

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO” FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**BALANÇO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM ÁREAS DE
CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES CENÁRIOS DE
MANEJO, CONSIDERANDO-SE MITIGAÇÕES**

Ricardo de Oliveira Bordonal

Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

2012

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE
MESQUITA FILHO” FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
E VETERINÁRIAS CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**BALANÇO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM ÁREAS DE
CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES CENÁRIOS DE
MANEJO, CONSIDERANDO-SE MITIGAÇÕES**

Ricardo de Oliveira Bordonal

Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior

Coorientador: Dr. Eduardo Barretto de Figueiredo

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).

JABOTICABAL – SP
Julho – 2012

B729b Bordonal, Ricardo de Oliveira
Balço de gases de efeito estufa em áreas de cana-de-açúcar
sob diferentes cenários de manejo, considerando-se mitigações /
Ricardo de Oliveira Bordonal. -- Jaboticabal, 2012
xv, 67 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2012
Orientador: Newton La Scala Júnior
Banca examinadora: Marcos Omir Marques, Marcos Adami
Bibliografia

1. Mudanças climáticas. 2. Aquecimento global. 3. Gases de
efeito estufa. 4. Mitigação. 5. Inventário. I. Título. II. Jaboticabal -
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 633.61:631.92

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da
Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de
Jaboticabal. E-mail: rbordonal@yahoo.com.br



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: BALANÇO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES CENÁRIOS DE MANEJO, CONSIDERANDO-SE MITIGAÇÕES

AUTOR: RICARDO DE OLIVEIRA BORDONAL

ORIENTADOR: Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. EDUARDO BARRETTO DE FIGUEIREDO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR

Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. MARCOS OMIR MARQUES

Departamento de Tecnologia / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. MARCOS ADAMI

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / São José dos Campos/SP

Data da realização: 18 de julho de 2012.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

RICARDO DE OLIVEIRA BORDONAL – Filho de José Orlando Bordonal e Teresa Cristina de Oliveira Bordonal, nasceu em Orlandia, São Paulo, no dia 22 de setembro de 1986. Em março de 2005, ingressou no Curso de Engenharia Agrônoma pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – SP. Atua na área de Ciências Agrárias e Ambientais, com ênfase em Produção Vegetal, trabalhando principalmente nos seguintes temas: manejo da cana-de-açúcar, mudanças climáticas na agricultura, aquecimento global, inventário de gases de efeito estufa, mitigação, desenvolvimento sustentável e bioenergia. Possui Especialização em Gestão Ambiental pela Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR (2012). Em agosto de 2010, ingressou no Curso de Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – SP. No mês de julho de 2012, submeteu-se à banca para a defesa de Dissertação, sendo aprovado como Mestre em Agronomia.

*“Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente, mas o
que melhor se adapta às mudanças”*

Charles Darwin

DEDICO

A Deus e a Nossa Senhora Aparecida em primeiro lugar por me abençoar com saúde, determinação e proporcionar momentos maravilhosos ao longo desta.

Aos meus pais, José Orlando Bordonal e Teresa Cristina de Oliveira Bordonal pelo amor incondicional, compreensão, apoio e confiança, sempre me dando forças para continuar em busca dos meus objetivos.

OFEREÇO

Ao meu irmão Marcelo Bordonal, à minha amada avó Ofélia Paulino e à minha namorada Vanessa Cestari, por tudo o que passamos juntos com muito amor, carinho e dedicação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, sempre em primeiro lugar na minha vida, pelas bênçãos infindáveis e por me indicar a direção. “Este é o caminho, andai por ele.”

Aos meus pais, a quem devo a minha vida e todo o meu caminho profissional, sem os quais eu não chegaria até aqui, obrigado por todo o amor, carinho e incentivo.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV/Unesp – Universidade Estadual Paulista, Campus de Jaboticabal, da qual me orgulho muito, por ser uma ótima Universidade e ter me oferecido esta oportunidade.

Ao orientador Professor Newton La Scala Júnior pelos ensinamentos, paciência, companheirismo, confiança e, principalmente, pela oportunidade e grande amizade ao longo desta jornada.

Ao coorientador Dr. Eduardo Barretto de Figueiredo, pela amizade, incentivo, camaradagem, bom humor, confiança, parceria profissional e pelas conversas que me ajudaram no entendimento de vários pontos da pesquisa.

Aos professores membros da Banca de Qualificação, Arthur Bernardes Cecílio Filho e Glauco de Souza Rolim, cujas críticas e sugestões contribuíram para a melhoria do presente estudo.

Aos membros da Banca de Defesa, Professor Marcos Omir Marques e Dr. Marcos Adami, que disponibilizaram seu precioso tempo para ajudar neste estudo, pelas críticas e sugestões que contribuíram para o enriquecimento do trabalho. Deixo aqui toda a minha gratidão e admiração pelos senhores.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas: Zezé, Shirley, Norival e Adriana, por toda dedicação, paciência e apoio durante esses anos.

Aos amigos e companheiros de mestrado do Departamento de Ciências Exatas, Luciano Ito Perillo, Willians Luiz Bueno de Souza, Elton da Silva Bicalho, Mara Regina Moitinho, Sísara Rocha Oliveira, João Fernandes da Silva Júnior e Daniel De Bortoli Teixeira, por toda a ajuda, camaradagem, conversas e momentos vividos durante esses anos.

Aos pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Bernardo Friedrich Theodor Rudorff, Daniel Alves Aguiar, Márcio Pupin Mello e Marcos Adami, pela amizade, conversas, ideias e parceria nas futuras publicações.

Ao amigo Dr. Alan Rodrigo Panosso, pela confiança, bom convívio, conversas, incentivos e, principalmente, pela amizade conquistada.

Aos meus avós Aurélio (*in memoriam*) e Amália (*in memoriam*), Alfeu (*in memoriam*) e Ofélia, aos meus tios e primos que não cito aqui, devido ao tamanho da família Bordonal, porém sempre fizeram parte da minha vida.

Ao meu irmão Marcelo de Oliveira Bordonal, pela amizade e companheirismo.

À minha amada, amiga e namorada Vanessa Rodrigues Cestari, que sempre esteve ao meu lado nos momentos de alegria e tristeza, e principalmente, pelo carinho, apoio e amor incondicional.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro.

E a todos, que de alguma forma contribuíram e incentivaram minha formação pessoal e profissional ao longo desta jornada.

Meu Sincero Obrigado.

SUMÁRIO

| | Página |
|---|---------------|
| LISTA DE TABELAS | x |
| LISTA DE FIGURAS | xi |
| RESUMO | xii |
| SUMMARY | xiv |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 4 |
| 2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A AGRICULTURA..... | 4 |
| 2.2 O EFEITO ESTUFA ADICIONAL E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS | 6 |
| 2.3 EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SISTEMAS AGRÍCOLAS | 10 |
| 2.4 ADAPTAÇÃO E OPÇÕES DE MITIGAÇÃO NA AGRICULTURA | 12 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 18 |
| 3.1 EMISSÕES DIRETAS E INDIRETAS DE N ₂ O DEVIDO AO MANEJO DO SOLO | 22 |
| 3.1.1 Fertilizante nitrogenado sintético..... | 23 |
| 3.1.2 Compostos orgânicos..... | 25 |
| 3.1.3 Emissão de N ₂ O dos resíduos da cana-de-açúcar..... | 25 |
| 3.1.4 Rotação de cultura com <i>Crotalaria juncea</i> L..... | 27 |
| 3.2 EMISSÕES DA QUEIMA DOS RESÍDUOS DA CANA-DE-AÇÚCAR..... | 27 |
| 3.3 EMISSÕES DE CO ₂ DEVIDO À CALAGEM | 28 |
| 3.4 EMISSÕES DEVIDO À APLICAÇÃO DE DEFENSIVOS..... | 29 |
| 3.5 EMISSÕES DEVIDO AO USO DE DIESEL (FONTES MÓVEIS) | 30 |
| 3.6 ACÚMULO DE CARBONO NO SOLO..... | 32 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 34 |
| 4.1 BALANÇO DE GEE CONSIDERANDO-SE O CICLO DE 6 ANOS DA CANA-DE-AÇÚCAR..... | 34 |
| 4.2 POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE GEE NO PERÍODO DE 2012 A 2041 | 44 |
| 5 CONCLUSÕES | 47 |

| | |
|---|-----------|
| 6 IMPLICAÇÕES..... | 48 |
| 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 49 |

LISTA DE TABELAS**Página**

- Tabela 1.** Fontes de emissão de GEE e acúmulo de carbono no solo, considerando-se o setor agrícola e de fontes móveis (maquinários) **20**
- Tabela 2.** Quantidade anual de insumos agrícolas aplicados e consumo de diesel (média para um ciclo de 6 anos) em 1 hectare para os cenários de produção estudados..... **24**
- Tabela 3.** Descrição das operações agrícolas específicas e consumo de óleo diesel ($L\ ha^{-1}$) para cada estágio de produção da cana-de-açúcar..... **31**
- Tabela 4.** Estimativa do balanço das emissões totais de GEE para os cenários de produção da cana-de-açúcar (em $kg\ CO_2eq\ ha^{-1}\ ano^{-1}$), considerando as fontes de emissão e o potencial de acúmulo de carbono no solo **34**

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|---|---------------|
| Figura 1. Esquema dos cenários de produção da cana-de-açúcar considerados neste estudo, com as setas representando as conversões de S0 para S1, S2 e S3..... | 19 |
| Figura 2. Mapa da colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo durante a safra 2010/2011 | 21 |
| Figura 3. Estimativas das emissões de GEE (em kg CO ₂ eq ha ⁻¹ ano ⁻¹) do setor agrícola, considerando o acúmulo de carbono no solo para cada cenário de produção de cana-de-açúcar (S0: Sistema de colheita manual queimada com preparo convencional; S1: Sistema de colheita mecanizada crua com preparo convencional; S2: Sistema de colheita mecanizada crua com preparo reduzido; S3: Sistema de colheita mecanizada crua com preparo reduzido e introdução de rotação com <i>Crotalaria juncea</i> L.) | 36 |
| Figura 4. Emissões líquidas totais referentes ao balanço de gases de efeito estufa (em t CO ₂ eq ha ⁻¹), considerando o ciclo completo de 6 anos para cada cenário de produção da cana-de-açúcar (S0, S1, S2 e S3) | 44 |
| Figura 5. Potencial de mitigação de GEE acumulado durante o período de 2012 a 2041, por ocasião da conversão das áreas de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo sob o sistema de colheita com queima para a colheita mecanizada crua (S1), considerando o preparo reduzido do solo (S2) e a rotação com <i>Crotalaria juncea</i> L. na reforma do canavial (S3) | 45 |

BALANÇO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES CENÁRIOS DE MANEJO, CONSIDERANDO-SE MITIGAÇÕES

RESUMO – Há uma necessidade crescente dos setores produtivos no desenvolvimento de técnicas de mitigação de gases de efeito estufa (GEE) de forma a reduzir o efeito estufa adicional. Entretanto, o desafio para o setor agrícola é reduzir as emissões líquidas de GEE enquanto se aumenta a produção para atender a demanda crescente por alimentos, fibras e biocombustíveis. Neste estudo foi estimado (i) o balanço de GEE em cenários de produção da cana-de-açúcar (S0, S1, S2 e S3), cuja colheita manual com queima (CQ) é convertida para a mecanizada sem queima (CC, cana crua), levando em consideração a adoção de práticas agrícolas conservacionistas, tais como o preparo reduzido do solo e a introdução da rotação de culturas com *Crotalaria juncea* L. durante a reforma do canavial; e (ii) o potencial de mitigação de GEE no período de 2012 a 2041 devido à conversão das áreas de cana-de-açúcar colhidas com queima (safra 2010/2011) no Estado de São Paulo para três cenários de manejo (S1, S2 e S3). Baseando-se nas metodologias do IPCC (2006), o balanço anual das emissões de GEE inclui as fontes agrícolas e móveis (maquinários), de acordo com o consumo médio anual de diesel e insumos agrícolas por hectare. Nos cenários que envolvem a colheita crua, o potencial de acúmulo de carbono no solo também foi considerado. Os resultados apontaram que a adubação nitrogenada sintética e o consumo de diesel foram responsáveis pelas maiores emissões nos cenários de cana crua, enquanto a queima de resíduos na pré-colheita da cana-de-açúcar resultou na maior emissão observada no cenário de cana queimada. As emissões totais de GEE foram de 2.651,9 e 2.316,4 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ para CQ (S0) e CC (S1), respectivamente. Considerando a taxa média de acúmulo de carbono no solo de 888,1 kg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ devido à conversão de CQ para CC, que resulta na deposição de resíduos vegetais em longo termo, o balanço das emissões de GEE no cenário S1 foi reduzido para 1.428,3 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹. O segundo decréscimo ocorreu quando se considerou a substituição do preparo convencional do solo pelo preparo reduzido durante o período de reforma no cenário de

cana crua (S2), que resultou na redução do balanço total das emissões de GEE para 1.180,3 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹. Além disso, a conversão de CQ para CC, com a introdução da rotação de cultura com *Crotalaria juncea* L. e o preparo reduzido do solo durante a reforma do canavial (S3), resultou no menor balanço de GEE, com 1.064,6 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹. Considerando a conversão das áreas de cana-de-açúcar colhidas com queima no Estado de São Paulo para três cenários de manejo, este estudo apontou para o potencial técnico de mitigação de GEE acumulado em 2041 que variou de 56,1 a 72,6 Mt CO₂eq, dependendo do cenário de manejo adotado. As estratégias de manejo agrícola apresentadas neste estudo podem contribuir substancialmente para mitigação de GEE na produção de açúcar e etanol no Brasil.

Palavras-chave: aquecimento global, preparo reduzido, rotação de culturas, produção de etanol, inventário, bioenergia, mudanças climáticas.

GREENHOUSE GAS BALANCE IN SUGARCANE AREAS UNDER DIFFERENT MANAGEMENT SCENARIOS, CONSIDERING MITIGATION

SUMMARY – There is a growing need for all productive sectors to develop GHG (greenhouse gas) mitigation techniques to reduce the enhanced greenhouse effect. However, the challenge to the agricultural sector is reducing net emissions while increasing production to meet growing demands for food, fiber and biofuel. This study estimated (i) the GHG balance in sugarcane production scenarios (S0, S1, S2 e S3) in which the burned harvest system (BH) is converted to green harvest (GH, mechanized harvest), taking into account some conservationist practices such as reduced tillage and a 4-month crop rotation with *Crotalaria juncea* L. during sugarcane replanting; and (ii) the GHG mitigation potential in the period from 2012 until 2041 due to conversion sugarcane areas harvested with burning (2010/2011 crop season) in São Paulo State for 3 management scenarios (S1, S2 e S3). Based on the IPCC (2006) methodologies, the annual emission balance includes both agricultural and mobile sources of GHG, according to the mean annual consumption of diesel and supplies per hectare. The potential soil carbon accumulation was also considered in the GH plot. The results indicated that the synthetic N fertilizer and diesel consumption were responsible for higher emissions in GH plot, while the burning of straw in sugarcane pre-harvest resulted in higher emissions observed in BH plot. The total amount of GHG emission was 2,651.9 and 2,316.4 kg CO₂eq ha⁻¹ yr⁻¹ for BH (S0) and GH (S1), respectively. Factoring in a mean annual soil carbon accumulation rate of 888.1 kg CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹ (due to the input from long-term crop residues associated with the conversion from BH to GH), the emission balance in S1 scenario decreased to 1,428.3 kg CO₂eq ha⁻¹ yr⁻¹. A second reduction in GHG balance occurred when a reduced tillage strategy was adopted instead of conventional tillage during the replanting season in the GH plot (S2), which helped reduce the total emission balance to 1,180.3 kg CO₂eq ha⁻¹ yr⁻¹. Moreover, the conversion of sugarcane from BH to GH, with the adoption of a crop rotation with *Crotalaria juncea* L. as well as reduced tillage during sugarcane replanting (S3), would result in a smaller

GHG balance of 1,064.6 kg CO₂eq ha⁻¹ yr⁻¹. Considering the sugarcane areas harvested with burning in São Paulo State for 3 management scenarios, this study highlighted to the accumulated GHG mitigation potential in 2041 could range from 56.1 to 72.6 Mt CO₂eq, depending on the management scenario adopted. The agricultural management strategies presented in this study could substantially contribute to GHG mitigation in the sugar and ethanol production in Brazil.

Keywords: global warming, reduced tillage, crop rotation, ethanol production, inventory, bioenergy, climate change.

1 INTRODUÇÃO

O último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007a) projetou que a produção mundial de alimentos poderá ser dramaticamente impactada nas próximas décadas pelas mudanças climáticas globais ocasionadas pelo efeito estufa adicional. Devido ao aumento da frequência e da severidade de eventos extremos, a distribuição de água e a produção de alimentos e fibras podem ser afetadas em diversas maneiras (GODFRAY et al., 2011). Estudos recentes têm focado na adaptação dos sistemas de produção a fim de reduzir o impacto negativo associado às mudanças climáticas. FLESSA et al. (2002) relataram que a conversão da agricultura convencional para a orgânica resultou na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) por hectare da fazenda, contribuindo para a redução de GEE na agricultura.

As mudanças climáticas estão ameaçando o ambiente e direcionando os esforços mundiais para o desenvolvimento de fontes alternativas de energia sustentáveis (LISBOA et al., 2011). A substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis derivados de culturas agrícolas poderia mitigar o efeito estufa ao reduzir as emissões de GEE; reduções de até 85% foram observadas em alguns casos (BÖRJESSON, 2009). No Brasil, o consumo de etanol proveniente da cana-de-açúcar por veículos foi responsável pela redução de 27,5 Mt CO₂eq em 2003, quando comparado aos combustíveis fósseis (MACEDO, 2005). O etanol é produzido a partir do processo de fermentação de várias culturas agrícolas, incluindo a cana-de-açúcar, o milho, a beterraba, o sorgo, entre outras. Quando comparado com outras matérias-primas, o etanol da cana-de-açúcar tem o balanço de GEE muito favorável (GOLDEMBERG et al., 2008).

Entretanto, a contribuição do setor sucroalcooleiro para o recente aumento da concentração de CO₂ na atmosfera está em discussão, desafiando inclusive a rotulação que a cana-de-açúcar é fonte de energia renovável (CERRI et al., 2009). Uma questão fundamental é a necessidade de se estimar como diferentes sistemas e opções de manejo associados à produção agrícola dessa cultura podem impactar no balanço de

GEE, levando em consideração o estado do estoque de carbono no solo, que pode desempenhar o papel importante como reservatório de carbono atmosférico.

O cultivo da cana-de-açúcar tem despertado o interesse da comunidade científica quanto às emissões de GEE, especialmente por enfrentar problemas de ordem socioeconômica e ambiental, como a prática da queima da palha por ocasião da colheita (ROSEIRO & TAKAYANAGUI, 2004). Dois sistemas de colheita contrastantes são praticados em áreas de cana-de-açúcar no sudeste do Brasil: colheita manual, que envolve a queima prévia da cana-de-açúcar, e colheita mecanizada, que não requer a queima prévia da cultura (também conhecida como colheita crua) e deixa grandes quantidades de palha sobre a superfície do solo.

