série de fatores, como disponibilidade de N e C, concentração de oxigênio, pH e temperatura no solo (Baggs e Philippot, 2010).

A prática de revolvimento do solo e seus subsequentes efeitos influenciam diretamente a estrutura do solo, a taxa de decomposição dos resíduos vegetais e a mineralização do N orgânico do solo (Piva *et al.*, 2012). Essas modificações apresentam potencial em interferir na atividade microbiológica do solo, podendo consequentemente, alterar de forma expressiva a dinâmica e emissões de GEE.

Aumentos na emissão de N<sub>2</sub>O pós adoção do SPD podem ocorrer em função das características dos solos, conforme observadas por Mutegi *et al.* (2010) e Tan *et al.* (2009) em solos argilosos. De acordo com Del Grosso *et al.* (2002) o aumento na emissão de N<sub>2</sub>O nos solos manejados em plantio direto, pode ocorrer devido a maior disponibilidade de N, em relação ao preparo convencional. Por outro lado, Six *et al.* (2004) corroboram a ideia de que menores emissões de N<sub>2</sub>O ocorrem em solos manejados sob plantio direto em longo prazo. Os autores justificam tal afirmação devido as melhorias na agregação e aeração do solo. Contudo, há também estudo que demonstra emissões de N<sub>2</sub>O similar em ambos sistemas de preparo (Siqueira-Neto *et al.*, 2011).

Em estudo realizado por Escobar *et al.*

(2010), em Latossolo argiloso na Região Sul do país, em um período correspondente a pós colheita da cultura da soja, observou-se que a emissão de N<sub>2</sub>O foi maior em plantio direto do que em preparo convencional. Uma das explicações ponderadas por esses autores é em função do elevado teor de N encontrado na palhada dessa leguminosa, a qual é mantida na superfície do solo por mais tempo, e ao ser decomposta lentamente libera N<sub>2</sub>O, pelo processo de nitrificação ou desnitrificação. Piva *et al.* (2012) corroboram com a ideia de que os acentuados picos nas emissões de N<sub>2</sub>O, resultantes do revolvimento do solo, estão diretamente relacionados a uma estimulação rápida de decomposição microbiana aliada ao aumento da oferta de substrato para a nitrificação e desnitrificação, posterior a incorporação de resíduos vegetais no solo. Além disso, às emissões de N<sub>2</sub>O são fortemente influenciadas por uma complexa relação entre os níveis de nitrato e amônio no solo, carbono orgânico dissolvido e sobretudo pela porosidade preenchida por água (PPA) (Bayer e Dieckow, 2014).

Aliado a isso, alguns estudos foram realizados em solos manejados com plantas de cobertura a fim de averiguar a emissão de GEE nesses sistemas (Jantalia *et al.*, 2008; Gomes *et al.*, 2009). De acordo com Albuquerque *et al.* (2012), sistemas de culturas em SPD por mais que se apresentem como fonte de GEE, quando há inclusão de leguminosas poderão contribuir para mitigar as emissões de gases se contrastados com a sucessão trigo-soja. Fato relacionado a menor emissão de N<sub>2</sub>O e ao maior sequestro de C.

Apesar do uso de leguminosas como plantas de cobertura apresentar potencial em incrementar a emissão de N<sub>2</sub>O quando comparadas ao cultivo de gramíneas (Gomes *et al.*, 2009), o aporte de N oriundo da adubação verde com leguminosas é passível de ser utilizado pela cultura em sucessão, de tal maneira que possibilite a redução da dose de N mineral a ser aplicada. Fato semelhante à quando realizado o cultivo de plantas de cobertura representantes da família das crucíferas, em relação a gramíneas, devido ao elevado potencial de reciclagem de N.

Outro fator importante e apontado por Khalil e Baggs (2005), se refere que com o aumento do oxigênio disponível concomitante com a decomposição dos resíduos, pode-se aumentar a ocorrência de micro-sítios anaeróbicos, consequentemente potencializando a emissão de N<sub>2</sub>O, pelo processo de desnitrificação.

Em estudo de [Copetti \*et al.\* \(2015\)](#), avaliando doses de nitrato de sódio e quantidades de palha de arroz em vasos simulando condições anaeróbicas, foi observado que a presença de palhada em solo alagado imobiliza o nitrato e diminui as emissões de N<sub>2</sub>O para a atmosfera. Os autores ainda concluíram em seu estudo que as emissões de N<sub>2</sub>O estão diretamente relacionadas aos níveis de nitrato no solo, e inversamente relacionadas a quantidade de palha. Os autores enfatizam que não é possível estimar a quantidade de emissões de N<sub>2</sub>O a partir da concentração de nitrato na solução, pois outros processos estão relacionados com o consumo de nitrato.

