



## Usina Flex: Comparação dos desempenhos ambiental e energético de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo

Ana Cristina Guimarães Donke<sup>1</sup>, Rafael Viñas<sup>2</sup>, Marília Ieda da Silveira Folegatti Matsuura<sup>3</sup>, Patrícia Helena dos Santos Matai<sup>4</sup>, Luiz Alexandre Kulay<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Energia; Grupo de Prevenção da Poluição - GP2, ana.donke@usp.br

<sup>2</sup>Fundação Espaço Eco

<sup>3</sup>Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, Embrapa Meio Ambiente

<sup>4</sup>Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Energia

<sup>5</sup>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Química, Grupo de Prevenção da Poluição - GP2

**Resumo.** O etanol está consolidado como combustível para movimentação de veículos leves e, nos últimos 40 anos, apenas a cultura de cana-de-açúcar foi explorada comercialmente para a produção deste combustível. Por outro lado, o desenvolvimento agrícola vem proporcionando safras recordes de grãos nas últimas décadas. A produção de milho se destaca pelo aumento da produtividade, podendo ser semeado como cultura principal ou como cultura de inverno em rotação com a soja. O sorgo, por sua vez, pode atuar como um substituto do milho, apresentando maior rusticidade e tolerância à seca. Dada essa conjuntura, usinas de etanol do Mato Grosso se associaram a produtores de milho e sorgo para incluir novas matérias-primas no processo de produção de combustíveis, compartilhando uma mesma unidade industrial, denominada Usina Flex. O objetivo deste trabalho foi realizar a avaliação do desempenho ambiental e energético do etanol de cana-de-açúcar, de milho e de sorgo produzidos no contexto supramencionado, através do levantamento de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e do levantamento do retorno energético, segundo a abordagem do ciclo de vida. A unidade funcional do estudo foi 1 m<sup>3</sup> de etanol hidratado e o sistema de produto incluiu a produção de insumos, produção da matéria-prima agrícola, produção de etanol, cogeração e etapas de transporte. Para a etapa agrícola da produção foram consideradas emissões causadas por uso de fertilizantes e vinhaça e restos culturais deixados no campo, pela queima de combustível em operações mecanizadas, pela queima da palhada (no caso da cana), além das emissões em decorrência de mudança do uso da terra (MUT), calculadas segundo diretiva da Comissão Europeia. Para a etapa industrial, foram consideradas as emissões decorrentes da fermentação e da queima de biomassa para a cogeração energética. Além destas, considerou-se as emissões das etapas de transporte. Os resultados em termos de emissões de GEE foram 1.380 kg CO<sub>2</sub> eq para o etanol de cana-de-açúcar, 1.460 kg CO<sub>2</sub> eq para o etanol de milho e 2.180 kg CO<sub>2</sub> eq para o etanol de sorgo, sendo que as emissões decorrentes da MUT representam entre 71% e 88% destes resultados. O retorno energético foi obtido pela relação entre a energia disponibilizada pelo combustível e a energia fóssil consumida em seu processo. O etanol de cana-de-açúcar disponibilizou 9,84 unidades de energia para cada unidade consumida na forma de energia fóssil, o etanol de milho disponibilizou 6,01 e o etanol de sorgo disponibilizou 7,16. Estes resultados são preâmbulos para análises mais amplas, considerando que a pesquisa segue em evolução.

**Palavras-chave.** Avaliação de Ciclo de Vida; EROI; Etanol; Cana-de-açúcar; Milho; Sorgo.

### Introdução

O etanol está consolidado como combustível para movimentação de veículos leves no Brasil. O país é um dos maiores produtores mundiais desta commodity e seu maior exportador. Em 2014, a produção total de etanol no país alcançou os 28,8 milhões de m<sup>3</sup>, dos quais 1,4 milhões de m<sup>3</sup> destinaram-se a exportação (ANP, 2015). No entanto, nos últimos 40 anos, apenas a cultura de cana-de-açúcar foi explorada comercialmente para a produção deste combustível. O setor sucroalcooleiro a partir da cana-de-açúcar é diretamente influenciado pela sazonalidade da produção de matéria-prima, sendo necessário formar estoques do etanol produzido no período de colheita para regularizar a oferta no período da entressafra. Por este motivo, uma safra que apresente resultados econômicos ruins, seja por problemas climáticos ou econômicos, terá possibilidade de recuperação apenas na colheita do ano seguinte. Em contexto de atipicidades climáticas cada vez mais recorrentes, a busca

por outras matérias-primas para a produção do biocombustível se torna estrategicamente importante, reduzindo a dependência da produção de etanol a uma só cultura.

