

## **X-011 - EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO CICLO DE VIDA DO ETANOL: UMA AVALIAÇÃO NAS FASES DE AGRICULTURA E INDUSTRIALIZAÇÃO EM MINAS GERAIS**

**Juan Carlos Claros Garcia<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Industrial pela Universidad del Valle - Bolívia. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Doutorando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da UFMG.

**Eduardo Von Sperling**

Engenheiro Civil, Doutor em Limnologia, PhD. Professor titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Amianto, 17, Ap. 6 – Santa Teresa - Belo Horizonte - MG - CEP: 31010-500 - Brasil - Tel: (31) 96829424 - e-mail: jcclarosgarcia@hotmail.com

### **RESUMO**

O presente estudo apresenta estimativas da emissão de gases de efeito estufa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ) nas etapas de agricultura e industrialização de cana-de-açúcar para produção de etanol em usinas localizadas no estado de Minas Gerais. As estimativas foram realizadas levando em conta diferentes cenários tecnológicos observados a partir de dados de 14 usinas pesquisadas, incluindo usinas produtoras de álcool e usinas produtoras de açúcar e álcool. Princípios de Avaliação do Ciclo de Vida foram considerados na quantificação das emissões. Para a estimativa das emissões foram levadas em conta as categorias de consumo de combustíveis, utilização de insumos da agricultura, liberação de  $\text{N}_2\text{O}$  no solo, emissões na queima da cana e utilização de produtos químicos. Os resultados mostram um nível mínimo de emissões de gases de efeito estufa de 961,08 kg  $\text{CO}_2\text{eq./ha}\cdot\text{ano}$  e um nível máximo de 3142,92 kg  $\text{CO}_2\text{eq./ha}\cdot\text{ano}$ , sendo que o nível médio de emissões é de 1678,38  $\text{CO}_2\text{eq./ha}\cdot\text{ano}$ . Dentre os cenários tecnológicos possíveis, foram analisados seis cenários representativos. Uma análise de variância mostrou que todos os cenários analisados apresentam diferenças significativas no teor de emissões de gases de efeito estufa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Emissão de gases de efeito estufa, Avaliação do Ciclo de Vida, Etanol, Cana-de-açúcar.

### **INTRODUÇÃO**

A energia produzida a partir da cana-de-açúcar experimenta atualmente um crescimento expressivo na matriz energética brasileira, principalmente devido ao consumo de etanol. Esse tipo de energia já é a segunda fonte primária de energia no país, perdendo apenas para o petróleo e derivados (EPE, 2008). Face à importância atribuída ao etanol, vários estudos, nacionais (entre eles: Macedo et al., 2004; Seabra, 2008; Soares et al., 2009) e internacionais (Kaltschmitt et al., 1997; Kadam, 2002; Luo et al., 2008, entre outros) têm se ocupado em avaliar sua eficiência energética e potencial mitigador das emissões de gases de efeito estufa (GEE). No entanto, ainda não existe consenso com respeito aos ganhos energéticos produzidos pelo etanol e seu impacto líquido em GEE. As discrepâncias se devem principalmente a divergências entre as abordagens e suposições adotadas na quantificação dos inputs e outputs durante o ciclo de vida do etanol (Liska e Cassman, 2008). Diferenças tecnológicas existentes em diferentes regiões onde o etanol é produzido também afetam o resultado das avaliações (Soares et al., 2009). Dessa forma, são necessários mais estudos que ajudem a compreender a forma em que as emissões de GEE ocorrem na produção do etanol. De modo geral, os estudos nacionais consideram apenas um único cenário tecnológico representativo das práticas atuais de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar para produção de etanol, sendo que no Brasil existem atualmente diversos cenários onde o etanol é produzido, os quais podem variar segundo o tipo de preparo do solo, o tipo de plantio e o tipo de tratamentos culturais, entre outros (Oliveira et al., 2007; Andrade e Andrade, 2007). A produção de etanol em cenários tecnológicos distintos pode levar a resultados diferentes na quantificação de emissões de GEE, o qual deve ser levado em conta na estimativa das emissões. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar as diferenças existentes entre as emissões de GEE provenientes de diferentes cenários tecnológicos de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar para produção de etanol, a partir de dados de