Em estudo recente realizado por [Nogueira \*et al.\* \(2016\)](#), foi observado que o sistema de ILPF, apresentou-se eficaz em mitigar as emissões de N<sub>2</sub>O, em relação ao sistema composto apenas por lavoura. Os autores enfatizam que sistema de integração devem ser considerados como opção tecnológica para reduzir as emissões desse gás. Corroborando [Piva \(2012\)](#), que observou maior acúmulo de emissão de N<sub>2</sub>O em lavoura, quando comparado a sistemas integrados, sendo que a ILPF apresentou maior potencial de mitigação desse gás.

Nota-se que não há uma conformidade nos dados em relação ao fluxo de N<sub>2</sub>O, de tal forma que, segundo [Bayer \*et al.\* \(2015\)](#), o efeito do preparo de solo e do plantio direto na emissão de GEE, tende a ser variável em função das condições edafoclimáticas e tipos de solos. Outro ponto primordial nesse aspecto, refere-se à qualidade do plantio direto em estudo. Visto que por se tratar de um “sistema”, uma série de fatores devem ser observados, e podem influenciar a dinâmica dos gases. De acordo com [Almeida \*et al.\* \(2015\)](#) os sistemas de manejo, plantio direto e preparo convencional, ainda carecem de maiores estudos a fim de averiguar seus efeitos para a produção de N<sub>2</sub>O oriundo dos solos cultivados.

#### 4. Fluxos de CH<sub>4</sub>

O gás CH<sub>4</sub> apresenta PAG equivalente a 25 moléculas de CO<sub>2</sub> ([Dong \*et al.\*, 2006](#)), isso lhe confere grande importância perante o efeito estufa, em função de suas características moleculares e do tempo de permanência na atmosfera, apresentando meia vida estimada de 12 anos ([IPCC, 2007](#)). Normalmente solos não perturbados atuam como dreno de CH<sub>4</sub>. Dessa maneira é possível inferir que sistemas conservacionistas de solo se apresentam como

uma estratégia para que áreas agrícolas atuem como sumidouros desse gás.

As emissões de CH<sub>4</sub> do solo são resultado do balanço entre a produção pelo processo de metanogênese e a oxidação através da metanotrofia ([Baggs \*et al.\*, 2006](#)). O CH<sub>4</sub> é produzido no solo pela decomposição anaeróbica da matéria orgânica e redução de CO<sub>2</sub> em ambientes anaeróbicos ([Mosier \*et al.\*, 2004](#)). É válido ressaltar que as bactérias metanotróficas são aeróbias obrigatórias, pois a enzima monooxygenase, responsável pelo início da oxidação de CH<sub>4</sub>, requer oxigênio molecular ([Mosier \*et al.\*, 2004](#)). Ou seja, a disponibilidade de O<sub>2</sub> regula a atividade metanotrófica. Portanto, as condições de anaerobiose resultam na produção de CH<sub>4</sub> como produto final da decomposição de compostos orgânicos pelas bactérias metanogênicas ([Lai, 2009](#)). Como esse gás é produzido por bactérias estritamente anaeróbicas, ocorrem diminuições nas emissões de CH<sub>4</sub> após a drenagem do solo, devido a aeração do solo inibir a produção realizada pelas bactérias metanogênicas ([Lima \*et al.\*, 2012](#)).

Todavia, essa dinâmica do CH<sub>4</sub> é altamente dependente das condições físicas e químicas do solo, pois estas apresentam efeito direto na atividade das bactérias que controlam as emissões e influxos de CH<sub>4</sub> através dos processos de produção e oxidação ([Ussiri \*et al.\*, 2009](#)). Nesse sentido, [Agostinetto \*et al.\* \(2002\)](#) ressaltam que aspectos do ambiente, como precipitação, radiação e temperatura, assim como características do solo, à exemplo dos níveis de matéria orgânica, teor de água, capacidade de redução e pH, interferem na produção de CH<sub>4</sub>, pois modificam a liberação de exsudatos da planta. Em concordância, [Smith \*et al.\* \(2003\)](#) ressaltam que as condições de umidade, teor de amônio e as operações de manejo são os principais fatores que influenciam a dinâmica do CH<sub>4</sub> em solos agrícolas.

[Vasconcelos \*et al.\* \(2018\)](#) trabalhando com diferentes níveis de palhada de cana de açúcar, observaram que no solo com presença da palhada, a absorção do gás CH<sub>4</sub> foi 40% mais elevada em comparação onde houve a remoção total do resíduo vegetal. Ainda, os autores sugerem que a manutenção de palhada na faixa de 6 Mg ha<sup>-1</sup>, mostra-se uma estratégia adequada para aumentar a produção de bioenergia e preservar a cobertura do solo, além de compensar as perdas nos estoques de C do solo.

