

Avaliação de impacto *ex ante* da adoção do ativo tecnológico ‘Cana Flex’ para produção de etanol de segunda geração

Rosana do Carmo Nascimento Guiducci¹

Hugo Bruno Correa Molinari²

Priscila Seixas Sabaini³

Thályta Fraga Pacheco⁴

Adilson Kenji Kobayashi⁵

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar os impactos econômicos e ambientais *ex ante* da cultivar de cana-de-açúcar ‘Cana Flex’, bem como o retorno do investimento em pesquisa e desenvolvimento. A ‘Cana Flex’ é voltada ao melhor aproveitamento da biomassa na produção de etanol de segunda geração (E2G). Consideraram-se cenários de adoção, para estimar ganhos econômicos na produção de E2G e na comercialização de créditos de descarbonização (CBios), no âmbito da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Os resultados indicam que, se 10% do bagaço de cana produzido na safra 2018/2019 fosse destinado à produção de E2G, o diferencial da ‘Cana Flex’, em comparação a uma variedade não modificada, implicaria em aumento de 393.263,6 m³ em E2G, em redução de emissão de 748.983,06 t CO₂eq, e em ganhos de R\$ 37,4 milhões na comercialização de CBios. Diante dos ganhos com CBios, o investimento em pesquisa e desenvolvimento retornaria a taxa interna de retorno (TIR) de 47% e o valor presente líquido (VPL) de R\$ 87,9 milhões, em 20 anos. A ‘Cana Flex’ tem grande potencial para contribuir para a viabilidade econômica do E2G no Brasil, elevando a produção e gerando ganhos econômicos ao setor produtivo, além de contribuir para o alcance das metas brasileiras de redução das emissões de gases de efeito estufa.

Termos para indexação: biocombustível, cana-de-açúcar, pesquisa e desenvolvimento, RenovaBio.

Ex ante impact assessment of the adoption of ‘Cana Flex’ technological asset for the production of second-generation ethanol

ABSTRACT

The objective of this study was to assess the *ex ante* economic and environmental impacts of the sugarcane cultivar ‘Cana Flex’, as well as the return of investment in research and development. ‘Cana Flex’ provides a better use of biomass in the production of second-generation ethanol (E2G). Adoption scenarios were considered to estimate the economic gains in the production of E2G, and in the commercialization of decarbonization credits (CBios), under the national biofuel policy (*Política Nacional de*

¹ Economista, doutora em Economia Aplicada, pesquisadora da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF. E-mail: rosana.guiducci@embrapa.br

² Engenheiro-Agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF. E-mail: hugo.molinari@embrapa.br

³ Engenheira de Alimentos, mestre em Ciências de Alimentos, analista da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF. E-Mail: priscila.sabaini@embrapa.br

⁴ Engenheira Química, mestre em Engenharia Química, analista da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF. E-mail: thalyta.pacheco@embrapa.br

⁵ Biólogo, doutor em Biologia Molecular, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF. E-mail: adilson.kobayashi@embrapa.br

Ideias centrais

- Etanol de segunda geração (E2G) é uma importante alternativa para reduzir emissões de GEE.
- Cana Flex é uma variedade geneticamente modificada, com potencial para aumentar a eficiência produtiva do E2G em até 24%, graças à maior digestibilidade da parede celular.
- Observaram-se impactos econômicos e ambientais relevantes por volume de biomassa processada na produção de E2G.
- Com 10% do bagaço de cana gerado na safra 2018/19 destinado à E2G, o diferencial da Cana Flex gerou um aumento de 393.263,6 m³ na produção de etanol, e uma redução da emissão de 748.983,06 tCO₂eq.

Recebido em
04/02/2021

Aprovado em
16/06/2021

Publicado em
23/09/2021



This article is published in Open Access under the Creative Commons Attribution licence, which allows use, distribution, and reproduction in any medium, without restrictions, as long as the original work is correctly cited.

Biocombustível - RenovaBio). The results indicate that if 10% of sugarcane bagasse, produced in the 2018/2019 harvest, was destined for E2G production, the 'Cana Flex' differential, compared to an unmodified cultivar, would imply 393,263.6 m³ increase of E2G, with the emission reduction of 748,983.06 t CO₂eq, and R\$ 37.4 million gains with the sale of CBios. Considering the gains with CBios, the investment in research and development would show 47% internal return rate (IRR) and R\$ 87.9 million net present value (NPV) in 20 years. 'Cana Flex' shows a great potential to contribute to the E2G economic viability in Brazil, increasing production and generating economic gains for the productive sector, besides contributing to the achievement of the Brazilian goals for the reduction of greenhouse gas emissions.

Index terms: biofuel, sugarcane, research and development, RenovaBio.

INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa posição de destaque na geração de energia renovável de biomassa. O caso da cadeia agroindustrial de cana-de-açúcar é emblemático, pois é fruto de anos de investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e em utilização de tecnologia, disponibilidade de crédito, expansão de área agrícola, capacidade de processamento e estruturação em vários segmentos da cadeia, que resultam na produção de etanol, açúcar, bioeletricidade, biofertilizantes, biogás, entre outros. Em consequência, o Brasil se tornou o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e de açúcar, e o segundo maior produtor de etanol. No mercado global, é responsável por mais da metade de todo o açúcar comercializado no mundo, além de ser o maior exportador de etanol. Em 2020/2021, a produção mundial de açúcar foi de 181,866 milhões de toneladas. (Estados Unidos, 2021; RFA, 2021). Os três maiores produtores mundiais, nesse ano, foram o Brasil, com 42,06 milhões de toneladas (23,1%), seguido da Índia, com 33,76 milhões de toneladas (18,6%) e a União Europeia, com 16,05 milhões de toneladas (8,8%) (Estados Unidos, 2021).

A produção mundial de etanol atingiu 98,76 bilhões de litros, em 2020, dos quais 52,78 bilhões de litros foram produzidos pelos Estados Unidos (53%), 30,05 bilhões de litros pelo Brasil (30%) e 4,74 bilhões de litros pela União Europeia (5%) (RFA, 2021). Entre 2015 e 2020, a produção de etanol no mundo cresceu 1,4%. No Brasil cresceu 10%, com pico de produção em 2018. (RFA, 2021). O ranking dos maiores produtores de etanol permaneceu inalterado nesse período (Figura 1).