A extensão em que a bioenergia pode reduzir as emissões de GEE depende do modo em que essa é produzida (MACEDO et al., 2008). A adoção de práticas de manejo conservacionistas pode resultar em mudanças significativas no balanço de GEE devido à redução do consumo de diesel pelos maquinários e ao aumento do estoque de carbono no solo (BAYER & MIELNICZUK, 1997). Além disso, tem sido argumentado que quando a rotação de cultura é introduzida, a fixação biológica de nitrogênio por culturas leguminosas pode contribuir na redução das emissões de N_2O do solo (URQUIAGA et al., 2010).

Em virtude da necessidade de adaptar os sistemas produtivos existentes para reduzir o impacto na emissão de GEE, o desafio é propor alternativas de manejo que possam resultar no menor balanço de GEE e comparar quando diferentes cenários de produção são contrastados. Nesse contexto, não há uma lista universal de aplicação das práticas de mitigação; contudo, as práticas agrícolas propostas deverão ser avaliadas de acordo com as condições climáticas específicas, características edáficas, contextos sociais, histórico da área e manejo individual dos sistemas agrícolas (IPCC, 2007b).

Neste estudo objetivou-se (i) estimar o balanço de GEE em quatro cenários de produção da cana-de-açúcar no sudeste do Brasil e identificar qual sistema produtivo pode resultar no menor balanço de GEE; e (ii) estimar o potencial de mitigação de GEE durante o período de 2012 a 2041, devido à conversão das áreas de cana-de-açúcar do

Estado de São Paulo colhidas manualmente com queima na safra 2010/2011 para três cenários de manejo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Desenvolvimento sustentável e a agricultura

O termo “desenvolvimento sustentável” tem se destacado mundialmente nas últimas décadas com a finalidade de transmitir ideias e preocupações relativas aos rumos das sociedades humanas, que dependem do equilíbrio entre as suas necessidades e a conservação do ambiente. O conceito de desenvolvimento sustentável apresenta definições variadas, sendo mais comum caracterizá-lo como a capacidade de satisfazer as necessidades da geração atual sem comprometer a possibilidade das gerações futuras (WCED, 1987). A sustentabilidade está fortemente relacionada às dimensões econômica, social e ambiental, e a falta de medidas que alcancem o equilíbrio entre essas dimensões pode comprometer o futuro do desenvolvimento sustentável (KAYGUSUZ, 2009), que é um processo de mudança no qual a exploração dos recursos, a orientação dos investimentos, os rumos do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional estão de acordo com as necessidades atuais e futuras (WCED, 1987).

A sustentabilidade agrícola é caracterizada como o equilíbrio em longo prazo da viabilidade econômica, da redução dos impactos ambientais e do abastecimento da demanda pública por alimentos, de modo que o consumo de recursos naturais finitos e as emissões líquidas de gases de efeito estufa na produção de alimentos sejam reduzidos (FARRELL & HART, 1998; LYBBERT & SUMNER, 2012). Nesse contexto, os sistemas agrícolas sustentáveis devem visar o aumento da produtividade, o aproveitamento eficiente dos nutrientes e da água presentes no solo, dos fluxos de energia (fontes renováveis), dos organismos benéficos, além do manejo ecológico de pragas e doenças, minimizando, assim, os impactos ambientais (CHEL & KAUSHIK, 2011).

Avanços no entendimento de aspectos fundamentais da bioquímica, agroecologia e biotecnologia, que estão ligados a programas de melhoramento genético, também podem contribuir significativamente para a sustentabilidade

(CASSMAN, 1999). Solucionar os problemas ambientais hoje em dia requer ações em longo prazo para o desenvolvimento sustentável, pois durante muitos anos os alimentos têm sido produzidos em larga escala e com uso intensivo das terras agrícolas, sobretudo com o intuito de satisfazer as necessidades de uma população global crescente.

O cultivo intensivo e a reposição inadequada dos nutrientes extraídos pelas culturas ou perdidos por meio do processo de erosão, lixiviação ou emissões gasosas, resultam na depleção da fertilidade e dos níveis de matéria orgânica dos solos, frequentemente para a metade ou abaixo dos níveis originais (MATSON et al., 1998). Além disso, a agricultura mundial contribui significativamente para níveis insustentáveis de fertilizantes, pesticidas e combustíveis fósseis não-renováveis durante a produção agrícola e o transporte dos alimentos até o consumidor (CHEL & KAUSHIK, 2011).

Em suma, as práticas agrícolas responsáveis pelo aumento da oferta mundial de alimentos têm causado diversos impactos sobre o ambiente, tais como a erosão do solo, a perda da diversidade ecológica, e a poluição do solo e da água, destacando-se, portanto, a necessidade de práticas agrícolas mais sustentáveis (TILMAN et al., 2002). DELGADO et al. (2011) relataram que, com a falta de aplicação de melhores práticas de conservação do solo e da água, não será possível manter os níveis de produtividade necessários para alimentar um adicional de 2,4 bilhões de pessoas projetados para 2050, visto que há uma relação direta entre as práticas de manejo conservacionistas e o aumento da produtividade.

De acordo com a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2009), a agricultura conservacionista fornece alternativas que podem resolver não só alguns dos desafios determinados pela erosão, mas também os desafios apresentados pelas mudanças climáticas e o alto custo energético projetado para o futuro. Os princípios da agricultura conservacionista relatados pela FAO (2009) se baseiam em práticas agrícolas que resultam no mínimo distúrbio do solo, e proporcionam a deposição contínua de resíduos vegetais das culturas, utilizando-se de sistemas de rotação de culturas e plantas de coberturas, que também estão em sincronia com as opções de manejo que podem ser utilizadas para sequestrar carbono

e ajudar a mitigar e adaptar às mudanças climáticas. Desta forma, as práticas de manejo agrícola que nos ajudam a mitigar e adaptar às mudanças climáticas serão fundamentais para a conservação e a sustentabilidade dos sistemas de cultivo, a qualidade do solo e da água, e a segurança alimentar (LAL et al., 2011).

2.2 O efeito estufa adicional e as mudanças climáticas

O efeito estufa natural está relacionado ao processo de absorção da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre, sendo responsável por manter as temperaturas de nosso planeta mais adequadas para sobrevivência (YU, 2004). Como parte dessa energia é absorvida pelos gases de efeito estufa (GEE), ocorre um aquecimento da atmosfera maior do que aquele que seria causado somente pela radiação solar. Entre os principais gases de efeito estufa estão o dióxido de carbono (CO_2), o ozônio (O_3), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), juntamente com o vapor d'água (H_2O), que prevaleceu nos últimos milênios como o principal gás de efeito estufa natural. O problema ocorre quando temos uma condição de efeito estufa ampliado, causado principalmente pela emissão adicional de CO_2 , CH_4 , N_2O , clorofluorcarbonos (CFCs), entre outros. A temperatura do planeta se ajusta para compensar esse desequilíbrio energético originando o fenômeno denominado “mudanças climáticas globais” (IPCC, 2001).

Os gases de efeito estufa emitidos na atmosfera por atividades antrópicas foram responsáveis pelo aumento da temperatura média global de aproximadamente $0,7^\circ\text{C}$ durante o século passado. Além disso, as estimativas apontam que a temperatura global está projetada para aumentar de $1,8^\circ\text{C}$ a $4,9^\circ\text{C}$ durante o século XXI (IPCC, 2007a). O aumento na concentração de CO_2 na atmosfera terrestre é a principal causa do aquecimento global, representando cerca de 60% das emissões totais de GEE. Desde os anos de 1800, três fontes principais contribuíram para esse aumento: a queima de combustível fóssil, a queima da biomassa das plantas associada à conversão da vegetação nativa (pradarias e florestas) para agricultura, e a decomposição da matéria orgânica do solo (HOUGHTON et al., 1983).

Junto com o dióxido de carbono (CO₂), o gás metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) também são responsáveis pelo aquecimento global. A concentração atmosférica de CO₂ continua aumentando, sendo atualmente próxima a 100 ppm (partes por milhão) acima daquela observada no período pré-industrial. O CH₄ saltou de 715 ppb (partes por bilhão) para 1.774 ppb e o N₂O saiu de 270 ppb para 319 ppb (IPCC, 2007a). No Brasil, entre os anos de 1990 e 2005, as emissões totais de CO₂, CH₄ e N₂O aumentaram em 65%, 37% e 45%, respectivamente (MCT, 2010), sendo amplamente reconhecido que as atividades antropogênicas são responsáveis pelas mudanças climáticas observadas e projetadas para as próximas décadas (GLEICK et al., 2010).

A agricultura, por sua vez, além de contribuir com as mudanças climáticas é também a principal vítima de seus impactos, sendo a produção de alimentos afetada diretamente por meio das alterações nas condições agroecológicas (SCHMIDHUBER & TUBIELLO, 2007). As condições climáticas regionais e globais se tornarão mais variáveis do que no presente com o aumento da frequência e da severidade de eventos extremos, tais como: ciclones, inundações, tempestades de granizo e secas (GODFRAY et al., 2011). A mudança na frequência de chuvas, devido à ocorrência de altas precipitações, poderá aumentar a probabilidade de deficiências hídricas em outros momentos (HATFIELD & PRUEGER, 2004).

Durante o século XX, mudanças na temperatura e na precipitação causaram importantes alterações no ciclo hidrológico em várias regiões. Uma das alterações observadas foi o declínio da cobertura de neve na primavera no hemisfério norte, começando nos anos de 1920 e acelerando no final de 1970 (IPCC, 2007c). No oeste dos Estados Unidos, a redução das massas de gelo e o derretimento precoce da neve irão potencializar a ocorrência de seca na agricultura, especialmente pela diminuição do reservatório de água disponível para irrigação (LETTENMAIER et al., 2008).

Os principais efeitos das mudanças climáticas sobre a agricultura certamente incidirão na queda de produtividade, manejo das culturas e diminuição de áreas adequadas à condução de lavouras, com consequências sociais, econômicas e políticas. Essa influência é específica a cada cultura e região. As condições de adaptação de estabelecimentos agrícolas à mudança do clima podem ser bem

variáveis, colocando-os em posições mais ou menos vulneráveis, em função de diferentes cenários climáticos (LIMA & ALVES, 2008). Vários estudos globais relataram a probabilidade de perda de 10-40% na produção agrícola da Índia (PARRY et al., 2004). Simulações apresentadas por ASSAD et al. (2004) apontaram que o aumento da temperatura em 5,8°C pode resultar na redução de áreas aptas à produção agrícola superiores a 95% nos Estados de Goiás, Minas Gerais e São Paulo, e aproximadamente 75% no Paraná.

De acordo com as estimativas apresentadas pela FAO (2006), a produção global de alimentos deverá aumentar em 70% até 2050 para atender as demandas de uma população global crescente. Diante disso, a produtividade agrícola nos países desenvolvidos e em desenvolvimento terá de melhorar para alcançar esse objetivo, enquanto os recursos naturais se tornam menos abundantes e os efeitos das mudanças climáticas se acentuam. Os países em desenvolvimento são particularmente mais vulneráveis às mudanças climáticas, sobretudo por depender muito de sua agricultura e por ter capital limitado para investimentos em adaptações inovadoras (BARRIOS et al., 2008). As projeções das mudanças climáticas são variáveis e há diferentes visões sobre a extensão dos impactos na agricultura. Apesar dessas diferenças, o consenso é que as áreas de produção menos resilientes sofrerão maiores impactos, assim como as temperaturas aumentarão mais nos trópicos de baixas latitudes (tropical e semi-tropical) e as regiões com escassez hídrica enfrentarão condições ainda mais secas (HUANG et al., 2011).

Estudos realizados recentemente por PINTO et al. (2008) apontaram que o impacto das mudanças climáticas ameaçará a produção de alimentos em áreas com potencial agrícola no Brasil, tendo um prejuízo que pode chegar a R\$ 7,4 bilhões em 2020, evidenciando assim, que o problema das mudanças climáticas é mais imediato do que muitos imaginam. Em termos de produção de culturas anuais, os efeitos das temperaturas elevadas são negativos (CERRI et al., 2007). Com exceção da cana-de-açúcar, está previsto na agricultura a perda de produtividade de várias culturas agrícolas, tais como: algodão, girassol, café, arroz, feijão e, principalmente, milho e soja (PINTO et al., 2008).

O efeito de enriquecimento de CO₂ pode ter um efeito positivo em algumas plantas bem como na melhoria da eficiência de uso da água. Entretanto, sob cenários de aumentos crescentes de temperatura, este efeito pode ser anulado pela variabilidade climática (LIMA & ALVES, 2008). De acordo com o IPCC (2007c), a produtividade das culturas poderá reduzir em 30% no sul da Ásia até o final do século, mesmo considerando os efeitos fisiológicos diretos positivos de CO₂. Impactos relacionados à variabilidade climática podem ser observados no levantamento de produção da cana-de-açúcar realizado pela CONAB (2011a), em que as condições climáticas não foram favoráveis durante a safra 2011/12. Além da falta de chuvas e a ocorrência de geadas, a luminosidade e as diferenças de temperatura durante o inverno estimularam o florescimento das lavouras, que resultou na queda de produtividade. Deste modo, a produtividade média brasileira foi de 68.289 kg/ha durante a safra 2011/12, 11,8% menor em relação à safra 2010/11.

Segundo o levantamento de safra da CONAB (2012), as condições climáticas influenciaram e influenciarão a cultura da cana-de-açúcar na safra 2012/13. Em 2011, os meses de agosto e setembro tiveram precipitações abaixo da média no Estado de São Paulo, principal produtor com mais de 60% da área nacional cultivada com cana-de-açúcar, o que prejudicou o desenvolvimento e a brotação dos canaviais. Em 2012, o mesmo fato ocorreu nos meses de fevereiro e março, repetindo os efeitos do período anterior e atingindo a mesma região antes castigada. Mesmo que as estimativas apontem para uma produtividade média de 70.289 kg/ha durante a safra 2012/13, 2,9% maior que na safra 2011/12, esse aumento ainda é considerado tímido, visto que o clima pode prejudicar novamente os canaviais pela má distribuição de chuvas. Considerando a quantidade de área expandida e renovada na safra anterior, mais de 16% do total cultivado, em termos lógicos, a produtividade deveria ser um pouco maior, já que o índice de produtividade destas áreas é o dobro das lavouras em ponto de renovação.

2.3 Emissão de gases de efeito estufa em sistemas agrícolas

A agricultura é responsável diretamente por 14% das emissões de GEE em CO₂eq (dióxido de carbono equivalente) e indiretamente por um adicional de 17% de emissões quando o uso da terra e a conversão para culturas agrícolas e pastagem são incluídos nos cálculos (LYBBERT & SUMNER, 2012), contribuindo aproximadamente com um terço das emissões totais antropogênicas (IPCC, 1996). Os principais gases de efeito estufa emitidos em atividades agrícolas são dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), representando cerca de 86,2% das emissões de GEE da agricultura global (VERGÉ et al., 2007). Ao separarmos a contribuição de cada GEE, a agricultura representa cerca de 60% do total das emissões antrópicas de N₂O e aproximadamente 50% de CH₄. Globalmente, as emissões agrícolas de CH₄ e N₂O tiveram um aumento de aproximadamente 17% durante o período de 1990 e 2005 (SMITH et al., 2007).

Diferentemente dos países industrializados, no Brasil a maior parcela das emissões líquidas estimadas de CO₂ é proveniente da mudança do uso da terra, em particular da conversão de florestas para uso agropecuário, que contribui com mais de dois terços das emissões totais de GEE no país. Aproximadamente 75% do CO₂ que o Brasil emite para a atmosfera são derivados de práticas agrícolas e do desmatamento. Apenas 25% são derivados da queima de combustíveis fósseis (CERRI et al., 2007; MCT, 2010). Portanto, a caracterização de como práticas de manejo agrícola afetam a dinâmica da emissão de gases de efeito estufa (GEE) é de grande importância na determinação, de forma quantitativa, dos impactos dessas práticas no clima do planeta (PANOSSO, 2011). Práticas agrícolas que favorecem as emissões gasosas a partir do solo incluem desmatamento, queima de biomassa, resíduos de colheita, revolvimento do solo, implantação de culturas em áreas marginais e o consumo de insumos agrícolas (WASSMANN & VLEK, 2004).

Os solos estocam cerca de 1.550 Pg de carbono orgânico, mais de duas vezes a quantidade de carbono presente na atmosfera (720 Pg) e cerca de três vezes mais que o carbono da biota terrestre (LAL, 2001; FOLLETT, 2001). Os níveis de carbono

orgânico nos solos são os resultados das complexas interações entre variáveis relacionadas aos processos de produção e transporte do gás do solo para a atmosfera. O manejo inadequado do solo pode resultar em processos degradativos de natureza física, química e biológica, tornando-o uma fonte de GEE. O metabolismo oxidativo aeróbio do substrato orgânico pelos microorganismos do solo tem como produto final a emissão de CO_2 , enquanto o CH_4 é o produto principal do metabolismo anaeróbio (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006). A magnitude e o tipo de emissões de GEE a partir de processos de degradação do solo dependem dos sistemas de manejo adotados (ESCOBAR, 2008).

O preparo do solo afeta a dinâmica do C e as emissões gasosas por meio de sua influência nas propriedades e processos do solo (WASSMANN & VLEK, 2004), em que a intensidade do preparo ocasiona um decréscimo do carbono orgânico do solo (TISDALL & OADES, 1980; LA SCALA et al., 2001). Características intrínsecas do solo também estão relacionadas com o maior ou menor acúmulo de carbono orgânico, a exemplo da textura, em que solos de textura argilosa apresentam maior potencial em acumular C orgânico do que solos de textura arenosa, ambos sob a mesma condição climática (SILVA et al., 1994). Portanto, o balanço de carbono em um ecossistema é, frequentemente, a diferença entre duas grandes componentes, similares em magnitude, mas opostas em sentido, ou seja, o carbono absorvido pela fotossíntese e a perda de carbono pela respiração (RAYMENT & JARVIS, 2000).

Embora os solos agrícolas possam atuar como fonte ou sumidouro de gases de efeito estufa (GEE) na agricultura, especialmente o CO_2 , os gases CH_4 e N_2O também contribuem fortemente para o efeito estufa. As emissões de CH_4 provenientes de solos agrícolas tropicais constituem uma parte significativa das emissões globais anuais de CH_4 , sendo as lavouras de arroz irrigado, a queima de biomassa e a pecuária (fermentação entérica) os principais responsáveis por essas emissões (ROBERTSON & GRACE, 2004). Em áreas de cana-de-açúcar, a queima de biomassa na pré-colheita da cultura é responsável pela liberação de quantidades abundantes de CH_4 , e em menores quantidades, de N_2O (IPCC, 2006; LISBOA et al., 2011). MARQUES et al. (2009)

estimaram que a queima de 10,4 t de biomassa resultou na liberação de C para a atmosfera numa taxa de 4,81 t CO₂eq ha⁻¹.

CERRI et al. (2009) estimaram a participação real do setor agropecuário nas emissões de GEE no território brasileiro, e apontaram que as emissões de CH₄ e N₂O no setor agrícola aumentaram em 21% e 24% entre os anos de 2000 e 2005, respectivamente. Tais emissões de N₂O estão associadas às práticas que aumentam a disponibilidade de N no solo, como práticas de fertilização (SMITH et al., 1998) e o retorno do N por meio dos resíduos de culturas (BAGGS et al., 2000), que são decompostos e liberados na forma de N₂O. Em adição, os produtos das excreções da pecuária (fezes e urina) e a queima de pastagens e resíduos de culturas também são responsáveis pelas emissões de N₂O relacionadas aos solos (DALAL et al., 2003).