Em estudo realizado por [Piva \*et al.\* \(2012\)](#) sob Latossolo Bruno foram observadas menores emissões de CH<sub>4</sub> decorrentes do SPD comparado ao preparo convencional. Em estudo realizado por [Albuquerque \*et al.\* \(2012\)](#) em sistemas de culturas, em Latossolo sob SPD, verificou que esses sistemas atuam como dreno de CH<sub>4</sub>, sendo que entre os sistemas estudados, o composto pela alfafa-milho foi o que apresentou maior ação oxidante desse gás. Os autores atribuíram isso a maior macroporosidade do solo.

Por sua vez, [Bayer \*et al.\* \(2013\)](#) relataram que a oxidação de CH<sub>4</sub> não teve relação com os sistemas de manejo, postulando a hipótese de que a melhoria em termos de qualidade do solo e conseqüente oxidação de CH<sub>4</sub>, ocorram de formas distintas no perfil do solo em sistemas conservacionistas de manejo, em que a capacidade do solo em oxidação tende a ser bastante lenta.

De acordo com [Glatzel e Stahr \(2001\)](#), para que ocorra emissão de CH<sub>4</sub> via solo não é necessário que o ambiente seja totalmente anaeróbico (como ocorrem nas lavouras de arroz), porém a existência de pequenos sítios anaeróbios, à exemplo dos espaços livres entre os agregados, poderão propiciar a emissão desse gás.

Nesse sentido, é fundamental abordar o tema de emissão de CH<sub>4</sub> em sistemas agrícolas, devido a expressiva contribuição que o cultivo de arroz em sistemas alagados ocasiona na emissão desse gás ([Mendonça, 2006](#)). Contudo se bem manejados, mitigações nas emissões de GEE são passíveis de se obter. Segundo a [Embrapa \(1998\)](#), somente a Região Sul, em 1994, contribuiu com 77,3% das emissões de CH<sub>4</sub>, devido principalmente ao manejo adotado de alagamento contínuo. As emissões de CH<sub>4</sub> representam mais de 90% do potencial de aquecimento global parcial nesse sistema de cultivo, logo as estratégias de mitigação devem se concentrar quando a cultura está implantada, pois nessa época o potencial de aquecimento global é 10 vezes maior em relação ao período sem arroz ([Zschornack \*et al.\*, 2018](#)).

Solos alagados cobrem apenas cerca de 8% da área terrestre no mundo, contudo esses locais são extremamente importantes, visto que se apresentam como fonte expressiva na emissão de CH<sub>4</sub> para a atmosfera, sendo responsáveis por metade da emissão do gás CH<sub>4</sub> emitido globalmente ([Sposito, 2008](#)).

Em algumas lavouras de arroz inundadas nos campos do Sul do Brasil, tem sido

adotado o plantio direto com o objetivo de reduzir o número de operações, possibilitando ainda a semeadura em período ideal ([Bayer \*et al.\*, 2014](#)). Apesar dos inúmeros trabalhos realizados a fim de avaliar a emissão de GEE oriundas de lavouras de arroz irrigado, ainda são poucos os estudos avaliando o efeito do sistema de preparo com ênfase no não revolvimento do solo, na emissão de CH<sub>4</sub> ([Pandey \*et al.\*, 2012](#)).

Na Região Sul do Brasil, [Bayer \*et al.\* \(2014\)](#) relataram evidências de que o SPD tem potencial para reduzir as emissões de CH<sub>4</sub> do solo em 21% em comparação com o sistema convencional. Contudo, não foi observado diferenças significativas para a emissão de N<sub>2</sub>O. Todavia, [Silva \*et al.\* \(2011\)](#) sugerem aprofundar os estudos em relação a influência da temperatura e conteúdo de frações lábeis de matéria orgânica, devido à forte relação com o potencial de emissão de CH<sub>4</sub> dos diversos solos e condições de clima de cultivo de arroz nessa região.

Outra alternativa que possibilita reduzir as emissões de CH<sub>4</sub> em sistemas de arroz irrigado é o manejo adequado da água de irrigação ([Bayer \*et al.\*, 2011](#)). Nesse sentido [Zschornack \*et al.\* \(2016\)](#) reportaram que embora a drenagem tenha favorecido as emissões de N<sub>2</sub>O, houve acentuada redução na emissão de CH<sub>4</sub>, conseqüentemente diminuiu-se o PAG (Poder de Aquecimento Global) parcial do sistema.