usinas localizadas no Estado de Minas Gerais. Os cenários tecnológicos considerados representam práticas de agricultura e industrialização realizadas atualmente nas usinas pesquisadas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar a avaliação das emissões de GEE, o estudo compreendeu três etapas. Na primeira etapa foi realizada uma estimativa inicial, onde foram identificadas as etapas e atividades relevantes geradoras de emissões de GEE. Na segunda etapa foi realizada uma pesquisa de campo, onde foram determinadas variáveis tecnológicas para a determinação de cenários de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar. Assim mesmo, nessa etapa foram coletados dados para a estimativa das emissões correspondentes a cada variável tecnológica. A terceira etapa consistiu na identificação de cenários tecnológicos e na estimativa de suas emissões e diferenças. A seguir mostram-se detalhes das três etapas da pesquisa.

### PRIMEIRA ETAPA: ESTIMATIVA INICIAL DAS EMISSÕES DE GEE

Para facilitar a avaliação das diferenças nas emissões de GEE, foi necessário realizar uma estimativa inicial das emissões, para identificar as etapas ou atividades onde ocorrem emissões representativas na agricultura e industrialização da cana-de-açúcar, uma vez que variações tecnológicas nessas etapas podem resultar em diferenças significantes na estimativa das emissões. Este primeiro estágio da pesquisa foi realizado aplicando princípios da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (USEPA, 2006) e recomendações do IPCC (2006). Foram levadas em conta somente as emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e o N<sub>2</sub>O (gases de efeito estufa), as quais são consideradas as mais importantes de origem antropogênica em sistemas relacionados com agricultura (IPCC, 2006). As emissões totais foram expressas em kg de CO<sub>2</sub> equivalente<sup>1</sup> (kg CO<sub>2</sub>eq). O estudo foi realizado com base em informações de 11 usinas localizadas em Minas Gerais, cujos processos de licenciamento ambiental foram consultados por meio da Federação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). As usinas pesquisadas incluem usinas produtoras de álcool (usinas autônomas) e usinas produtoras de açúcar e álcool (usinas anexas). As estimativas das emissões foram realizadas considerando um hectare de terreno cultivado durante um ano (unidade funcional). O período de base para cálculo das emissões foi determinado em seis anos, o qual inclui o pousio (seis meses), o ciclo da cana-planta (um ano e meio) e quatro ciclos da cana-soca<sup>2</sup> (quatro anos), na etapa de agricultura. De modo geral, as emissões de GEE foram calculadas aplicando a seguinte equação:

$$E_i = (I_j \times nc \times FE_j) / 6$$

equação (1)

Onde: E<sub>i</sub> = emissões de GEE correspondentes a uma categoria ou atividade (i) considerada no cálculo das emissões; i = consumo de combustível nas operações agrícolas; consumo de combustível no transporte de mudas; consumo de combustíveis no transporte de torta de filtro, cinzas e sedimentos; consumo de combustível no transporte de cal e fertilizantes; consumo de combustível na fertirrigação; consumo de combustíveis na colheita mecânica; consumo de combustíveis no carregamento e transporte da cana-de-açúcar; consumo de cal e fertilizantes; consumo de defensivos agrícolas; queima do canavia; liberação de N<sub>2</sub>O no solo; produção de mudas; e consumo de produtos químicos na etapa industrial; I<sub>j</sub> = quantidade consumida do insumo j na categoria ou atividade em questão; nc = número de ciclos nos quais a quantidade I<sub>j</sub> é consumida; FE<sub>j</sub> = fator de emissão de GEE correspondente ao insumo I<sub>j</sub>; j = combustível, cal, fertilizantes, defensivos agrícolas, cana a ser queimada durante a colheita e produtos químicos usados na etapa industrial. O número de ciclos (nc) varia dependendo se a quantidade de insumo (j) é utilizada somente no ciclo da cana planta (nc = 1), nos quatro ciclos da cana-soca (nc = 4) ou nos ciclos da cana-planta e cana-soca (nc = 5). O divisor 6 representa o período de base considerado (seis anos).

Os fatores de emissão aplicados foram obtidos de duas fontes: (1) do Ecoinvent (IFU/IFEU, 2006); e (2) quando disponíveis, do IPCC (2006). O Ecoinvent é uma ampla base de dados que mostra as cargas ambientais, incluindo as emissões gasosas, associadas ao ciclo de vida de produtos/processos industriais e de agricultura,

<sup>1</sup> De acordo com o IPCC (2007), a emissão de 1 kg de CH<sub>4</sub> equivale à emissão de 21 kg de CO<sub>2</sub>eq; e a emissão de 1 kg de N<sub>2</sub>O equivale à emissão de 310 kg de CO<sub>2</sub>eq.