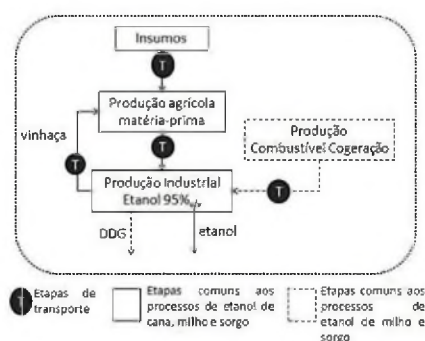
Por outro lado, no estado do Mato Grosso, desde o início da década de 2000 a produção de milho cresceu ininterruptamente, passando a superar largamente o consumo regional, gerando, inclusive, dificuldades para o estoque e transporte do milho produzido. O sorgo, por sua vez, é uma cultura de ciclo mais curto, que costuma ser plantada em substituição ao milho quando ocorrem atrasos no plantio e, além disso, apresenta maior rusticidade e tolerância à seca. Como solução, ao invés de vender o milho e o sorgo a preços reduzidos, buscaram-se alternativas para agregação de valor ao produto que permitissem o consumo da produção na própria região.

O resultado foi a introdução do milho e do sorgo como matérias-primas para as usinas de etanol a partir de 2011. A solução veio de uma tecnologia pioneira, em que o processo de produção de etanol de grãos aproveita as instalações da usina de cana-de-açúcar e reduz a ociosidade da planta no período de entressafra da cana. Esse enfoque passou a ser denominado de Usina Integrada, Usina Flexível ou Usina “Flex”. Desde a introdução desta nova tecnologia, estudos começaram a ser conduzidos no sentido de avaliar a viabilidade econômica deste novo arranjo, mas poucos autores se dedicaram a iniciativas para avaliar o desempenho ambiental e eficiência energética do processo. Dessa forma, este estudo tem por objetivo avaliar os desempenhos ambientais e energéticos dos processos de produção de etanol a partir de três diferentes matérias-primas (cana-de-açúcar, milho e sorgo), em uma Usina Flex no estado do Mato Grosso. Para tanto, seguindo a abordagem do ciclo de vida, foram levantadas as emissões de GEE e realizadas as estimativas do retorno energético (relação entre energia disponível e energia fóssil consumida pelo combustível). Os estudos seguiram os conceitos e aspectos operativos estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2009). Espera-se que os resultados apresentados neste estudo contribuam para a comparação e tomada de decisão quanto à introdução de novas matérias-primas para a produção de etanol no Brasil.

### Modelagem do Ciclo de Vida

Os três estudos foram modelados a partir da abordagem atribucional, com um enfoque do tipo berço-ao-portão. Os sistemas de produto englobam as etapas de produção de matéria-prima renovável, a produção industrial do etanol, do combustível para cogeração, dos insumos utilizados nos processos e as etapas de transporte (Figura 1). As tecnologias consideradas para a modelagem dos três produtos podem ser consideradas representativas para o estado do MT e suas descrições seguem na sequência.

Figura 20. Sistema de produto para a produção de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo em Usina Flex



A produção agrícola de cana-de-açúcar segue a tecnologia de cultivo convencional, com aplicação de calcário, vinhaça, torta de filtro, fertilizantes (NPK), pesticidas e reguladores de crescimento. A colheita é mecanizada em 25% da área e manual com queima da palhada em 75%. A produtividade é 82 t/ha. Na etapa industrial, ocorre a



limpeza da cana por lavagem, extração do caldo em moendas à vapor, fermentação com recuperação das leveduras e destilação para obtenção de etanol hidratado. A cogeração é realizada em caldeira à 21bar, a partir da queima do bagaço gerado na etapa de moagem da cana. Os transportes ocorrem por modal rodoviário.