A principal fonte de emissão de N₂O em áreas de cana-de-açúcar é a aplicação de fertilizantes nitrogenados, seja na forma mineral e/ou orgânica, tais como a torta de filtro e a vinhaça (LISBOA et al., 2011). A eficiência no uso de nitrogênio na produção da cana-de-açúcar varia de 6 a 40% (REICHARDT et al., 1982; DE OLIVEIRA et al., 2002), em que 60% do fertilizante nitrogenado aplicado pode ser perdido para a atmosfera por razões relacionadas à fórmula do fertilizante, taxa de liberação, tempo e local de aplicação, e condições climáticas (VERGÉ et al., 2007). Além das fontes diretas de emissões de GEE, o setor agrícola é responsável indireto pelas emissões nos setores industriais e de energia por meio da produção de fertilizantes e pesticidas, produção e operação de máquinas agrícolas (consumo de diesel), e no uso de energia em áreas agrícolas (WEST & MARLAND, 2002; JANZEN et al., 2003).

2.4 Adaptação e opções de mitigação na agricultura

A contribuição da agricultura para o aumento do efeito estufa antropogênico pode ser reduzida por meio do desenvolvimento de estratégias de manejo agrícola com capacidade de mitigar e adaptar as culturas às mudanças climáticas. Nesse contexto, o termo "agricultura de baixo carbono" surge para designar ações capazes de reduzir as

emissões de GEE provenientes da agricultura, de forma que o desenvolvimento sustentável possa ser alcançado (NORSE, 2012).

Mitigar significa intervir nos sistemas de produção no sentido de reduzir as emissões ou aumentar os sumidouros de GEE; adaptar corresponde aos ajustes necessários nos sistemas ecológicos, produtivos e socioeconômicos, em resposta às mudanças climáticas atuais ou projetadas. As oportunidades para mitigar as emissões de GEEs na agricultura se dividem em três grandes categorias, baseado no mecanismo fundamental: i) reduzir emissões, ii) promover remoções e iii) evitar ou deslocar emissões (SMITH et al., 2007).

Reduzir emissões: A agricultura libera quantidades significativas de CO₂, CH₄ e N₂O na atmosfera. O fluxo desses gases pode ser reduzido pelo manejo mais eficiente dos fluxos de carbono e nitrogênio em ecossistemas agrícolas. Por exemplo, práticas que fornecem N de modo mais eficiente às culturas frequentemente reduzem as emissões de N₂O. As práticas que mais reduzem emissões dependem das condições locais e, portanto, variam de região para região (SMITH et al., 2007).

Promover remoções: Os ecossistemas agrícolas guardam grandes reservas de carbono, principalmente na matéria orgânica no solo. Historicamente, esses sistemas perderam mais de 50 Pg de carbono, mas uma parte desse carbono pode ser recuperada por meio de um manejo aprimorado, que resulte na absorção do CO₂ atmosférico. Qualquer prática que aumente a entrada fotossintética de carbono ou diminua o retorno do carbono armazenado na forma de CO₂, seja pela respiração, fogo ou erosão, aumentará as reservas de carbono, “sequestrando” o carbono ou criando sumidouros de carbono. Muitos estudos no mundo têm demonstrado que quantidades consideráveis de carbono no solo podem ser estocadas dessa forma, através de várias práticas agrícolas, adequadas às condições locais. As terras agrícolas também retiram CH₄ da atmosfera através da oxidação, mas esse efeito é pequeno em relação aos fluxos de outros GEEs (SMITH et al., 2007).

Evitar ou deslocar emissões: Culturas e resíduos agrícolas podem ser usados como fonte de combustível, diretamente ou após a conversão para combustíveis tais como o etanol ou o diesel. Essas matérias primas bioenergéticas também liberam CO₂

com a combustão, mas esse carbono é de origem atmosférica recente (via fotossíntese) e não carbono fóssil. O benefício efetivo dessas fontes de bioenergia para a atmosfera é equivalente ao deslocamento das emissões de combustíveis fósseis, descontadas as emissões provenientes da produção, transporte e processamento. As emissões de GEEs, especialmente CO₂, podem ainda ser evitadas por práticas de manejo agrícola que previnam o cultivo de novas áreas sob floresta, pastagens e outros tipos de vegetação não agrícola (SMITH et al., 2007).

De acordo com SMITH et al. (2007) o sequestro de carbono no solo (SCS) pode fornecer uma contribuição estimada de 89% em relação ao potencial total de mitigação, enquanto a mitigação das emissões de CH₄ e N₂O dos solos representam somente 9% e 2%, respectivamente, do total. Desta forma, o SCS é uma estratégia de mitigação na qual a agricultura pode diretamente desempenhar um papel fundamental, em que as taxas de sequestro de carbono podem ser ampliadas pela adoção de práticas de manejo conservacionistas. A literatura está repleta de exemplos em que as práticas conservacionistas podem ser usadas para mitigar e adaptar às mudanças climáticas (EAGLE et al., 2010; JOHNSON et al., 2010).

Um sistema de cultivo ideal para sequestrar carbono é caracterizado pela produção e manutenção de quantidade abundante de biomassa e carbono orgânico no solo (WANG et al., 2010). No sudeste do Brasil, mudanças nas práticas de manejo da cultura da cana-de-açúcar têm sido consideradas mais importantes que a atual expansão da fronteira agrícola (CERRI et al., 2009), uma vez que grandes áreas estão sendo convertidas do sistema de manejo com queima para o mecanizado sem queima (cana crua). No sistema de cana crua, a colheita utilizando máquinas proporciona o retorno de resíduos vegetais para a superfície do solo, favorecendo, assim, o acúmulo de matéria orgânica e uma redução na emissão de gases em comparação ao sistema de cana queimada (RAZAFIMBELO et al., 2006; CERRI et al., 2009).

Ao elaborar um inventário de emissões de gases de efeito estufa para a cultura da cana-de-açúcar, DE FIGUEIREDO & LA SCALA (2011) verificaram que a conversão do manejo da queima para a colheita crua contribui com a redução das emissões de GEE de 310,7 a 1.484,0 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, sendo esse último valor encontrado

quando os possíveis ganhos de carbono no solo são considerados. Estimativas apresentadas por CERRI et al, (2011) apontaram que a conversão do sistema de colheita com queima para o mecanizado sem queima resultou na taxa anual de acúmulo de carbono de aproximadamente $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ na camada de 0-30 cm de profundidade.

Existe uma correlação positiva entre a manutenção da palha e o aumento do carbono orgânico no solo (COS), influenciado pelo tempo de adoção da colheita sem queima, textura do solo e distúrbio do solo (GALDOS et al., 2009). Práticas de preparo do solo, como o preparo convencional, podem resultar na depleção do COS ao invés de sequestro. Vários estudos relatam sobre o aumento significativo nos estoques de carbono do solo em sistemas de preparo reduzido ou plantio direto, comparado aos sistemas de preparo convencional (LAL & KIMBLE, 1997; BAYER et al. 2006).

USSIRI & LAL (2009), estudando os efeitos dos sistemas de preparo convencional, reduzido e o plantio direto no estoque de carbono e emissão de CO_2 no cultivo de milho, em Ohio, EUA, concluíram que solos sobre sistema de plantio direto, ou seja, sem distúrbio mecânico e com deposição de resíduos, armazenaram aproximadamente o dobro da quantidade de C na profundidade de 0,3 m, quando comparado aos sistemas convencional e reduzido. BAYER et al. (2000) encontraram taxa de acúmulo de carbono de $1,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de um sistema de 9 anos de plantio direto, comparada com $0,10 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ do sistema convencional na camada de 0-30 cm no sudeste do Brasil.

Portanto, o aumento dos estoques de C está condicionado às maiores quantidades de resíduos vegetais retornados ao solo e ao mínimo de distúrbio do solo (WANG et al., 2010). Dessa forma, restaurar as quantidades de carbono no solo em sistemas agrícolas pode, além de remover o CO_2 da atmosfera, melhorar a produção sustentável da agricultura, de modo que o sequestro de carbono também se relaciona com as funções e propriedades dos solos que resultam no aumento da produtividade (DELGADO et al., 2011). É importante considerar que a adoção de práticas conservacionistas, como o plantio direto ou o preparo reduzido, resulta na redução de

60 a 70% no consumo de combustível (óleo diesel) durante as operações agrícolas, quando comparado ao sistema de preparo convencional (CERRI et al., 2007).

Quanto ao potencial de mitigação das emissões de N_2O na agricultura, o uso de novas tecnologias como a agricultura de precisão e o melhor planejamento na nutrição das culturas podem promover o uso eficiente de fertilizantes e, assim, reduzir as emissões associadas com aplicações excessivas (VITOUSEK et al., 2009), reduzindo custos e melhorando a eficiência de produção das culturas. De acordo com REAY et al. (2012), a melhoria na eficiência de utilização do nitrogênio na produção agrícola continua a ser uma estratégia fundamental pelo qual o aumento da demanda por alimentos no futuro possa ser alcançado sem o aumento proporcional nas emissões de N_2O , de modo que as emissões por unidade de produto agrícola sejam significativamente reduzidas.

Dentre as práticas que aumentam a eficiência no uso de nitrogênio incluem: ajuste das taxas de aplicação com base em estimativas precisas das necessidades da cultura (ou seja, agricultura de precisão); uso de fertilizantes de liberação lenta ou controlada ou inibidores de nitrificação (que desaceleram processos microbianos que levam à formação de N_2O); aplicação de nitrogênio quando a perda for menos provável, geralmente logo antes do consumo (melhor programação); aplicação do nitrogênio de forma mais precisa no solo, para torná-lo mais acessível às raízes; ou evitar a aplicação excessiva, além das necessidades imediatas de nitrogênio (SMITH et al., 2007).

A prática da rotação de cultura é evidenciada na literatura por melhorar a produção de biomassa, especialmente com a introdução de leguminosas (WANG et al., 2010; AMBROSANO et al., 2011). O crescimento de leguminosas pode reduzir substancialmente a entrada de fertilizantes sintéticos por meio da fixação biológica de nitrogênio (FBN), que por sua vez, reduz o consumo de combustíveis fósseis na produção de fertilizantes (ZENTNER et al., 2001). Além disso, a FBN tem a vantagem de estar na forma orgânica, que facilita muito a sua incorporação no húmus pela atividade microbiana (URQUIAGA et al., 2010).

Portanto, a necessidade de identificar estratégias de manejo eficientes na redução das emissões de GEE e/ou no aumento dos estoques de carbono do solo é

possível a partir do conhecimento das atividades envolvidas na produção da cana-de-açúcar. Tais estratégias devem vir aliadas à redução da vulnerabilidade dos sistemas agrícolas aos impactos das mudanças climáticas, mantendo-se os níveis de produção para garantir a sustentabilidade dos sistemas produtivos. Neste trabalho foram investigadas novas formas de manejo agrícola que possam sustentar a produção da cana-de-açúcar e seus derivados em longo prazo, e promover o menor balanço de emissões de gases de efeito estufa neste setor.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Tradicionalmente, a cana-de-açúcar no sudeste do Brasil é cultivada em ciclos de 5 a 6 anos com colheitas anuais. Durante o período de renovação do canavial, que se estende da última colheita até a reforma, o solo pode ser utilizado para o plantio de uma cultura de rotação, ou pode ficar em pousio por 3 a 4 meses até o replantio da cana-de-açúcar. O sistema de plantio que utiliza a rotação de cultura durante a renovação do canavial é denominado “plantio de ano e meio”, caracterizado por apresentar melhores produtividades e normalmente plantado entre janeiro e maio, com um período de crescimento de 15 a 18 meses para a primeira colheita e 12 meses para as colheitas subsequentes. Depois da primeira colheita, aproximadamente 18 meses após o plantio, seja colhida queimada ou mecanizada crua, segue-se a rebrota da soqueira, a qual, se manejada adequadamente, resulta em mais quatro anos de colheita em média. Da quinta colheita em diante, a produtividade tende a cair, necessitando a renovação do canavial com o plantio de novas mudas.

Diferentes sistemas de preparo do solo podem ser utilizados durante a renovação do canavial: 1) preparo convencional, em que a grade pesada é utilizada a 30 cm de profundidade, seguido da operação de subsolagem para descompactar o solo a 40 cm de profundidade, da grade média a 25 cm de profundidade e da grade niveladora a 25 cm de profundidade (em média); e 2) preparo reduzido, no qual o mínimo de operações de preparo (considerado aqui como a operação de subsolagem e a abertura dos sulcos para aplicação da torta de filtro) é realizado antes do plantio da cultura, sendo seguido pelo plantio mecanizado, que envolve a abertura dos sulcos e a distribuição das mudas e fertilizantes em uma única operação.

Os cenários de produção considerados foram: sistema de colheita manual com queima da palha da cana-de-açúcar, que utiliza o preparo convencional do solo na reforma do canavial (S0); sistema de colheita mecanizada sem queima que utiliza o preparo convencional durante a reforma (S1); sistema de colheita mecanizada sem queima com o preparo reduzido durante a reforma (S2); e o sistema de colheita mecanizada sem queima sob o preparo reduzido do solo, porém com a introdução da

rotação de cultura com *Crotalaria juncea* L. durante o período de reforma (S3). Foi considerado o ciclo de cultivo de 6 anos, em que nos cenários S0, S1 e S2, as áreas foram deixadas em pousio por 3 a 4 meses antes do replantio da cana-de-açúcar, enquanto no cenário S3, esse período foi ocupado com a rotação de cultura. A Figura 1 ilustra os cenários de produção avaliados, com as setas representando as conversões de S0 para S1, S2 e S3.

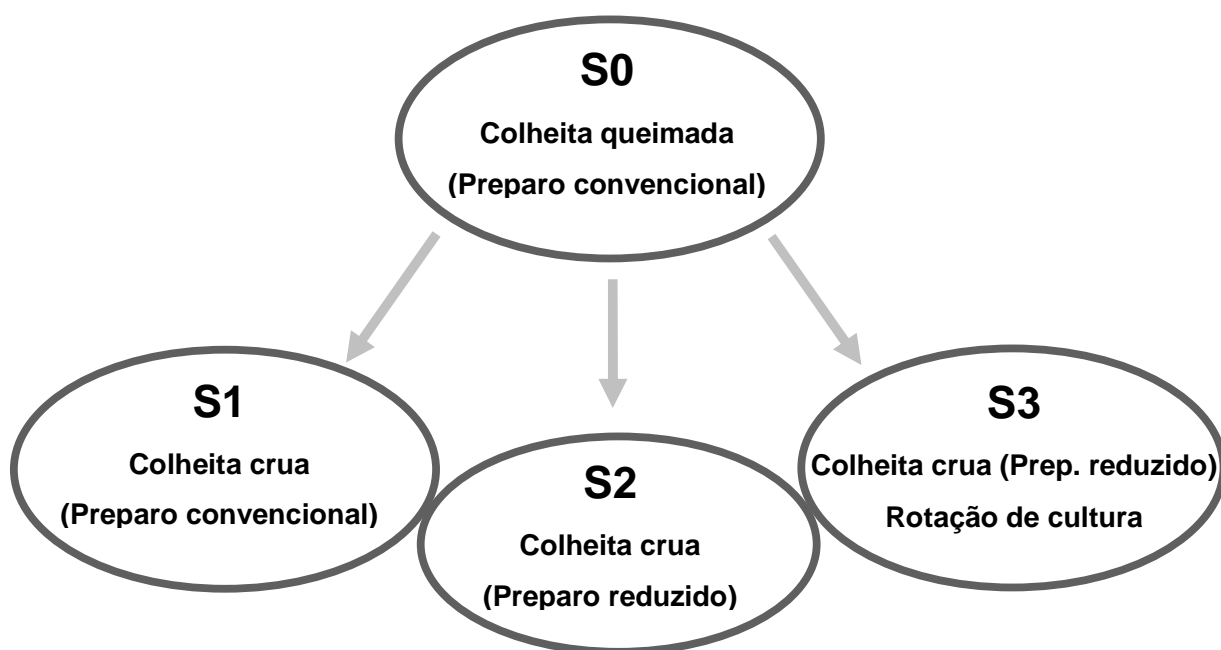


Figura 1. Esquema dos cenários de produção da cana-de-açúcar considerados neste estudo, com as setas representando as conversões de S0 para S1, S2 e S3.

O cálculo das estimativas das emissões de GEE e do possível acúmulo de carbono no solo foi baseado nas metodologias do IPCC (2006), levando em consideração as seguintes fontes de GEE: a) Emissões de N_2O do manejo do solo associadas ao uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos, compostos orgânicos (vinhaça e torta de filtro) e resíduos de cultura depositados na superfície do solo (cana-de-açúcar e *Crotalaria juncea* L.); b) Emissões de CH_4 e N_2O devido à queima na pré-colheita da cana-de-açúcar; c) Aplicação de calcário; d) Aplicação de defensivos agrícolas; e) Consumo de diesel pelo maquinário durante as operações agrícolas. As

emissões de GEE relacionadas às fases de produção dos insumos agrícolas (fertilizante nitrogenado sintético, calagem e defensivos), assim como as fases de extração, processamento e transporte do diesel também foram incluídas nos cálculos. Além disso, foi considerado o potencial de acúmulo de carbono no solo devido às mudanças dos sistemas de manejo; por exemplo, na conversão de S0 para S2, grandes quantidades de resíduos da cultura seriam deixadas na superfície do solo, assim como as mudanças no tipo de preparo do solo poderiam ocorrer nesse caso (Tabela 1).

Tabela 1. Fontes de emissão de GEE e acúmulo de carbono no solo, considerando-se o setor agrícola e de fontes móveis (maquinários).

| Setor | Fonte de emissão e potencial de acúmulo de carbono no solo para os sistemas de manejo estudados |
|-----------------------------------|---|
| Agrícola | Emissões diretas e indiretas de N ₂ O de solos manejados <ul style="list-style-type: none"> - Fertilizante N sintético - N proveniente dos compostos orgânicos (vinhaça e torta de filtro) - N proveniente dos resíduos da cana-de-açúcar e <i>Crotalaria juncea</i> L. Emissões de CH ₄ e N ₂ O da queima de resíduos da cana-de-açúcar Emissões de CO ₂ da aplicação de calcário Emissões relacionadas à aplicação de defensivos agrícolas Potencial de acúmulo de carbono no solo |
| Fontes móveis (maquinário) | Emissões provenientes do consumo de óleo diesel pelo maquinário <ul style="list-style-type: none"> - CO₂ - CH₄ - N₂O |

Os dados de entrada para os cálculos das estimativas foram baseados na literatura, e representa o consumo médio anual dos insumos agrícolas e óleo diesel por hectare durante o período de 6 anos da cultura, que compreende a reforma, o plantio, os quatro tratamentos de soqueira e as cinco colheitas. O balanço das emissões de GEE para os cenários de produção foi expresso em termos de kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (CO₂ equivalente) após os valores serem convertidos conforme o potencial de

aquecimento global individual para cada gás no período de 100 anos, sendo 1 para CO₂, 25 para CH₄ e 298 para N₂O (IPCC, 2007a).

A estimativa do potencial de mitigação de GEE durante o período de 2012 a 2041 proveniente da conversão do tipo de colheita no Estado de São Paulo foi baseada na área de cana colhida com queima, estimada a partir da interpretação de imagens de satélite, de acordo com a metodologia proposta por AGUIAR et al. (2011). As áreas de cana-de-açúcar colhidas com queima durante a safra 2010/2011 foram mapeadas pelo Projeto Canasat (Figura 2; AGUIAR et al., 2011).

