

O Sistema de Inovação Tecnológica da agro-energia da cana-de-açúcar no Brasil – da sua gênese à transição agroecológica atual

Por Edouard Lanckriet, com a contribuição de Marcelo Poppe

O Sistema de Inovação Tecnológica da agro-energia da cana-de-açúcar no Brasil – da sua gênese à transição agroecológica atual

Abstract

After the food crisis of 2007, the agro-energies were demonized and ostracized as development tools promoted by international institutions. The debate was mired in a false question of direct competition between bioenergy and food security. This confusion is all the more regrettable, since it is now well established that food insecurity is a particularly economic problem: famine in poor countries is due to lack of infrastructure and production technologies, not scarcity of arable land. The economic and agronomic successes of the countries that have structured sustainable agro-energy sectors, Brazil in the lead, justify that the question of the role of bioenergy in development strategies should be replaced and clarified by new angles of analysis.

The main function of agro-energies is that of an economic regulator of the agricultural sectors; they absorb surpluses, reduce their exposure to fluctuations in international markets, guarantee producer incomes, and secure the long-term investments that are essential for structuring long-term and competitive sectors. Thus, they are an instrument of food security. Furthermore, current developments in Brazil are related to the agro-ecological transition of the sugarcane production model. Still experimental, it allows restoring tropical soils and returns them to their function of CO₂ dissipation, to rebuild the natural tropical capital. The conditions for the success of the Brazilian model lie in a strong and complex framework and public support, motivated and legitimized by the orientation of the model's trajectories, at the service of national development strategies, based in a solid Technology Innovation System (SIT) associating public and private stakeholders.

Resumo

Após a crise alimentar de 2007, as agro-energias foram demonizadas e condenadas ao ostracismo como ferramentas de desenvolvimento promovidas por instituições internacionais. O debate ficou atolado em uma pergunta falsa, a da concorrência direta entre bioenergia e segurança alimentar. Essa confusão é ainda mais lastimável, uma vez que agora está bem estabelecido que a insegurança alimentar é um problema sobretudo econômico: a fome nos países pobres se deve à falta de infraestrutura e de tecnologias de produção, e não por escassez de terras aráveis. Os sucessos econômicos e agrônômicos dos países que estruturaram setores de agro-energia sustentáveis, o Brasil na liderança, justificam que a questão do papel das bioenergias em estratégias de desenvolvimento seja recolocada e esclarecida por novos ângulos de análise.

A principal função das agro-energias é a de um regulador econômico dos setores agrícolas; elas absorvem excedentes, reduzem sua exposição às flutuações nos mercados internacionais, garantem os rendimentos dos produtores e asseguram os investimentos de longo prazo que são essenciais para estruturar setores duradouros e competitivos. Assim, elas são um instrumento da segurança alimentar. Além disso, a evolução atual no Brasil diz respeito à transição agroecológica do modelo de produção da cana-de-açúcar. Ainda experimental, ela permite restaurar solos tropicais e devolve-los à sua função de dissipação de CO₂, para reconstruir o capital natural tropical. As condições para o sucesso do modelo brasileiro residem em um enquadramento e um apoio público forte e complexo, motivados e legitimados pela orientação das trajetórias do modelo a serviço de estratégias de desenvolvimento nacional, com base num sólido Sistema de Inovação Tecnológica (SIT) reunindo partes interessadas públicas e privadas.

I. Introdução

A agroindústria brasileira de cana-de-açúcar está transformando as terras tropicais em uma vantagem econômica competitiva através da produção de açúcar, etanol e eletricidade. Por esse motivo, o modelo brasileiro de cana é promovido no Brasil como uma alavanca de desenvolvimento e muitos países tropicais são tentados pela experiência de uma transferência desse modelo.

Análises precipitadas dos motivos da crise alimentar de 2007 levaram à histeria a discussão sobre a competição entre biocombustíveis e segurança alimentar. Como resultado, as agro-energias foram demonizadas, banidas de projetos apoiados por agências internacionais de desenvolvimento, e uma verdadeira “lei do silêncio” se instalou sobre o assunto em torno de 2010. Também é preciso desqualificar outro fator falsamente identificado como invalidando seu uso: sua falta de competitividade em relação aos derivados de petróleo.

A importância dada à questão da insegurança alimentar deu origem a inúmeros trabalhos que permitiram a evolução do debate. O óbvio hoje é que a insegurança alimentar é um problema econômico antes de ser um problema agrônomo. O argumento de uma competição direta entre produção de bioenergia e segurança alimentar não se sustenta na escala de um país, mas ainda ilude incautos e dificulta um exame incontestável da função das agro-energias numa estratégia de desenvolvimento.

Mais do que independência energética, o sucesso do modelo brasileiro se explica pelo domínio tecnológico que está associado a ele. A questão da tecnologia e, em termos gerais, a aquisição de habilidades de inovação é fundamental para questões de desenvolvimento. De fato, o papel da tecnologia é central no sucesso da bioenergia no Brasil. Para estudar o modelo brasileiro, é útil mobilizar o conceito de Sistema de Inovação Tecnológica (SIT). Na economia do desenvolvimento, esse conceito caracteriza todos os atores públicos e privados cujas interações ajudam a

moldar as trajetórias tecnológicas de um setor, a instalar e desenvolver novas indústrias. Ele permite caracterizar as ligações entre tecnologia e desenvolvimento.

Neste artigo, aplica-se o conceito de SIT à agroindústria brasileira de cana-de-açúcar. Analisa-se no longo prazo as condições de criação, depois a dinâmica de evolução do SIT brasileiro da cana-de-açúcar. Por SIT da cana, compreende-se todos os atores políticos, tecnológicos e industriais relacionados à cana-de-açúcar; aqueles que, por meio de sua ação, importam ou produzem e depois difundem as tecnologias relacionadas à oferta¹ de produtos da cana-de-açúcar, e à demanda² desses produtos, por outro lado.

Analisando no longo prazo - do final do século XIX até a atualidade - as trajetórias tecnológicas e o quadro político do SIT da cana, destacam-se duas questões: quais foram as condições de sucesso econômico das agro-energias e qual é sua função na estratégia de desenvolvimento brasileira. As respostas aqui analisadas lançam novas luzes sobre os debates relacionados ao papel da bioenergia nas estratégias de desenvolvimento.

Durante muito tempo, a implantação de setores agro-energéticos estimulou a formação das capacidades tecnológicas do capital humano brasileiro. Ao longo da sua trajetória, o SIT da cana garantiu a importação, adaptação e, finalmente, inovação das tecnologias necessárias para o desenvolvimento do setor sucroalcooleiro. O país tornou-se mestre de suas trajetórias tecnológicas e pode adaptar seu modelo aos desafios do desenvolvimento local.