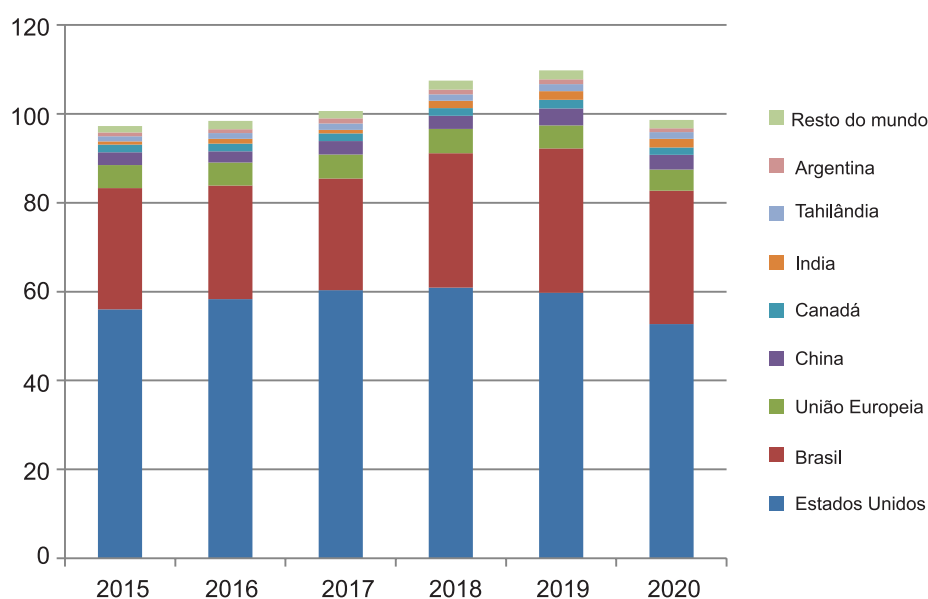


Figura 1. Produção mundial de etanol 2015-2020, em bilhões de litros.

Fonte: RFA (2021).

No mercado interno, considerando-se os dados da safra 2018/2019, foram produzidas 620.435 toneladas de cana-de-açúcar, em uma área de 8.589 mil hectares (Conab, 2019b). A produção nacional é altamente concentrada na região Centro-Sul, com destaque para o estado de São Paulo, responsável por 53,7% da produção agrícola. Os demais estados do Centro-Sul produziram 38,6%, enquanto a região Norte-Nordeste produziu 7,7% (Conab, 2021a).

Diferentemente dos Estados Unidos, que produzem etanol a partir do milho, uma das principais *commodities* alimentares, o Brasil produz etanol derivado sobretudo do cultivo da cana-de-açúcar⁶. O bagaço produzido durante a moagem da cana é usado como combustível nas usinas de cogeração, para suprir a demanda de energia no local, gerando, por vezes, excedente para exportação (Aprobio, 2019). Além da energia elétrica resultante da queima do bagaço da cana, também fazem parte dessa cadeia produtiva a produção de fertilizantes, vinhaça e torta de filtro, todos de grande interesse econômico, ambiental e social para o Brasil. Com efeito, a importância da cultura da cana-de-açúcar no país é grande, pois gera emprego e renda para cerca de 70 mil produtores, abrangendo em torno de 30% dos municípios brasileiros (Unica, 2019).

Especialmente do ponto de vista ambiental, o etanol de cana-de-açúcar é o biocombustível com a menor pegada de carbono do mundo, o que possibilita 90% menos emissões de gases de efeito estufa (GEE), em comparação à gasolina (Unica, 2020). De fato, desde o lançamento dos veículos flex até dezembro de 2018, o uso do etanol evitou a emissão de 523 milhões de toneladas de CO₂eq na atmosfera, redução que é equivalente ao plantio de quase 4 bilhões de árvores ao longo de 20 anos (Unica, 2019).

Nesse contexto, um dos grandes desafios para a pesquisa atualmente é potencializar os benefícios ambientais, econômicos e sociais da cadeia produtiva do etanol, por meio de ganhos de eficiência, obtidos especialmente pelo desenvolvimento de tecnologias, processos e insumos que permitam o melhor aproveitamento de seus resíduos. Destaca-se aqui a busca pela viabilidade técnica e econômica da produção de etanol de segunda geração (E2G) ou etanol lignocelulósico.

Diversas iniciativas em P&D para aumentar a eficiência produtiva do E2G estão em curso no mundo. Uma delas é o ativo de inovação ‘Cana Flex’, cultivar de cana-de-açúcar geneticamente modificada, desenvolvida pela Embrapa Agroenergia, que apresenta maior digestibilidade da parede celular, com potencial para elevar a produção de biocombustível, entre outros produtos.

O presente estudo procurou avaliar o impacto *ex ante* da cultivar ‘Cana Flex’ em cenários de adoção da tecnologia. Buscou-se estimar benefícios econômicos, tendo como fonte de receita adicionais de produção e de comercialização de créditos de descarbonização (CBios), no âmbito do RenovaBio. Avaliou-se, também, o retorno do investimento realizado em P&D, no desenvolvimento da cultivar, em razão dos benefícios econômicos esperados.

Desafios do E2G no Brasil e a tecnologia ‘Cana Flex’

A capacidade instalada para a produção de etanol celulósico ou de segunda geração, no Brasil, é composta por duas plantas em escala comercial (GranBio e Raízen) e uma experimental do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), com capacidades de produção nominal de 82, 42, e 3 milhões de litros de E2G por ano, respectivamente (EPE, 2018). A planta construída pela Raízen, com o apoio do BNDES, foi inaugurada em 2014, o que tornou o Brasil o único país do mundo com uma planta E2G produzindo estavelmente em escala comercial. A Raízen produziu 20 milhões de litros de E2G em 2019 e anunciou investimento em uma nova usina de E2G, expandindo para 82 milhões de litros a capacidade de produção, o dobro da planta atual (EPE, 2021). Com isso deverá se tornar o único produtor mundial a operar duas plantas de etanol 2G em escala industrial (Novacana, 2021). Em 2019, as duas usinas comerciais produziram 6,11 milhões de litros de E2G, tendo sido processadas 106,36 mil toneladas de bagaço e de palha de cana (ANP, 2021).

⁶ A produção de etanol de milho no Brasil teve início na safra 2018/2019, com 2,45% da produção total, tendo passado para 4,7%, no ano seguinte, e 9,2%, na safra 2020/2021 (Conab, 2021b).

No entanto, a produção comercial de E2G ainda é muito baixa, diante do potencial do país. As usinas atualmente em operação – Raízen, GranBio, Poet-DSM, Dupont, Beta Renewables, Quad County e Edeniq – operam em média com 7% de suas capacidades (Novacana, 2017b). Um dos maiores desafios enfrentados por essas usinas está relacionado a problemas de engenharia na alimentação do reator de pré-tratamento, apontado como o elemento crítico para a expansão da produção de E2G em grandes volumes (Novacana, 2017b). De acordo com o estudo realizado pela empresa Lux Research, melhorias nessa etapa promoveriam uma redução de custo de produção de até 16%, em média, além de evoluções nas etapas subsequentes de produção (Novacana, 2015).

Há ainda desafios relacionados à economicidade no uso de insumos em algumas etapas do processo produtivo. As enzimas responsáveis pela “desconstrução” da biomassa em açúcares representam cerca de 20 a 25% do custo total de produção (Novacana, 2015). Mas, o destaque maior está na matéria-prima (biomassa), que corresponde a até 40% do total das despesas (Novacana, 2017a).

Assim, o ativo tecnológico denominado ‘Cana Flex’ representa uma solução tecnológica com grande potencial para contribuir para a viabilidade econômica do E2G, em escala comercial, no Brasil.

Trata-se de uma cultivar de cana-de-açúcar, com maior digestibilidade da parede celular, desenvolvida pela Embrapa Agroenergia por meio de uma rede de pesquisa com os seguintes parceiros: Rothamsted Research, Universidade de Cambridge, Universidade de York, Instituto de Botânica de São Paulo (IBot), Universidade Estadual de Maringá (UEM), Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (Ridesa/UFPR) e Universidade Federal do ABC (UFABC).