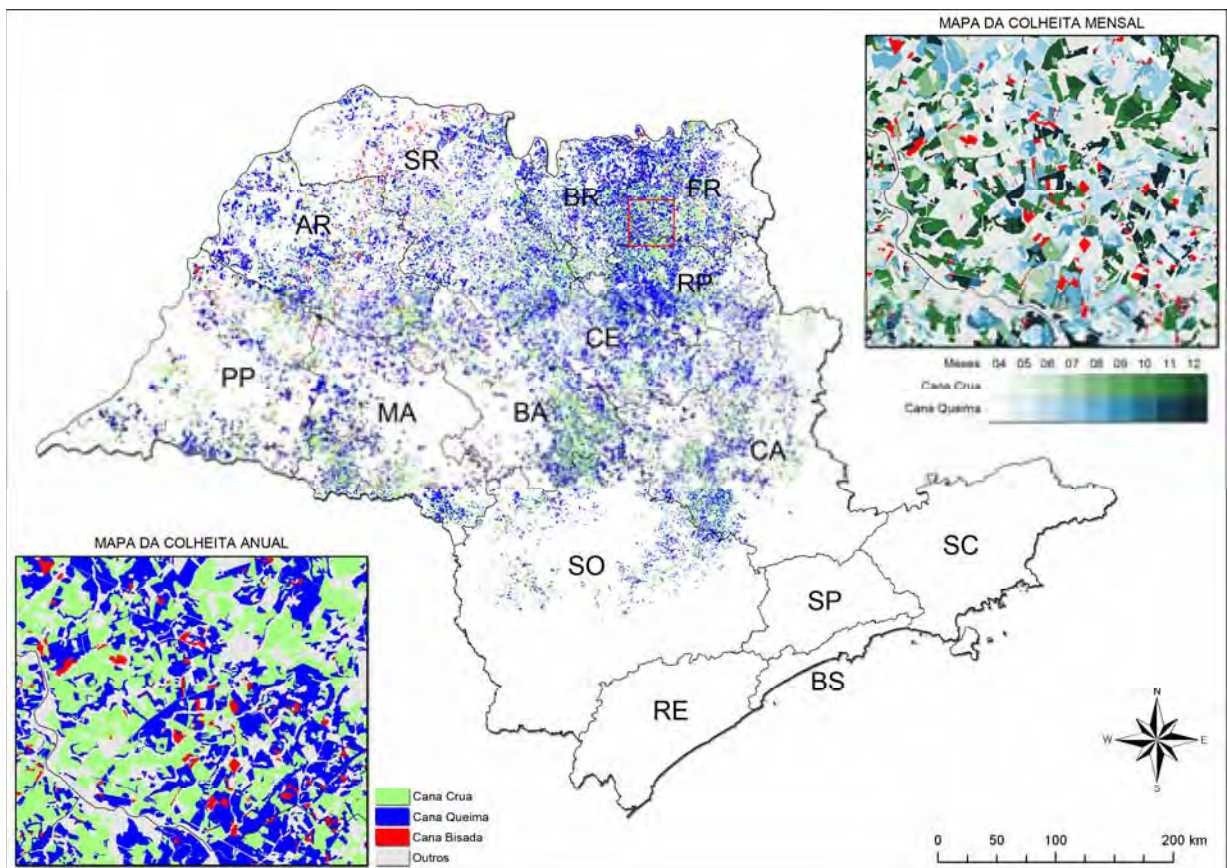


Figura 2. Mapa da colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo durante a safra 2010/2011 (Fonte: AGUIAR et al., 2011).

A taxa de conversão do tipo de colheita adotada neste estudo foi baseada na hipótese que toda a área de cana colhida com queima na safra 2010/2011 será

convertida para colheita sem queima a partir de 2011 até o ano de 2020 (10 anos), a despeito do tipo de colheita das novas áreas de cultivo de cana que surgirem no período de 2012 a 2041. Essa hipótese é válida considerando que no Estado de São Paulo existe a Lei Nº 11.241/2002 (SÃO PAULO, 2002), que determina a extinção da queima da cana-de-açúcar até 2021 em áreas mecanizáveis (com declividade $\leq 12\%$). Segundo AGUIAR et al. (2011), de 4,72 milhões de hectares de cana-de-açúcar colhidos durante a safra 2010/2011 no Estado de São Paulo, 2,10 milhões de hectares (44,4%) foram colhidos sob o sistema de colheita com queima. Nesse contexto, a taxa anual de conversão considerada para o cálculo do potencial de mitigação de GEE acumulado foi de 210.000 hectares, sendo as estimativas expressas em termos de Mt CO₂eq.

3.1 Emissões diretas e indiretas de N₂O devido ao manejo do solo

O óxido nitroso (N₂O) é formado no solo por processos microbianos conhecidos como nitrificação e desnitrificação (BREMNER, 1997; GENTILE et al., 2008). A aplicação de fertilizantes N sintéticos diretamente no solo é a principal fonte de emissão de N₂O na agricultura (VAN GROENIGEN et al., 2010). Além disso, a aplicação de compostos orgânicos e os resíduos das culturas deixados na superfície do solo pela colheita mecanizada também são importantes fontes de emissão de N₂O (PATTEY et al., 2007). Poucos estudos na literatura relatam sobre as emissões de N₂O dos solos em condições tropicais, ocorrendo portanto, a falta de informações sobre os fatores de emissão de N₂O específicos para as condições edafoclimáticas do sudeste do Brasil. Dessa forma, este estudo teve como referência os fatores de emissão de N₂O sugeridos pelo IPCC (2006), que considera três fontes diretas de emissão: os fertilizantes N sintéticos, os compostos orgânicos e a mineralização dos resíduos da cultura deixados na superfície do solo.

Nas estimativas das emissões de N₂O, o fator de emissão (FE) de 1% foi aplicado para as emissões diretas dos fertilizantes N sintéticos, dos compostos orgânicos (vinhaça e torta de filtro) e para o teor de N dos resíduos da cultura que

retornaram ao solo. Nas emissões indiretas de N_2O , foi adotado o FE de 1%, e a fração do N volatilizado de 10% para os fertilizantes sintéticos e 20% do N volatilizado para os compostos orgânicos aplicados. Para calcular as emissões de N_2O da lixiviação e do escoamento superficial dessas três fontes, foi considerada a fração de lixiviação de 30% e o FE de 0,75% (IPCC, 2006).

As emissões relacionadas às fases de produção e transporte do fertilizante N sintético também foram consideradas, com um fator de emissão de $3,97 \text{ kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$ de N (MACEDO et al., 2008).

3.1.1 Fertilizante nitrogenado sintético

A aplicação de fertilizantes é uma prática regular que visa o incremento na produção de biomassa e na produtividade, além de manter a fertilidade do solo (LISBOA et al., 2011). Essa prática, entretanto, tem sido motivo de preocupação para a comunidade científica, particularmente relacionada às emissões de N_2O (NG KEE KWONG & DEVILLE, 1984; COSTA et al., 2009). A adubação mineral prévia ao cultivo da cana-de-açúcar visa manter a produtividade em aproximadamente $100 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Desse modo, recomenda-se a aplicação de fertilizantes N sintéticos no plantio a uma dose que varia de 30 a 90 kg N ha^{-1} (SPIRONELLO et al., 1997). Entretanto, evidências científicas apontaram que a utilização de adubo verde durante a reforma do canavial pode suprimir a necessidade de adubação nitrogenada no plantio devido ao processo de fixação biológica de nitrogênio, que é resultado do sistema de rotação de culturas com leguminosas (PERIN et al., 2004; MASCARENHAS et al., 2008). Além disso, PARK et al. (2010) relataram que o N proveniente do plantio de leguminosas permaneceu disponível para a cana-de-açúcar até o quarto ano de soqueira, resultando no potencial de redução da aplicação de fertilizante N sintético em aproximadamente 100% no primeiro ano, e 60%, 25% e 10% nos anos subsequentes.

Em relação à fertilização nitrogenada durante o tratamento de soqueiras, para a produtividade esperada de $100 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, recomenda-se aplicar a taxa de $100 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ durante os ciclos de soqueira (SPIRONELLO et al., 1997). Porém, durante os

primeiros anos de conversão do sistema de colheita queimada para o sistema de colheita crua, recomenda-se aplicar uma taxa de 130 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ (30% superior) (TRIVELIN & VITTI, 2005), pois a alta relação C:N dos resíduos da cultura remanescentes no solo pode levar à imobilização do nitrogênio do solo e dos fertilizantes pelos microorganismos, reduzindo a disponibilidade de N para cultura da cana-de-açúcar (VITTI et al., 2007; GENTILE et al., 2008).

No cálculo das estimativas das emissões de N₂O, para o cenário S0 (colheita com queima da palha), foi considerada a dose de fertilizante N sintético de 60 kg N ha⁻¹ no plantio, enquanto nos anos de soqueira, a dose foi aumentada para 100 kg N ha⁻¹, resultando na taxa média de aplicação de 76,7 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ durante o ciclo de 6 anos (Tabela 2). Para o cenário S1 (colheita crua), foi considerada a dose de fertilizante de 60 kg N ha⁻¹ no plantio, e de 130 kg N ha⁻¹ nos anos de soqueira, correspondendo à taxa média de aplicação de 96,7 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ durante o ciclo da cultura (Tabela 2).

Tabela 2. Quantidade anual de insumos agrícolas aplicados e consumo de diesel (média para um ciclo de 6 anos) em 1 hectare para os cenários de produção estudados.

| Insumos | S0 | S1 | S2 | S3 |
|---------------------------------|------------|-------|-------|-------|
| | Quantidade | | | |
| Fertilizante N sintético (kg N) | 76,7 | 96,7 | 96,7 | 66,1 |
| Vinhaça (kg N) | 29,4 | 29,4 | 29,4 | 29,4 |
| Torta de filtro (kg N) | 17,5 | 17,5 | 17,5 | 17,5 |
| Calcário (kg) | 333,3 | 333,3 | 333,3 | 333,3 |
| Inseticidas (kg) | 0,03 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| Herbicidas (kg) | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 |
| Diesel (litros) | 117,4 | 189,0 | 177,4 | 178,6 |

Como os cenários S1 e S2 se diferem somente em relação ao sistema de preparo do solo durante a reforma do canavial (convencional versus reduzido), a taxa média de fertilizante N aplicado em S2 também foi considerada como sendo 96,7 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 2). No cenário S3, que envolve o plantio da *Crotalaria juncea* L. durante o período de reforma do canavial, o fertilizante N sintético não foi aplicado no plantio (100% de redução), mas nos anos de soqueira, doses de 52 kg N ha⁻¹ (60% de

redução), 97,5 kg N ha⁻¹ (25% de redução), 117 kg N ha⁻¹ (10% de redução) e 130 kg N ha⁻¹ foram adotadas, resultando na taxa média de aplicação de 66,1 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ no ciclo de 6 anos (Tabela 2).

3.1.2 Compostos orgânicos

A vinhaça é aplicada como adubo orgânico (fertirrigação) em áreas de cana-de-açúcar, sobretudo por apresentar quantidades consideráveis de potássio. Em média, os níveis de nitrogênio, fósforo e potássio são: 0,28-0,57; 0,09-0,10; 1,29-3,95 kg m⁻³, respectivamente (DE BARROS et al., 2010). O conteúdo de N na vinhaça foi considerado como sendo 0,368 kg N m⁻³, com a aplicação de 120 m³ ha⁻¹ em cada ano de soqueira (DE FIGUEIREDO & LA SCALA, 2011). Normalmente a vinhaça não é aplicada no plantio da cana-de-açúcar, resultando portanto, na taxa média de aplicação de 29,4 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ durante o ciclo de 6 anos (Tabela 2).

A torta de filtro é aplicada em áreas de renovação do canavial na taxa que varia de 15 a 35 t ha⁻¹ no sulco de plantio, especialmente por apresentar teores elevados de fósforo em sua composição (EMBRAPA, 2011). Normalmente o teor de umidade da torta de filtro varia de 75-80% (NUNES JÚNIOR, 2008), tendo a composição média, expressa em % da matéria seca, variando de 1,1 a 1,4 de N, 1,04 a 2,55 de P₂O₅ e 0,3 a 0,96 de K₂O (FERREIRA et al., 1986). Foi considerado o teor de 1,4% de N em 25% de matéria seca na torta de filtro, sendo essa aplicada no sulco de plantio na dose de 30 t ha⁻¹ durante a reforma do canavial (DE FIGUEIREDO & LA SCALA, 2011), que corresponde à taxa média de aplicação de 17,5 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ durante o ciclo de 6 anos da cultura (Tabela 2).

3.1.3 Emissão de N₂O dos resíduos da cana-de-açúcar

No sistema de colheita mecanizada crua, a quantidade de resíduos da cultura deixada no campo após a colheita varia de 10 a 20 t ha⁻¹ de matéria seca, com o teor de N presente nesses resíduos variando de 40 a 80 kg ha⁻¹ (TRIVELIN et al., 1996;

RESENDE et al., 2006). A decomposição do material orgânico pela atividade microbiana é influenciada pelo teor de umidade do solo, temperatura do solo e qualidade do material (SIERRA, 1997; NÚÑEZ et al., 2001), sendo inversamente proporcional ao conteúdo de lignina e à relação C:N. Os resíduos com relação C:N maior que 25 são mais estáveis no solo, enquanto materiais com relação C:N menores que 25 são decompostos rapidamente (ALEXANDER, 1977; SÁ, 1995). Visto que os resíduos da cana-de-açúcar apresentam, em média, uma relação C:N próxima a 100, isso pode levar à imobilização do N do solo (SMITH & DOUGLAS, 1971; WHITE, 1984; KHAN et al., 2008), e conseqüentemente, a menores emissões de N₂O (MUHAMMAD et al., 2010).

Considerou-se a produtividade média de colmos de 81 t ha⁻¹ ano⁻¹ (CONAB, 2011b), com a deposição de resíduos na superfície do solo de 15 t ha⁻¹ ano⁻¹ de matéria seca, e um teor de 60 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ presente nesses resíduos (TRIVELIN et al., 1996). Entretanto, vários estudos apontam que o N presente nos resíduos da cana-de-açúcar não está completamente disponível para os processos de nitrificação e desnitrificação no solo. BASANTA et al. (2002) relataram que o N presente nos resíduos da cana-de-açúcar, uma vez deixados na superfície do solo, apresentou a taxa de decaimento que variou de 3% a 30% durante o ano agrícola. Em estudos realizados por OLIVEIRA et al. (1999), os resultados apontaram que o N liberado pelos resíduos da cana-de-açúcar foi de aproximadamente 20% ao ano, valores similares aos encontrados por VITTI (2003), de aproximadamente 26%.

Nas estimativas das emissões de N₂O dos resíduos da cana-de-açúcar depositados na superfície do solo, o teor de N disponível para nitrificação e desnitrificação foi considerado como sendo 20% do total presente na palha (60 kg ha⁻¹ de N) durante o período de 1 ano. Considerando 5 colheitas durante o ciclo de 6 anos, o teor médio de 10 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N estaria disponível para atividade microbiana do solo em áreas de colheita crua.

3.1.4 Rotação de cultura com *Crotalaria juncea* L.

A rotação de cultura em áreas de reforma do canavial tem sido amplamente praticada no Estado de São Paulo, Brasil. No cenário de produção S3 foi considerado o preparo reduzido do solo antes do plantio de *Crotalaria juncea* L., cujo ciclo de produção é de aproximadamente 100 dias. Após esse período, o manejo biomassa da *Crotalaria juncea* L. e a abertura do sulco/adubação da cana-de-açúcar ocorre em uma única operação, por meio do sistema mecânico conhecido como “Para-Choque”. Os resultados da literatura apontaram que a produção média da *Crotalaria juncea* L. varia de 9,34 a 9,77 t ha⁻¹ de matéria seca, com a taxa de fixação simbiótica de nitrogênio da ordem de 169 a 250 kg N ha⁻¹ (ALVES et al., 2003; PERIN et al., 2004; SILVA et al., 2006), que permanece disponível no solo para a próxima cultura, em nosso caso, a cana-de-açúcar.

A fixação biológica de nitrogênio não foi contabilizada nos cálculos como fonte de emissão de N₂O, visto que há falta de evidências científicas que comprovem as emissões decorrentes do processo de fixação por si só (ROCHETTE & JANZEN, 2005; IPCC, 2006; BARTON et al., 2011). Esses autores concluíram que as emissões de N₂O induzidas pelo crescimento das culturas leguminosas deveriam ser estimadas somente em função da decomposição dos resíduos vegetais. Dessa forma, considerou-se a deposição de 9,5 t ha⁻¹ de matéria seca na superfície do solo e o teor de N fixado de 200 kg ha⁻¹ durante a reforma do canavial, correspondendo à taxa média de 33,3 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ disponível para atividade microbiana do solo durante o ciclo de 6 anos.

3.2 Emissões da queima dos resíduos da cana-de-açúcar

Os resíduos da cana-de-açúcar representam cerca de 11% da produção mundial de resíduos agrícolas, e a queima desses resíduos é responsável por uma liberação substancial de GEE, particularmente o CO₂ (IPCC, 1995). Além disso, outros gases relacionados ao efeito estufa, como o monóxido de carbono (CO), o metano (CH₄), as espécies de nitrogênio (N₂O, NO_x) e os compostos orgânicos voláteis não-metano

(NMVOC) são lançados para a atmosfera (LEVINE, 2000). Para o cálculo das estimativas das emissões de GEE provenientes da queima dos resíduos da cana-de-açúcar, de acordo com o IPCC (2006) somente as emissões de CH₄ e N₂O devem ser consideradas, pois o crescimento da cultura no ciclo seguinte (1 ano agrícola) compensaria as emissões de CO₂ por meio da fotossíntese. Essa hipótese também é aplicada ao CO, visto que esse é rapidamente convertido em CO₂ quando na atmosfera. As emissões de NO_x também não foram consideradas nas estimativas, pois o potencial de aquecimento global ainda é incerto (IPCC, 2006).

Os fatores de emissão aplicados nos cálculos foram: 2,7 e 0,07 para o CH₄ e o N₂O (g kg⁻¹ de matéria seca queimada), respectivamente (ANDREA & MERLET, 2001). As emissões de GEE devido à queima da cana-de-açúcar dependem da quantidade de resíduos produzidos pela cultura. Deste modo, a produtividade média anual da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo foi considerada como sendo 81 t ha⁻¹ de colmos (CONAB, 2011b), com a produção média de 15 t ha⁻¹ de matéria seca, que resulta na taxa produtividade/resíduo de 0,1852 (DE FIGUEIREDO & LA SCALA, 2011). O fator de combustão utilizado nos cálculos foi de 0,80 (IPCC, 2006).

3.3 Emissões de CO₂ devido à calagem

A prática de calagem é conduzida durante a reforma do canavial, normalmente antes do plantio, sobretudo com intuito de elevar o pH do solo para 5,5-6,5 e a saturação por bases (V%) ao redor de 60% (SPIRONELLO et al., 1997). Para os cálculos, foi considerada a dose de 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico durante a reforma do canavial (DE FIGUEIREDO & LA SCALA, 2011), que resulta na taxa média de aplicação de 333,3 kg ha⁻¹ ano⁻¹ durante o ciclo de 6 anos (Tabela 2). O fator de emissão foi considerado como sendo 0,13 t de C por t de calcário dolomítico aplicado (IPCC, 2006). As emissões relacionadas às fases de produção do calcário também foram consideradas, com uma quantidade emitida de 0,01 kg CO₂eq kg⁻¹ de calcário produzido (MACEDO et al., 2008).