<sup>2</sup> Pousio: descanso temporário dado à terra cultivada; *cana-planta*: primeiro brote, após o plantio; *cana-soca*: rebrotes subsequentes ao corte da cana-planta.

entre outros. A partir dessa fonte, os fatores de emissão foram obtidos selecionando os processos e os GEE considerados no presente estudo. O IPCC (2006) fornece fatores de emissão para os principais processos de agricultura, tais como uso de cal, queima de resíduos agrícolas e liberação de  $N_2O$  no solo. Nesses casos, foram utilizados os fatores de emissão recomendados pelo IPCC. Os dados de consumo de combustíveis em veículos e equipamentos agrícolas que não foi possível coletar nas usinas pesquisadas foram baseados em Macedo et al. (2004).

O cenário considerado para levantamento das emissões representa as práticas tecnológicas mais empregadas nas usinas estudadas, com valores médios de consumo e produção. Os GEE foram classificados em sete categorias: consumo de combustível; consumo de cal e fertilizantes; consumo de defensivos agrícolas; emissão de  $N_2O$  no solo; emissões na queima do canavial; produção de mudas; e emissões na industrialização da cana-de-açúcar.

## RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA

A Tabela 1 mostra o resumo de resultados das emissões de GEE para as etapas de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar para produção de etanol, obtidos na primeira etapa da pesquisa.

**Tabela 1: Emissão de GEE na agricultura e industrialização da cana-de-açúcar**

<b>Categoria</b>	<b>Emissão de GEE (kg CO<sub>2</sub>eq./ha·ano)</b>	<b>Contribuição de cada categoria ao total de emissões</b>
Consumo de combustível	337,18	21,90%
Operações agrícolas	69,77	
Transporte de insumos	17,28	
Fertirrigação	30,20	
Colheita, carregamento e transporte da cana	219,93	
Consumo de calcário e fertilizantes	298,38	19,38%
Consumo de defensivos agrícolas	30,39	1,97%
Queima do canavial	434,31	28,21%
$N_2O$ liberado no solo	331,52	21,53%
Produção de mudas	72,81	4,73%
Produtos químicos etapa industrial	35,01	2,27%
<b>TOTAL</b>	<b>1539,60</b>	<b>100%</b>

Como pode ser observado na Tabela 1, a maior parte das emissões de GEE ocorre durante a queima do canavial, consumo de combustível, liberação de  $N_2O$  no solo e consumo de calcário e fertilizantes. Durante a pesquisa de campo, as tecnológicas envolvidas com essas atividades foram pesquisadas. Assim mesmo, foram coletados dados atuais de consumo de insumos para cada variável tecnológica.

## SEGUNDA ETAPA: IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS TECNOLÓGICAS PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL E ESTIMATIVA DAS EMISSÕES EM TAIS VARIÁVEIS

Uma vez identificadas as etapas responsáveis pela maior parte das emissões, identificaram-se as variáveis tecnológicas associadas a tais etapas e realizou-se a estimativa de emissões de GEE correspondentes. Cada variável tecnológica está constituída de determinadas práticas tecnológicas adotadas pelas usinas pesquisadas. Para realizar essa parte do estudo, foi feita uma pesquisa de campo em três usinas localizadas no Estado de Minas Gerais, onde, com base em informações das usinas pesquisadas, foram identificadas as práticas tecnológicas atualmente realizadas. Assim mesmo, foram coletados dados atuais de consumo de insumos para a agricultura e industrialização da cana-de-açúcar, levando em conta cada prática tecnológica. Procurou-se focar o levantamento de dados naquelas etapas onde ocorre a maior parte das emissões, com base nos resultados obtidos na primeira etapa do estudo.

Para realizar a estimativa das emissões de GEE correspondentes às variáveis tecnológicas, foi utilizada a seguinte equação:

$$E_{ij} = I_m \times FE_m$$

equação (2)

Onde:  $E_{ij}$  = emissões de GEE (kg CO<sub>2</sub>eq/ha) correspondentes às práticas tecnológicas presentes (j) em cada variável tecnológica (i);  $I_m$  = quantidade consumida do insumo (m) nas práticas presentes em cada variável tecnológica; m = combustível, calcário, gesso, fertilizantes, defensivos agrícolas, cana a ser queimada durante a colheita; e produtos químicos na etapa industrial;  $FE_m$  = fator de emissão de GEE correspondente ao insumo  $I_m$ .