A ‘Cana Flex’ é uma cultivar geneticamente transformada, que contém construções gênicas para suprimir a expressão de genes que codificam para acil transferases, combinadas com promotores tecido-específico e constitutivo. Mais especificamente, o ativo apresenta uma diminuição dos níveis de transcrição do gene *BAHD1* ou a atividade da enzima codificada por este gene e, por consequência, produz menor quantidade de ferulatos reduzindo o *cross-linking* entre os polímeros à parede celular.

Uma das vantagens desse ativo é que a diminuição das interligações de ácido ferúlico na parede celular permite um melhor acesso das enzimas hidrolíticas à lignocelulose para produção de E2G, o que gera economicidade, ao reduzir custos na etapa de pré-tratamento da biomassa. Resultados da pesquisa mostraram que, em condições ótimas de pré-tratamento (organosolv com etanol 30%, a 180 °C, por 240 min) a cultivar geneticamente transformada liberou 24% mais glicose, durante o processo de sacarificação do bagaço, do que uma cultivar não transformada, conforme descrito em Souza et al. (2019).

O aumento da digestibilidade da biomassa diz respeito não apenas à produção de E2G, mas também é um dos principais critérios para valorizar a biomassa como fonte de ração animal, dada a menor recalcitrância de sua parede celular e, conseqüentemente, maior valor nutricional da biomassa. Além disso, melhorias na digestibilidade de biomassas podem elevar a produção de biocombustíveis e de outros produtos, a exemplo da produção de blocos construtores de açúcares C5/C6, para atender outros segmentos industriais, como o químico.

A tecnologia de modificação da parede celular pode ser incorporada a qualquer cultivar de cana, de acordo com o ambiente de produção. Atualmente, a cultivar que está sendo testada é adaptada para a região Centro-Sul, onde se concentram os maiores produtores nacionais de cana e de etanol.

Espera-se que a tecnologia gere benefícios ao setor agroindustrial, ao agricultor e ao país. Na etapa agroindustrial, são esperados benefícios em duas vias independentes. A primeira, pelo aumento da produção de E2G, a partir do maior rendimento e eficiência de sacarificação, para uma mesma quantidade de biomassa e enzima. A segunda, pela possibilidade de redução de custos, a partir da redução da quantidade de enzimas utilizada, mantendo-se a mesma conversão. Cabe destacar que o aumento da disponibilidade de açúcares fermentescíveis pode atender a produção de E2G ou de compostos químicos produzidos a partir de glicose e segmento de ração animal. Na fase agrícola,

em particular, a maior valorização do bagaço de cana poderá beneficiar também os produtores rurais, responsáveis pelo fornecimento de 23% da cana processada, segundo estimativa da Federação dos Plantadores de Cana do Brasil (Feplana) (Reis, 2020). No Centro-Sul, os produtores independentes forneceram um terço da cana processada nas indústrias, na safra 2020/2021, e disputam com as usinas ganhos com CBios (Udop, 2021). Por fim, os benefícios esperados para o país referem-se ao alcance das metas de redução de emissões de GEE, sobretudo pelo aumento da produção e consumo de um biocombustível com baixíssima emissão relativa.

METODOLOGIA

Definição de cenários e estimativas de produção

A ‘Cana Flex’ apresenta as mesmas características e desempenho que as cultivares disponíveis no mercado na fase agrícola, não havendo ganhos nem perdas nessa fase. Na fase industrial, espera-se o mesmo rendimento para a produção de etanol 1G e de açúcar. É no processamento da palha e do bagaço destinados à produção de E2G que está o diferencial desse ativo tecnológico e, portanto, o impacto esperado.

Para avaliar esses impactos, foram elaborados cenários de adoção da ‘Cana Flex’ e cenários de destinação do bagaço para a produção de etanol celulósico. O ponto de partida foi a estimativa do total de bagaço de cana gerado no Brasil, tendo-se como referência a produção da safra 2018/2019.

De acordo com dados da Conab (Tabela 1), o Brasil produziu 163,4 milhões de toneladas de bagaço de cana na safra 2011/2012, com uma relação bagaço/cana moída média nacional ponderada pela produção de 29,13% (Conab, 2013). Na safra 2015/2016 (último levantamento realizado), o país produziu 178,3 milhões de toneladas de bagaço, com relação bagaço/cana moída de 26,79% (Conab, 2019a). A relação bagaço/cana moída média desse período foi de 27,56% em base úmida. Com este indicador, estimou-se que, na safra de 2018/2019, tenham sido produzidos cerca de 170 milhões de toneladas de bagaço de cana (Tabela 1).

Tabela 1. Produção de bagaço de cana-de-açúcar e etanol, safras 2011/2012 a 2018/2019.

| Safr | Bagaço (1.000 Mg) | Cana-de-açúcar moída (1.000 Mg) | Bagaço/cana moída (%) | Etanol (1.000 m ³) | |
|---------|----------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------|
| | | | | Anidro | Hidratado |
| 2011/12 | 163.404 | 559.215 | 29,13 | 8.581 | 14.101 |
| 2012/13 | 165.122 | 588.478 | 28,02 | 9.844 | 13.382 |
| 2013/14 | 173.329 | 651.294 | 26,31 | 12.187 | 15.289 |
| 2014/15 | 168.308 | 633.927 | 26,55* | 12.079 | 16.401 |
| 2015/16 | 178.302 | 666.824 | 26,79 | 11.661 | 18.572 |
| 2016/17 | 179.664 | 651.841 | 27,56** | 11.589 | 15.665 |
| 2017/18 | 176.694 | 641.066 | 27,56** | 11.366 | 16.492 |
| 2018/19 | 171.117 | 620.832 | 27,56** | 9.917 | 23.186 |

*Relação média bagaço/cana moída das safras 2013/2014 e 2015/2016. **Média do período 2011/2012-2015/2016.

Fonte: Conab (2019a) e Unica (2019).

Embora o potencial para a produção de E2G seja grande, o custo de produção ainda é considerado relativamente elevado nas condições atuais de mercado, o que inviabiliza economicamente a produção em escala comercial. Procurou-se mostrar, no entanto, que o incremento da liberação de glicose na etapa de sacarificação, proporcionado pela ‘Cana Flex’, pode contribuir para melhorar os resultados econômicos do E2G no Brasil.

Para isso, estimou-se a produção de etanol anidro de segunda geração, com base em coeficientes técnicos de produção-padrão para uma variedade de cana não modificada, em cenários que

estabelecem percentuais de 10, 30, 50, 70 e 100% de destinação da biomassa para a produção de E2G. Para a variedade transformada ‘Cana Flex’ foi adotado um incremento de 24% na concentração final de glicose, a partir do tratamento do bagaço, com base nos resultados da pesquisa descritos detalhadamente em Souza et al. (2019). Esse incremento pode estar associado ao aumento de eficiência na disponibilização de celulose, nas etapas anteriores à hidrólise enzimática – por exemplo, redução da cristalinidade do material e maior facilidade de remoção de hemicelulose e lignina no pré-tratamento –, e ao aumento de conversão de celulose à glicose, na hidrólise enzimática. Os parâmetros referentes à etapa de fermentação alcoólica, definidos para a cana não modificada, foram mantidos para a ‘Cana Flex’.