3.4 Emissões devido à aplicação de defensivos

As quantidades de defensivos agrícolas aplicados em áreas de cana-de-açúcar são variáveis de acordo com o histórico de manejo da área. Entre os defensivos, os herbicidas são os mais consumidos no manejo agrícola da cana-de-açúcar, enquanto a aplicação de fungicidas é praticamente nula e o consumo de inseticidas é relativamente baixo (MACEDO, 2005). Nesse contexto, foram consideradas as emissões de GEE relacionadas às fases de produção e transporte dos inseticidas e herbicidas consumidos nos cenários de produção, tendo como base os fatores de emissão sugeridos por MACEDO et al. (2008), que apontaram para a emissão de 29,0 e 25,0 kg CO₂eq kg⁻¹ de inseticida e herbicida, respectivamente.

Nas áreas de cana-de-açúcar onde o sistema de colheita é o manual com queima (S0), normalmente os inseticidas são aplicados apenas no plantio na dose de 0,16 kg ha⁻¹ (MACEDO et al., 2008), que corresponde à taxa média de aplicação de 0,03 kg ha⁻¹ ano⁻¹ durante o ciclo de 6 anos da cultura (Tabela 2). Por outro lado, em áreas de cana-de-açúcar onde o sistema de colheita é o mecanizado sem queima (S1, S2 e S3), os níveis de infestação por pragas de solo têm aumentado com a deposição de resíduos vegetais na superfície do solo (MACEDO, 2005). Para esses cenários, foi considerada a dose de 0,16 kg ha⁻¹ de inseticida aplicado tanto no plantio quanto no tratamento de soqueiras (MACEDO et al., 2008), correspondendo à taxa média de aplicação de 0,13 kg ha⁻¹ ano⁻¹ durante o ciclo da cultura (Tabela 2).

Com a conversão do sistema de colheita com queima (S0) para o mecanizado sem queima (S1, S2 e S3), acreditava-se que a deposição da palha na superfície do solo seria suficiente para controlar completamente as plantas daninhas. Entretanto, a deposição da palha no solo tem causado mudanças físicas, químicas e biológicas, que favoreceram o desenvolvimento de algumas espécies de plantas daninhas em canaviais (MACEDO, 2005). Atualmente, os herbicidas têm sido consumidos em quantidades semelhantes tanto em áreas de cana queimada quanto em áreas de cana crua. Sendo assim, considerou-se a aplicação das mesmas doses para todos os cenários, com a dose de 2,2 kg ha⁻¹ de herbicida aplicado no plantio e no tratamento de soqueiras

(MACEDO et al., 2008), resultando na taxa média de aplicação de $1,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ durante o ciclo de 6 anos da cultura (Tabela 2).

3.5 Emissões devido ao uso de diesel (fontes móveis)

As operações agrícolas durante a produção da cana-de-açúcar são responsáveis pelo consumo de grandes quantidades de diesel, especialmente os cenários que envolvem a colheita mecanizada. As estimativas das emissões de gases de efeito estufa (GEE) foram relacionadas às emissões diretas provenientes do consumo de diesel pelo maquinário durante as operações agrícolas de preparo do solo, plantio, tratamento de soqueiras, colheita e transporte da cana-de-açúcar para a usina. As emissões associadas às fases de extração, processamento e distribuição do diesel também foram consideradas nas estimativas. Os dados utilizados nos cálculos foram baseados no consumo médio anual de todas as operações agrícolas envolvidas no manejo da cana-de-açúcar durante o ciclo de 6 anos, e estão detalhados na Tabela 3.

As emissões diretas de CO_2 , CH_4 e N_2O foram estimadas de acordo com a metodologia do IPCC (2006). Os fatores de emissão aplicados para o CO_2 , CH_4 e N_2O foram: $74.100 \text{ kg CO}_2 \text{ TJ}^{-1}$, $4,15 \text{ kg CH}_4 \text{ TJ}^{-1}$ e $28,6 \text{ kg N}_2\text{O} \text{ TJ}^{-1}$, respectivamente. Para determinar o fator de emissão, a densidade do diesel foi considerada como sendo 852 g L^{-1} , com o consumo específico de 195 g kWh^{-1} (DE FIGUEIREDO & LA SCALA, 2011). As emissões de GEE relacionadas às fases de extração, processamento e distribuição do diesel foram consideradas como sendo $0,581 \text{ kg CO}_2\text{eq L}^{-1}$ de diesel (MACEDO et al., 2008).

Tabela 3. Descrição das operações agrícolas específicas e consumo de óleo diesel (L ha⁻¹) para cada estágio de produção da cana-de-açúcar.

| Operações agrícolas | | S0 | S1 | S2 | S3 |
|---|---|--------------------|--------|--------|--------|
| | | L ha ⁻¹ | | | |
| Preparo do solo e plantio | Destruição química da soqueira | - | - | 1,60 | - |
| | Destruição mecânica da soqueira | 11,09 | 11,09 | - | 11,09 |
| | Sistematização do terreno | 30,00 | 30,00 | 30,00 | 30,00 |
| | Grade pesada | 21,23 | 21,23 | - | - |
| | Aplicação de calcário | 3,73 | 3,73 | 3,73 | 3,73 |
| | Aplicação de gesso | 3,73 | 3,73 | 3,73 | 3,73 |
| | Subsolagem | 26,00 | 26,00 | 26,00 | 26,00 |
| | Grade média | 21,23 | 21,23 | - | - |
| | Grade niveladora | 9,38 | 9,38 | - | - |
| | Aplicação da torta de filtro | 9,60 | 9,60 | 9,60 | 9,60 |
| | Semeadura <i>Crotalaria juncea</i> L. | - | - | - | 4,18 |
| | Sistema "Para-Choque" + sulcador/adubador | - | - | - | 9,13 |
| | Sulcação e adubação | 13,64 | 13,64 | - | - |
| | Distribuição das mudas | 6,67 | 6,67 | - | 6,67 |
| | Fecham. sulco e aplic. inseticida | 2,67 | 2,67 | - | 2,67 |
| | Plantio mecanizado | - | - | 25,00 | - |
| | Aplicação de herbicida | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 1,60 |
| Quebra meio | 6,15 | 6,15 | 6,15 | 6,15 | |
| Total (1) | | 166,72 | 166,72 | 107,41 | 114,55 |
| Tratamento de soqueiras | Enleiramento da palha | - | 2,67 | - | - |
| | Adubação | 7,08 | 7,08 | 7,08 | 7,08 |
| | Vinhaça (transp. + aplic.) | 7,41 | 7,41 | 7,41 | 7,41 |
| | Aplicação de herbicida | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 1,60 |
| | Aplicação de inseticida | - | 1,60 | 1,60 | 1,60 |
| Total (2) | | 16,09 | 20,36 | 17,69 | 17,69 |
| Equipamento de colheita | Colhedora | - | 74,00 | 74,00 | 74,00 |
| | Carregamento | 12,70 | - | - | - |
| | Reboque julieta/transb. | - | 21,20 | 21,20 | 21,20 |
| | Transporte trucks | 82,00 | 82,00 | 82,00 | 82,00 |
| Total (3) | | 94,70 | 177,20 | 177,20 | 177,20 |
| Consumo médio anual (L ha⁻¹)* | | 117,43 | 189,03 | 177,36 | 178,55 |

S0: Colheita queimada com preparo convencional; S1: Colheita crua com preparo convencional; S2: Colheita crua com preparo reduzido; S3: Colheita crua com preparo reduzido e introdução de rotação de cultura com *Crotalaria juncea* L..

*Média para o ciclo de 6 anos da cana-de-açúcar. Adaptado de MACEDO et al. (2004).

3.6 Acúmulo de carbono no solo

O método da estimativa é baseado nas variações dos estoques de C orgânico do solo (COS) em um período finito, de acordo com as mudanças no manejo agrícola da cana-de-açúcar; nesse caso, a entrada de resíduos da cultura pela colheita mecanizada sem queima e a adoção de práticas agrícolas conservacionistas (WANG et al., 2010). O período de tempo padrão considerado para as variações dos estoques de C foi de 20 anos, e as práticas de manejo foram consideradas influenciar os estoques na camada de 0-30 cm de profundidade (IPCC, 2006). GALDOS et al. (2010) compilaram dados da literatura sobre os estoques de carbono em áreas de cana-de-açúcar sob o sistema de colheita queimada no Brasil, e encontraram valores variando de 28,8 a 59 t C ha⁻¹ em solos arenosos e de 44,4 a 69,8 t C ha⁻¹ em solos argilosos, ambos na camada de 0-30 cm. Estudos recentes realizados por PINHEIRO et al. (2010) demonstraram que os estoques de carbono em áreas de cana-de-açúcar sob o sistema de colheita queimada são de 10,9 t C ha⁻¹ na camada de 0-10 cm e de 43,5 t C ha⁻¹ na camada de 0-40 cm.

Para determinar as estimativas das variações que ocorrem nos estoques de carbono do solo após a conversão das áreas de cana-de-açúcar do cenário S0 para S1, S2 e S3, considerou-se como referência o estoque de carbono conservador de 44 t C ha⁻¹ na camada de 0-30 cm para o cenário S0. Além disso, convencionou-se que as práticas de manejo nos cenários de produção fossem mantidas por um período de 20 anos, sendo as estimativas dos estoques de carbono expressas em termos de kg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹.

De acordo com a metodologia do IPCC (2006), os dados específicos de manejo devem ser obtidos e classificados em sistemas de manejo agrícolas apropriados (por exemplo, cultivo de baixa, média e alta entrada de resíduos), incluindo as práticas de preparo do solo (convencional, reduzido e plantio direto), sendo esses parâmetros estratificados posteriormente de acordo com o clima da região e o tipo de solo. Como este estudo objetivou comparar o balanço das emissões de GEE, considerou-se que os cenários de produção foram cultivados sobre solos arenosos, que são os solos mais comuns em áreas de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, Brasil (PRADO, 2005).

Além disso, o regime climático do Estado de São Paulo utilizado para atribuir o fator de mudança nos estoques de C (F_I e F_{MG}) foi caracterizado como tropical úmido.

Em experimentos de campo em que a produção de biomassa de variedades de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo foi estudada, RONQUIM (2007) relatou que a produtividade de resíduos da cultura variou de 12,5 a 24,9 t ha⁻¹ de matéria seca, com o conteúdo de carbono nesses resíduos próximo a 42% (TRIVELIN et al., 1995). Dessa forma, para uma produtividade de 81 t ha⁻¹ ano⁻¹ de colmos de cana-de-açúcar (CONAB, 2011b), considerou-se a deposição média de 15 t ha⁻¹ ano⁻¹ de matéria seca na superfície do solo nos cenários S1, S2 e S3. Portanto, o fator padrão de mudança nos estoques de carbono (F_I) relacionado à deposição de grandes quantidades de resíduos na superfície do solo foi considerado como sendo 1,11 (11%) em 20 anos (IPCC, 2006).

A adoção da estratégia de preparo reduzido anual (S2 e S3) em relação ao preparo convencional (S0 e S1) pode resultar no aumento de 15% nos estoques de carbono do solo na camada de 0-30 cm de profundidade durante o período de 20 anos (IPCC, 2006). Entretanto, considerando um ciclo de cultivo de 6 anos da cultura, aproximadamente três períodos de preparo do solo ocorreriam em 20 anos. Dessa forma, o fator padrão de mudança nos estoques de carbono (F_{MG}) associado ao tipo de preparo do solo na reforma do canavial foi considerado como sendo 1,0225 (2,25%) em 20 anos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Balanço de GEE considerando-se o ciclo de 6 anos da cana-de-açúcar

As estimativas do balanço das emissões totais de GEE do setor agrícola e fontes móveis para a cultura da cana-de-açúcar (em kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹) estão apresentadas na Tabela 4, levando em consideração o potencial de acúmulo de carbono no solo. As estimativas apontaram para as emissões totais de GEE da ordem de 2.651,9 e 1.428,3 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ nos cenários S0 e S1, respectivamente. Quando o sistema de colheita queimada (S0) é convertido para o sistema de colheita sem queima (S1), a emissão de 46,1% (1.223,6 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹) pode ser evitada.

Tabela 4. Estimativa do balanço das emissões totais de GEE para os cenários de produção da cana-de-açúcar (em kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹), considerando as fontes de emissão e o potencial de acúmulo de carbono no solo.

| Fontes de emissão (kg CO ₂ eq ha ⁻¹ ano ⁻¹) | S0 | S1 | S2 | S3 |
|---|---------|---------|---------|---------|
| Fertilizante N sintético | 780,4 | 983,9 | 983,9 | 672,5 |
| Vinhaça | 196,2 | 196,2 | 196,2 | 196,2 |
| Torta de filtro | 116,8 | 116,8 | 116,8 | 116,8 |
| Resíduos da cana-de-açúcar | - | 57,4 | 57,4 | 57,4 |
| Resíduos da <i>Crotalaria juncea</i> L. | - | - | - | 191,0 |
| Queima de resíduos | 883,6 | - | - | - |
| Calagem | 162,2 | 162,2 | 162,2 | 162,2 |
| Aplicação de defensivos | 46,6 | 49,7 | 49,7 | 49,7 |
| Óleo diesel | 466,1 | 750,2 | 703,9 | 708,6 |
| Sub-total | 2.651,9 | 2.316,4 | 2.270,1 | 2.154,4 |
| Acúmulo de carbono no solo | - | 888,1 | 1.089,8 | 1.089,8 |
| Total | 2.651,9 | 1.428,3 | 1.180,3 | 1.064,6 |
| Diferença (%)* | - | 46,1 | 55,5 | 59,9 |

*Redução (%) das emissões de GEE em relação ao cenário S0.

A adoção do sistema de colheita mecanizada sem queima com o preparo reduzido do solo na reforma do canavial (S2) resultou em emissões totais de GEE de 1.180,3 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, evitando aproximadamente 55,5% (1.471,6 kg CO₂eq ha⁻¹

ano⁻¹) de emissões quando comparado ao cenário S0. Além disso, o cenário em que foi considerada a introdução da cultura fixadora de N durante o período de reforma (S3) resultou em emissões totais de GEE de 1.064,6 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, correspondendo à redução das emissões de aproximadamente 59,9% (1.587,3 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹) quando comparado ao cenário S0.

Na Figura 3 são apresentadas as estimativas das emissões de gases de efeito estufa (em kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹) para cada uma das fontes do setor agrícola, nos quatro cenários de produção. De acordo as estimativas, os fertilizantes N sintéticos e o consumo de diesel durante as operações agrícolas foram responsáveis pelas maiores emissões de GEE nos cenários S1, S2 e S3. Em contrapartida, no cenário S0, as maiores emissões de GEE foram provenientes da aplicação de fertilizantes N sintéticos e da queima de resíduos na pré-colheita da cana-de-açúcar.

Para o cenário de produção S0, a aplicação média de 76,7 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de fertilizante N sintético durante o ciclo de 6 anos da cultura resultou na emissão de GEE de aproximadamente 780,4 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4). As emissões diretas e indiretas de N₂O associadas à aplicação de fertilizante sintético foram de 475,9 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto as fases de produção e distribuição do fertilizante sintético foram responsáveis pela emissão de 304,5 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹.

Com a conversão da colheita manual com queima (S0) para o sistema mecanizado sem queima (S1), maiores quantidades de fertilizantes sintéticos (30%) foram aplicadas durante o tratamento de soqueiras (TRIVELIN & VITTI, 2005), resultando, portanto, na aplicação média de 96,7 kg N ha⁻¹ ano⁻¹. Esse aumento foi responsável por emissões de 983,9 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4), sendo 600,0 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ provenientes das emissões diretas e indiretas de N₂O no solo e 383,9 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ relacionadas às fases de produção e distribuição do fertilizante sintético. Visto que os cenários de produção S1 e S2 se diferem somente em relação ao preparo do solo durante as operações agrícolas de reforma (convencional e reduzido), as quantidades de insumos agrícolas aplicados nesses sistemas foram consideradas iguais. No entanto, a aplicação de fertilizante N no cenário S2 também resultou na

emissão de 983,9 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4), correspondendo aproximadamente a 43% das emissões totais de GEE nesse cenário.

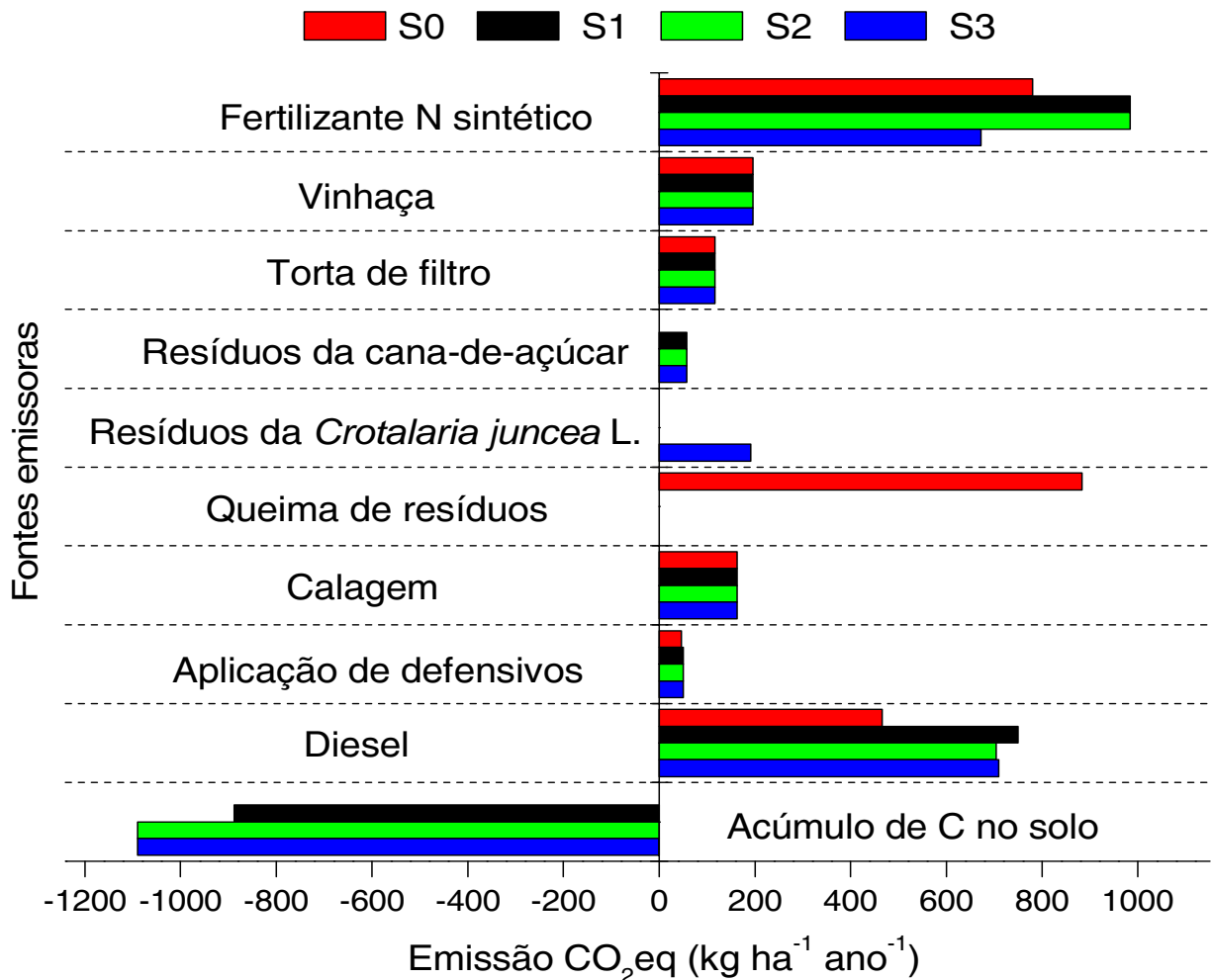


Figura 3. Estimativas das emissões de GEE (em kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹) do setor agrícola, considerando o acúmulo de carbono no solo para cada cenário de produção de cana-de-açúcar (S0: Sistema de colheita manual queimada com preparo convencional; S1: Sistema de colheita mecanizada crua com preparo convencional; S2: Sistema de colheita mecanizada crua com preparo reduzido; S3: Sistema de colheita mecanizada crua com preparo reduzido e introdução de rotação com *Crotalaria juncea* L.).