Além das emissões de CH<sub>4</sub> do solo, é importante ressaltar a relevante parcela de contribuição da fermentação entérica e do manejo dos dejetos animais nas emissões à nível nacional ([MCTI, 2014](#)). Porém, segundo [Rivera \*et al.\* \(2010\)](#) e [Cottle \*et al.\* \(2011\)](#), ao fornecer alimentos de qualidade, adicionar suplementos à dieta, melhoria nas pastagens e na capacidade produtiva dos animais, além de outras medidas relacionadas a eficiência produtiva, é possível reduzir as emissões de CH<sub>4</sub> provenientes da fermentação entérica.

Entre os benefícios ecológicos e ambientais de sistemas integrados, como lavoura pecuária e/ou lavoura pecuária floresta, se tem a mitigação do efeito estufa, devido a maior capacidade de sequestro de C e uma menor emissão de CH<sub>4</sub> por kg de carne produzido ([Balbino \*et al.\*, 2011](#)). Nesse sentido, há capacidade de aumentar a produção de carne bovina, mantendo estáveis os níveis atuais de emissão de CH<sub>4</sub>, evidenciando considerável potencial de expansão da produção de carne bovina no país sem aumento proporcional nas emissões de GEE ([Vilela \*et al.\*, 2012](#)).

De acordo com Bayer e Dieckow (2014), a pesquisa em GEE tende a avançar de forma apreciável, onde a curto prazo será possível uma análise minuciosa de identificação das respectivas fontes de emissão aliadas aos processos resultantes na emissão desses gases, sendo um passo primordial para adoção de medidas mitigadoras.

### 5. Perspectivas futuras

A pesquisa envolvendo os processos de emissões de GEE nos atuais sistemas de cultivo é de profundo interesse não apenas em âmbito nacional, mas também mundial, visando a produção de alimentos e fibras de modo menos impactantes ao meio ambiente. Notoriamente, há necessidade de aprofundar o entendimento das variáveis que regulam as emissões de GEE. Para tal, a determinação de um maior número de variáveis envolvidas na emissão dos principais gases é fundamental, pois possibilita o conhecimento das correlações existentes entre os atributos do solo (físicos, químicos e microbiológicos) com o fluxo de gases.

As práticas conservacionistas do solo, que visam reduzir a perturbação do mesmo, aliada à sua proteção, bem como incrementar o aporte de resíduos, mostram-se vantajosas no contexto abordado, apresentando potencial em mitigar as emissões, além de aumentar o sequestro de carbono. Todavia o avanço na pesquisa é necessário para que se possa determinar a conjuntura de fatores que tornam as respostas variáveis nas diferentes condições de clima e solo.

Devido a crescente expansão e potencialidade de mitigação de GEE que os sistemas integrados apresentam, aliada à sua complexidade, experimentos futuros devem analisar minuciosamente questões inerentes a lotação animal, intensidade de pastejo, produção de raízes e implicações da adubação sobre o sequestro de C e emissão de GEE a longo prazo

### 6. Conclusões

Uma série de variáveis pode interferir em maior ou menor grau na emissão dos três principais gases do efeito estufa discutidos nessa revisão, à exemplo do pH, atributos físicos do solo, temperatura, disponibilidade de carbono e nitroto, umidade, entre outros. Contudo, a adoção de práticas conservacionistas, à exemplo da adoção do sistema plantio direto, sistemas integrados de produção, e formas de cultivo que possibilitem o uso sustentável do solo e que

incrementem a entrada de C através dos resíduos, apresentam-se como medida imprescindível para mitigação de gases do efeito estufa, desde que corretamente manejadas.