Os benefícios econômicos com a tecnologia foram mostrados em volume de produção, com valor em reais, tendo-se considerado o preço médio pago aos produtores de São Paulo pelo etanol anidro, em 2018, e em geração de CBios.

Impacto econômico e ambiental no âmbito da política nacional RenovaBio

A política nacional RenovaBio, instituída pela Lei n.º 13.576, de 26 de dezembro de 2017 (Brasil, 2017, art. 1º), é uma política de Estado que tem os seguintes objetivos:

I - contribuir para o atendimento aos compromissos do Brasil, no âmbito do Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima;

II - contribuir com a adequada relação de eficiência energética e de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na produção, na comercialização e no uso de biocombustíveis, inclusive com mecanismos de avaliação de ciclo de vida;

III - promover a adequada expansão da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética nacional, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis;

IV - contribuir com previsibilidade para a participação competitiva dos diversos biocombustíveis no mercado nacional de combustíveis.

O último objetivo está estreitamente alinhado ao sétimo objetivo de desenvolvimento sustentável (ODS 07) da Organização das Nações Unidas, que trata de energia renovável, em que se estabelece, entre outras metas, a de aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global até 2030 (Nações Unidas Brasil, 2021).

A RenovaBio prevê a remuneração de produtores de biocombustível pelo desempenho ambiental, utilizando para isso a emissão dos chamados CBios. O funcionamento da RenovaBio tem como mecanismo principal a compra e venda desses créditos, que serão negociados em bolsa de valores e funcionarão como um novo produto para as companhias. De um lado estão os produtores de biocombustíveis (etanol, biodiesel e bioquerosene), que irão credenciar seus processos produtivos junto às certificadoras (instituições credenciadas para este fim) e receberão os CBios. Do outro lado estão as distribuidoras de combustíveis, que possuem metas individuais de redução das emissões de acordo com a fatia de mercado de combustíveis fósseis que possuem. As distribuidoras terão de adquirir CBios para atingir as metas individuais de redução de emissões (Brasil, 2019). Para o ano de 2021, foram definidas metas compulsórias definitivas de redução de emissões de GEE de 24,86 milhões de CBios (ANP, 2021). Até 15 de maio de 2021, o volume depositado de CBios para comercialização na bolsa de valores B3 correspondia a 62% da meta da política nacional RenovaBio para 2021 (B3, 2021).

Para comprovar o desempenho ambiental da produção de etanol em particular, as usinas de biocombustíveis deverão detalhar os aspectos agrícolas e industriais de seus processos produtivos que resultam na emissão de carbono. Essa análise tem como base a avaliação do ciclo de vida (ACV). A emissão total é comparada com a do combustível fóssil equivalente (a gasolina, no caso do etanol, ou

o diesel, para o biodiesel) e resulta em uma nota final que caracteriza a mitigação das emissões. Todo o cálculo para se chegar a essa nota de eficiência será realizado com o uso da ferramenta RenovaCalc. A nota final atribuída ao processo produtivo representa a diferença entre a intensidade de carbono existente no combustível fóssil substituto (por exemplo, gasolina) e a intensidade de carbono estabelecida no processo que estiver sendo certificado pela RenovaBio (por exemplo, etanol 2G).

Portanto, o fator para emissão dos CBios é a nota de eficiência energético-ambiental atribuída ao produtor, a partir das informações do seu processo produtivo. Cada tonelada de gás carbônico, comprovadamente retirada da atmosfera por um produtor de biocombustível, gera a emissão de um título de CBio. A emissão dos CBios teve início em dezembro de 2019, e a vigência da política RenovaBio teve início em janeiro de 2020 (Brasil, 2019).

Neste estudo, buscou-se simular emissões de CBios para o cenário de produção de etanol E2G, com a utilização de 10% do bagaço produzido na safra 2018/2019. Para isto, foram informados, na calculadora RenovaCalc, os seguintes dados: quanto a terceiros, bagaço processado de cana, em toneladas, considerando-se 50% de umidade; distância de transporte; e rendimento de etanol anidro, medido em litros por tonelada de bagaço. Adotou-se a distância média geral de 25 km, no transporte da cana-de-açúcar, da colheita até a indústria, conforme Conab (2019a). Considerou-se 100% do transporte de etanol anidro como rodoviário. Não se considerou a produção de etanol hidratado. Da mesma forma, não se consideraram, no cálculo da nota de eficiência, os insumos relativos à fase industrial (enzimas, ácido sulfúrico, amônia e hidróxido de sódio), em razão da dificuldade de obtenção desses dados junto às empresas. Entre os dois processos produtivos analisados, interessa observar a diferença de eficiência quanto ao rendimento de etanol por biomassa ('Cana Flex' *versus* cana não modificada).

Rentabilidade do investimento em pesquisa e desenvolvimento

A análise de rentabilidade do investimento em P&D levou em consideração despesas de P&D e benefícios econômicos esperados com a adoção da tecnologia no mercado brasileiro.

Para o levantamento do custo de geração da tecnologia, consideraram-se as despesas diretas do projeto financiado com recursos do sistema Embrapa gestão (SEG), ao longo de cinco anos, bem como as despesas indiretas, relacionadas à administração e manutenção do centro de pesquisa da Embrapa Agroenergia, que envolvem gastos com pessoal, depreciação de infraestrutura e treinamento. A estimativa de despesas de pessoal considerou o tempo dedicado de cada membro da equipe, ao longo da execução do projeto, e o valor da hora de acordo com o cargo. Da mesma forma, o custo de depreciação da estrutura física usada no projeto, especialmente de laboratórios, foi calculado com base no tempo de uso das instalações pela equipe e no valor da depreciação por hora de uso.

O fluxo de benefícios utilizado na análise corresponde a uma parcela dos ganhos adicionais com a comercialização de CBios, que serão mostrados adiante nos resultados do estudo.

Considerou-se um período de 20 anos, em que o investimento no desenvolvimento da tecnologia deve ser realizado nos 5 primeiros anos, sem gerar nenhuma receita, apenas fluxo negativo. Nos dois anos seguintes, considerou-se que não deveria haver despesas com pesquisa e nem geração de renda, pois seria o período para a transferência da tecnologia e o crescimento vegetativo da cana até o primeiro corte, que é imprescindível para a multiplicação de toletes e a consequente ampliação da área cultivada com a variedade. Por ser uma avaliação *ex ante*, não se dispõe no momento de informações sobre gastos com transferência de tecnologia. Optou-se por deixar esses dois anos zerados no fluxo de caixa. A partir do oitavo ano, começariam os ganhos com a produção de E2G e não haveria mais investimentos em P&D. No caso do presente estudo, o fluxo de receita refere-se aos ganhos com a comercialização de CBios. São geradas receitas crescentes até o 17.º ano, quando a produção se estabilizaria em 10% do processamento de bagaço de cana, permanecendo a mesma receita até o 20.º ano.

Os indicadores de rentabilidade utilizados na análise foram: taxa interna de retorno (TIR), relação custo-benefício (CB) e valor presente líquido (VPL).