Baseando-se em uma revisão de literatura, LISBOA et al. (2011) encontraram que o uso de fertilizantes nitrogenados na produção de bioetanol da cana-de-açúcar

representou aproximadamente 40% do total das emissões de GEE. Esse resultado é consistente com as estimativas apresentadas para os cenários de produção S1 e S2. Entretanto, estudos de longa duração demonstraram que pequenas reduções na aplicação de fertilizantes N são possíveis quando o sistema de colheita mecanizado é adotado por um longo período (mais de 15 anos). Essas reduções não são possíveis durante os primeiros 6 anos de conversão (ROBERTSON & THORBURN, 2007). Em longo prazo, a adoção do sistema de colheita mecanizada crua (S1, S2 e S3) pode resultar em reduções ainda maiores nas emissões de GEE provenientes do uso de fertilizantes nitrogenados.

Os resultados apresentados neste estudo indicam que as variações nas quantidades de fertilizantes nitrogenados aplicados em áreas de cana-de-açúcar com intuito de aumentar a produtividade resultam em maiores emissões de N₂O do solo. Evidências científicas apontaram que a eficiência na adubação nitrogenada por meio do uso de culturas fixadoras de N como alternativa ao nitrogênio sintético, assim como evitar a aplicação excessiva de N no solo, pode mitigar substancialmente as emissões de N₂O na agricultura (ROBERTSON & GRACE, 2004; MACLEOD et al., 2010; PARK et al., 2010). De acordo com COSTA et al. (2008), as plantas leguminosas podem reduzir as emissões de N₂O pois liberam o nitrogênio de forma gradual em relação aos fertilizantes minerais. Além disso, a entrada de nitrogênio no solo pela fixação biológica é parte de um processo natural, ao contrário dos processos artificiais utilizados na produção de fertilizantes sintéticos, que demandam alto gasto energético (DÖBEREINER et al., 2000; ZENTNER et al., 2004; COSTA et al., 2009).

Por ocasião da reforma do canavial com a introdução da rotação com *Crotalaria juncea* L. (cenário S3), a taxa de aplicação de fertilizante N sintético foi reduzida para 66,1 kg N ha⁻¹ ano⁻¹, que corresponde à emissão de 672,5 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4), sendo 410,1 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ proveniente das emissões de diretas e indiretas de N₂O do solo e 262,4 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ associados às fases de produção e distribuição do fertilizante sintético. As estimativas apresentadas neste estudo demonstram que a introdução da *Crotalaria juncea* L. (cenário S3) durante o ano de reforma pode resultar em emissões evitadas de 311,4 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4)

quando comparado aos cenários S1 e S2. Esse valor é similar aos estimados por MACLEOD et al. (2010), que encontrou um potencial de mitigação estimado de aproximadamente $500 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, quando a fixação biológica é utilizada como fonte de nitrogênio.

Os subprodutos da fabricação de açúcar e álcool utilizados em áreas de cana-de-açúcar como fertilizantes orgânicos resultaram em emissões de GEE de aproximadamente 196,2 e 116,8 $\text{kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ associados à aplicação de vinhaça e torta de filtro, respectivamente (Tabela 4). Entretanto, as emissões de GEE relacionadas aos compostos orgânicos foram equivalentes entre os cenários de produção, visto que foram consideradas as mesmas taxas de aplicação de vinhaça e torta de filtro.

No setor agrícola, a queima da palha na pré-colheita em áreas de cana-de-açúcar (cenário S0) é considerada como importante fonte de emissão de gases de efeito estufa (GEE) durante a produção da cultura. Tais áreas de cana são responsáveis por 98% das emissões de GEE provenientes da queima de resíduos agrícolas no Brasil (LIMA, 1999). Embora a prática da queima tenha sido reduzida durante o período de 2006 a 2008 (AGUIAR et al., 2009), na safra 2010/2011, 44,4% das áreas de cana-de-açúcar foram colhidas sob o sistema de colheita queimada, demonstrando que a prática da queima é amplamente adotada (AGUIAR et al., 2011).

As estimativas apontaram que a queima da palha na pré-colheita da cana-de-açúcar (S0) resultaram em emissões de GEE de aproximadamente $883,6 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 4), correspondendo a 33% do total das emissões de GEE no cenário S0. Conforme relatado por CERRI et al. (2009), a queima de resíduos agrícolas no Brasil, principalmente da cana-de-açúcar, foi responsável pelas emissões de GEE de 4,0 Mt CO_2eq no ano 2000. Aplicando a estimativa das emissões de GEE provenientes da queima de resíduos da cana-de-açúcar ($883,6 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), em uma área de 2,10 milhões de hectares colhidos com queima no Estado de São Paulo, os resultados apontam para as emissões de GEE de 1,86 Mt $\text{CO}_2\text{eq ano}^{-1}$. Esse resultado é comparável aos estimados por CERRI et al. (2009), já que o Estado de São Paulo é

responsável por aproximadamente 60% da área total cultivada com cana-de-açúcar no Brasil (CONAB, 2011b).

Quando a colheita mecanizada sem queima da cana-de-açúcar é realizada, a deposição média de palha na superfície do solo, considerado aqui como $15 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de matéria seca, resulta na emissão de GEE (na forma de N_2O) equivalente a $57,4 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 4) nos cenários de produção S1, S2 e S3. As emissões de GEE relacionadas à mineralização dos resíduos depositados na superfície do solo pela colheita mecanizada ($57,4 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) corresponderam a 6,5% das emissões provenientes da colheita com queima ($883,6 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Nesse contexto, o carbono que seria emitido durante a queima do canavial pode ser mantido na palha e possivelmente na matéria orgânica do solo, permitindo que aproximadamente 8 milhões de hectares cultivados com cana-de-açúcar no Brasil (CONAB, 2011b) contribuam na mitigação do aquecimento global.

Em relação ao cenário S3, as estimativas apontaram para a emissão adicional de $191,0 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 4) proveniente da mineralização dos resíduos da *Crotalaria juncea* L. na renovação do canavial. Entretanto, vários estudos demonstraram que o uso de culturas leguminosas como adubo verde não afetaram significativamente as emissões de N_2O do solo, sendo apresentados fatores de emissão menores do que aqueles sugeridos pelos métodos do IPCC (2006) (JANTALIA et al., 2008; BARTON et al., 2011). Pesquisas complementares são necessárias para aperfeiçoar a contribuição dos resíduos das leguminosas nos fluxos adicionais de N_2O .

A aplicação de calcário também é considerada uma importante fonte de emissão de GEE no setor agrícola, em que a aplicação de 2 t ha^{-1} de calcário dolomítico na reforma do canavial resultou na emissão de GEE de $162,2 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 4), sendo $158,9 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ relacionados à aplicação do calcário e $3,3 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ provenientes do processo de produção do calcário. Conforme apresentado na Figura 3, as emissões de GEE da aplicação de calcário foram equivalentes para os cenários estudados, visto que foi adotada a mesma taxa de aplicação.

Quanto as emissões de GEE referentes à produção de defensivos agrícolas utilizados no manejo da cana-de-açúcar, como herbicidas e inseticidas, as estimativas apontaram para emissões de 46,6 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4) em áreas de cana colhidas manualmente com queima (S0). Por outro lado, o uso de defensivos em áreas de cana-de-açúcar colhidas mecanicamente sem queima (S1, S2 e S3) foram responsáveis por emissões correspondentes a 49,7 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4). Esse aumento nas emissões de GEE durante o ciclo de 6 anos é devido ao maior consumo de inseticidas em áreas de colheita mecanizada crua (MACEDO, 2005).

Uma fonte secundária de emissão de GEE (~32%) apresentada nas estimativas, especialmente nos cenários S1, S2 e S3, é o consumo de diesel pelo maquinário durante as operações agrícolas de plantio, tratamento de soqueiras, colheita mecanizada e transporte da cana-de-açúcar até a usina. O cenário S0 apresentou o menor consumo de diesel, com a média anual de 117,4 L ha⁻¹ durante o ciclo da cultura, que corresponde à emissão de GEE de aproximadamente 466,1 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4), sendo 397,9 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ relacionados à queima do combustível e 68,2 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ provenientes da extração, processamento e distribuição do diesel.

Ao adotar a colheita 100% mecanizada no cenário S1, com colhedoras que consomem em média 74L ha⁻¹ (Tabela 3), o consumo médio anual passou a ser 189,0 L ha⁻¹, que resultou na emissão de 750,2 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4), sendo 640,4 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ provenientes da queima do combustível e 109,8 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ devido à extração, processamento e distribuição do diesel. PAULA et al. (2010) estimaram que o consumo de diesel durante as operações agrícolas no processo produtivo da cana-de-açúcar (plantio, cultivo, colheita mecânica e transporte até a usina) foi responsável por um passivo ambiental de 554,00 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, sem considerar as emissões de GEE provenientes da extração, processamento e distribuição do diesel. De acordo com KOGA et al. (2003), as emissões de CO₂ provenientes do consumo de diesel podem ser reduzidas de 15 a 29% em sistemas de manejo alternativos, como o preparo reduzido do solo (cenários S2 e S3), que resulta em maior economia de combustível.

DE FIGUEIREDO & LA SCALA (2011) relataram que a adoção do preparo reduzido como alternativa ao preparo convencional na reforma do canavial, em que algumas operações de preparo são evitadas, pode reduzir o consumo de diesel e, consequentemente, mitigar as emissões de GEE. Essa abordagem é consistente com as estimativas apresentadas neste estudo, em que a adoção do preparo reduzido durante a reforma do canavial no cenário S2 resultou no consumo médio anual de 177,4 L ha⁻¹ de diesel, que corresponde à emissão de 703,9 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4), sendo 600,8 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ proveniente da queima do combustível e 103,1 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ devido à extração, processamento e distribuição do diesel. No cenário de produção S3, em que foi mantido o preparo reduzido do solo, porém foi considerada a introdução da rotação com *Crotalaria juncea* L. na renovação do canavial, o consumo médio anual de diesel pelo maquinário passou a ser 178,6 L ha⁻¹, que corresponde à emissão de 708,6 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4), sendo 604,8 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ devido à queima do combustível e 103,8 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ proveniente da extração, processamento e distribuição do diesel.

O potencial de acúmulo de carbono no solo tem sido amplamente relatado como uma das opções mais baratas e eficientes na redução das emissões atmosféricas de GEE (IPCC, 2001). Na Figura 3 são apresentados os valores estimados do potencial de acúmulo de carbono no solo durante o período de 20 anos nos cenários de produção S1, S2 e S3 (valores considerados negativos no balanço). A conversão do sistema de cultivo S0 para S1 (sistema de colheita queimada para mecanizada crua) apresentou o potencial de acúmulo de carbono no solo estimado de aproximadamente 888,1 kg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4) devido à deposição de grandes quantidades de palha na superfície do solo, na qual a cultura da cana-de-açúcar apresenta um conteúdo de carbono na matéria seca de 42% (TRIVELIN et al., 1995). Além disso, a conversão do cenário S1 para S2 resultou no potencial de acúmulo de C da ordem de 201,7 kg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ quando a estratégia de preparo reduzido é praticada durante a renovação do canavial. Quando o cenário S2 é comparado ao S0, essa diferença é ainda maior, indicando um potencial de acúmulo de carbono no solo de 1.089,8 kg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4).

O uso de adubo verde (cenário S3) poderia influenciar o acúmulo de carbono no solo; no entanto, de acordo com a metodologia do IPCC (2006), esse potencial não deveria ser considerado quando o adubo verde for utilizado em sequências de plantio menores que 1/3 (ex., rotação de culturas). Portanto, de acordo com as estimativas o cenário S3 apresentou a mesma taxa de acúmulo de carbono no solo que o S2: um adicional de 1.089,8 kg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4) quando comparado ao cenário S0.

É importante enfatizar que a taxa de acúmulo de carbono no solo é finita, e normalmente convencionou-se que quando as taxas de acúmulo cessam e um novo estado de C estável ocorre, o carbono do solo atingiu a saturação (SIX et al., 2002). Estimar a duração do tempo de acúmulo de C no solo é uma tarefa difícil, visto que na maioria dos experimentos de longa duração o carbono e a densidade do solo não são quantificados em tempos regulares (pelo menos a cada 5 anos) ao longo do experimento (WEST & SIX, 2007). Dessa forma, foi considerado nos cálculos das estimativas taxas de acúmulo de C no solo para o período de 20 anos (IPCC, 2006).

Vários estudos demonstraram a tendência de acúmulo de carbono no sistema de manejo da cana crua. O aumento nos estoques, entretanto, é condicionado por fatores como o tempo de adoção do sistema de colheita sem queima, a textura do solo, o clima e o revolvimento do solo durante a reforma (GALDOS et al., 2009). Em estimativas para determinar os estoques de carbono em áreas de cana-de-açúcar no Brasil, CERRI et al. (2011) concluíram que os solos argilosos apresentaram a taxa anual de acúmulo de carbono aproximadamente três vezes maior do que em solos arenosos. No entanto, a condição climática e a classe textural não influenciaram o acúmulo de carbono no solo neste estudo, pois foram consideradas as mesmas condições de clima e textura para os cenários de produção.

A intensidade de preparo do solo durante a reforma do canavial é um importante fator no acúmulo de carbono no solo; a adoção de práticas agrícolas como a aração e a gradagem induz a perdas de carbono no solo pelas emissões de CO₂ devido não somente ao aumento da aeração do solo, mas também pela quebra de agregados, que expõem o carbono lábil à atividade microbiana (SÁ et al., 2001; LA SCALA et al., 2009). LA SCALA et al. (2006) demonstraram que, em poucos dias após o preparo

convencional, a perda de carbono em termos de emissões de CO₂ pode ser tão alta quando às taxas de sequestro anuais relatadas em áreas de cana-de-açúcar. Portanto, este estudo destacou a importância de considerar o preparo reduzido do solo durante os períodos de reforma, com o objetivo de manter os estoques de C no solo e evitar perdas.

Em medições locais, GALDOS et al. (2009) encontraram um aumento anual dos estoques de carbono de 4.400 kg CO₂ ha⁻¹ nos primeiros 20 cm de profundidade após 8 anos sob o sistema de colheita mecanizada crua, sem considerar as operações de preparo do solo durante a reforma do canavial. Avaliando as áreas de cana-de-açúcar sob o sistema de colheita mecanizada crua durante o período de 12 anos, FELLER (2001) relataram um acúmulo anual de carbono no solo de 1.173,3 kg CO₂ ha⁻¹ na camada de 0-20 cm de profundidade, mesmo considerando as operações de preparo durante a reforma do canavial. Os níveis de acúmulo de carbono no solo relatados por FELLER (2001) são bem inferiores do que aqueles observados por GALDOS et al. (2009), porém são superiores aos níveis apresentados neste estudo, que foram: 888,1 kg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ para o cenário S1 e 1.089,8 kg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ para os cenários S2 e S3 (Tabela 4).

Na Figura 4 são apresentadas as estimativas das emissões líquidas totais referentes ao balanço de gases de efeito estufa (em ton CO₂eq ha⁻¹), considerando o ciclo de cultivo completo de 6 anos para cada cenário de produção estudado. As estimativas apontaram que o cultivo da cana-de-açúcar sob o sistema de colheita com queima e o preparo convencional do solo durante o período de reforma (S0) resultou no balanço total de GEE de 15,9 t CO₂eq ha⁻¹ em 6 anos. Considerando a taxa média anual de acúmulo de C no solo de 888,1 kg CO₂ ha⁻¹, devido à deposição de palha na superfície do solo pela colheita mecanizada sem queima (S1), o balanço total de GEE foi reduzido para 8,6 t CO₂eq ha⁻¹, evitando aproximadamente 46% (7,3 t CO₂eq ha⁻¹) de emissões comparado ao cenário S0. Quando o preparo reduzido do solo foi adotado na reforma do canavial (S2), o resultado para o balanço total das emissões de GEE foi menor ainda, correspondendo a 7,1 t CO₂eq ha⁻¹ em 6 anos. Portanto, a conversão de S0 para S2 resultou em reduções de 55% (8,8 t CO₂eq ha⁻¹) das emissões de GEE.

Além disso, a introdução da *Crotalaria juncea* L. e do preparo reduzido do solo durante a reforma do canavial (S3) resultou em um novo balanço de emissões de GEE, equivalente a 6,4 t CO₂eq ha⁻¹, evitando aproximadamente 60% (9,5 t CO₂eq ha⁻¹) de emissões de GEE em relação ao cenário S0.