A produção de milho segue o sistema de plantio direto com rotação de cultura como 2ª safra, conta com aplicação de calcário, de vinhaça, fertilizantes e pesticidas. Plantio e colheita são mecanizados e a produtividade é 7,5 t/ha. A secagem dos grãos ocorre em secadores elétricos. A tecnologia empregada para a produção de etanol é do tipo “*Dry Milling*”. São utilizadas as instalações para cogeração de energia, dornas de fermentação e colunas de destilação da usina de etanol de cana. A energia é suprida pela queima de cavaco de madeira na caldeira. Apenas etanol hidratado é produzido e os transportes também ocorrem por modal rodoviário.

Uma vez que o sorgo granífero atua como cultura substituta do milho, as tecnologias de produção agrícola de ambos os produtos se assemelham muito, seguindo o mesmo padrão de rotação e mesmas etapas de produção. As diferenças se pautam nas quantidades de produtos aplicados, já que o sorgo é considerado uma cultura menos exigente, mas também menos produtiva, com 3,8 t/ha. Da mesma forma, a tecnologia empregada na etapa industrial possibilita a utilização tanto de milho quanto de sorgo como matéria-prima. Assim, a avaliação do etanol de sorgo seguiu a mesma tecnologia descrita para o etanol de milho.

### **Bases conceituais, requisitos técnicos e premissas**

O objetivo dos estudos é avaliar a produção de etanol hidratado a partir de cana-de-açúcar, milho e sorgo, independentemente, mas produzidos em uma mesma planta do tipo Usina Flex. A função do sistema é produzir etanol e o fluxo de referência é 1m<sup>3</sup> de etanol hidratado, quantidade definida também como a unidade funcional. O sistema de produto segue as definições apontadas no item *Modelagem do Ciclo de Vida*.

Os dados utilizados para a modelagem das etapas de produção de matéria-prima, produção de etanol e etapa de cogeração foram essencialmente de origem primária, com complementação por dados secundários. As etapas de produção de insumos e produção de cavaco de madeira tiveram dados de fonte secundária, a base de dados ecoinvent, com adaptações às condições brasileiras de matriz elétrica e à geração de calor (gás natural). A cobertura geográfica considera o estado do Mato Grosso, Brasil. A cobertura temporal corresponde às safras e produções de 2012/2013. Variações de ordem geográfica ou temporal se devem aos escopos dos ICVs utilizados do banco de dados. A cobertura tecnológica considera as especificações descritas no item anterior. Não foram considerados aspectos ambientais associados à construção de bens de capital. Por critério de exclusão, não foram consideradas entradas com participação mássica menores que 1% do total de entradas. Exceção a esta regra se fez para o caso dos fitossanitários aplicados na etapa agrícola, que foram incluídos na análise considerando o critério de significância ambiental. Em relação aos aspectos de alocação, foram consideradas partições entre os produtos que transpassam as fronteiras do sistema, sempre segundo o critério mássico. Para o sistema de etanol de cana, realizou-se alocação entre caldo e sobra de bagaço, na etapa de moagem, cujos fatores foram 96,57% e 3,43%, respectivamente. Para os sistemas de etanol de milho e sorgo, realizaram-se alocações entre o etanol e o DDG úmido, na etapa de destilação. Os fatores utilizados para etanol de milho foram 45,3% para etanol e 54,7% para DDG úmido e para o etanol de sorgo foram 44,2% para etanol e 55,8% para DDG úmido. Para os estudos de etanol amiláceo também ocorreram procedimentos de alocação na etapa agrícola de produção de grãos, para repartir igualmente as emissões derivadas de MUT, entre as culturas de 1ª e 2ª safra do sistema de rotação. As emissões derivadas de MUT foram calculadas para o estado do Mato Grosso, para o período de 1993-2013, de acordo com IPCC Guidelines (2006) e Comissão Europeia (2010). Os dados de área de culturas (anuais e perenes), pastagem e florestas plantadas foram coletados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016) e do Instituto Brasileiro de Árvores (IBA, 2015). Segundo os dados levantados, considerou-se que a expansão das culturas podem ocorrer sobre áreas de culturas perenes - único tipo de uso de terra que apresentou redução em área no período – ou sobre matas nativas. Os métodos de avaliação de impacto de ciclo

de vida selecionados foram *ReCiPe Midpoint (H) V.1.10 / World Recipe H* (GOEDKOOPE, 2012), cuja análise limitou-se à categoria de impacto Mudanças Climáticas (MC), e *Cumulative Energy Demand V.1.08* (CED) (JUNGLUTH; FRISCHKNECHT, 2009), do qual extraiu-se o consumo da categoria de energia primária Não Renovável Fóssil, para o posterior cálculo do Índice de Retorno sobre o Investimento Energético (EROI) (Hammerschlag, 2006). O EROI foi definido como a relação entre a energia disponibilizada pelo combustível, determinada pelo Poder Calorífico Inferior do etanol hidratado (21.350 MJ), e a energia primária de origem fóssil consumida.