II. O setor de etanol surge através da tecnologia, para responder às crises do preço do açúcar

O cultivo de cana-de-açúcar foi introduzido no Brasil assim que os colonos portugueses chegaram em 1530, inicialmente exclusivamente para produção de açúcar. Tornou-se a primeira atividade econômica organizada e continuou a ser a principal atividade econômica da colônia do século XVI ao século XVIII. Desde o início do século XX, o crescimento da indústria canavieira está intimamente ligado ao desenvolvimento tecnológico, mas essa dinâmica vai além da capacidade dos atores do setor, e requer o envolvimento e o apoio do Estado. Entre 1870 e 1970, uma dinâmica de transferência e difusão tecnológica se estabelece em resposta às várias crises da agroindústria da cana.

II.1. Final do século XIX - pré-história do Sistema de Inovação Tecnológica da cana

A primeira intervenção direta do Estado para apoiar a agroindústria açucareira remonta a 1873 e visa a atualização tecnológica da indústria para fortalecer sua competitividade nos mercados internacionais (Dunham et al., 2011). Um decreto

¹ Atualmente, principalmente, açúcar, etanol anidro, etanol hidratado e bioeletricidade.

² Essencialmente, dispositivos para consumo de etanol anidro, etanol hidratado e bioeletricidade a partir da cana.

promulgado pelo governo imperial em 1875³ apoia um movimento de modernização industrial iniciado por um grupo de gerentes de usinas do Estado de Pernambuco, com base na implantação de tecnologias importadas da França e da Inglaterra. Esse decreto reflete o desejo do governo imperial de apoiar a competitividade do açúcar brasileiro nos mercados internacionais, política de apoio financeiro ao setor que durou até meados da década de 1890 (Queda, 1972).

Em 1889, um novo decreto (Decreto 10.393), do governo republicano, introduziu uma condicionalidade tecnológica⁴ para a concessão de ajuda financeira ao setor. Essa medida foi ineficaz e fortemente contestada pelos produtores que, por sua mobilização, obtiveram o recuo do governo no ano seguinte. Essa sequência é considerada como fundadora do Sistema de Inovação Tecnológica da cana (Dunham et al., 2011), sobretudo pela mobilização que ela provocou entre os produtores de cana-de-açúcar, e as relações de influência estabelecidas a partir dela entre produtores e governo.

II.2. Início do XX – estabelecimento do Sistema de Inovação Tecnológica da cana

Entre o final do século XIX e o início do século XX, há uma crise crônica dos preços do açúcar nos mercados internacionais, o que afeta as receitas de exportação da indústria açucareira brasileira. Inspirados pela reação dos produtores ocidentais de açúcar de beterraba, em particular dos produtores franceses, à mesma crise, os produtores brasileiros se mobilizam para desenvolver um novo mercado para o setor açucareiro: o do etanol combustível⁵ (Barros Meira, 2003). Com efeito, para responder às crises do preço do açúcar, os produtores recebem apoio público para o desenvolvimento do segmento etanol. Nessa época, como não havia suficientemente carros em circulação para o etanol combustível representar um mercado significativo, o objetivo foi então utilizar o etanol combustível como fonte de calor, ou de luz para o mercado de iluminação pública⁶. Foi a Sociedade Nacional de Agricultura (SNA), que preparou desde 1901 a promoção dos usos do álcool como combustível, inclusive organizando congressos e exposições tecnológicas e industriais dedicadas ao etanol. Assim, pela primeira vez, o etanol brasileiro é

³ O Decreto 2.687 garantiu o financiamento a uma taxa anual de 7% e por um período que variava de 5 a 30 anos, dos investimentos relacionados à transformação de unidades de produção de açúcar artesanal ou semi-artesanal em unidades industriais.

⁴ O foco foi no tipo de difusor usado para extrair o suco da cana-de-açúcar, a escolha se baseando no que o governo considerou ser mais eficaz, e dizia respeito a uma tecnologia importada da Europa, onde foi desenvolvida por produtores de açúcar de beterraba.

⁵ Desde 1955, os produtores europeus de açúcar se preocuparam em desenvolver mercados para o etanol combustível/carburante de beterraba. As inovações tecnológicas e políticas desenvolvidas na Europa para abrir mercados para o etanol, com o objetivo de valorizar os excedentes de produção de beterraba, influenciaram fortemente os produtores brasileiros de cana-de-açúcar, que se mobilizaram para importá-las (Barros Meira, 2003).

⁶ A primeira menção à possível utilização do etanol como combustível no Brasil data de 1905 (Carlí, 1979). Comunicação feita durante a Segunda Conferência Açucareira, com base em um artigo alemão transcrito na revista "A Lavoura" sob o título "O desenvolvimento do uso do etanol". O principal interesse na época era a iluminação das cidades do interior.

utilizado para desenvolver a indústria da cana-de-açúcar, apresentado principalmente como uma solução para o problema de superprodução de açúcar (Barros Meira, 2003, Dunham et al., 2011).

O mercado de etanol combustível começa a se desenvolver no Brasil na década de 1910, no entanto, permanece muito limitado, pois o etanol combustível é mais caro do que os produtos concorrentes importados. A fraqueza do mercado não permite investir na necessária transformação tecnológica do setor para que o etanol absorva o excesso de cana produzido, pois de fato, o etanol combustível é produzido pela destilação do melaço residual. Sendo assim, ele não permite desempenhar o papel inicialmente visado pelos produtores: a absorção da produção excedente de cana-de-açúcar e a regulação dos preços do açúcar.

Os grupamentos de produtores representados pela SNA defendem junto ao governo o estabelecimento de um mecanismo de regulação de preços ou de subsídios para o mercado do etanol, mas o governo permanece insensível e o mercado do etanol permanece incipiente até meados da década de 1920 (Melo, 1942).

Apesar da ausência de um quadro regulatório para apoiar o setor de etanol, começa a se configurar o ecossistema de partes interessadas, a partir do qual o futuro SIT da cana vai se formar. A SNA representa os interesses dos atores industriais do setor junto ao governo e é através da tecnologia que ela pretende responder aos desafios de desenvolvimento do setor. Antes de 1920, o Brasil tinha pouca capacidade de inovação tecnológica, mas a rede de atores se organizou num primeiro momento para assegurar a transferência de tecnologia.