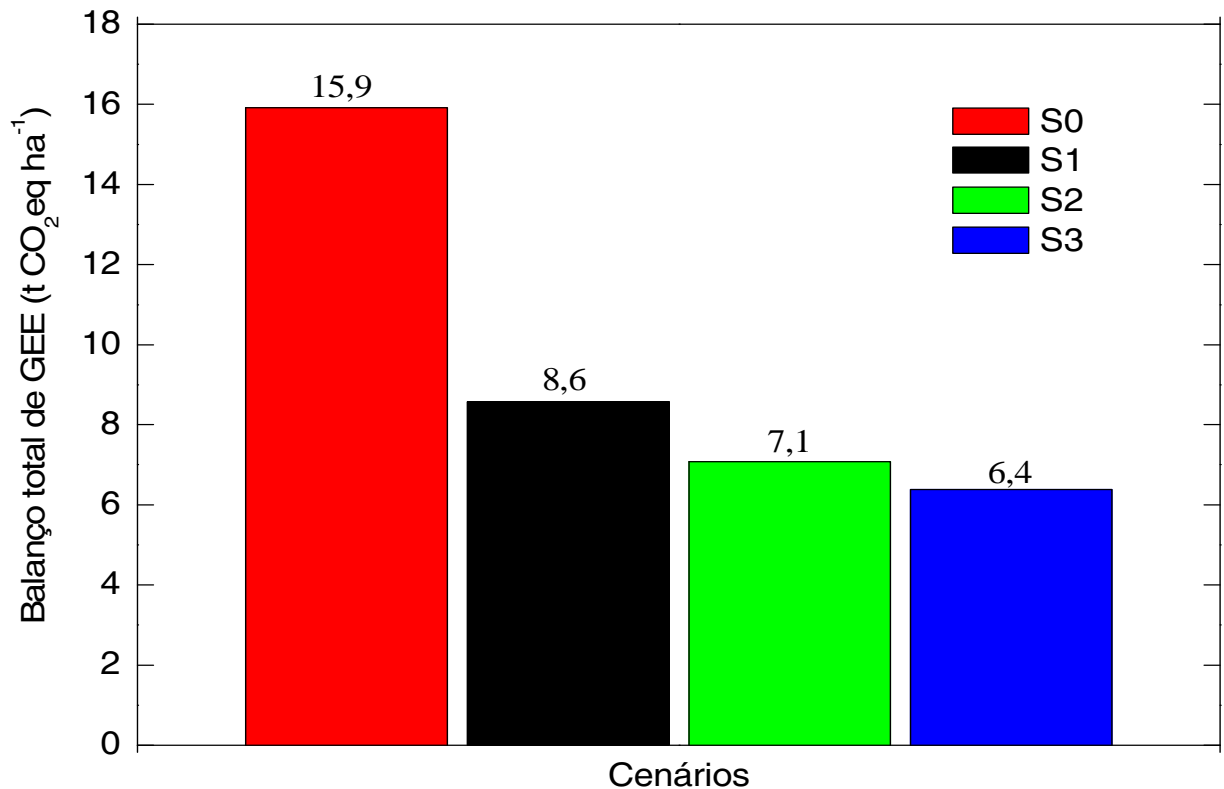


Figura 4. Emissões líquidas totais referentes ao balanço de gases de efeito estufa (em t CO₂eq ha⁻¹), considerando o ciclo completo de 6 anos para cada cenário de produção da cana-de-açúcar (S0, S1, S2 e S3).

4.2 Potencial de mitigação de GEE no período de 2012 a 2041

Na Figura 5 são apresentadas as estimativas para o potencial técnico de mitigação de GEE acumulado no período de 2012 a 2041, devido à possibilidade de conversão das áreas de cana-de-açúcar colhidas manualmente com queima (S0) no Estado de São Paulo durante a safra 2010/2011 (2,10 Mha). Considerando a taxa anual de conversão de 210.000 hectares de 2011 a 2020, seja para o cenário S1, S2 ou S3,

as estimativas apontaram para o potencial de mitigação de GEE acumulado de aproximadamente 56,1; 67,4 e 72,6 Mt CO₂eq, respectivamente. Ao longo do período de 2012 a 2041, as emissões evitadas de GEE variaram de acordo com o cenário de manejo adotado, em que o cenário S3 apresentou ao final do período estudado a emissão evitada acumulada adicional de 16,5 e 5,2 Mt CO₂eq quando comparado aos cenários S1 e S2, respectivamente.

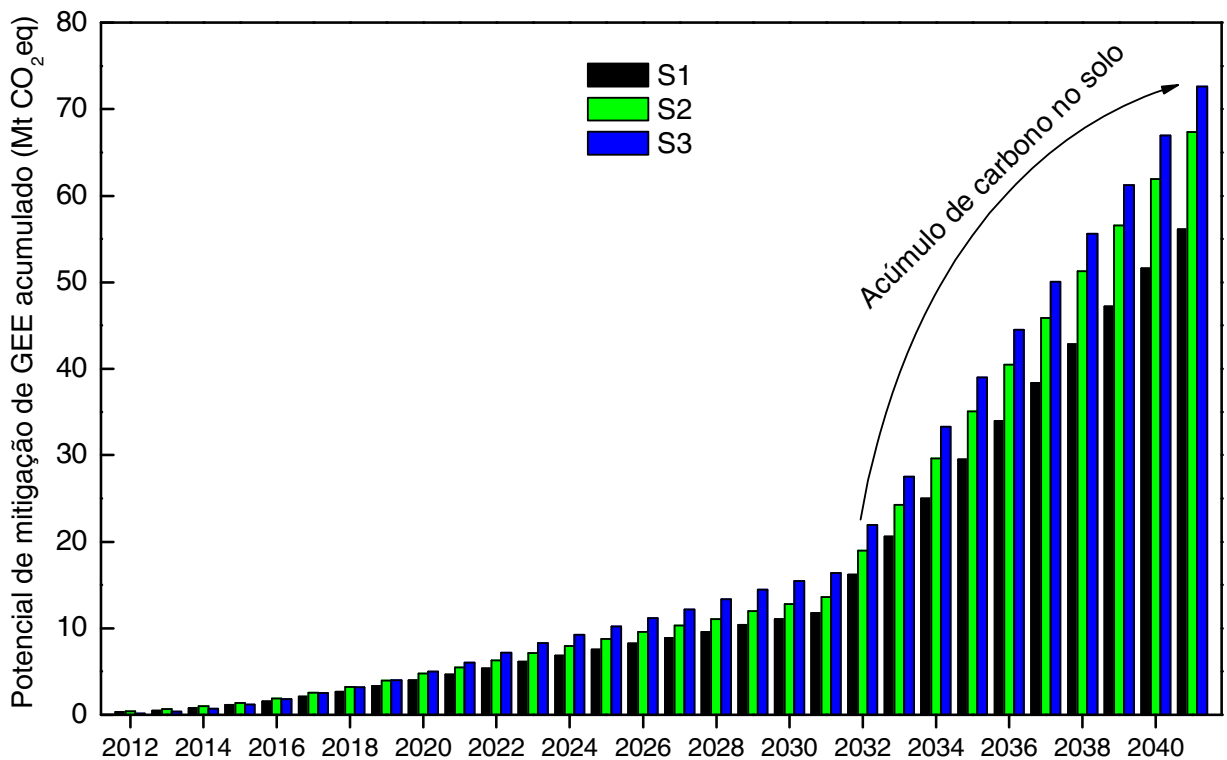


Figura 5. Potencial de mitigação de GEE acumulado durante o período de 2012 a 2041, por ocasião da conversão das áreas de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo sob o sistema de colheita com queima para a colheita mecanizada crua (S1), considerando o preparo reduzido do solo (S2) e a rotação com *Crotalaria juncea* L. na reforma do canavial (S3).

De acordo com a Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MCT, 2010), no ano de 2005 o Brasil foi responsável por emissões de GEE da ordem de 2.192,6 Mt CO₂eq, sendo o Estado de São Paulo responsável por 139,8 Mt CO₂eq, que corresponde a 6,4% do

total emitido no país (CETESB, 2011). Em longo prazo (2041), a conversão das áreas de cana-de-açúcar colhidas com queima durante a safra 2010/2011 pode resultar na mitigação que varia de 40,1 a 51,9% das emissões totais de GEE no Estado de São Paulo, variações essas que dependem do cenário de manejo adotado.

A Lei Federal Nº 12.187/2009 (BRASIL, 2009), que institui a Política Nacional sobre Mudanças Climáticas, determina que o Brasil adote como compromisso voluntário nacional, estratégias de mitigações das emissões de GEE visando reduzir entre 36,1 e 38,9% suas emissões projetadas até 2020, em relação a 2005. De acordo com a Lei Estadual Nº 13.798/2009 (SÃO PAULO, 2009), que institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas, o Estado de SP assumiu o compromisso frente aos desafios das mudanças climáticas globais em reduzir as emissões de GEE em 20% até o ano de 2020, tendo como base os valores relativos a 2005. Nesse contexto, a adoção de práticas de manejo que levam à redução das emissões de GEE em áreas de cana-de-açúcar pode contribuir consideravelmente para alcançar parte dos objetivos estabelecidos pela lei estadual e federal, além de favorecer a produção de açúcar e etanol no Brasil de forma mais sustentável perante o mercado internacional.

5 CONCLUSÃO

Os cenários propostos neste estudo para diferentes manejos agrícolas da cana-de-açúcar podem resultar em reduções consideráveis no balanço de emissões de GEE durante a produção da cultura. As estimativas demonstraram um potencial de mitigação de GEE de 1.223,6; 1.471,6 e 1.587,3 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ quando as áreas de cana-de-açúcar são convertidas do cenário de manejo S0 para S1, S2 e S3, respectivamente.

Dentre os insumos agrícolas utilizados na produção da cana-de-açúcar, a adubação nitrogenada sintética foi responsável pelas maiores emissões de GEE provenientes do setor agrícola em todos os cenários de manejo. O uso de diesel durante as operações agrícolas apresentou a segunda maior fonte de emissão de GEE para os cenários S1, S2 e S3, enquanto no cenário S0 a segunda maior fonte de emissão de GEE foi proveniente da queima de resíduos na pré-colheita da cana-de-açúcar.

O potencial de acúmulo de C no solo representou a principal estratégia de mitigação de GEE, sendo superior ao menor consumo de diesel e de fertilizante N sintético proposto para os cenários S2 e S3, respectivamente. Portanto, é importante enfatizar que a adoção de sistemas agrícolas conservacionistas pode favorecer não só o acúmulo de C no solo, mas também o menor consumo de diesel durante as operações agrícolas.

Em longo prazo, a adoção de cenários de manejo conservacionistas (S3) pode resultar no potencial de mitigação das emissões de GEE de aproximadamente 51,9% das emissões totais do Estado de São Paulo em relação ao ano de 2005. Dessa forma, os resultados apresentados nesse estudo podem contribuir e orientar tecnicamente a elaboração de políticas públicas visando à produção agrícola sustentável da cana-de-açúcar no território brasileiro, no sentido de reduzir a taxa nacional de carbono perante a economia global.

6 IMPLICAÇÕES

A conscientização sobre as questões ambientais em médio e longo prazo são imprescindíveis para o desenvolvimento sustentável. A mudança climática é amplamente considerada como um dos maiores desafios para a civilização humana moderna, pois essa tem um profundo impacto socioeconômico e ambiental. É necessário desenvolver um conjunto de estratégias que incluem adaptação, mitigação, desenvolvimento tecnológico e pesquisa para combater a mudança do clima. As perspectivas para mitigação de gases de efeito estufa na agricultura apresentam grande potencial. Porém, as iniciativas atuais sugerem que a identificação sinérgica entre políticas de mudanças climáticas, desenvolvimento sustentável, e melhoria na qualidade do meio ambiente provavelmente levará ao caminho para a realização do potencial de mitigação na agricultura.

Este estudo sugere que melhores práticas de manejo agrícola da cana-de-açúcar, como o aumento na eficiência da adubação nitrogenada, a erradicação da queima na pré-colheita da cultura, e a redução do consumo de diesel durante as operações agrícolas, ainda são necessárias. Destacou-se, portanto, o preparo reduzido do solo e a fixação biológica de nitrogênio que podem reduzir o consumo de diesel e a demanda de fertilizante sintético pelas culturas, respectivamente. Nesse contexto, a formulação de políticas públicas que incentive boas práticas agrícolas, assim como a consorciação da cana-de-açúcar com a produção de alimentos, pode favorecer não só a questão da segurança alimentar, mas também o balanço das emissões de gases de efeito estufa relacionado ao setor sucroalcooleiro.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y. E. Imagens de sensoriamento remoto no monitoramento da colheita da cana-de-açúcar. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, p. 440-451, 2009.

AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; SILVA, W. F.; ADAMI, M.; MELLO, M. P. Remote sensing images in support of environmental protocol: monitoring the sugarcane harvest in São Paulo State, Brazil. **Remote Sensing**, Flagstaff, v. 3, p. 1-22, 2011.

ALEXANDER, M. Mineralization and immobilization of nitrogen. In: ALEXANDER, M. (Ed.). **Introduction to soil microbiology**. 2nd ed. New York: Wiley, 1977. p. 136–247.

ALVES, B. J. R.; BODDEY R. M.; URQUIAGA S. The success of BNF in soybean in Brazil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 252, p. 1-9, 2003.

AMBROSANO, E. J.; TRIVELIN, P. C. O.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G. M. B.; SCHAMMASS, E. A.; MURAOKA, T.; ROSSI, F. ¹⁵N-labeled nitrogen from green manure and ammonium sulfate utilization by the sugarcane ratoon. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p. 361-368, 2011.

ANDREA, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. **Global Biogeochem**, Cycle 15, p. 955-966, 2001.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JR., J.; ÁVILA, A. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 1057-1064, 2004.

BAGGS, E. M.; REES, R. M.; SMITH, K. A.; VINTEN, A. J. A. Nitrous oxide emission from soils after incorporating crop residues. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 16, n. 2, p. 82-87, 2000.

BARRIOS, S.; OUATTARA, B.; STROBL, E. The impact of climatic change on agricultural production: is it different for Africa? **Food Policy**, Guildford, v. 33, n. 4, p. 287-298, 2008.

BARTON, L.; BUTTERBACH-BAHL, K.; KIESE, R.; MURPHY, D. V. Nitrous oxide fluxes from a grain–legume crop (narrow-leafed lupin) grown in a semiarid climate. **Global Change Biology**, Oxford, v. 17, p. 1153-1166, 2011.

BASANTA, M. V.; DOURADO NETO, D.; RICHARD K.; BACCHI, O. O. S.; OLIVEIRA, J. C. M.; TRIVELIN, P. C. O.; TIMM, L. C.; TOMINAGA, T. T.; CORRECHEL, V.; CÁSSARO, F. A. M.; PIRES, L. F.; MACEDO, J. R. Eficiência no uso de nitrogênio em relação aos manejos dos resíduos da cultura de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 2002, Recife. **Anais...** p. 268-275.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 105-112, 1997.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, p. 101-109, 2000.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, p. 237-245, 2006.

BÖRJESSON, P. Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective – What determines this? **Applied Energy**, London, v. 86, p. 589–594, 2009.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 29 dez. 2009. Seção 1, Edição Extra, n. 248-A, p. 109-110.

BREMNER, J. M. Sources of nitrous oxide in soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 49, n. 1/3, p. 7-16, 1997.

CASSMAN, K. G. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 96, p. 5952-5959, 1999.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83-99, 2007.

CERRI, C. C.; MAIA, S. M. F.; GALDOS, M. V.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; BERNOUX M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 831-843, 2009.

CERRI, C. C.; GALDOS, M. V.; MAIA, S. M. F.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; POWLSON, D.; CERRI, C. E. P. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 62, p. 23-28, 2011.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo. São Paulo/SP: Secretaria do Meio Ambiente, 2011. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/geesp/file/docs/inventario_o_sp/Primeiro_Inventario_GEE_WEB_Segunda-Edicao.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2012.

CHEL, A.; KAUSHIK, G. Renewable energy for sustainable agriculture. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 31, p. 91-118, 2011.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, safra 2011/2012, terceiro levantamento, dezembro/2011.** 2011a. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_12_08_11_00_54_08.pdf>. Acesso em: 18 maio 2012.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, safra 2010/2011, terceiro levantamento, janeiro/2011.**

2011b. Disponível em:
<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_01_06_09_14_50_boletim_cana_3o_lev_safra_2010_2011..pdf>, Acesso em: 23 ago. 2011.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, safra 2012/2013, primeiro levantamento, abril/2012.** 2012. Disponível em:
<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_04_10_09_19_04_boletim_de_cana.pdf>. Acesso em: 18 maio 2012.

COSTA, F. S.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C. Emissões de gases de efeito estufa em agroecossistemas e potencial de mitigação. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**, Porto Alegre: Gênese, 2008. p. 545-559.

COSTA, A. R.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. M.; MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDES, T. G.; SILVEIRA, P. M. **Uso do nitrogênio na agricultura e suas implicações na emissão do gás de efeito estufa óxido nitroso (N₂O)**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009. 47p.

DALAL, R. C.; WANG, W. J.; ROBERTSON, G. P.; PARTON, W. J. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 41, n. 2, p. 165-195, 2003.

DE BARROS, R. P.; VIÉGAS, P. R. A.; DA SILVA, T. L. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, p. 341-346, 2010.

DE FIGUEIREDO, E. B.; LA SCALA, N. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 141, n. 1-2, p. 77-85, 2011.

DE OLIVEIRA, M. W.; TRIVELIN, P. C. O.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; MORTATTI, J. Leaching of nitrogen, potassium, calcium and magnesium in a sandy soil

cultivated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 861-868, 2002.

DELGADO, J. A.; GROFFMAN, P.; NEARING, M. A.; GODDARD, T.; REICOSKY, D.; LAL, R.; KITCHEN, N.; RICE, C.; TOWERY, D.; SALON, P. Conservation practices to mitigate and adapt to climate change. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 66, n. 4, p. 118-129, 2011.

DÖBEREINER, J.; BALDANI, V. L. D. REIS, V. M. The role of biological nitrogen fixation to bio-energy programmes in the tropics. In: ROCHA-MIRANDA, C. E. (Ed.). **Transition to global sustainability: the contribution of Brazilian science**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2000. p. 196-208.

EAGLE, A. J.; HENRY, L. R.; OLANDER, L. P.; HAUGEN-KOZYRA, K.; MILLAR, N.; ROBERTSON, G. P. **Greenhouse gas mitigation potential of agricultural land management in the united states: a synthesis of the literature**. Durham: Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, Duke University. 2010. Disponível em: <<http://nicholasinstitute.duke.edu/ecosystem/land/TAGGDLitRev>>. Acesso em: 30 maio 2012.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Adubação – resíduos alternativos**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html>, Acesso em: 23 ago. 2011.

ESCOBAR, L. F. **Emissão de gases de efeito estufa em sistemas de manejo em solo do planalto médio do Rio Grande do Sul**. 2008. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

FAO. **World agriculture: towards 2030/2050**. Rome, 2006.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Conservation Agriculture**. Rome: Agriculture and Consumer Protection Department, 2009. Disponível em: <<http://www.fao.org/ag/ca/>>. Acesso em: 09 maio 2012.

FARRELL, A.; HART, M. What does sustainability really mean? The search for useful indicators. **Environment**, Washington, v. 40, n. 9, p. 4-9, 26-31, 1998.

FELLER, C. **Efeitos da colheita sem queima da cana-de-açúcar sobre a dinâmica do carbono e propriedades do solo**. Piracicaba: Centro de Energia Nuclear na Agricultura/USP, 2001. 150p. (Final Report Fapesp Contract 98/12648-3).

FERREIRA, E. S.; ZOTARELLI, E. M. M.; SALVIATI, L. Efeitos da utilização da torta de filtro na produtividade da cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 1986, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Copersucar, 1986. p. 321-331.

FLESSA, H.; RUSER, R.; DÖRSCH, P.; KAMP, T.; JIMENEZ, M. A.; MUNCH, J. C.; BEESE, F. Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O) from two farming systems in southern Germany. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 91, p. 175-189, 2002.

FOLLETT, R. F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 1-2, p. 77-92, 2001.

GALDOS, M. V.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Soil carbon stocks under unburnt sugarcane in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 153, p. 347-352, 2009.

GALDOS, M. V.; CERRI, C. C.; LAL R.; BERNOUX, M.; FEIGL, B.; CERRI, C. E. P. Net greenhouse gas fluxes in Brazilian ethanol production systems. **Global Change Biology Bioenergy**, Washington, v. 2, p. 37-44, 2010.

GENTILE, R.; VANLAUWE, B.; CHIVENGE, P.; SIX, J. Interactive effects from combining fertilizer and organic residue inputs on nitrogen transformations. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 40, p. 2375-2384, 2008.