### Referências Bibliográficas

- Agostinetto, D.; Fleck, N.G.; Rizzardi, M.A.; Balbinot Junior, A.A. 2002. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. *Ciência Rural* 32: 1073-1081.
- Aita, C.; Giacomini, S.J. 2007. Matéria orgânica do solo, nitrogênio e enxofre nos diversos sistemas de exploração agrícola. In: Yamada, T.; Stipp, S.R.; Vitti, A.G.C. Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira. IPNI- International Plant Nutrition Institute. Piracicaba, Brasil. p.1-35.
- Albuquerque, M.A. 2012. Estoques de carbono e nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em Latossolo Vermelho sob sistemas de culturas em plantio direto. Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Brasil. 90pp.
- Almeida, R.F.; Naves, E.R.; Silveira, C.H.; Wendling, B. 2015. Emissão de óxido nitroso em solos com diferentes usos e manejos: Uma Revisão. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente* 8: 441-461.
- Amado, T.J.C.; Bayer, C.; Eltz, F.L.F.; Brum, A.C.R. 2001. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 25: 189-197.
- Baggs, E.M.; Chebii, J.; Ndufa, J.K. 2006. A short-term investigation of trace gas emissions following tillage and no-tillage of agroforestry residues in western Kenya. *Soil and Tillage Research* 90: 69-76.
- Baggs, E.M.; Philippot, L. 2010. Microbial Terrestrial Pathways to Nitrous Oxide. In: Smith, K. Nitrous oxide in climate change. Earthscan, Londres. Pp.4-35.
- Balbino, L.C.; Barcellos, A.O.; Stone, L.F. 2011. Marco Referencial: integração lavoura-pecuária-floresta. Embrapa. Brasil. 130 pp.
- Bateman, E.J.; Baggs, E.M. 2005. Contributions of nitrification and denitrification to N<sub>2</sub>O emissions from soils at different water-filled pore space. *Biology and Fertility of Soils* 41:379-388.
- Batjes, N.H. 1998. Mitigation of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration by increased carbon sequestration in the soil. *Biology and Fertility of Soils* 27: 230-235.
- Bayer, C.; Amado, T.J.C.; Tornquist, C.G.; Cerri, C.E.; Dieckow, J.; Zanatta, J.A.; Nicoloso, R.S.; Carvalho, P.C.F. 2011. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. *Tópicos em Ciência do Solo* 7: 55-118.
- Bayer, C.; Costa, F.S.; Pedroso, G.M.; Zschornack, T.; Camargo, E.S.; Lima, M.A.; Frigheto, R.T.S.; Gomes, J.; Marcolin, E.; Macedo, V.R.M. 2014. Yield-scaled greenhouse gas emissions from flood irrigated rice under long-term conventional tillage and no-till systems in a Humid Subtropical climate. *Field Crops Research* 162: 60-69.
- Bayer, C.; Dieckow, J. 2014. Emissão de gases de efeito estufa em solos agrícolas em sistema plantio direto. *Anais da Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas*. Araxá, Brasil. 15-19 de set, 2014.
- Bayer, C.; Gomes, J.; Vieira, F.C.B.; Zanatta, J.A.; Picolo, M.C.; Dieckow, J. 2013. Soil methane oxidation in a long-term no-tillage system in Southern Brazil. *Semina: Ciências Agrárias* 34: 1695-1706.
- Bayer, C.; Gomes, J.; Zanatta, J.A.; Vieira, F.C.B.; Picolo, M.C.; Dieckow, J.; Six, J. 2015. Soil nitrous oxide emissions as affected by long-term tillage,