## Resultados e Discussão

Os resultados obtidos para a categoria Mudanças Climáticas, para a categoria de consumos energéticos Não Renováveis Fóssil e o valor obtido como EROI estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 13. Resultados obtidos para as categorias *Mudanças Climáticas* (ReCiPe midpoint (H) v. 1.10) e *Energia Não Renovável, Fóssil* (CED) e *Índices de Retorno sobre o Investimento Energético* (EROI) para 1 m<sup>3</sup> de etanol hidratado de cana-de-açúcar, milho e sorgo.

	Unidade	1 m <sup>3</sup> C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O (95% <sub>v/v</sub> ) de cana	1 m <sup>3</sup> C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O (95% <sub>v/v</sub> ) de milho	1 m <sup>3</sup> C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O (95% <sub>v/v</sub> ) de sorgo
<b>Mudanças Climáticas</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	1.380	1.460	2.180
<b>CED</b>	MJ	2.170	3.530	2.960
<b>Não Renovável, Fóssil</b>				
<b>EROI</b>	-	9,84	6,05	7,21

### *Mudanças Climáticas*

Os resultados obtidos para a categoria MC indicam que o etanol de cana-de-açúcar apresentou as menores emissões potenciais. A substância que mais contribuiu foi o CO<sub>2</sub> MUT, com participação de 72% da emissão total, ou 991 kg CO<sub>2</sub> eq, causadas pela expansão de área plantada de cana-de-açúcar. Neste caso, a expansão de área plantada ocorreu em 75% da área atual, dos quais 9% substituíram áreas de lavouras permanentes e 91% substituíram áreas de mata nativa. A segunda substância de destaque foi o CO<sub>2</sub> fóssil, com 11% das emissões, devido à queima do diesel nas etapas de transporte e operações agrícolas mecanizadas e na aplicação de ureia no campo. O N<sub>2</sub>O representou 10% das emissões. Esta substância teve origem na etapa agrícola, devido à aplicação de fertilizantes e vinhaça e às emissões derivadas da palhada deixada no solo (em 25% da área). Por fim, a emissão de CH<sub>4</sub> biogênico participou com 7% das emissões, pela queima da palhada na pré-colheita da cana (em 75% da área). Ao comparar os resultados encontrados com dados levantados em literatura para etanol de cana-de-açúcar, observamos que as emissões apresentadas foram maiores que as encontradas por Cavallet et al (2013), de 517 kg CO<sub>2</sub> eq por m<sup>3</sup> de etanol hidratado produzido; maiores que as 825 kg CO<sub>2</sub> eq por m<sup>3</sup> encontrados por Muñoz et al (2014); e menores que as 1.397 kg CO<sub>2</sub> eq por m<sup>3</sup> de etanol encontradas por Guerra et al (2014). Os dois últimos resultados também consideraram emissões por MUT, embora tenham assumido fronteiras geográficas diferentes (região Centro-Sul do Brasil e estado de São Paulo, respectivamente). No estudo de Guerra et al, cerca de 350 kg CO<sub>2</sub> eq por m<sup>3</sup> de etanol foram emitidos em decorrência de MUT, com expansão de área de cana-de-açúcar avançando sobre pastagem.



O etanol de milho apresentou resultados de 1.460 kg CO<sub>2</sub> eq para cada m<sup>3</sup> de combustível. Desta emissão, 71% se deram como CO<sub>2</sub> MUT, ou 1.030 kg CO<sub>2</sub> eq, advindas da etapa agrícola. Neste caso, a expansão da cultura de milho 2<sup>a</sup> safra ocorreu em 97% da área atual e, destas, 1% substituiu lavouras permanentes e o restante substituiu mata nativa. Cabe lembrar que, por ser uma cultura rotacionada, apenas 50% das emissões decorrentes de MUT foram atribuídas ao milho. A emissão de CO<sub>2</sub> fóssil contribuiu com 16% da emissão, e ocorreram nas etapas de transporte e na agrícola pela aplicação de ureia e queima de diesel nas operações mecanizadas. O N<sub>2</sub>O contribuiu para o desempenho, representando 12% das emissões, que ocorreram majoritariamente na etapa agrícola, devido à aplicação de fertilizantes e emissões derivadas da palhada no campo. Muñoz et al (2014) também encontraram emissões de 825 kg CO<sub>2</sub> eq por m<sup>3</sup> de etanol de milho produzido nos EUA. Os autores também levantaram as emissões por MUT mas constataram que, nos últimos 20 anos, não foi observado aumento da área plantada. Sem as emissões por MUT, o etanol de milho do MT emitiria apenas 430 kg CO<sub>2</sub> eq por m<sup>3</sup>.