Com o desenvolvimento do automóvel, a década de 1920 testemunhou a importância estratégica dos combustíveis. Já nessa época, a conscientização sobre o limite das reservas de petróleo era alta⁷ e, no Brasil como nos Estados Unidos, o etanol foi percebido como o combustível do futuro (A Lavoura, 1923 citado por Barros Meira, 2003). Por essas razões, o governo brasileiro aceita aos poucos os argumentos da SNA e desenvolve ensaios tecnológicos para validar e, em breve, promover o etanol combustível. O setor de etanol começa a emergir. Em 1921 foi criada a Estação Experimental para Combustíveis e Minas (EECM), um organismo público dependente do Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio (MAIC), cuja missão era testar e disseminar conhecimento sobre o uso de combustíveis. Em 1922, as conclusões do "Primeiro Congresso sobre Carvão e Outros Combustíveis Nacionais" organizados pela EECM indicam a necessidade de apoiar o desenvolvimento do setor de etanol combustível. A EECM organiza sua promoção: o motor de um veículo Ford de 4 cilindros é adaptado para funcionar com etanol e o seu desempenho nos principais shows de corridas de automóveis atrai a atenção do público (A Lavoura, 1931, citado por Barros Meira, 2003).

O governo reconhece a importância estratégica do etanol combustível e promove-o, no entanto, não adapta o quadro regulatório para estimular o desenvolvimento do

⁷ Em 1921, as projeções giravam em torno de 80 anos de reservas de petróleo.

setor. Os atores da indústria da cana continuam a fazer campanha pelo apoio público ao desenvolvimento do setor de etanol, que eles percebem como uma solução para as crises de produção que continuam afetando seu desempenho financeiro.

A partir de 1925, o desenvolvimento da frota de veículos motorizados era tal⁸ que o etanol combustível tornou-se cada vez mais percebido pela opinião pública e privada como uma opção industrial, econômica e estratégica apropriada (Barros Meira, 2003). Aos argumentos econômicos, estratégicos e políticos, se sobrepõem as demonstrações técnicas realizadas pelos órgãos científicos alemães e franceses da qualidade do etanol, utilizado puro ou em mistura, como combustível em motores a gasolina (Carlí, 1979). Sem esperar a adoção de um quadro regulamentar de incentivo ao etanol, o setor privado toma então a iniciativa de produzir e comercializar etanol a partir do processamento direto de cana-de-açúcar, que até então era produzido apenas da destilação do melaço residual⁹ (Melo, 1942). As poucas usinas que embarcaram nessa aventura usaram equipamentos importados da Europa, principalmente da França e da Alemanha, para produzir e refinar o etanol combustível diretamente da cana-de-açúcar (Dunham et al., 2011). Essa primeira etapa do desenvolvimento do SIT da cana se baseou portanto na importação e absorção de tecnologia praticadas pelos empreendedores da indústria canavieira.

No entanto, o setor de etanol combustível ainda não conhece um desenvolvimento sólido, pois o governo não se empenha em criar o quadro regulatório que o setor reivindica como apoio. Essa situação se altera devido a uma crise externa. O crash de 1929 provocou uma virada fundamental na política industrial do país, que passou a dar um maior apoio público para a indústria, particularmente o setor de etanol. A partir do golpe de estado e da ascensão de Getúlio Vargas ao poder em 1930, uma série de medidas foram adotadas para superar os efeitos da crise econômica e o país entrou em uma era de intervencionismo estatal muito pronunciado (Torres da Veiga Pereira, 2007). A crise de 1929 afetou seriamente as exportações brasileiras e a indústria açucareira ficou à beira da falência. O Decreto 19.717 de 1931 estipulou a obrigação de adicionar 5% de etanol à gasolina convencional importada, criando um novo mercado para o etanol de cana-de-açúcar. Isso implicou numa adaptação tecnológica do setor e a instalação de novos dispositivos industriais.

A nova legislação criou as condições para o desenvolvimento de um novo setor de etanol industrial, adjacente ao setor agroalimentar existente. O setor de etanol foi criado para absorver a produção excedentária do setor açucareiro, para "suavizar" os preços do açúcar e, em última instância, para aumentar sua competitividade. Portanto, esse setor industrial é principalmente uma ferramenta de gerenciamento

⁸ 73.500 veículos de passageiros em 1925 para 103.000 em 1926.

⁹ Em 1927, a fábrica da USGA lançou no Recife a comercialização de um combustível composto por 55% de etanol hidratado e 45% de éter, uma iniciativa a seguir pelas fábricas "Azulina", "Motorina" e "Cruzeiro". do Sul".

de mercado para um setor agrícola. No entanto, essa diversificação dos mercados da cana-de-açúcar, torna sua gestão mais complexa. Para garantir que esta nova ferramenta atenda ao objetivo de competitividade da indústria da cana, o governo, a pedido dos produtores, assume o controle total do setor através do planejamento da produção e dos mercados. É para este fim que é criado em 1933 o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA). O IAA define os volumes de produção de cada produtor, os volumes de processamento de cada usina, os preços de venda de cada produto: cana-de-açúcar, açúcar e etanol, e decide quem tem permissão para vender (de Moraes & Zilberman, 2014). O Instituto também define a taxa de mistura de etanol com combustível convencional, que é administrada a fim de garantir a compra de todos os volumes de produção atribuídos aos produtores e atenuar as variações de produção de cana-de-açúcar (Figura 1). Finalmente, o IAA controla as exportações de açúcar cujos lucros financiam o custo de operação.

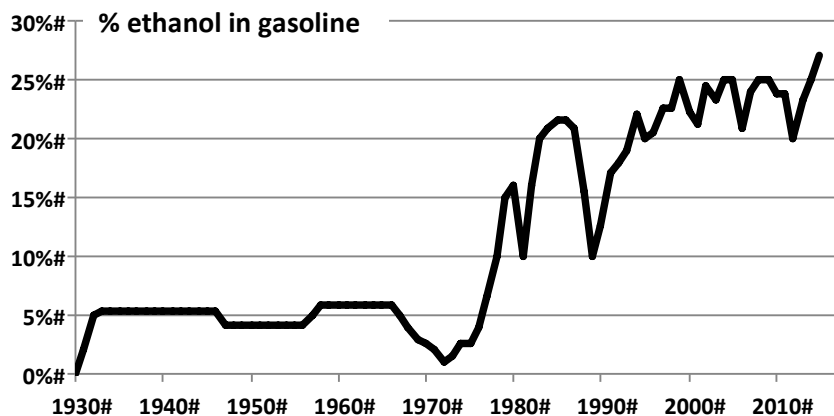


Figura 1. Mistura mandatória de etanol na gasolina (CGEE, 2017)

Em 1940, a indústria do etanol consistia em 38 destilarias industriais, todas importadas da Europa, para uma produção anual de 53 milhões de litros de etanol (Melo, 1942). O SIT da cana, apoiado pelo governo¹⁰, desempenha seu papel de absorção tecnológica.