Tendo em vista o longo prazo estabelecido na análise ora proposta, cabe destacar que especialistas apontam que a migração para o carro elétrico pode tornar-se uma vantagem competitiva para o Brasil, considerando-se o desenvolvimento de carro elétrico com célula de combustível que usa etanol, em vez de hidrogênio líquido. Nesse caso, a célula de combustível extrai o hidrogênio do etanol, sem gerar emissões de gases, e tem maior eficiência ambiental. Neste sentido, o estudo de Andersson & Börjesson (2021) mostra que os combustíveis renováveis têm um maior potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida do que uma mistura de eletricidade de baixo carbono. Os autores verificaram que veículos híbridos *plug-in* podem permitir que o setor automotivo alcance objetivos climáticos mais ambiciosos do que os veículos elétricos a bateria. Portanto, ao contrário do que se poderia esperar, o impacto do carro elétrico pode ser positivo para o setor sucroenergético do Brasil nas próximas décadas. Serão necessários, no entanto, investimentos para a incorporação dessas tecnologias à produção automobilística do país, assim como elevar a produção de biocombustíveis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentam as estimativas de volume de produção, valor da produção e CBios da ‘Cana Flex’, em comparação a uma cana não modificada, além dos resultados da análise de retorno do investimento em P&D.

Produção de etanol anidro de segunda geração: ‘Cana Flex’ versus cana não modificada

Nos cenários de produção de E2G (etanol anidro), consideraram-se os coeficientes técnicos de produção, a partir do processamento de percentuais do bagaço de cana gerados na safra 2018/2019 (Tabela 2).

Partindo-se do cenário mais conservador, em que apenas 10% do bagaço gerado na safra 2018/2019 seria destinado à produção de etanol anidro de segunda geração, seria possível produzir 1,6 milhões de m³, com a cana não modificada, e 2 milhões de m³, com a ‘Cana Flex’. Os volumes de produção poderiam chegar a 16,4 e 20,3 milhões de m³, com as duas variedades de cana, respectivamente, se todo o bagaço estimado fosse destinado à produção de E2G (Tabela 2).

Calculou-se o diferencial em eficiência produtiva e em valor da produção, proporcionado pela adoção da ‘Cana Flex’ (Tabela 3). Tendo-se como referência o cenário com 30% do bagaço de cana destinado à produção de E2G, seria possível produzir o equivalente a 4,91 bilhões de litros de etanol a partir de cana não modificada. Essa produção aumentaria para 6,09 bilhões de litros, se o bagaço utilizado fosse de ‘Cana Flex’. O ganho estimado com a adoção da tecnologia neste cenário seria de 1,18 bilhões de litros, que poderia chegar ao máximo de 3,9 bilhões de litros, se todo o bagaço gerado fosse de ‘Cana Flex’ e 100% destinado à produção de E2G. Em termos monetários, o ganho seria da ordem de R\$ 2,14 bilhões, para o cenário de 30% de bagaço destinado à produção de E2G, que chegaria a R\$ 7,14 bilhões no cenário de adoção máxima, ou seja, 100% do bagaço destinado à produção de E2G (Tabela 3).

Considerando-se que, em 2018, a produção de etanol total (anidro e hidratado) foi de 33,10 bilhões de litros, a produção de E2G projetada nesse cenário (6,09 bilhões de litros) equivaleria a 18,4% da produção nacional, e o ganho com a tecnologia ‘Cana Flex’ (1,18 bilhões de litros) equivaleria a 3,6% da produção total de 2018. É um adicional significativo, especialmente para um produto cujo processo produtivo está em fase de aprimoramento, não apenas no Brasil, mas em vários países, buscando maior eficiência produtiva e/ou redução de custos, para viabilizar-se economicamente.

Tabela 2. Coeficientes técnicos de produção para cenários de produção de etanol 2G, a partir de cana não modificada e ‘Cana Flex’.

| Cenários de destinação de bagaço para E2G (%) | Bagaço destinado a E2G, (1000 t, base úmida) | Bagaço destinado a E2G (1000 t, base seca) ^(a) | Massa de celulose possível (1000 t) ^(b) | Massa de celulose na cana não modificada (1000 t) ^(c) | Massa de glicose na hidrólise enzimática: cana não modificada (1000 t) ^(d) | Volume de etanol anidro: cana não modificada (1000 m ³) ^(e) | Massa de glicose na hidrólise enzimática: Cana Flex (1000 t) ^(f) | Volume de etanol anidro produzido: Cana Flex (1000 m ³) ^(g) |
|---|--|---|--|--|---|--|---|--|
| 10 | 17.110,13 | 8.555,06 | 3.268,03 | 2.941,23 | 2.750,05 | 1.638,60 | 3.410,06 | 2.031,86 |
| 30 | 51.330 | 25.665,19 | 9.804,10 | 8.823,69 | 8.250,15 | 4.915,80 | 10.230,19 | 6.095,59 |
| 50 | 85.551 | 42.775,32 | 16.340,17 | 14.706,16 | 13.750,26 | 8.192,99 | 17.050,32 | 10.159,31 |
| 70 | 119.771 | 59.885,45 | 22.876,24 | 20.588,62 | 19.250,36 | 11.470,19 | 23.870,45 | 14.223,03 |
| 100 | 171.101 | 85.550,65 | 32.680,35 | 29.412,31 | 27.500,51 | 16.385,98 | 34.100,64 | 20.318,62 |

Considerando-se os seguintes parâmetros: ^(a)50% de umidade, teor padrão de umidade do bagaço enviado à caldeira; ^(b)o percentual médio de celulose, determinado por metodologia do NREL para diferentes bagaços = 38,2% (base seca); ^(c)90% de eficiência de disponibilização de celulose; ^(d)o coeficiente estequiométrico de conversão de celulose à glicose, em massa, de 1,1 e 85% de conversão na etapa de hidrólise enzimática; ^(e)o coeficiente estequiométrico de conversão de glicose a etanol, em massa, de 0,511, e 92% de rendimento na etapa de fermentação, coeficiente usual de fermentação alcoólica industrial e densidade do etanol de 0,789 kg L⁻¹; ^(f)para ‘Cana Flex’, mantidos os mesmos parâmetros de umidade e composição, com incremento de 24% na liberação de glicose durante processo de sacarificação; ^(g)os mesmos parâmetros de fermentação alcoólica definidos para a cana não modificada.

Tabela 3. Estimativa de ganhos com a tecnologia em cenários de adoção

| Cenários de destinação de bagaço para E2G | Etanol anidro 2G (1000 m ³) | | | Ganho com a tecnologia | |
|---|---|-----------|------------------------|------------------------------|---------------|
| | Cana não modificada | Cana Flex | (1000 m ³) | (preço R\$ L ⁻¹) | (R\$ milhões) |
| | A | B | C=A-B | D | E=C*D |
| 10% | 1.638,60 | 2.031,86 | 393,26 | | 714,60 |
| 30% | 4.915,8 | 6.095,6 | 1.179,8 | | 2.143,8 |
| 50% | 8.193,0 | 10.159,3 | 1.966,3 | 1,8171 ¹ | 3.573,0 |
| 70% | 11.470,2 | 14.223,0 | 2.752,8 | | 5.002,2 |
| 100% | 16.386,0 | 20.318,6 | 3.932,6 | | 7.146,0 |

1 - Preço do etanol anidro recebido pelo produtor, em São Paulo, em 2018 (CEPEA/ESALQ, 2019).