Em relação ao desempenho do etanol de sorgo, o produto apresentou o pior desempenho, com emissões potenciais de 2.180 kg CO<sub>2</sub> eq por m<sup>3</sup>. As substâncias que contribuíram para estas emissões foram o CO<sub>2</sub> MUT, com 84% das emissões totais, ou 1.830 kg CO<sub>2</sub> eq, originadas na etapa agrícola. Da área atual plantada, 91% se deve à expansão e, deste total, considerou-se que 13% ocorreu sobre lavouras permanentes e 87% sobre mata nativa. O sorgo também recebe 50% dessas emissões. O CO<sub>2</sub> fóssil respondeu por 9% das emissões e se deve à queima de diesel nas etapas de transporte, nos maquinários agrícolas e na aplicação de ureia no campo. Finalmente, o N<sub>2</sub>O contribuiu com 7% das emissões, originado na etapa agrícola pela decomposição da palhada deixada no campo e aplicações de ureia. Cai et al (2013) encontraram emissões entre 1.275 e 1.706 kg CO<sub>2</sub> eq por m<sup>3</sup> de etanol de sorgo granífero produzido. Os autores estimaram que 555 kg CO<sub>2</sub> eq se devem à MUT. As emissões da produção de etanol de sorgo no Mato Grosso se mostraram bastante maiores e podem estar relacionadas à baixa produtividade da cultura.

Em uma análise comparativa, pode-se observar a grande participação das emissões decorrentes de MUT para os três produtos analisados. Tal comportamento pode ser explicado pelas características intrínsecas ao estado do Mato Grosso e ao recorte temporal considerado na metodologia de levantamento de MUT. O estado do Mato Grosso apresentou intensificação da atividade agropecuária e, conseqüentemente, acréscimo de produção e área plantada, a partir de meados da década de 1990, chegando a quase quadruplicar a sua área de produção de grãos entre 1995 e 2015 (CONAB, 2015). À parte das emissões por MUT, os aspectos que distinguiram os três processos estudados, e que influenciaram os resultados, decorreram da aplicação de doses superiores de ureia nas culturas de milho e sorgo em comparação com a cultura de cana-de-açúcar e das emissões de CH<sub>4</sub> biogênico, proveniente da queima da palha na etapa pré-colheita da cana-de-açúcar.

### *Consumo de energia Não Renovável de origem Fóssil*

A partir da aplicação do método de avaliação de impacto CED, obteve-se o perfil de consumo de energia primária, que considera fontes renováveis e não renováveis de energia, para a produção de 1 m<sup>3</sup> dos combustíveis. Deste perfil, os valores encontrados como energia primária consumida de origem Não Renovável Fóssil foram utilizados como um dos indicadores para a determinação do EROI.

Em relação aos consumos de energia fóssil para a produção de etanol de cana-de-açúcar, encontrou-se o valor de 2.170 MJ por m<sup>3</sup> de combustível. Esse consumo ocorre principalmente na forma de petróleo e gás natural. O petróleo compõe 79% dos consumos energéticos e se deve às etapas de transporte e às atividades mecanizadas na etapa agrícola. Já o gás natural, corresponde a 20% do consumo e ocorre na etapa de produção da ureia, transportes, e produção de fertilizante fosfatado e potássico. Para o etanol de milho, observou-se o consumo energético fóssil de 3.530 MJ por m<sup>3</sup> de combustível. A energia é consumida pelo uso de petróleo, que contribui com 69% da emissão, especialmente nas etapas de transporte, produção do diesel utilizado na etapa agrícola e na produção de ureia, consumida em quantidade superior à da produção de cana. O gás natural também ganha destaque no perfil energético, com 30% do consumo total para a categoria. Este combustível é utilizado na etapa de produção da ureia, de glifosato e etapas de transporte. O etanol de sorgo apresentou um perfil semelhante ao