A Segunda Guerra Mundial impactou fortemente o comércio internacional. O Brasil vislumbra o colapso das exportações de açúcar e a ameaça à sua capacidade de abastecimento em combustíveis. A dinâmica industrial do país é reorientada para o mercado interno, os volumes de cana transformados em etanol aumentam e os industriais nacionais são encorajados a garantir, pelo desenvolvimento de suas capacidades de produção, a substituição das importações tecnológicas. O setor de etanol é declarado de interesse nacional (Decreto 4.722), o que implica manter de

¹⁰ A Lei 700 de 1937 introduz uma isenção de impostos para todas as atividades relacionadas à produção, armazenamento, transporte ou melhoria do etanol combustível. Essa é a primeira forma explícita de apoio financeiro (indireto) do governo ao setor de etanol. Em paralelo com a política de cotas e as medidas de isenção de impostos para apoiar o surgimento do setor, o governo implantou uma série de medidas de apoio às importações de equipamentos industriais e produtos relacionados à produção de etanol combustível (Dunham et al., 2011).

fato condições preferenciais de apoio aos setores de cana, açúcar e etanol (de Moraes & Zilberman, 2014). Esse contexto permite a consolidação de indústrias nacionais, como a Dedini, que através da inovação torna-se o primeiro fabricante brasileiro capaz de produzir integralmente uma usina de açúcar.

O Sistema de Inovação Tecnológica da cana é gradualmente estruturado em reação às diferentes crises às quais está exposto e, em primeiro lugar, para garantir a competitividade do setor da cana-de-açúcar. O uso da tecnologia para diversificar os mercados de cana é o cerne da estratégia dos empreendedores, mas o engajamento do governo é decisivo. O papel do governo nesta dinâmica tecnológica consiste principalmente a garantir os mercados, o que permite ao setor privado investir e assegurar a difusão das tecnologias necessárias para o desenvolvimento do setor de etanol¹¹.

Até a década de 1970, o envolvimento público serviu principalmente como uma estratégia para apoiar um setor agroindustrial de importância nacional, sem se voltar ainda para redução da dependência do petróleo importado (Calabi et al., 1983 citado por CGEE, 2007). A política de modernização e o auxílio do IAA para a indústria de cana-de-açúcar surtiram efeito: o etanol forneceu em média 7,5% da demanda brasileira de combustível entre 1931 e 1975 (Lynd et al., 2015).

Mas a agroindústria canavieira ainda estava muito exposta às flutuações nos preços internacionais do açúcar (Cassuto, 2013). O desenvolvimento do setor etanol-combustível continuava a ser percebido como a forma mais eficaz de equilibrar o mercado de açúcar e diversificar os mercados para o setor canavieiro. A conquista desse segmento requeria a implantação de uma tecnologia alternativa, pois o parque industrial petrolífero já estava estabelecido e era muito competitivo, exigindo um esforço nacional para o qual o Estado não mobilizava recursos suficientes.

III. Proálcool, 1975 - os interesses dos produtores de açúcar convergem com os do governo e o Programa Nacional do Álcool é adotado

A 1ª crise do petróleo de 1973 aumenta a dimensão estratégica do etanol. Entre 1973 e 1975, o custo das importações brasileiras de petróleo mais que quadruplica¹², e a diversificação de fontes de energia ocupa o debate público, e é rapidamente traduzida em objetivos de desenvolvimento. O governo reage criando um plano nacional de desenvolvimento do etanol combustível: o Proálcool.

O novo presidente da ditadura militar, instaurada em 1964, Ernesto Geisel, se posiciona em 1974 a favor de um apoio mais afirmado à indústria canavieira e se

¹¹ Como não há registro na literatura de fracasso no uso das inovações importadas e constatando o surgimento da indústria em 1931, infere-se que o SIT da cana foi eficaz na absorção e difusão tecnológica.

¹² No primeiro choque do petróleo, o barril subiu de US\$ 2 para mais de US\$ 12. Como o Brasil importava mais de 80% de seu petróleo, os gastos com importações de derivados de petróleo cresceram 450% entre 1973 e 1974, apesar dos volumes aumentarem apenas 15%. Esses gastos passaram de US\$ 750 milhões em 1973 para US\$ 4,1 bilhões em 1974.

compromete com o desenvolvimento do setor de etanol. O artigo 2º do Decreto 76.593 de 1975, estabelece claramente os objetivos do Proálcool: estimular a expansão do suprimento de matérias-primas (de cana-de-açúcar), dando particular importância ao aumento da produtividade agrícola, à modernização e ao desenvolvimento das usinas de produção existentes, e à instalação de novas unidades produtoras de etanol, anexas às usinas existentes ou autônomas. Percebe-se a intenção de continuar apoiando a indústria canavieira, mesmo num contexto em que descobertas de petróleo são anunciadas no Brasil (de Moraes & Zilberman, 2014).

O Proálcool durou dez anos, de 1975 a 1985 e foi desenvolvido em duas fases, distintas por suas ambições, meios envolvidos e contexto de aplicação. Na primeira fase, o SIT da cana não é particularmente orientado na sua produção científica e nas suas atividades de P&D, que seguem o caminho já iniciado. O Estado garante os mercados de etanol e apoia financeiramente a expansão das capacidades agroindustriais, a atividade se desenvolve em conformidade, mas não há ruptura ou grande inovação tecnológica. Essa situação muda radicalmente na segunda fase do Proálcool, onde o Estado encomenda a organismos industriais uma inovação tecnológica estratégica.

Os objetivos do Proálcool, como anunciados em seu lançamento em 1975, são produzir 3 bilhões de litros de etanol no horizonte de 5 anos (1980) e 10 bilhões de litros no horizonte de 10 anos (1985). Em 1975, a produção de etanol no Brasil era de 625 milhões de litros (Ramos, 2007).

III.1. 1ª Fase do Proálcool, 1975-1979 - estímulo à oferta e garantia de mercado

Essa fase se concentra sobre a expansão da capacidade de produção de cana-de-açúcar, fortalecimento das usinas existentes e construção de unidades de produção de etanol adjacentes às de açúcar. Ela tem um impacto moderado na agroindústria, cujo número de unidades aumenta em 11,5% entre 1975 e 1981 (de Arruda Veiga Filho & Ramos, 2006), num contexto de queda nos preços internacionais do açúcar (de Moraes & Zilberman, 2014). No entanto, o Proálcool já se mostra eficaz para a regulação dos preços dos produtos da cana (Ramos, 1991). O etanol produzido durante essa fase é principalmente o etanol anidro, usado em mistura com gasolina convencional.

Em 1979, a continuação do Programa fica ameaçada pela flutuação para cima do preço do açúcar no mercado internacional, fazendo com que os produtores percam o interesse pelo etanol e sejam tentados pelo mercado clandestino de exportação de açúcar. No mesmo ano, a economia brasileira luta com uma inflação galopante (77%), à qual se soma o segundo choque do petróleo ligado à guerra Irã - Iraque. As importações de petróleo ainda representam 32% das despesas totais de importação do Brasil, mas o Proálcool está ficando sem fôlego e o volume de etanol é insuficiente para garantir a independência energética do país.