Nos resultados obtidos pela calculadora *RenovaCalc*, o detalhamento de cálculos para se chegar à uma estimativa de receita obtida com os CBios mostra que a intensidade de carbono, gerada na produção do etanol anidro de segunda geração, seria de 2,2 g CO₂eq MJ⁻¹, o que geraria uma nota de eficiência de 85,2 g CO₂eq MJ⁻¹ dada pela diferença entre a intensidade de carbono do etanol anidro e da gasolina (Tabela 4). A intensidade de carbono da gasolina é de 87,4 g CO₂eq MJ⁻¹. Essa informação é fornecida pela planilha de apoio da *RenovaCalc*. No presente estudo, considerou-se que 100% da produção seriam elegíveis para a política nacional *RenovaBio*, ou seja, não haveria irregularidades nas informações submetidas na fase de certificação, e seria um produto obtido a partir de resíduos. Optou-se, para fins dessa simulação, pelo cenário mais conservador de produção, em que apenas 10% do bagaço gerado na safra 2018/2019 seria processado para produção de E2G (1,6 milhões m³, para cana não modificada, e 2 milhões m³, para ‘Cana Flex’).

O poder calorífico inferior (PCI) do etanol hidratado é de 28,26 MJ kg⁻¹ que, ao ser multiplicado pela nota de eficiência resulta em um total de redução de emissões de carbono de 2.407,75 g CO₂eq kg⁻¹ etanol ou 1.904,53 g CO₂eq L⁻¹ de etanol. Isso significa que, ao substituir-se a gasolina pelo total de E2G produzido com a cana não modificada, deixar-se-ia de emitir um total de 3.120.762,76 t CO₂eq. Para a produção com a ‘Cana Flex’, a redução da emissão seria maior, da ordem de 3.869.745,82 t CO₂eq. Aqui fica evidente a vantagem da tecnologia, pois gera maior redução de emissões de CO₂ para a mesma quantidade de biomassa processada.

Tabela 4. Parâmetros do E2G no âmbito da política nacional RenovaBio.

| Parâmetro | Cana não modificada | Cana Flex |
|---|----------------------|----------------------|
| Intensidade de carbono etanol anidro (g CO ₂ eq MJ ⁻¹) | 2,2 | 2,2 |
| Intensidade de carbono gasolina (g CO ₂ eq MJ ⁻¹) | 87,4 | 87,4 |
| Nota de eficiência energético-ambiental(g CO ₂ eq MJ ⁻¹) | 85,2 | 85,2 |
| Produção de etanol anidro (m ³) | 1.638.598,37 | 2.031.861,98 |
| Volume elegível (%) | 100 | 100 |
| Volume elegível de etanol (m ³) | 1.638.598,37 | 2.031.861,98 |
| Poder calorífico inferior (MJ kg ⁻¹ de etanol) | 28,26 | 28,26 |
| Intensidade de carbono evitado (g CO ₂ eq kg ⁻¹ etanol) | 2.407,75 | 2.407,75 |
| Massa específica (kg L ⁻¹) | 0,791 | 0,791 |
| Emissão de carbono evitada (g CO ₂ eq L ⁻¹ etanol) | 1.904,53 | 1.904,53 |
| Emissão de carbono evitada (g CO ₂ eq) | 3.120.762.759.442,20 | 3.869.745.821.708,33 |
| CBio (t CO ₂ eq) | 3.120.762,76 | 3.869.745,82 |
| Valor do CBio (\$ t ⁻¹ CO ₂ eq) | 10 | 10 |
| Receita (\$) | 31.207.627,59 | 38.697.458,22 |
| Receita (R\$) | 156.038.137,97 | 193.487.291,09 |
| Receita (R\$ L ⁻¹) | 0,095 | 0,095 |

Em termos de impacto econômico e, assumindo-se que o CBio seja comercializado por US\$10, por tonelada de CO₂eq (Ceise, 2019), o ganho por litro de E2G anidro seria de R\$ 0,095. Observa-se que a receita obtida na venda de CBios, a partir da ‘Cana Flex’ (R\$ 193,4 milhões), supera a receita gerada com a cana não modificada (R\$ 156 milhões) em R\$ 37,4 milhões, considerando-se a taxa de câmbio R\$/US\$ igual a 5.

Portanto, não havendo diferença na etapa agrícola e sendo desconsideradas quaisquer diferenças no uso de insumos na etapa industrial, a eficiência energética do etanol anidro 2G, a partir das duas variedades de cana, é a mesma. O que difere é a maior produção em litros de etanol por unidade de biomassa processada, proporcionado pela ‘Cana Flex’. Assim, verificou-se que é possível obter maior quantidade de créditos de descarbonização por unidade de biomassa processada e, conseqüentemente, maior receita advinda da comercialização de CBios a partir da variedade de cana modificada.

Análise de retorno do investimento em pesquisa e desenvolvimento

A análise de rentabilidade avaliou o retorno econômico do investimento em P&D (gastos diretos e indiretos com a pesquisa) relativamente aos ganhos esperados com a sua adoção no mercado brasileiro. Os valores relativos ao fluxo de investimento em P&D e fluxos de receita que irão compor o fluxo de caixa estão detalhados (Tabelas 5 e 6).

Tabela 5. Estimativa dos custos da pesquisa.

| Ano | Custo de pessoal | Custeio de pesquisa | Depreciação de capital | Custo de administração | Total |
|-------|------------------|---------------------|------------------------|------------------------|--------------|
| 2012 | 176.279,10 | 113.500,00 | 34.356,88 | 17.025,00 | 341.160,98 |
| 2013 | 528.837,30 | 358.500,00 | 103.070,63 | 53.775,00 | 1.044.182,93 |
| 2014 | 528.837,30 | 168.600,00 | 103.070,63 | 25.290,00 | 825.797,93 |
| 2015 | 528.837,30 | | 103.070,63 | | 631.907,93 |
| 2016 | 528.837,30 | | 103.070,63 | | 631.907,93 |
| 2017 | 88.139,55 | | 17.178,44 | | 105.317,99 |
| Total | 2.379.767,85 | 640.600,00 | 463.817,84 | 96.090,00 | 3.580.275,64 |

A estimativa de custos da pesquisa inclui despesas diretas e indiretas. As despesas indiretas referem-se a gasto com pessoal e depreciação de capital, que ficariam a cargo da Embrapa Agroenergia. As despesas diretas incluem custeio de pesquisa e custo de administração.

As despesas de custeio da pesquisa e custo de administração foram previstas para projeto de pesquisa, com orçamento de R\$ 886.690,00. Deste total, R\$ 96.090,00 seriam destinados às taxas de administração e R\$ 640.600,00 gastos com despesas da pesquisa. As despesas indiretas, compostas pelo custo de pessoal e depreciação de capital, foram estimadas em R\$ 2.379.767,84 e R\$ 463.817,84, respectivamente. Observa-se que o custo total do desenvolvimento da tecnologia no período de 2012 a 2017 seria de R\$ 3,58 milhões, sendo 66,47% destinado a custeio de pessoal, 17,89% custeio de pesquisa, 12,95% depreciação de capital e 2,68% custos de administração (Tabela 5).