Para a estimativa das emissões de GEE associadas às variáveis tecnológicas, foram mantidos alguns dados obtidos na primeira etapa. No entanto, a maioria dos dados colhidos durante a pesquisa de campo difere daqueles colhidos na primeira etapa da pesquisa.

## RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

A Tabela 2 mostra as variáveis tecnológicas identificadas durante a pesquisa de campo, suas emissões de GEE, os desvios-padrão correspondentes e a frequência (%) com que cada prática tecnológica ocorre nas usinas pesquisadas. As emissões correspondem aos valores médios determinados a partir dos dados das usinas. Os desvios-padrão estão mostrados entre parêntesis.

**Tabela 2: Variáveis tecnológicas, emissões de GEE (kg CO<sub>2</sub>eq/ha), desvios-padrão e frequência (%) das opções tecnológicas na produção de etanol**

Manutenção da área de cultivo		Produção de mudas	Aplicação de corretivos	Preparo do solo e plantio
<ul style="list-style-type: none"> <li>Operações de manutenção na área de cultivo 62,09 (11,91) – 100%</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Produção de mudas como parte do plantio 228,67 (96,87) – 100%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicação de calcário e gesso 1735,92 (890,28) – 100%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cultivo convencional 267,33 (69,05) – 80,90%</li> <li>Cultivo mínimo 197,56 (0) – 19,10%</li> </ul>
Tratos culturais cana-soca		Adubação no plantio	Adubação em soqueira	Aplicação de defensivos agrícolas
<ul style="list-style-type: none"> <li>Operações de agricultura em soqueira 26,13 (0) – 100%</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Cana de ano e meio em área de vinhaça 1269,95 (211,29) – 23,24%</li> <li>Cana de ano em área de vinhaça 1269,95 (211,29) – 8,99%</li> <li>Cana de ano e meio em área sem vinhaça 1261,51 (297,88) – 26,81%</li> <li>Cana de ano em área sem vinhaça 1385,81 (253,23) – 10,37%</li> <li>Adubação com torta de filtro 519,18 (248,13) – 30,59%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Área de vinhaça com cana queimada 1374,91 (173,62) – 13,05%</li> <li>Área de vinhaça com cana crua 1631,24 (174,28) – 6,03%</li> <li>Área sem vinhaça com cana queimada 1056,71 (36,02) – 55,35%</li> <li>Área sem vinhaça com cana crua 1199,62 (148,85) – 25,57%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consumo de defensivos agrícolas 30,37 (4,51) – 100%</li> </ul>
Queima do canavial	Colheita	Transporte de cana	Industrialização	Período de base
<ul style="list-style-type: none"> <li>Queima do canavial para colheita manual 952,86 (136,86) – 100%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Colheita manual 41,19 (6,06) – 63,30%</li> <li>Colheita mecânica 692,94 (58,67) – 36,70%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Em caminhões de 28t 249,15 (86,73) – 33%</li> <li>Em caminhões de 45t 209,72 (101,49) – 24%</li> <li>Em caminhões de 58 t 279,34 (69,33) – 43%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Em usinas de álcool 60,04 (45,66) – 28,54%</li> <li>Em usinas de açúcar e álcool 41,77 (10,95) – 71,46%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>b_1 = 6</math> anos – 55,17%</li> <li><math>b_2 = 7,83</math> anos – 14,55%</li> <li><math>b_3 = 5,5</math> anos – 20,63%</li> <li><math>b_4 = 7,33</math> anos – 6,32%</li> <li><math>b_5 = 6,42</math> anos – 1,90%</li> <li><math>b_6 = 8,25</math> anos – 0,50%</li> <li><math>b_7 = 5,92</math> anos – 0,71%</li> <li><math>b_8 = 7,75</math> anos – 0,22%</li> </ul>