A preocupação com o efeito da guerra no Oriente Médio sobre a evolução dos preços do petróleo reforça a motivação do governo para alcançar a independência energética. Mas os produtores de cana-de-açúcar relutam em expandir a produção de etanol face ao aumento dos preços do açúcar, duvidando da capacidade do Estado de garantir a sustentabilidade da produção de etanol (de Moraes & Zilberman, 2014). Cada vez mais determinado a fazer do etanol uma importante ferramenta de independência energética, diante do risco de queda na produção, o governo decide estabelecer, por meio de um mecanismo de subsídio, a paridade dos preços pagos aos produtores de cana, seja ela destinada à produção de açúcar ou de etanol.

III.2. 2ª fase do Proálcool, 1979-1985 - estímulo à demanda e envolvimento do Estado na tecnologia

Por outro lado, visando a redução da dependência do petróleo importado, é preciso mais do que apenas misturar o etanol com a gasolina. O desafio torna-se consumir etanol em vez de gasolina. Mais uma vez a solução é tecnológica: o veículo a motor abastecido a 100% com etanol, que o governo se engaja a apoiar a difusão através do SIT da cana. Os primeiros veículos 100% a etanol datam de 1978 (Cassuto, 2013), e para garantir sua rápida propagação na frota brasileira, o governo precisa convencer a indústria automotiva instalada no país¹³.

Além do seu comprometimento com a oferta de etanol, o governo faz a análise de que é necessário estimular a demanda. Centros de P&D públicos e privados se mobilizam, como o Centro Tecnológico da Aeronáutica (CTA), em testes e desenvolvimento de motores, e o Centro de Tecnologia da Coopersucar (CTC), cooperativa de usinas canavieiras, em tecnologias agroindustriais.

As montadoras de veículos já vinham sendo solicitadas e faziam experimentos com motores 100% a etanol desde 1976, mas a sua confiança na capacidade do governo de garantir a produção de etanol é baixa. Em 1979, o novo presidente do regime ditatorial, João Figueiredo, reitera o compromisso do governo em favor do etanol, assim como a meta de 10 bilhões de litros anuais em 1985. Além disso, o forte aumento dos preços dos combustíveis convencionais representa um risco para o futuro do mercado automobilístico e a transição para motor de etanol interessa também a indústria automotiva (Torres da Veiga Pereira, 2007). Assim, ela termina por aceitar produzir em grande escala veículos com motores 100% a etanol.

Esse motor requer um etanol significativamente diferente do etanol anidro incorporado à gasolina: o etanol hidratado, que passa a ser a prioridade do governo na pilotagem do SIT da cana. Além do seu uso nos motores adaptados, sua produção e comercialização requerem a adequação tecnológica e industrial do segmento, especialmente a infraestrutura logística de armazenamento, transporte e distribuição, pois ele é mais corrosivo que a gasolina, exigindo materiais e

¹³ Nessa época, os fabricantes locais de veículos leves são Fiat, Ford, General Motors (GM) e Volkswagen (VW).

componentes com tratamento apropriado. Assim, o Estado financia o melhoramento e a ampliação de instalações de armazenamento e distribuição de etanol (tanques, oleodutos, ferrovias e terminais portuários). Petrobras, companhia de petróleo controlada pelo Estado, se encarrega da exploração dessa infraestrutura.

Pelo lado da oferta, a ênfase dada ao apoio às destilarias independentes, em vez de destilarias anexas, afirma a aposta num setor de etanol autônomo. Essa transição permite ao governo rever sua ambição para 14 bilhões de litros por ano em 1987.

A fim de organizar o funcionamento da segunda fase do Proálcool e otimizar sua aplicação, o governo cria duas novas entidades responsáveis pela condução do setor: o Conselho Nacional do Álcool (CNAL) e seu órgão executivo, a Comissão Executiva Nacional do Álcool (CENAL), sob a direção do Ministério da Indústria e Comércio (MIC), e composto por membros de vários ministérios e de confederações da indústria, comércio e agricultura. O CNAL é responsável pela formulação e supervisão da implementação das políticas relativas ao Proálcool, assim como do reforço orçamentário em apoio ao Programa. A coexistência dentro de um organismo público de representantes da esfera política, industrial e do agronegócio ajuda a garantir que o SIT da cana atenda aos interesses do desenvolvimento local. Petrobras, responsável pela distribuição de etanol, é instada a criar um fundo de compensação de preços entre etanol e combustíveis convencionais, a "conta etanol", alimentado por uma taxa incidente sobre o diesel, destinada a compensar os custos adicionais de produção de etanol, além do aporte do fundo já operacional do IAA, financiado pelas receitas de exportação de açúcar. A complexidade da configuração política para pilotar esse modelo ilustra o efeito da formação de capital humano local induzida pelo desenvolvimento tecnológico.

III.3. Resultados do Proálcool - desenvolvimento do setor da cana-de-açúcar, consolidação do etanol combustível

"O Proálcool é a inovação política mais importante destinada a ampliar a produção de açúcar na história do país ... ele permitiu aumentos sem precedentes nos rendimentos do setor açucareiro" (Santiago, Ivo, Barbosa e Rosseto, 2006). Entre 1975 e 1980, a área cultivada de cana expandiu-se em 609.000 ha (+ 29%) e a superfície média das propriedades aumentou 36,4%, refletindo uma concentração de atores no setor, concomitante com a sua expansão. Ao mesmo tempo, os rendimentos da produção agrícola (t_{cana}/ha) aumentaram em mais de 20%, enquanto a produção industrial ($t_{açúcar}/ha$) aumentou 35,6% (de Arruda Veiga Filho & Ramos, 200; Pereira de Carvalho e De Oliveira Carrijo, 2007). O Proálcool também teve um impacto significativo no desenvolvimento rural, com a criação de 625 mil empregos diretos e 828 mil empregos indiretos em áreas rurais (Pereira de Carvalho e De Oliveira Carrijo, 2007).

O Proálcool também resultou na inserção maciça e rápida do etanol na matriz de combustíveis do país. Entre 1975 e 1986, a parcela de etanol aumentou de 1,1% para 55,5%, e sua produção chegou a 11 bilhões de litros em 1985, superior às ambições do governo no lançamento do programa (Pereira de Carvalho & De

Oliveira Carrijo, 2007). Em 1975, o etanol era derivado principalmente do processamento de melaço residual, um coproduto da indústria açucareira, e em 1985 é produzido a partir do processamento direto da cana-de-açúcar, um produto industrial que absorve 60% da produção de cana do Brasil (de Moraes & Zilberman, 2014) e determinante do desenvolvimento da indústria canavieira como um todo.