Para a receita, considerou-se um cenário conservador de adoção da tecnologia, supondo-se aumento gradativo do percentual de processamento do bagaço de 1% ao ano até atingir 10% de processamento de bagaço para a produção de E2G no décimo ano (Tabela 6). Assim, com 1% do total de bagaço de cana, no primeiro ano seriam produzidos 203 mil m³ de etanol anidro de segunda geração com a ‘Cana Flex’, o que equivaleria a 387 mil CBios. O diferencial de CBios obtidos com a ‘Cana Flex’, em comparação à cana não modificada, seria de 74,9 mil CBios, o equivalente a R\$ 3,7 milhões, ao preço de \$10 ou R\$ 50,00 cada CBio.

Com um aumento gradativo da produção de E2G, empregando-se ao final de 10 anos o equivalente a 10% do bagaço de cana da safra 2018/2019, o benefício econômico da ‘Cana Flex’, baseado na comercialização de CBios, chegaria a R\$ 37,4 milhões, conforme definido anteriormente. Foram geradas receitas crescentes com a comercialização de CBios até o 17.º ano, quando a produção se estabilizaria em 10% do processamento de bagaço de cana, permanecendo a mesma receita até o 20º ano.

Tabela 6. Receita de CBios em cenário de expansão gradativa da produção de E2G.

| Ano | Bagaço (%) | Produção de etanol anidro (m ³) | | Emissão de carbono evitada (t CO ₂ eq) | | | CBIO tCO ₂ eq (R\$) | Benefício econômico (R\$) | Participação da Embrapa (%) | Participação da Embrapa (R\$) |
|-----|------------|---|--------------|---|--------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | | Cana não modificada | Cana Flex | Cana não modificada | Cana Flex | Ganhos com a tecnologia | | | | |
| | | | | (A) | (B) | C=(B-A) | D | E=(C*D) | (F) | G=(E*F) |
| 1 | 1 | 163.859,84 | 203.186,20 | 312.076,28 | 386.974,58 | 74.898,31 | 50,00 | 3.744.915,31 | 70 | 2.621.440,72 |
| 2 | 2 | 327.719,67 | 406.372,40 | 624.152,55 | 773.949,16 | 149.796,61 | 50,00 | 7.489.830,62 | 70 | 5.242.881,43 |
| 3 | 3 | 491.579,51 | 609.558,59 | 936.228,83 | 1.160.923,75 | 224.694,92 | 50,00 | 11.234.745,93 | 70 | 7.864.322,15 |
| 4 | 4 | 655.439,35 | 812.744,79 | 1.248.305,10 | 1.547.898,33 | 299.593,22 | 50,00 | 14.979.661,25 | 70 | 10.485.762,87 |
| 5 | 5 | 819.299,19 | 1.015.930,99 | 1.560.381,38 | 1.934.872,91 | 374.491,53 | 50,00 | 18.724.576,56 | 70 | 13.107.203,59 |
| 6 | 6 | 983.159,02 | 1.219.117,19 | 1.872.457,66 | 2.321.847,49 | 449.389,84 | 50,00 | 22.469.491,87 | 70 | 15.728.644,31 |
| 7 | 7 | 1.147.018,86 | 1.422.303,39 | 2.184.533,93 | 2.708.822,08 | 524.288,14 | 50,00 | 26.214.407,18 | 70 | 18.350.085,02 |
| 8 | 8 | 1.310.878,70 | 1.625.489,59 | 2.496.610,21 | 3.095.796,66 | 599.186,45 | 50,00 | 29.959.322,49 | 70 | 20.971.525,74 |
| 9 | 9 | 1.474.738,53 | 1.828.675,78 | 2.808.686,48 | 3.482.771,24 | 674.084,76 | 50,00 | 33.704.237,80 | 70 | 23.592.966,46 |
| 10 | 10 | 1.638.598,37 | 2.031.861,98 | 3.120.762,76 | 3.869.745,82 | 748.983,06 | 50,00 | 37.449.153,11 | 70 | 26.214.407,18 |

Para fins da análise de retorno do investimento em P&D, considerou-se a participação da Embrapa nos benefícios econômicos de 70%, tendo-se em vista colaboradores externos, assim como a interação com atores locais no momento da adoção (Tabela 7).

Tabela 7. Indicadores de rentabilidade do investimento em pesquisa

| Taxa interna de retorno - TIR | Relação custo/benefício - B/C (6%) | Valor presente líquido - VPL (6%) |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 47% | 18,25 | R\$ 87.938.829,62 |

Observa-se que o investimento retornaria uma TIR de 47%, o que indica viabilidade econômica, pois essa taxa é superior às taxas de juros de mercado que poderiam ser adotadas como referência. A taxa Selic, por exemplo, que é a taxa básica de juros do mercado brasileiro, fechou em 4,5% ao ano na reunião do Copom de 11/12/2019. A taxa máxima atingida pela Selic, nos últimos três anos, foi de 12,9% ao ano, em janeiro de 2017 (Bacen, 2020). Atualmente, em razão da pandemia do coronavírus,

as taxas de juros no mundo estão com viés de baixa, chegando até mesmo a juros negativos em alguns países. Optou-se por utilizar a taxa de 6% ao ano, como taxa mínima de atratividade para esta análise.

A relação de custo-benefício obtida foi de R\$18,25, o que significa que, para cada R\$ 1,00 investido na pesquisa, a tecnologia retornaria R\$ 18,25 de receita adicional obtida com CBio. Ao final de 20 anos, a tecnologia geraria um VPL de R\$ 87,9 milhões, ou seja, pagaria todo o investimento, com remuneração dos valores à taxa de 6% ao ano, e retornaria esse montante no final do período.

Os resultados indicam que os investimentos em pesquisa têm grande potencial de retorno para o setor produtivo e para a sociedade de modo geral. Optou-se por um cenário conservador, em que o processamento de bagaço atingiria o máximo de 10% do total de bagaço gerado no país. Outra suposição conservadora é a do fluxo de receitas, que são oriundas apenas do ganho adicional em CBios, embora se tenha mostrado o adicional de aumento de produção e receita propriamente dita. Considerou-se, ainda, que a participação da Embrapa no ganho econômico gerado pela tecnologia seria de 70%, levando-se em consideração a participação de outros parceiros no desenvolvimento e adoção da tecnologia. Ainda assim, os indicadores de viabilidade econômica apontam elevado retorno do investimento P&D.

CONCLUSÃO

Neste estudo, avaliaram-se os impactos econômicos e ambientais *ex ante* com a adoção da ‘Cana Flex’, cultivar desenvolvida pela Embrapa que oferece um incremento de 24% na concentração final de glicose, a partir do tratamento do bagaço da cana.

Observaram-se impactos econômicos relevantes que resultariam da produção de E2G por volume de biomassa processada da ‘Cana Flex’, em comparação a uma variedade de cana não modificada. Observou-se que se 10% do bagaço de cana produzido na safra 2018/2019 fosse destinado à produção de E2G, o diferencial da ‘Cana Flex’ com uma variedade não modificada implicaria o aumento de 393.263,6 m³ da produção de etanol, adicional que seria equivalente a R\$ 714,6 milhões. Em termos de impacto ambiental, esse diferencial implicaria a redução da emissão de 748.983,06 t CO₂eq. No âmbito da política nacional RenovaBio, essa redução de emissão de CO₂ geraria o equivalente a R\$ 37,4 milhões na comercialização de CBios.