- cropping systems and nitrogen fertilization in Southern Brazil. *Soil and Tillage Research* 146: 213-222.
- Bayer, C.; Martin Neto, L.; Mielniczuk, J.; Pavinato, A.; Dieckow, J. 2006. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil and Tillage Research* 86: 237-245.
- Bayer, C.; Martin-Neto, L.; Mielniczuk, J.; Pilon, C.N.; Sangoi, L. 2001. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. *Soil Science Society of America Journal* 65: 1473-1478.
- Bayer, C.; Mielniczuk, J.; Amado, T.J.C.; Martin-Neto, L.; Fernandes, S. V. 2000. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research* 54: 101-109.
- Bertol, I.; Cogo, N.P.; Schick, J.; Gudagnin, J.C.; Amaral, A.J. 2007. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 31: 133-142.
- Brasil. 2012. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). MAPA/ACS. Brasília. Pp. 173.
- Brasil-Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. 2016. Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. p. 336.
- Briedis, C.; SÁ, J.C.M.; Lal, R.; Tivet, F.; Franchini, J. C.; Ferreira, A.O.; Hartman, D.C.; Schimiguel, R.; Bressan, P.T.; Inagaki, T.M.; Romaniw, J.; Gonçalves, D.R.P. 2018. How does no-till deliver carbon stabilization and saturation in highly weathered soils? *Catena* 163: 13-23.
- Carvalho, J.L.N.; Cerri, C.E.P.; Cerri, C.C. 2009. SPD aumenta o sequestro de carbono pelo solo. *Visão agrícola* 9: 132-135.
- Cerri, C.C.; Cerri, C.E.P. 2007. Agricultura e aquecimento global. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo* 32: 40-44.
- Copetti, A.C.C.; Silva, L.S.; Drescher, G.L.; Müller, E.A.; Busanello, R.L.; Vieira, F.C.B. 2015. Effect of rice straw and nitrate levels in soil solution on nitrous oxide emission. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 39: 458-465.
- Cordeiro, L.A.M.; Galerani, P.R.; Dossa, D.; Amaral, D.D. 2011. Plano Nacional para consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura. *Revista Plantio Direto* 121: 14-17.
- Cordeiro, L.A.M.; Vilela, L.; Marchão, R.B.; Kluthcouski, J. Martha Júnior, G.B. 2015. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. *Cadernos de Ciência e Tecnologia* 32: 15-53.
- Cottle, D.J.; Nolan, J.V.; Wiedemann, S.G. 2011. Ruminant enteric methane mitigation: a review. *Animal Production Science* 51: 491-514.
- Dong, H.; Mangino, J.; Mcallister, T.A.; Hatfield, J.D.; Johnson, D.E.; Lassey, K.R.; Lima, M.A.; Romanovskaya, A. 2006. Emissions from livestock and manure management. In: Eggleston, H.S.; Buenda, L.; Miwa, K.; Ngara, T.; Tanabe, K. IPCC-Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama. Pp.10-1.10.87.
- Dechen, S.C.F.; Telles, T.S.; Guimarães, M.F.; De Maria, I.C. 2015. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. *Bragantia* 74: 224-233.
- Del Grosso, S.J.; Ojima, D.S.; Parton, W.J.; Mosier, A.R. 2002. Simulated effects of tillage and timing of N fertilizer application on net greenhouse gas fluxes and N losses for agricultural soils in the Midwestern USA. In: Van Ham, J.; Baede, A.P.M.; Guicherit, R.; Wiliams-Jacobse, J.G.M.F. (eds). Non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases: scientific understanding, control options and policy aspects. Proceedings of the Third International Symposium. Maastricht: Millpress Science Publishers. Pp. 23-28.
- Embrapa Meio Ambiente. Emissão de metano em sistemas de produção de arroz irrigado. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente. 1998. Disponível em: <http://www.cnpma.embrapa.br/projetos/index.php3?sec=agrog:::92>
- Escobar, L.F.; Amado, T.J.C.; Bayer, C.; Chavez, L.F.; Zanatta, J.A.; Fiorin, J.E. 2010. Postharvest nitrous oxide emissions from a subtropical Oxisol as influenced by summer crop residues and their management. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34: 507-516.
- Glatzel, S.; Stahr, K. 2001. Methane and nitrous oxide exchange in differently fertilized grassland in southern Germany. *Plant and Soil* 231: 21-35.
- Ferreira, A.O.; Amado, T.J.C.; Rice, C.W.; Diaz, D.A.R.; Briedis, C.; Inagaki, T.M.; Gonçalves, D.R.P. 2018. Driving factors of soil carbono accumulation in Oxisols in long-term no-till systems of South Brazil. *Science of the Total Environment* 622-623: 735-742.
- Gomes, J.; Bayer, C.; Costa, F.S.; Piccolo, M.C.; Zanatta, J.A.; Vieira, F.C.B.; Six, J. 2009. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crop-based rotations under subtropical climate. *Soil and Tillage Research* 106: 36-44.
- IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. United Kingdom and New York. 86 pp.
- IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. Climate Change 2013: The physical sciences basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press. United Kingdom and New York. 1535 pp.
- IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, United Kingdom and New York. 1454 pp.
- Jantalia, C.P.; Santos, H.P.; Urquiaga, S.; Boddey, R.; Alves, B.J.R. 2008. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 82: 161-173.
- Khalil, M.I.; Baggs, E.M. 2005. CH<sub>4</sub> oxidation and N<sub>2</sub>O emissions at varied soil water-filled pore spaces and headspace CH<sub>4</sub> concentrations. *Soil Biology and Biochemistry* 37:1785-1794.
- Kuzyakov, Y.; Friedel, J.K.; Stahr, K. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology & Biochemistry* 32: 1485-1498.
- Lai, D.Y.F. 2009. Methane Dynamics in Northern Peatlands: A review. *Pedosphere* 19: 409-421.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123: 1-22.
- Lal, R.; Follett, R.F.; Kimble, J.M. 2003. Achieving soil carbon sequestration in the United States: A challenge to the policy makers. *Soil Science* 168: 827-845.
- Lima, M.A.; Frighetto, R.T.S.; Villela, O.M.; Costa, F.S.; Bayer, C.; Macedo, V.R.M.; Marcolin, E. 2012. Emissão de metano em cultivo de arroz irrigado por inundação. In: Lima, M.; Boddey, R.; Alves, B.J.R.; Machado, P.L.O.A., Urquiaga, S. Estoque de carbono e emissão de gases do efeito estufa. Editora Embrapa. Brasil. Pp. 193-222.
- Mendonça, F. 2006. Aquecimento global e suas manifestações regionais e locais: alguns indica-