A frota nacional de veículos também foi profundamente alterada. As parte de mercado dos veículos 100% a etanol passou de 0,4% em 1979 a 66% em 1986. Em 1985, a frota brasileira tinha quase 2,5 milhões de veículos 100% a etanol.

Essas transformações tecnológicas indicam a aquisição de competências tecnológicas do país. O SIT da cana, pelo seu desenvolvimento, confirma suas capacidades de importação, adaptação, inovação e difusão tecnológica, e inovação política. O Proálcool criou milhares de empregos nas áreas rurais. Ele também levou ao desenvolvimento da agroindústria da cana-de-açúcar, que financiou pesquisas agrônômicas para a melhoria da produtividade, assim como a formação do capital humano do país: técnicos, engenheiros e pesquisadores. Nesse sentido, tem constituído uma força motriz para o desenvolvimento nacional.

Mas isso exige uma liderança política complexa e tem um custo. A competição entre energias é acima de tudo a competição entre sistemas tecnológicos que permitem a produção e o consumo dessas energias (Furtado et al., 2011). A fim de assegurar o desenvolvimento do sistema de tecnologia de energia da cana-de-açúcar, o governo teve que suportar o custo financeiro de sua proteção, e o tempo de sua incubação. Os incentivos fiscais do governo, com preços baixos garantidos para o etanol combustível, foram a principal alavanca para substituição da frota de veículos a combustíveis convencionais pela de combustíveis alternativos. Os empréstimos oferecidos pelo governo no âmbito do Proálcool, para financiar o desenvolvimento industrial do setor, tiveram taxas de juros negativas, dada a inflação da época (Furtado et al., 2011). Ao longo de três décadas, até 2005, o total desses subsídios foi de cerca de US\$ 30 bilhões. Mas o mercado gerado movimentava hoje cerca de US\$ 20 bilhões por ano na economia e gera cerca de 1 milhão de empregos (Goldemberg, 2017).

IV. Pós Proálcool - uma década de crise para o setor de etanol

A partir de 1985, assistiu-se a uma redução consistente dos preços do petróleo, a um aumento da produção nacional de petróleo e a um incremento dos preços internacionais do açúcar. Também, a uma mudança de regime político no Brasil: o regime ditatorial militar é substituído por um regime presidencialista democrático. A combinação de um contexto econômico desfavorável para a agroenergia e uma crise na economia brasileira empurra os governos que se sucedem para reduzir seu apoio aos setores agroenergéticos. Nesse período ocorre a liberalização e a reestruturação competitiva do setor da cana-de-açúcar. O segmento açucareiro é

estimulado pelo crescimento das exportações, mas as cadeias agroenergéticas estão em crise.

Isso conduz a uma mudança de curso do SIT da cana, que continua atuante, mas sem ruptura tecnológica, sem introdução de inovação radical, sem inflexão significativa de trajetórias de inovação. As inovações são incrementais, ao serviço do aumento da produtividade e do rendimento do sistema instalado. Elas são conduzidas principalmente pelo setor privado, que se organiza para manter a atividade de inovação, apesar da falta de suporte público. O setor da cana-de-açúcar cresce fortemente durante a década de 1990 graças ao boom no mercado de exportação de açúcar¹⁴, beneficiário dos ganhos de produtividade induzidos pelo Proálcool, e que continuou financiando a dinâmica de inovação.

Para o segmento etanol, a reestruturação foi muito mais dolorosa: mais de 130 destilarias entraram em falência entre 1986 e 1997, de um total inicial de 467 (número de destilarias autônomas ou anexas a usinas) (de Arruda Veiga Filho & Ramos, 2006). No entanto, a mistura mandatória de etanol na gasolina é mantida durante toda a década de 1990, o que permite a sobrevivência da atividade agroenergética.

V. *Flex-fuel* , 2003 - a consolidação do etanol carburante automotivo

O início dos anos 2000 é marcado por um aumento sustentado dos preços do petróleo e as previsões de tendência também são de alta. A indústria açucareira está madura e seus custos de produção estão entre os mais baixos do mundo. A cana torna-se uma matéria-prima que permite considerar a produção de etanol a preços competitivos com combustíveis convencionais (Cassuto, 2013). Em 2000, o governo percebe que a vantagem competitiva conquistada pela indústria açucareira pode ser estendida ao setor de combustíveis. Uma série de decisões marca o renovado interesse do governo brasileiro no etanol. O Decreto 3.546 de 2000 cria, no âmbito do Ministério da Agricultura e do Abastecimento, o Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (CIMA), com o objetivo de deliberar sobre as políticas relacionadas com as atividades do setor sucroalcooleiro, considerando, entre outros, os seguintes aspectos: (i) adequada participação dos produtos da cana-de-açúcar na Matriz Energética Nacional; (ii) mecanismos econômicos necessários à auto-sustentação setorial; (iii) desenvolvimento científico e tecnológico. O decreto reflete a clara vontade governamental de fortalecer um sistema tecnológico energético alternativo, baseado na exploração de uma matéria-prima renovável e local. Na sequência, entre 2001 e 2003 são concedidas isenções fiscais ao segmento etanol combustível.

Nesse contexto regulatório favorável, surge a principal alavanca do renascimento do etanol combustível: o motor *flex-fuel*, que aceita indiferentemente etanol ou

¹⁴ Entre 1992 e 1999, o Brasil multiplicou suas exportações de açúcar por cinco, se transformando no maior exportador mundial. Em 2004 o país detinha mais de 36% do mercado mundial.

combustível convencional. Mais uma vez, a adoção de uma nova tecnologia é responsável pela impulsão do setor canavieiro num novo patamar de mercado, muito superior ao anterior, envolvendo os fabricantes de automóveis e a cadeia produtiva agroindustrial do SIT da cana, sob incentivo do governo.

O motor *flex-fuel* foi desenvolvido no início dos anos 90 pelo Grupo Bosch. Em 1994, o dispositivo *flex-fuel* Bosch tinha sido proposto aos fabricantes de automóveis presentes no mercado brasileiro, mas não despertou interesse na época porque o preço do petróleo estava baixo, o segmento etanol estava em crise e o governo não mostrava sinais de apoio. Mais tarde, em 1998, o grupo Fiat criou seu próprio protótipo de veículo *flex-fuel*, mas pelas mesmas razões, a recepção do produto foi desfavorável no Brasil.