A análise do retorno dos investimentos em P&D compreendeu um período de 20 anos, dos quais cinco anos seriam dedicados ao desenvolvimento da tecnologia, 2 anos à sua transferência ao mercado, e 13 anos à adoção progressiva pelo setor produtivo. A taxa interna de retorno do investimento na pesquisa, para o fluxo de renda relativo à 70% dos ganhos com a geração de CBios, seria de 47%, com VPL de R\$ 87.938.829,62. Os resultados indicaram a viabilidade econômica do investimento em P&D.

A tecnologia ‘Cana Flex’ tem grande potencial para contribuir com as metas do Brasil para a redução de emissões de GEE, via matriz de combustível, além de gerar ganhos econômicos importantes para o setor produtivo. Espera-se que os resultados obtidos até este momento em escala piloto sejam confirmados em escala industrial, o que constitui os próximos passos do desenvolvimento da tecnologia. A expectativa é que a ‘Cana Flex’ contribua de forma decisiva para a viabilidade econômica do E2G nos próximos anos, consolidando a posição do Brasil como líder no mercado global de biocombustível.

REFERÊNCIAS

ANDERSSON, Ö.; BÖRJESSON, P. The greenhouse gas emissions of an electrified vehicle combined with renewable fuels: life cycle assessment and policy implications. *Applied Energy*, v.289, 116621, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116621>.

- ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Metas individuais compulsórias definitivas de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/metas-individuais-compulsorias-definitivas-de-reducao-de-emissoes-de-gases-causadores-do-efeito-estufa-para-2021>>. Acesso em: 18 maio 2021.
- APROBIO. Associação dos Produtores de Biocombustíveis do Brasil. Quão competitiva é a produção de biocombustíveis no Brasil e nos Estados Unidos. Disponível em: <<https://aprobio.com.br/noticia/quao-competitiva-e-a-producao-de-biocombustiveis-no-brasil-e-nos-estados-unidos>>. Acesso em: 4 set. 2019.
- B3. Renda fixa: dados por ativo. Disponível em: <http://www.b3.com.br/pt_br/market-data-e-indices/servicos-de-dados/market-data/historico/renda-fixa/>. Acesso em: 18 maio 2021.
- BACEN. Banco Central do Brasil. Taxas de juros básicas: histórico. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>>. Acesso em: 8 jan. 2020.
- BRASIL. Decreto nº 9.888, de 27 de junho de 2019. Dispõe sobre a definição das metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis de que trata a Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e institui o Comitê da Política Nacional de Biocombustíveis - Comitê RenovaBio. 2019. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/Decreto/D9888.htm>. Acesso em: 24 set. 2019.
- BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. 2017. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/L13576.htm>. Acesso em: 24 set. 2019.
- CEISE. Centro Nacional das Indústrias do Setor Sucroenergético e Biocombustíveis. Certificadas no RenovaBio poderão vender 29 milhões de CBios em 2020. Disponível em: <<http://www.ceisebr.com/conteudo/certificadas-no-RenovaBio-poderao-vender-29-milhoes-de-CBios-em-2020.html>>. Acesso em: 2 dez. 2019.
- CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia. Banco de Dados. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/consultas-ao-banco-de-dados-do-site.aspx>>. Acesso em: 29 out. 2019.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Perfil do Setor do Açúcar e do Etanol no Brasil: edição para a safra 2015/16. 2019a. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana>>. Acesso em: 12 nov. 2019.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Perfil do Setor do Açúcar e do Etanol no Brasil: v.5: safra 2011/2012. Brasília, 2013. 88p. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana>>. Acesso em: 12 nov. 2019.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Série Histórica das Safras. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/serie-historica-das-safra>>. Acesso em: 4 set. 2019b.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Série Histórica das Safras: cana-de-açúcar - agrícola. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/serie-historica-das-safra>>. Acesso em: 18 maio 2021a.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Série Histórica das Safras: cana-de-açúcar - indústria. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/serie-historica-das-safra>>. Acesso em: 18 maio 2021b.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis: ano 2020. [Rio de Janeiro], 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2020>>. Acesso em: 18 ago. 2021.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Cenários de oferta de etanol e demanda do ciclo Otto 2018-2030. Rio de Janeiro, 2018.
- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/advQuery>>. Acesso em: 11 maio 2021.
- NAÇÕES UNIDAS BRASIL. Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7: energia limpa e acessível: garantir o acesso a fontes de energia confiáveis, sustentáveis e modernas para todos. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/7>>. Acesso em: 18 maio 2021.
- NOVACANA. Dilema do etanol 2G: os desafios da matéria-prima celulósica. 2017a. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/dilema-etanol-2g-desafios-materia-prima-celulosica-260117>>. Acesso em: 10 fev. 2020.
- NOVACANA. Etanol celulósico na encruzilhada: gargalos continuam e usinas atingem, em média, apenas 7% da capacidade. 2017b. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/etanol-celulosico-encruzilhada-gargalos-usinas-7-capacidade-310517>>. Acesso em: 10 fev. 2019.
- NOVACANA. Etanol celulósico: CTBE e Novozymes atacam o custo das enzimas. 2015. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/etanol-celulosico-ctbe-novozymes-atacam-custo-enzimas-030315>>. Acesso em: 10 fev. 2020.
- NOVACANA. Raízen irá investir em nova planta de etanol de segunda geração. 2021. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/raizen-investir-nova-planta-etanol-segunda-geracao-250621>>. Acesso em: 19 ago. 2021.
- REIS, A. Quanta cana de fornecedores as usinas estão usando atualmente. Jornal Cana, 17 set. 2020. Disponível em: <<https://jornalcana.com.br/quanta-cana-de-fornecedores-as-usinas-estao-usando-atualmente/>>. Acesso em: 17 maio 2021.
- RFA. Renewable Fuels Association. Annual fuel ethanol production: U.S. and world ethanol production. Disponível em: <<https://ethanolrfa.org/statistics/annual-ethanol-production/>>. Acesso em: 12 maio 2021.

SOUZA, W.R. de; PACHECO, T.F.; DUARTE, K.E.; SAMPAIO, B.L.; MOLINARI, P.A. de O.; MARTINS, P.K.; SANTIAGO, T.R.; FORMIGHIERI, E.F.; VINECKY, F.; RIBEIRO, A.P.; CUNHA, B.A.D.B.da; KOBAYASHI, A.K.; MITCHELL, R.A.C.; GAMBETTA, D. de S.R.; MOLINARI, H.B.C. Silencing of a BAHD acyltransferase in sugarcane increases biomass digestibility. *Biotechnology for Biofuels*, v.12, art.111, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1450-7>.

UDOP. União Nacional da Bioenergia. Usinas e fornecedores de cana duelam por crédito de carbono. Disponível em: <<https://www.udop.com.br/noticia/2021/04/12/usinas-e-fornecedores-de-cana-duelam-por-credito-de-carbono.html>>. Acesso em: 17 abr. 2021.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Setor Sucroenergético. Disponível em: <<https://www.unica.com.br/setor-sucroenergetico/>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Uso do etanol evita 515 milhões de toneladas de CO₂. 2020. Disponível em: <<https://unica.com.br/noticias/uso-do-etanol-evita-515-milhoes-de-toneladas-de-co2-na-atmosfera/>>. Acesso em: 19 ago. 2021.