O período de base varia devido ao número médio de cortes realizados no canavial nas usinas pesquisadas: 5,5 cortes em áreas sem irrigação e 7,33 cortes em áreas com irrigação. Assim mesmo, o período de base também é afetado pelo tipo de cana (cana de ano e meio e cana de ano) e o período normal de pousio, que nas usinas pesquisadas foi determinado em 5 meses (0,42 anos). Dessa maneira, na Tabela 2, o período de base corresponde às seguintes situações observadas durante a pesquisa de campo: ( $b_1$ ) sem pousio/cana de ano e meio/5,5 cortes = 6 anos; ( $b_2$ ) sem pousio/cana de ano e meio/ 7,33 cortes = 7,83 anos; ( $b_3$ ) sem pousio/cana de ano/5,5 cortes = 5,5 anos; ( $b_4$ ) sem pousio/cana de ano/7,33 cortes = 7,33 anos; ( $b_5$ ) com pousio/cana de ano e meio/5,5 cortes = 6,42 anos; ( $b_6$ ) com pousio/cana de ano e meio/7,33 cortes = 8,25 anos; ( $b_7$ ) com pousio/cana de ano/5,5 cortes = 5,92 anos; ( $b_8$ ) com pousio/cana de ano/7,33 cortes = 7,75 anos.

A partir das opções tecnológicas mostradas na Tabela 2, podem ser determinados diversos cenários tecnológicos de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar. Esses cenários, por sua vez, podem levar a diferentes resultados na estimativa das emissões de GEE. Na terceira etapa da pesquisa buscou-se identificar tais cenários tecnológicos e avaliar as diferenças existentes quanto à emissão de GEE correspondentes.

### TERCEIRA ETAPA: IDENTIFICAÇÃO DE CENÁRIOS TECNOLÓGICOS PARA PRODUÇÃO DE ETANOL E ESTIMATIVA DAS EMISSÕES EM TAIS CENÁRIOS

A partir dos dados da Tabela 2, foram identificados um total 384 cenários tecnológicos possíveis para a agricultura e industrialização de cana-de-açúcar para produção de etanol. De modo geral, as emissões de GEE em cada cenário podem ser calculadas segundo a seguinte equação:

$$E_k = (\sum E_{ij} \times nc) / b_j \quad \text{equação 3}$$

Onde:  $E_k$  = emissões de GEE (kg CO<sub>2</sub>eq/ha·ano) correspondentes ao cenário tecnológico (k);  $E_{ij}$  = emissões de GEE (kg CO<sub>2</sub>eq/ha) correspondentes às práticas tecnológicas presentes (j) em cada variável tecnológica (i), segundo a Tabela 2; i = manutenção da área de cultivo, produção de mudas, ..., industrialização; nc = número de ciclos nos quais as emissões  $E_{ij}$  ocorrem, dependendo do ano base ( $b_j$ ) considerado;  $b_j$  = ano base (j) considerado para a estimativa das emissões de GEE no cenário  $E_k$ ;  $b_j$  pode variar de 5,5 a 8,25 anos, segundo a Tabela 2.

Para facilitar a apresentação das emissões de GEE nos cenários tecnológicos identificados, foram escolhidos aqueles mostrados na Tabela 3. Nessa tabela, mostram-se apenas as práticas tecnológicas que diferenciam um cenário do outro. Na mesma tabela, apresentam-se valores médios das emissões de GEE correspondentes e os desvios-padrão (entre parêntesis).

Para a determinação das emissões de GEE correspondentes às usinas que produzem açúcar e álcool (usinas anexas), foi levado em conta o método de alocação baseada na massa (Ramírez, 2009), no qual as emissões de GEE são divididas proporcionalmente ao teor de cana-de-açúcar (massa) que é destinado somente à produção de álcool. No caso das usinas pesquisadas, a proporção de massa destinada à produção de álcool em tais usinas é de 43,71%

Na Tabela 3, pode-se observar que as emissões de GEE variam bastante entre os cenários tecnológicos considerados, especialmente entre as usinas autônomas e as usinas anexas. Para avaliar estas diferenças, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) comparando todos os cenários mostrados na Tabela 3. A análise de variância foi feita com um grau de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ). A análise de variância mostrou diferenças significativas entre todos os cenários considerados ( $p < 0,05$ ), de modo que todos os cenários considerados são estatisticamente diferentes.

Por outro lado, a média de emissões de GEE considerando todos os cenários tecnológicos possíveis foi determinada em 2820,65 CO<sub>2</sub>eq/ha·ano, para usinas autônomas. Assim mesmo, a média geral, considerando tanto usinas autônomas quanto usinas anexas, foi de 1678,38 CO<sub>2</sub>eq/ha·ano.