- dores da Região Sul do Brasil. *Revista de Climatologia* 2: 71-86.
- MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 2016. Estimativas anuais de emissões de gases do efeito estufa no Brasil. 3ª edição. Brasília. 85 pp.
- Montzka, S.A.; Fraser, P.J.; Butler, J.H.; Connell, P.S.; Cunnold, D.M.; Daniel, J.S.; Derwent, R.G.; Lal, S.; McCulloch, A.; Oram, D.; Reeves, C.E.; Sanhueza, E.; Steele, L.P.; Velders, G.J.M.; Weiss, R.F.; Zander, R. 2003. Controlled substances and other source gases. In: Ennis, C. A. Scientific assessment of ozone depletion: 2002. World Meteorological Organization, Geneva-Suíça. Pp. 1.1–1.83.
- Mosier, A.; Wassmann, R.; Verchot, L.; King, J.; Palm, C. 2004. Methane and nitrogen oxide fluxes in tropical agricultural soils: sources, sinks and mechanisms. *Environment, Development and Sustainability* 6: 11-49.
- Mutegei, J.K.; Munkholm, L.J.; Petersen, B.M.; Hansen, E.M.; Petersen, S.O. 2010. Nitrous oxide emissions and controls as influenced by tillage and crop residue management strategy. *Soil Biology and Biochemistry* 42: 1701-1711.
- Nelson, D.L.; Cox, M.M. 2013. *Lehninger principles of biochemistry*. 6 ed. Freeman & Company. New York. 105 pp.
- Nogueira, A.K.S.; Rodrigues, R.A.R.; Silva, J.J.N.; Botin, A.A.; Silveira, J.G.; Mombach, M.A.; Armacolo, N.M.; Romeiro, S.O. 2016. Fluxos de óxido nítrico em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 51: 1156-1162.
- Omonode, R.A.; Vyn, T.J.; Smith, D.R.; Hegymegi, P.; Gál, A. 2007. Soil carbon dioxide and methane fluxes from long-term tillage systems in continuous corn and corn-soybean rotations. *Soil & Tillage Research* 95: 182-195.
- Pandey, D.; Agrawal, M.; Bohra, J.S. 2012. Greenhouse gas emissions from rice crop with different tillage permutations rice-wheat system. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 159: 133-144.
- Parajuli, P.B.; Jayakody, P.; Sassenrath, G.F.; Ouyang, Y. 2016. Assessing the impacts of climate change and tillage practices on stream flow, crop and sediment yields from the Mississippi River Basin. *Agricultural Water Management* 168: 112-124.
- Piva, J.T.; Dieckow, J.; Bayer, C.; Zanatta, J.A.; Moraes, A.; Pauletti, V.; Tomazi, T.; Pergher, M. 2012. No-till reduces global warming potential in a subtropical Ferralsol. *Plant and Soil* 361:359-373.
- Piva, J. T. 2012. Fluxo de gases de efeito estufa e estoque de carbono do solo em sistemas integrados de produção no sub trópico brasileiro. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Brasil. 96 pp.
- Pontes, L.S.; Barro, R.S.; Savian, J.V.; Berndt, A.; Moletta, J.L.; Silva, V.P.; Bayer, C.; Carvalho, P.C.F. 2018. Performance and methane emissions by beef heifer grazing in temperate pastures and in integrated crop-livestock systems: The effect of shade and nitrogen fertilization. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 253:90-97.
- Primavesi, O.; Arzabe, C.; Pedreira, M.S. 2007. Mudanças climáticas: visão tropical integrada das causas, dos impactos e de possíveis soluções para ambientes rurais ou urbanos. *Embrapa Pecuária Sudeste*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-publicacao/48017/mudancas-climaticas-visao-tropical-integrada-das-causas-dos-impactos-e-de-possiveis-solucoes-para-ambientes-rurais-ou-urbanos>
- Rivera, A.R.; Berchielli, T.T.; Messana, J.D.; Velasquez, P.T.; Franco, A.V.M.; Fernandes, L.B. 2010. Fermentação ruminal e produção de metano em bovinos alimentados com feno de capim-tifton 85 e concentrado com aditivos. *Revista Brasileira de Zootecnia* 39: 617-624.
- Redin, M.; Recous, S.; Aita, C.; Chaves, B.; Pfeifer, I.C.; Bastos, L.M.; Pilecco, G.E.; Giacomini, S.J. 2018. Root and Shoot Contribution to Carbon and Nitrogen Inputs in the Topsoil Layer in No-Tillage Crop Systems under Subtropical Conditions. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 42: 1-16.
- Sá, J.C.M.; Ferreira, A.D. 2018. The soil science in the evolution of no-till system in Brazil. *Boletim informativo-sociedade brasileira de ciência do solo* 44: 54-57.