etanol de milho em termos de consumo energético, embora tenha apresentado consumo inferior. Foram consumidos 2.960 MJ para produzir 1 m<sup>3</sup> de etanol de sorgo, com consumos também na forma de petróleo e gás natural. O petróleo participa com 80% dos consumos, com quantidade e etapas semelhantes às apresentadas pelo etanol de milho: etapas de transporte, atividades agrícolas mecanizadas e produção de ureia. O consumo na forma de gás natural é inferior ao consumido na produção de etanol de milho, representando 18% de todo o consumo energético fóssil, consumido na produção de ureia (que é aplicada em menor quantidade para a produção de sorgo), nas etapas de transporte e na produção de glifosato.

### *Índice de Retorno sobre o Investimento Energético (EROI)*

A determinação do consumo energético de origem fóssil neste trabalho possibilitou quantificar a energia fornecida pelos sistemas energéticos em relação à energia não renovável por eles consumida (EROI). Considerou-se como energia fornecida pelo sistema, o valor do Poder Calorífico Inferior do etanol hidratado que, segundo a ANP (2015), corresponde a 6.300 kcal por kg, ou seja, 21.350 MJ por m<sup>3</sup> de combustível.

O EROI obtido para o etanol de cana-de-açúcar corresponde a um retorno de 9,84 unidades de energia renovável para cada unidade de energia fóssil consumida. Macedo, Seabra e Silva (2008) encontraram valores de 9,3, embora tenham considerado pressupostos e abordagens diferentes daqueles estabelecidos para o presente estudo, o que restringe as possibilidades de comparação. O retorno energético obtido para o etanol de milho na usina *flex* corresponde a 6,05. Kim e Dale (2005) encontraram EROI de 1,62 para o etanol de milho dos EUA, que utilizam fontes energéticas fósseis para a produção industrial. Já Salla e Cabello (2010), que estudaram o etanol de milho produzido utilizando fontes energéticas renováveis para a etapa industrial, apresentaram dados que indicaram o EROI de 2,96. Para o etanol de sorgo, o retorno energético corresponde a 7,21. Cai et al (2013) encontraram EROIs de 2,0 e 4,9 para etanol de sorgo granífero com gás natural fóssil e gás natural renovável como fontes de energia, respectivamente. O resultado de Cai et al para o cenário com combustível renovável foi mais próximo ao resultado de etanol de sorgo no Mato Grosso.

De uma forma geral, já que os três produtos comparados apresentam as mesmas características físicas em sua forma final, o conteúdo energético disponibilizado pelos combustíveis é rigorosamente o mesmo. Dessa forma, as variações entre os EROIs obtidos por cada sistema são justificadas pelos diferentes consumos energéticos de origem fóssil. No geral, segundo a análise realizada para categoria de consumo energético não renovável fóssil, pode-se verificar que a etapa de produção da ureia foi um fator determinante para maiores consumos de energia fóssil. Dessa forma, os produtos que apresentaram maiores consumos de ureia em seu sistema de produção, obtiveram consumos energéticos mais elevados e, conseqüentemente, menores EROIs.

### **Conclusão**

Dos resultados de MC, pôde-se inferir que o etanol de sorgo apresenta os piores resultados, causados pelas emissões por MUT e distinguindo-se dos demais produtos por apresentar baixa produtividade agrícola. O etanol de milho apresentou resultado intermediário para MC e apresentou maiores emissões em decorrência do aporte de fertilizante nitrogenado. O etanol de cana-de-açúcar apresentou o melhor desempenho e entre suas emissões se destacaram as etapas de queimada da palha para a colheita. Em comparação com a literatura, os resultados para os três produtos demonstraram emissões superiores aos estudos levantados, ocasionados por emissões por MUT. No entanto, por não existir uma metodologia consolidada para o estabelecimento de MUT, os resultados dessa emissão costumam variar muito entre os estudos e muitos autores ainda deixam de considerá-la em estudos de ACV. O desenvolvimento de metodologias consensuais para a definição das MUT tornarão os resultados mais facilmente comparáveis. Neste trabalho, a metodologia de estimação de MUT baseou-se em dados estatísticos em nível estadual, utilizando um procedimento aproximado ao considerar que o decréscimo de áreas com determinados usos da terra para o estado são representativos para determinar as características do crescimento de áreas das culturas nos casos estudados.