A Tabela 4 mostra um resumo das médias das emissões correspondentes a cada categoria considerada no cenário tecnológico mais freqüente na produção de etanol em usinas de álcool (cenário 1). Já a Tabela 5 mostra uma relação das médias das emissões correspondentes a cada operação realizada para obtenção do álcool no cenário 1.



**Tabela 3: Alguns cenários tecnológicos na agricultura e industrialização da cana-de-açúcar para produção de etanol, suas emissões de GEE e desvios-padrão**

Cenário	Descrição	Práticas tecnológicas	Emissões de GEE (CO <sub>2</sub> eq/ha·ano)
1	Cenário tecnológico mais frequente em usinas de álcool	Cultivo convencional; adubação com torta de filtro; área sem vinhaça com cana queimada; queima do canavial; colheita manual; transporte de cana em caminhões de 58t; industrialização em usinas de álcool; período de base b <sub>1</sub> .	2613,60 (120,50)
2	Cenário tecnológico com maior quantidade de emissões em usinas de álcool	Cultivo convencional; cana de ano em área de vinhaça; área de vinhaça com cana queimada; queima do canavial; colheita manual; transporte de cana em caminhões de 58t; industrialização em usinas de álcool; período de base b <sub>4</sub> .	3142,92 (212,09)
3	Regime com menor quantidade de emissões em usinas de álcool	Cultivo mínimo; adubação com torta de filtro; área sem vinhaça com cana crua; colheita mecânica; transporte de cana em caminhões de 45t; industrialização em usinas de álcool; período de base b <sub>5</sub> .	2214,41 (124,12)
4	Cenário tecnológico mais frequente em usinas de açúcar e álcool	Cultivo convencional; adubação com torta de filtro; área sem vinhaça com cana queimada; queima do canavial; colheita manual; transporte de cana em caminhões de 58t; industrialização em usinas de açúcar e álcool; período de base b <sub>1</sub> .	1135,09 (52,60)
5	Cenário tecnológico com maior quantidade de emissões em usinas de açúcar e álcool	Cultivo convencional; cana de ano em área de vinhaça; área de vinhaça com cana queimada; queima do canavial; colheita manual; transporte de cana em caminhões de 58t; industrialização em usinas de açúcar e álcool; período de base b <sub>4</sub> .	1365,78 (92,62)
6	Cenário tecnológico com menor quantidade de emissões em usinas de açúcar e álcool	Cultivo mínimo; adubação com torta de filtro; área sem vinhaça com cana crua; colheita mecânica; transporte de cana em caminhões de 45t; industrialização em usinas de açúcar e álcool; período de base b <sub>5</sub> .	961,08 (54,16)

**Tabela 4: Emissão de GEE na agricultura e industrialização da cana-de-açúcar (cenário 1)**

Categoria	Emissões de GEE (CO <sub>2</sub> eq/ha·ano)	Contribuição de cada categoria ao total de emissões
Uso de combustíveis	499,64	19,12%
Operações de manutenção da área agrícola	41,16	
Transporte de insumos	356,57	
Operações agrícolas	101,91	
Produção de mudas	31,99	1,22%
Consumo de corretivos	289,22	11,07%
Consumo de fertilizantes	304,87	11,66%
Consumo de defensivos agrícolas	27,84	1,07%
Emissões de N <sub>2</sub> O no solo	572,80	21,92%
Aplicação de torta de filtro	66,55	
Uso de fertilizantes a base de nitrogênio	465	
Palha remanescente	41,25	
Emissões na queima do canavial	832,21	31,84%
Uso de produtos químicos na indústria	55,03	2,11%
<b>TOTAL</b>	<b>2613,60</b>	<b>100%</b>

**Tabela 5: Emissão de GEE nas operações de agricultura e industrialização da cana-de-açúcar (cenário 1)**

<b>Operação</b>	<b>Emissões de GEE (CO<sub>2</sub>eq/ha·ano)</b>	<b>%</b>
Manutenção da área de cultivo	56,92	2,18
Produção de mudas	38,11	1,46
Aplicação de corretivos (cultivo convencional)	325,21	12,44
Preparo do solo e plantio	44,56	1,70
Tratos culturais cana-soca	19,59	0,75
Adubação no plantio (adubação com torta de filtro)	86,53	3,31
Adubação em soqueira (área sem vinhaça com cana queimada)	792,53	30,32
Aplicação de defensivos agrícolas	27,84	1,07
Queima do canavial	873,46	33,42
Colheita (manual)	37,76	1,44
Transporte de cana (em caminhões de 58t)	256,06	9,80
Industrialização (em usinas de álcool)	55,03	2,11
<b>TOTAL</b>	<b>2613,60</b>	<b>100%</b>