No contexto econômico do início dos anos 2000, de aumento dos preços do petróleo e de perspectiva de preços muito mais competitivos do etanol, graças à competitividade conquistada pela indústria açucareira durante a década anterior, o Grupo Volkswagen estava preparando um novo modelo para distribuição no Brasil: o VW Gol. Em 2002, quando o governo brasileiro anunciou a isenção/redução do imposto sobre produtos industrializados (IPI) para veículos *flex-combustíveis*, a VW lançou a produção em grande escala e a distribuição comercial do seu novo modelo, equipado com essa tecnologia. Já em 2003, os consumidores se mostraram rapidamente seduzidos (Torres da Veiga Pereira, 2007). Em 2006, todos os fabricantes de automóveis no Brasil já ofereciam modelos *flex-fuel*. Dez anos depois, mais de 60 modelos *flex-fuel* estavam disponíveis no mercado, fabricados por quase vinte fabricantes de automóveis de origem europeia, norte-americana, japonesa, coreana e chinesa. Esse recomeço rápido foi facilitado pela manutenção da infraestrutura de distribuição de etanol instalada durante o Proálcool, em especial as bombas de etanol, que foram mantidas durante a crise do etanol da década de 1990 em 90% dos postos de abastecimento.

O motor *flex-fuel* foi a solução para a crise de confiança dos motoristas brasileiros em relação ao etanol combustível, pois trabalhando bem tanto com o etanol hidratado puro como com a gasolina (no caso brasileiro, misturada com etanol anidro em níveis que evoluíram de 15% a 27,5% atualmente), garante ao motorista uma independência em relação a eventuais crises de um ou outro combustível.

Mais uma vez, o poder público, tanto federal quanto estadual, contribuiu fortemente para criar as condições institucionais e regulatórias que permitiram que os atores da SIT acelerassem a substituição de combustível convencional pelo etanol. Para isso foram estimuladas: (i) oferta, agindo sobre a produção de cana e sua transformação em etanol; (ii) demanda, incentivando a rápida difusão de veículos *flex-fuel* a partir de 2003. Por exemplo, o crédito público ao setor, a taxas preferenciais, via BNDES, aumentou 800% na década, totalizando quase 30 bilhões de reais. No meio da década foi criada a Embrapa Agroenergia, e até o final dela foram investidos 80 milhões de reais em pesquisa. As infraestruturas de estocagem e transporte absorveram 4 bilhões de reais. Diversos estados têm alíquotas do imposto sobre

circulação de mercadorias (ICMS) diferenciadas entre combustíveis renováveis e fósseis. O retorno "acelerado" do etanol combustível atesta a eficácia das políticas públicas de incentivo para implantar a dinâmica tecnológica pretendida. O gráfico abaixo ilustra a difusão desta tecnologia dentro da frota brasileira desde 2003.

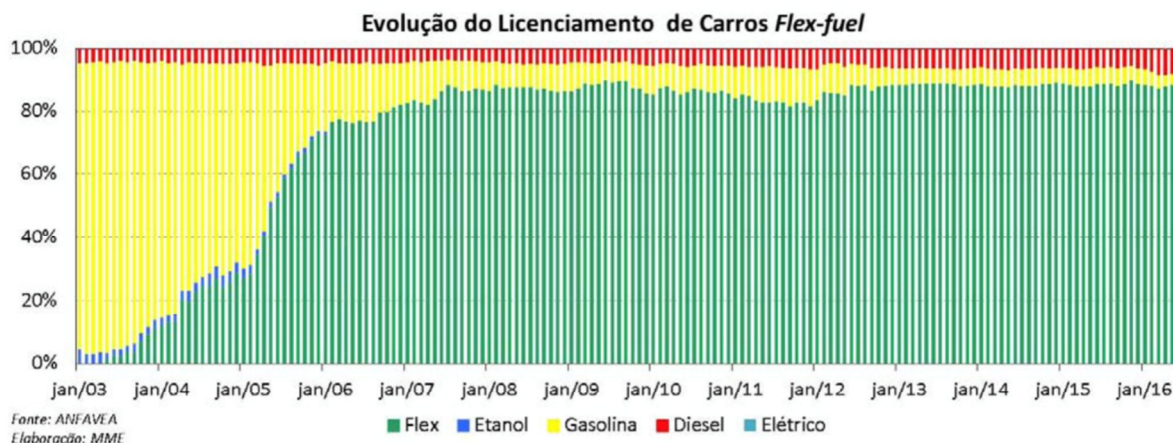


Figura 2: Evolução da venda de veículos no Brasil, por tipo de motor, entre 2003 e 2016. Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2016; dados da Anfavea.

A expansão do setor de etanol atingiu o pico entre 2005 e 2009: 103 novas usinas foram instaladas no país, uma média de mais de 20 por ano, a grande maioria das quais são plantas autônomas de etanol, sem fábrica de açúcar anexa (International Sugar Organization, 2012). A produção de etanol aumentou de 10 bilhões de litros em 2000/01 para 27 bilhões em 2009/10. As exportações de etanol passaram de 516 milhões de litros em 2001/02 para 4,7 bilhões de litros em 2008/09 (IPEA, 2010), quando atingiram o pico, o Brasil fornecendo mais de 90% do etanol combustível comercializados em todo o mundo.

O etanol tornou-se competitivo com os combustíveis petrolíferos em 2005 (Nogueira et al., 2008). Em 2007, o Brasil produziu etanol a um custo equivalente a US\$ 30 e US\$ 35 por barril de petróleo, o preço de um barril de petróleo nos mercados internacionais era nessa época mais de US\$ 60 (Nass et al., 2007). O contexto econômico internacional suportou essa nova fase de crescimento do SIT da cana, que não precisou do mesmo apoio público do Proálcool, ainda mais porque a infraestrutura do sistema já estava construída, no entanto, o papel do Estado continua decisivo na orientação do SIT da cana.

O gráfico seguinte mostra a evolução da produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol entre 1975 (data do início do Proálcool) e 2012. Percebe-se o quanto o crescimento do segmento etanol, inicialmente introduzido como ferramenta de suporte à agroindústria canavieira, depende da política pública. As duas fases de forte apoio governamental à agroenergia, entre 1975-1985 (Proálcool) e 2002-2009 (*flex-fuel*), correspondem a um forte crescimento da produção de etanol. Também fica evidente que toda a agroindústria da cana-de-açúcar se beneficia muito dessas políticas públicas de apoio à agroenergia, pois a produção de cana dobra no

Proálcool e dobra novamente na primeira década deste século, assim como a do açúcar. Isso confirma a visão inicial dos produtores de açúcar brasileiros que, desde o início do século XX, viram a indústria do etanol como uma ferramenta para o crescimento e a resiliência econômica do setor canavieiro. Percebe-se também que o ano de 2008 marca o início de uma nova crise para o segmento etanol, ligada à crise financeira e ao colapso dos preços do petróleo, bem como inconsistências no apoio público e prática de preços de petróleo administrados.