Sobre os EROIs, o etanol de cana-de-açúcar apresentou o melhor retorno energético, com índice de 9,84, seguido pelo etanol de sorgo, com 7,21, e pelo etanol de milho, com menor retorno energético, de 6,05. A partir das análises dos perfis energéticos, esses resultados diferiram em função das variações entre os consumos de energia fóssil, já que os produtos comparados são idênticos em sua versão final e proporcionam a mesma quantidade de energia. O consumo de ureia demonstrou ser uma etapa determinante para o retorno energético, já que a produção desse insumo pode ser considerada um processo energo-intensivo e influenciou negativamente os desempenhos dos produtos que mais dependeram deste insumo. Estes resultados são preâmbulos para análises mais amplas, nas quais deverão ser considerados a integração dos processos em uma usina *flex*, outros aspectos ambientais e a inclusão da variável econômica.

## Referências Bibliográficas

- ANP (BRASIL) (2015) *Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2015*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009) ABNT NBR ISO 14044: *Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações*. Rio de Janeiro: ABNT.
- CAI, H. et al. (2013) *Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of production of bioethanol from sorghum in the United States*. *Biotechnology for Biofuels*, v.6, n.141, p. 1-15.
- CAVALETT, O. et al. (2013) *Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v.18, n.3, p. 647-658.
- COMISSÃO EUROPEIA (2010) *Decisão da Comissão de 10 de junho de 2010 relativa a diretrizes para o cálculo das reservas de carbono nos solos para efeitos do anexo V da Directiva 2009/28/CE*, *Jornal Oficial da União Europeia*, L151/19 de 17 jun 2010.
- CONAB (2015) *Séries históricas. Séries Históricas de Área Plantada, Produtividade e Produção, Relativas às Safras 1976/77 a 2014/15 de Grãos, 2001 a 2014 de Café, 2005/06 a 2014/15 de Cana-de-Açúcar*. 2015. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&>>. Acesso em: set 2015.
- GOEDKOOPE M.J. et al. (2012) *ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation, 1ª edição (revisada)*. Disponível em: <<http://www.lcia-recipe.net/publications>>.
- GUERRA, J. P. M. et al. (2014) *Comparative analysis of electricity cogeneration scenarios in sugarcane production by LCA*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 19, n. 4, p. 814-825.
- HAMMERSCHLAG, R. (2006) *Ethanol's Energy Return on Investment: A Survey of the Literature 1990-Present*. *Environmental Science & Technology*, v.40, n.6, p. 1744-1750.
- IBA (2015). *Relatório Ibá 2015*. Disponível em [iba.org/pt/biblioteca-iba/publicacoes](http://iba.org/pt/biblioteca-iba/publicacoes). Acesso em 2015.
- IBGE (2016). *Sistema IBGE de Recuperação Automática*. Disponível em [www.sidra.ibge.gov.br](http://www.sidra.ibge.gov.br). Acesso em 2016.
- IPCC. (2006) *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan*.
- JUNGBLUTH, N.; FRISCHKNECHT, R. (2009) *Cumulative Energy Demand*. In: HISCHE, R.; WEIDEMA, B. (Ed.) *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*. *Ecoinvent report No. 3, v.2.1, St Gallen*.
- KIM, S.; DALE, B.E. (2005) *Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel*. *Biomass & Bioenergy*, v. 29, n.6, p. 426-439.
- MACEDO, I.C.; SEABRA, J.E.A.; SILVA, J.E.A.R. (2008) *Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020*. *Biomass and Bioenergy*, v.32, n.7, p. 582-595.
- MUÑOZ, I. et al. (2014) *Life cycle assessment of bio-based ethanol produced from different agricultural feedstocks*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v.19, n.1, p. 109-119.
- NEMECEK, T.; SCHNETZER, J.; REINHARD, J. (2014) *Updated and harmonised greenhouse gas emissions for crop inventories*. *International Journal of Life Cycle Assessment, The Ecoinvent Database V3*, p. 1-18.
- SALLA, D.A.; CABELLO, C. (2010) *Análise Energética de Sistemas de Produção de Etanol de Mandioca, Cana-de-Açúcar e Milho*. *Revista Energia na Agricultura, Botucatu*, v.25, n.2, p.32-53.