## CONCLUSÕES

Os resultados do estudo mostram que as emissões de GEE na produção de etanol variam dependendo do cenário tecnológico no qual ocorre a obtenção desse bicomcombustível. Práticas tais como o cultivo convencional, plantação de cana de ano em áreas de vinhaça e colheita manual com queima do canavial, contribuem para o aumento significativo das emissões de GEE. Assim mesmo, práticas tais como o cultivo mínimo, adubação com torta de filtro e colheita mecânica contribuem para a diminuição das emissões de GEE. A análise de variância mostrou que existem diferenças significantes entre o teor máximo e mínimo de emissões, tanto na produção de álcool em usinas autônomas quanto usinas anexas. As emissões correspondentes ao cenário tecnológico mais freqüente nas usinas pesquisadas também mostraram diferenças significantes com respeito às emissões máximas e mínimas. Isto mostra que as práticas tecnológicas mais frequentes nas usinas pesquisadas apresentam níveis médios de emissões de GEE. Tais práticas tecnológicas mostram que o fator que mais contribui para as emissões totais é a queima do canavial, seguido das emissões de N<sub>2</sub>O no solo e consumo de combustíveis. Quanto às operações agrícolas, o cenário tecnológico mais freqüente mostra que as operações de queima do canavial, seguido pela aplicação de fertilizantes em áreas sem vinhaça com cana queimada e aplicação de corretivos, são as que mais contribuem para as emissões totais. Finalmente, todos os cenários analisados no estudo mostram diferenças significantes nas emissões totais de GEE, o qual demonstra a grande variabilidade no teor de emissões, em função do cenário tecnológico praticado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDRADE, L.; ANDRADE, P. Implantação e condução de canaviais. *Informe agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 44-54, jul./ago. 2007.
2. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Cana-de-açúcar já é a segunda fonte primária de energia no Brasil. In: EPE. Balanço Energético Nacional: Resultados preliminares, 2008. Disponível em <www.ben.epe.gov.br> Acesso em Maio 2009.
3. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. National Greenhouse Gas Inventories Programme, 2006.
4. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
5. INSTITUT FÜR UMWELTINFORMATIK; INSTITUT FÜR ENERGIE & UMWELTFORSCHUNG. *Ecoinvent v2.01a for Umberto 5.5*. Hamburg: 2006. 1 CD-ROM.
6. KADAM, K. L. Environmental benefits on a life cycle basis of using bagasse-derived ethanol as a gasoline oxygenate in India. *Energy Policy*, n. 30, p. 371-384, 2002.



7. KALTSCHMITT, M.; REINHARDT, G.; STELZER, T. Life cycle analysis of biofuels under different environmental aspects. *Biomass and Bioenergy*, v. 12, n. 2, p. 21-34, 1997.
8. LISKA, A. J.; CASSMAN, K. G. Towards standardization of life-cycle metrics for biofuels: greenhouse gas emissions mitigation and net energy yield. *Journal of biobased materials and bioenergy*, v. 2, p. 187-203, 2008.
9. LUO, L.; VOET, E.; HUPPES, G. Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008.
10. MACEDO, I. C.; LEAL, M.; SILVA, J. *Balanço das emissões de gases de efeito estufa na produção e no uso de etanol no Brasil*. SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2004. 32 p.
11. OLIVEIRA, M.; FREIRE, F.; MACEDO, G.; FERREIRA, J. Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 30-43, jul./ago. 2007.
12. RAMIREZ, P. K. *Análise de métodos de alocação utilizados em Avaliação do Ciclo de Vida*. 2009. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.
13. SEABRA, J. E. A. *Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil*. 2008. 298 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.
14. SOARES, L.; ALVES, B.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. Mitigação das emissões de gases de efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. *Circular Técnica*, n. 27, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009.
15. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Life Cycle Assessment: principles and practice*. Cincinnati: USEPA, 2006. 88 p.