GLEICK, P. H.; ADAMS, R. M.; AMASINO, R. M.; ANDERS, E.; ANDERSON, D. J.; ANDERSON, W. W.; ANSELIN, L. E. Climate change and the integrity of science. **Science**, Washington, v. 328, p. 689-690, 2010.

GODFRAY, H. C. J.; PRETTY, J.; THOMAS, S. M.; WARHAM, E. J.; BEDDINGTON, J. R. Linking policy on climate and food. **Science**, Washington, v. 331, p. 1013-1014, 2011.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, Surrey, v. 36, p. 2086-2097, 2008.

HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Impact of changing precipitation patterns on water quality. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 59, p. 51-58, 2004.

HOUGHTON, R. A.; HOBBIE, J. E.; MELLILO, J. M.; MOORE, B.; PETERSON, B. J.; SHAVER, G. R.; WOODWELL, G. M. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO₂ to the atmosphere. **Ecological Monographs**, Lawrence, v. 53, p. 235-262, 1983.

HUANG, H.; VON LAMPE, M.; VAN TONGEREN, F. Climate change and trade in agriculture. **Food Policy**, Guildford v. 36, n. 1, p. S9-S13, 2011.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. In: HOUGHTON, J. T. (Ed.). **Climate change 1994: radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 339p.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. In: WATSON, R. T. (Ed.). **Climate Change 1995: impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses, contribution of working group II to the second assessment report of the IPCC**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 878p.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. In: HOUGHTON, J. T. (Ed.). **Climate change 2001: the scientific basis, contribution of working group I to the third assessment report of the IPCC**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 886p.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. In: EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K. (Ed.). **Guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the national greenhouse gas inventories programme**. Hayama: IGES, 2006. 664p.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. In: SOLOMON, S. (Ed.). **Climate Change 2007: the physical science basis**, contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2007a. 996p.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. In: METZ, B. (Ed.). **Climate change 2007: mitigation of climate change**, contribution of working group III to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2007b. 851p.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. In: PARRY, M. L. (Ed.). **Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability**, contribution of working group II to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2007c. 976p.

JANTALIA, C. P.; SANTOS, H. P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 82, p. 161-173, 2008.

JANZEN, H. H.; BEAUCHEMIN, K. A.; BRUINSMA, Y.; CAMPBELL, C. A.; DESJARDINS, R. L.; ELLERT, B. H.; SMITH, E. G. The fate of nitrogen in agroecosystems: An illustration using Canadian estimates. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 67, p. 85-102, 2003.

JOHNSON, J. M. F.; KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S. Conservation considerations for sustainable bioenergy feedstock production: If, what, where, and how much? **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 65, n. 4, p. 88A-91A, 2010.

KAMINSKI, J. **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. 123p.

KAYGUSUZ, K. Energy and environmental issues relating to greenhouse gas emissions for sustainable development in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 253-270, 2009.

- KHAN, K. S.; GATTINGER, A.; BUEGGER, F.; SCHLOTTER, M.; JOERGENSEN, R. G. Microbial use of organic amendments in saline soils monitored by changes in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 40, p. 1217-1224, 2008.
- KOGA, N.; TSURUTA, H.; TSUJI, H.; NAKANOA, H. Fuel consumption-derived CO_2 emissions under conventional and reduced tillage cropping systems in northern Japan. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 99, p. 213-219, 2003.
- LA SCALA, N.; LOPES, A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red latosol in southern Brasil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 62, p. 163-166, 2001.
- LA SCALA, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G. T. Short-term soil CO_2 emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, p. 244-248, 2006.
- LA SCALA, N.; LOPES, A.; SPOKAS, K.; ARCHER, D.; REICOSKY, D. C. Short-term temporal changes of bare soil CO_2 fluxes after tillage described by first-order decay models. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 60, p. 258-264, 2009.
- LAL, R.; KIMBLE, J. M. Conservation tillage for carbon sequestration. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 49, p. 243-253, 1997.
- LAL, R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 71, p. 145-191, 2001.
- LAL, R.; DELGADO, J. A.; GROFFMAN, P. M.; MILLAR, N.; DELL, C.; ROTZ, A. Management to mitigate and adapt to climate change. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 66, n. 4, p. 276-285, 2011.
- LETTENMAIER, D. P.; MAJOR, D.; POFF, L.; RUNNING, S. Water resources. In: BACKLUND, P.; JANETOS, A.; SCHIMEL, D. (Ed.). **The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources, and biodiversity in the United States**. Washington: Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, 2008. p. 153-186.

LEVINE, J. Global biomass burning: a case study of the gaseous and particulate emissions released to the atmosphere during the 1997 fires in Kalimantan and Sumatra, Indonesia. In: INNES, J.; BENISTON, M.; VERSTRAETE, M. (Ed.). **Biomass burning and its inter-relationships with the climate system**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. v. 3, p. 15-31.

LIMA, M. A.; LIGO, M. A.; CABRAL, M. R.; BOEIRA, R. C.; PESSOA, M. C. P. Y.; NEVES, M. C. **Emissão de gases do efeito estufa provenientes da queima de resíduos agrícolas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1999. 60p.

LIMA, M. A.; ALVES, B. J. R. Vulnerabilidades, impactos e adaptação à mudança do clima no setor agropecuário e solos agrícolas. **CGEE Parcerias Estratégicas**, Brasília, v. 27, p. 73-112, 2008.

LISBOA, C. C.; BUTTERBACH-BAHL, K.; MAUDER, M.; KIESE, R. Bioethanol production from sugarcane and emissions of greenhouses gases – Known and unknowns. **Global Change Biology Bioenergy**, Washington, v. 3, p. 277-292, 2011.

LYBBERT, T. J.; SUMNER, D. A. Agricultural technologies for climate change in developing countries: Policy options for innovation and technology diffusion. **Food Policy**, Guildford, v. 37, p. 114-123, 2012.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V.; SILVA, J. E. A. R. **Balanco das emissões de gases de efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2004. 37p.

MACEDO, I.C. **Sugarcane's energy**: twelve studies on brazilian sugarcane agribusiness and its sustainability. São Paulo: União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, 2005. 195p.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the averages and a prediction for 2020. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v. 9, p. 582–595, 2008.

MACLEOD, M.; MORAN, D.; EORY, V.; REES, R. M.; BARNES, A.; TOPP, C. F. E.; BALL, B.; HOAD, S.; WALL, E.; MCVITTIE, A.; PAJOT, G.; MATTHEWS, R.; SMITH, P.; MOXEY, A. Developing greenhouse gas marginal abatement cost curves for agricultural emissions from crops and soils in the UK. **Agricultural Systems**, Essex, v. 103, p. 198-209, 2010.

MARQUES, T. A.; SASSO, C. G.; SATO, A. M.; SOUZA, G. M. Burning of the sugarcane crop: biomass aspects, soil fertility and CO₂ emissions in atmosphere. **BioScience Journal**, Uberlândia, v. 25, p. 83-89, 2009.

MASCARENHAS, H. A. A.; WUTKE, E. B.; TANAKA, R. T.; CARLINI-GARCIA, L. A.; BOLONHEZI, D. Leguminosas adubos verdes em áreas de renovação de canavial no Estado de São Paulo. **Informações Agronômicas**, São Paulo, n. 124, p. 14-18, 2008.

MATSON, P. A.; NAYLOR, R.; ORTIZ-MONASTERIO, I. Integration of environmental, agronomic, and economic aspects of fertilizer management. **Science**, Washington, v. 280, p. 112-115, 1998.

MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia. Segunda comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima. Brasília/DF: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/326988.html>>. Acesso em: 03 fev. 2012.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.

MUHAMMAD, W.; VAUGHAN, S. M.; DALAL, R. C.; MENZIES, N. W. Crop residues and fertilizer nitrogen influence residue decomposition and nitrous oxide emission from a Vertisol. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 47, p. 15-23, 2010.

NG KEE KWONG, K. F.; DEVILLE, J. Nitrogen leaching from soils cropped with sugarcane under the humid tropical climate of Mauritius, Indian Ocean. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 13, p. 471-474, 1984.

- NORSE, D. Low carbon agriculture: Objectives and policy pathways. **Environment Development**, Chicago, v. 1, p. 25-29, 2012.
- NUNES JÚNIOR, D. Torta de filtro: de resíduo a produto nobre. **Idea News**, Ribeirão Preto, v. 8, n. 92, p. 22-30, 2008.
- NÚÑEZ, S.; MARTINEZ-YRIZAR, A.; BURQUEZ, A.; GARCIA-OLIVA, F. Carbon mineralization in the southern Sonoran Desert. **Acta Oecologica**, Paris, v. 22, p. 269-276, 2001.
- OLIVEIRA, M. W.; TRIVELIN, P. C. O.; PENATTI, C. P.; PICCOLLO, M. C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2359-2362, 1999.
- PANOSSO, A. R. **Variabilidade espacial da emissão de CO₂ e sua relação com propriedades do solo em área de cana-de-açúcar no sudeste do Brasil**. 2011. 107f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2011.
- PARK, S. E.; WEBSTER, T. J.; HORAN, H. L.; JAMES, A. T.; THORBURN, P. J. A legume rotation crop lessens the need for nitrogen fertiliser throughout the sugarcane cropping cycle. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 119, p. 331-341, 2010.
- PARRY, M. L.; ROSENZWEIG, C.; IGLESIAS, A.; LIVERMORE, M.; FISCHER, G. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. **Global Environmental Change**, Guildford, v. 14, p. 53-67, 2004.
- PATTEY, E.; EDWARDS, G. C.; DESJARDINS, R. L.; PENNOCK, D. J.; SMITH, W.; GRANT, B.; MACPHERSON, J. I. Tools for quantifying N₂O emissions from agroecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 142, p. 103-119, 2007.
- PAULA, M.; PEREIRA, F. A. R.; ARIAS, E. R. A.; SCHEEREN, B. R.; SOUZA, C. C.; MATA, D. S. Fixação de carbono e a emissão dos gases de efeito estufa na exploração da cana-de-açúcar. **Ciência & Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, p. 633-640, 2010.

PERIN, A.; SANTOS, R. H. S.; URQUIAGA, S.; GUERRA, J. G. M.; CECON, P. R. Produção de fitomassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes em cultivo isolado e consorciado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 1, p. 35-40, 2004.

PINHEIRO, E. F. M.; LIMA, E.; CEDDIA, M. B.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Impact of pre-harvest burning versus trash conservation on soil carbon and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region. **Plant and Soil**, The Hague, v. 333, p. 71-80, 2010.

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, S. R. M.; ZULLO JR, J.; OTAVIAN, A. F.; AVILA, A. M. H. de; EVANGELISTA, B. A.; MARIN, F. R.; MACEDO JR, C.; PELLEGRINO, G. Q.; COLTRI, P. P.; CORAL, G. A. Nova geografia da produção agrícola no Brasil. In: DECONTO, J.G. (Org.). **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. 2. ed. Campinas: Embrapa, 2008. v. 1, p. 24-71.

PRADO, H. **Solos do Brasil - gênese, morfologia, classificação, levantamento e manejo de solos**. 4. ed. Piracicaba, SP, 2005. 281 p.

RAYMENT, M. B.; JARVIS, P. G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 32, n. 1, p. 35-45, 2000.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHÈS, B.; LARRÉ-LARROUY, M. C.; DE LUCA, E. F.; LAURENT, J. Y.; CERRI, C. C.; FELLER, C. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture Ecosystem & Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 1-4, p. 285-289, 2006.

REAY, D. S.; DAVIDSON, E. A.; SMITH, K. A.; SMITH, P.; MELILLO, J. M.; DENTENER, F.; CRUTZEN, P. J. Global agriculture and nitrous oxide emissions. **Nature Climate Change**, London, v. 2, p. 410-416, 2012.

REICHARDT, K.; LIBARDI, P. L.; URQUIAGA, S. C. The fate of fertilizer nitrogen in soil-plant systems with emphasis on the tropics. In: INTERNATIONAL ANATOMIC ENERGY

AGENCY SYMPOSIUM, 1982. Albuquerque, New Mexico. **Proceedings...** p. 277-289. IAEA-SM-263/36.

RESENDE, A. S.; SANTOS, A.; XAVIER, R. P.; COELHO, C. H.; GONDIM, A.; OLIVEIRA, O. C.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 30, n. 6, p. 937-941, 2006.

ROBERTSON, G. P.; GRACE, P. R. Greenhouse gas fluxes in tropical and temperate agriculture: the need for a full-cost accounting of global warming potentials. **Environment, Development and Sustainability**, Dordrecht, v. 6, n. 1, p. 51-63, 2004.

ROBERTSON, F. A.; THORBURN, P. J. Management of sugarcane harvest residues: consequences for soil carbon and nitrogen. **Soil Research**, Rome, v. 45, p. 13-23, 2007.

ROCHETTE, P.; JANZEN, H. H. Towards a revised coefficient for estimating N₂O emissions from legumes. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 73, p. 171-179, 2005.

RONQUIM, C. C. **Dinâmica espaço temporal do carbono aprisionado na fitomassa dos agroecossistemas do Nordeste do Estado de São Paulo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2007. Disponível em: <http://www.abagrp.org.br/media/uploads/pdf/lv_fitomassa_nesp.pdf>. Acesso em: 22 dezembro 2011.

ROSEIRO, M. N. V.; TAKAYANAGUI, A. M. M. Meio ambiente e poluição atmosférica: o caso da cana-de-açúcar. **Revista Saúde**, Natal, v. 30, n. 1-2, p. 76-83, 2004.

SÁ, J. C. M. Rotação de culturas: produção de biomassa e benefícios à fertilidade do solo. In: CURSO SOBRE MANEJO DO SOLO EM SISTEMA DE SEMEADURA DIRETA, 1995. Castro. 344p.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; DICK, W. A.; LAL, R.; FILHO, S. P. V. B; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1486-1499, 2001.

SÃO PAULO (Estado). Lei Estadual nº 11.241, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, São Paulo, SP, 20 set. 2002.

SÃO PAULO (Estado). Lei Estadual nº 13.798, de 9 de novembro de 2009. Institui a política estadual de mudanças climáticas. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**. Poder Executivo, São Paulo, v. 119, n. 209, 10 nov. 2009.

SCHMIDHUBER, J.; TUBIELLO, F. N. Global food security under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 104, p. 19703-19708, 2007.

SIERRA, J. Temperature and soil moisture dependence of N mineralization in intact soil cores. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 29, p. 1557-1563, 1997.

SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de Cerrados do Oeste Baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, p. 541-547, 1994.

SILVA, E. C.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; VELOSO, M. E. C.; TRIVELIN, P. C. O. Aproveitamento do nitrogênio (^{15}N) da crotalária e do milho pelo milho sob plantio direto em Latossolo Vermelho de Cerrado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 739-746, 2006.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 241, p. 155-176, 2002.

SMITH, J. H.; DOUGLAS, C. L. Wheat straw decomposition in the field. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 35, p. 269-272, 1971.

SMITH, K. A.; THOMSON, P. E.; CLAYTON, H.; MCTAGGART, I. P.; CONEN, F. Effects of temperature, water content and nitrogen fertilization on emissions of nitrous oxide by soils. **Atmosphere Environment**, Oxford, v. 32, n. 19, p. 3301-3309, 1998.

SMITH, P.; MARTINO, D.; CAI, Z.; GWARY, D. Agriculture. In: METZ, B. (Ed.). **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: Cambridge University Press, 2007. p. 497-540.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B. Van; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J. L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETO, R. Cana-de-açúcar. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. 2.ed. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. p. 237-239. (Boletim Técnico, 100).

TILMAN, D.; CASSMAN, K. G.; MATSON, P. A.; NAYLOR, R.; POLASKY, S. Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, Washington, v. 418, p. 671-677, 2002.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. The management of ryegrass to stabilize aggregates of a red-brown earth. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 18, p. 415-422, 1980.

TRIVELIN, P. C. O.; VICTORIA, R. L.; RODRIGUES, J. C. S. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-¹⁵N e uréia-¹⁵N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, p. 1375-1385, 1995.

TRIVELIN, P. C. O.; RODRIGUES, J. C. S.; VICTORIA, R. L. Utilização por soqueira de cana-de-açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia-¹⁵N e uréia-¹⁵N aplicado

ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, p. 89-99, 1996.

TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C. Manejo do nitrogênio e enxofre na nutrição e adubação de cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2005, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: GAPE, 2005. p. 1-46.

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C. P.; BODDEY, R. M. Variações nos estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa em solos das regiões tropicais e subtropicais do Brasil: Uma análise crítica. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 130, p. 17-21, 2010.

USSIRI, A. N.; LAL, R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 39-47, 2009.

VAN GROENIGEN, J. W.; VELTHOF, G. L.; OENEMA, O.; VAN GROENIGEN, K. J.; VAN KESSEL, C. Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: a case study for arable crops. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 61, p. 903-913, 2010.

VERGÉ, X. P. C.; DE KIMPE, C.; DESJARDINS, R. L. Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 142, p. 255-269, 2007.

VITOUSEK P. M.; NAYLOR, R.; CREWS, T.; DAVID, M. B.; DRINKWATER, L. E.; HOLLAND, E.; JOHNES, J.; KATZENBERGER, J.; MARTINELLI, L. A.; MATSON, P. A.; NZIGUHEBA, G.; OJIMA, D.; PALM, C. A.; ROBERTSON, G. P.; SANCHEZ, P. A.; TOWNSEND, A. R.; ZHANG, F. S. Nutrient imbalances in agricultural development. **Science**, Washington, v. 324, n. 5934, p. 1519-1520, 2009.

VITTI, A. C. **Adubação nitrogenada de cana de açúcar (soqueira) colhida mecanicamente sem a queima prévia: manejo e efeito na produtividade**. 2003. 144 f. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

- VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 2, p. 249-256, 2007.
- WANG, Q.; LI, Y.; ALVA, A. Cropping systems to improve carbon sequestration for mitigation of climate change. **Journal of Environmental Protection**, Flórida, v. 1, p. 207-215, 2010.
- WASSMANN, R.; VLEK, P. L. G. Mitigating greenhouse gas emissions from tropical agriculture: scope and research priorities. **Environment, Development and Sustainability**, Dordrecht, v. 6, p. 1-9, 2004.
- WCED - World Commission On Environment And Development. **Our common future**. Oxford: Oxford University Press, 1987.
- WEST, T. O., MARLAND, G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Oxford, v. 91, p. 217-232, 2002.
- WEST, T. O.; SIX, J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 80, p. 25-41, 2007.
- WHITE, P. J. Effects of crop residues incorporation on soil properties and growth of subsequent crops. **Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry**, Melbourne, v. 24, p. 219-235, 1984.
- YU, C. M. Sequestro florestal de carbono no Brasil: dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas. **Annablume IEB**, São Paulo, 2004. 280p.
- ZENTNER, R. P.; CAMPBELL, C. A.; BIEDEREBECK, V. O.; MILLER, P. R.; SELLES, F.; FERNANDEZ, M. R. In Search of a Suitable Cropping System for the Semi-Arid Canadian Prairies. **Journal of Sustainable Agriculture**, Binghamton, v. 18, n. 2-3, p. 117-136, 2001.

ZENTNER, R. P.; CAMPBELL, C. A.; BIEDEREBECK, V. O.; SELLES, F.; LEMKE, R.; JEFFERSON, P. G.; GAN, Y. Long-Term Assessment of Management of an Annual Legume Green Manure Crop for Fallow Replacement in the Brown Soil Zone. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 83, p. 475-482, 2004.