- Sant-Anna, S.A.C.; Jantalia, C. P.; Sá, J.M.; Vilela, L.; Marchão, R.L.; Alves, B.J.R.; Urquiaga, S.; Boddey, R.M. 2017. Changes in soil organic carbon during 22 years of pastures, cropping or integrated crop/livestock systems in the Brazilian Cerrado. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 108: 101-120.
- Sapkota, T.K.; Jat, M.L.; Aryal, J.P.; Jat, R.K.; Khatri-Chhetri, A. 2015. Climate change adaptation, greenhouse gas mitigation and economic profitability of conservation agriculture: Some examples from cereal systems of Indo-Gangetic Plains. *Journal of Integrative Agriculture* 14: 1524-1533.
- Silva, L.S.; Griebeler, G.; Moterle, D.F.; Bayer, C.; Zschornack, T.; Pcojeski, E. 2011. Dinâmica da emissão de metano em solos sob cultivo de arroz irrigado no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35: 473-481.
- Siqueira Neto, M.; Piccolo, M.C.; Feigl, B.J.; Venzke Filho, S.P.V.; Cerri C.E.P.; Cerri, C.C. 2009. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR). II - Emissões de CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33: 1023-1029.
- Siqueira Neto, M.; Piccolo, M.C.; Costa Junior, C.; Cerri, C.C.; Bernoux, M. 2011. Emissões de gases do efeito estufa em diferentes usos da terra no bioma cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35: 63-76.
- Six, J.; Ogle, S.M.; Breidt, F.J.; Conant, R. T.; Mosier, A.R.; Paustian, K. 2004. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term. *Global Change Biology* 10: 155-160.
- Shuman, G.E.; Janzen, H.H.; Herrick, J.E. 2002. Soil dynamics and potential carbon sequestration. *Environmental Pollution* 116: 391-396.
- Smith, K.A.; Ball, T.; Conen, F.; Dobbie, K.E.; Massheder, J.; Rey, A. 2003. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science* 54: 779-791.
- Smith, K.; Crutzen, P.; Mosier, A.; Winiwarter, W. 2010. The Global Nitrous Oxide Budget: A reassessment. In: Smith, K. Nitrous oxide and climate change. *EARTHSCAN*. Londres. Pp.1-3.
- Sposito, G. 2008. *The Chemistry of Soils*. 2 ed. Oxford University Press, New York. 329 pp.
- Tan, I.Y.S.; Van Es, H.M.; Duxbury, J.M.; Melkonian, J.J.; Schindelbeck, R.R.; Geohring, L. D.; Hively, W.D.; Moebius, B.N. 2009. Single-event nitrous oxide losses under maize production as affected by soil type tillage, rotation, and fertilization. *Soil and Tillage Research* 102: 19-26.
- Torres, J.L.Z.; Fabian, A.J.; Pereira, M.G.; Andrioli, I. 2006. Influência de plantas de cobertura na temperatura e umidade do solo na rotação milho-soja em plantio direto. *Revista Brasileira de Agrociência* 12: 107-113.
- Vasconcelos, A.L.S.; Cherubin, M.R.; Feigl, B.J.; Cerri, C.E.P.; Gmach, M.R.; Siqueira Neto, M. 2018. Greenhouse gas emission responses to sugarcane straw removal. *Biomass and Bioenergy* 113: 15-21.
- United Nations. 2015. Framework Convention on Climate Change. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
- Ussiri, D.A.N.; Lal, R.; Jarecki, M.K. 2009. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. *Soil and Tillage Research* 104: 247-255.
- Vilela, L.; Martha Jr. G.B.; Marchão, R.L. 2012. Integração lavoura-pecuária-floresta: alternativa para

- intensificação do uso da terra. Revista UFG 13: 92-99.
- Zschornack, T.; Rosa, C.M.; Camargo, E.S.; Reis, C.E.S.; Schoenfeld, R.; Bayer, C. 2016. Impacto de plantas de cobertura e da drenagem do solo nas emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O sob cultivo de arroz irrigado. Pesquisa Agropecuária Brasileira 51: 1163-1171.
- Zschornack, T.; Rosa, C.M.; Reis, C.E.S.; Pedroso, G.M.; Camargo, E.S.; Santos, D.C.; Boeni, M.; Bayer, C. 2018. Soil CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O Emissions from Rice Paddy Fields in Southern Brazil as Affected by Crop Management Levels: a Three-Year Field Study. Revista Brasileira de Ciência do Solo 42: 1-14.
- Wolschick, N.H.; Barbosa, F.T.; Bertol, I.; Bagio, B.; Kaufmann, D.S. 2018. Long-Term Effect of Soil Use and Management on Organic Carbon and Aggregate Stability. Revista Brasileira de Ciência do Solo 42: 1-13.