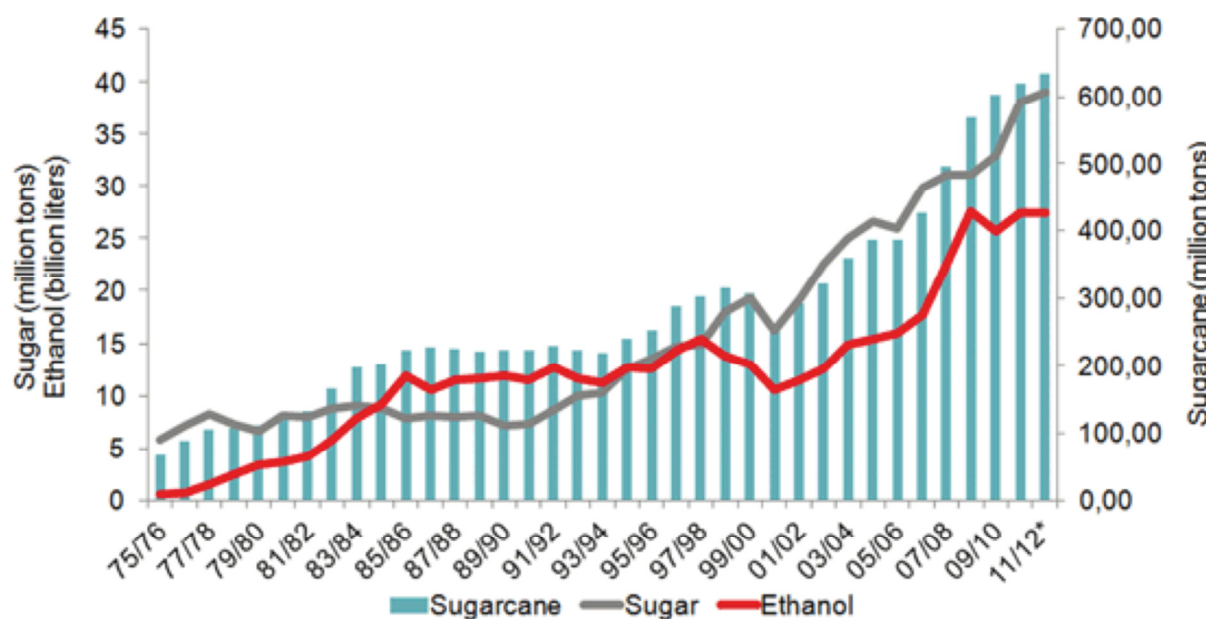


Figura 3: Evolução da produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol (anidro e hidratado) entre 1975 e 2012. Fonte: (de Moraes & Zilberman, 2014).

Numerosos autores louvam o efeito sistêmico que o Proálcool e a expansão do etanol combustível provocou na cadeia produtiva da indústria canavieira e na economia brasileira como um todo: "a difusão das inovações foi possível a partir do Proálcool e resultou em menores custos de produção, um aumento geral da competitividade do setor, tendo os avanços tecnológicos beneficiado tanto a indústria açucareira como a indústria do álcool" (Furtado et al., 2011). "Os progressos realizados pela indústria de bens de capital garantiram um melhor desempenho para a integralidade do setor" (Shikida & Perosa, 2012). "Nas últimas décadas, o rendimento agrícola da cana-de-açúcar (t/ha) cresceu a uma taxa média anual de 1,4% e a do processamento industrial (litro de etanol por tonelada de cana) de 1,6%, representando um ganho médio anual de 3,1% na produção de etanol por hectare desde Proálcool" (Lynd et al., 2015). Esse aumento de produtividade permitiu reduzir a área plantada por unidade de energia produzida: "graças a esses ganhos de produtividade, a superfície atualmente mobilizada para produção de etanol representa 38% da que seria necessária cultivar no início do Proálcool para obter a mesma quantidade de etanol" (Lynd et al., 2015). "Houve no Brasil uma sinergia entre o desenvolvimento dos biocombustíveis e o desenvolvimento social e

agrícola; os biocombustíveis têm sido um fator de dinamização da economia rural e de reforço da segurança alimentar" (Lynd et al., 2015).

VI – Bioeletricidade, anos 2000 – um novo segmento de crescimento se abre para o SIT da cana

O apoio público ao setor de cana diz respeito também ao desenvolvimento de um novo mercado, o da geração de eletricidade a partir da biomassa. Mais uma vez, é o desenvolvimento tecnológico que garante sua emergência e seu crescimento. Historicamente, as usinas usavam lenha¹⁵ para suprir suas necessidades de vapor e energia para o processo de produtivo. Depois do Proálcool, o modelo evoluiu gradualmente da dependência de energia externa ao processo (lenha), para a autosuficiência energética, utilizando o bagaço nas caldeiras como fonte de energia, e em seguida para a geração de excedentes comercializados na rede elétrica.

Essa energia elétrica excedente, produzida em sistemas de cogeração (vapor e eletricidade) alimentados com bagaço de cana começou a ser introduzida na rede elétrica, marginalmente, no final da década de 1980. Demorou um certo tempo para as usinas aferirem o potencial energético do bagaço como combustível nas unidades de cogeração desenvolvidas no Brasil a partir de tecnologias importadas. Assim, a bioeletricidade excedente da cogeração torna-se mais um desenvolvimento tecnológico que vem diversificar as oportunidades de negócios na indústria da cana-de-açúcar e aumentar seus fluxos de receita. Foi principalmente a evolução do quadro institucional que regula o mercado da eletricidade e que rege os auxílios ao investimento no setor de energia, que estimulou os vários avanços tecnológicos vivenciados pelo setor.

Os primeiros incentivos públicos remontam à década de 1990. Primeiro, foi criado o estatuto de "produtor independente de eletricidade" (PIE), que permite às usinas revender o excedente de produção de eletricidade para a rede. Na década seguinte, uma série de reformas de liberalização do setor elétrico, por um lado, e o apoio ao desenvolvimento da produção de bioeletricidade, por outro lado, permitiram o surgimento de um mercado real de eletricidade de cana-de-açúcar e estimularam a difusão de tecnologias adequadas. Em 2001, o governo suscitou a adoção de contratos de longo prazo (15 anos) para compra da eletricidade gerada a partir de biomassa. Essa característica contratual garante a receita, atrai investidores e estimula o financiamento de plantas de cogeração associadas a usinas sucroalcooleiras (Seabra & Macedo, 2011).

Além disso, por intermédio do BNDES, o governo brasileiro criou o Programa de apoio à cogeração de energia elétrica a partir de resíduos da cana-de-açúcar, um conjunto de linhas de crédito a taxas e condições preferenciais para as usinas que investissem em plantas de cogeração de alta eficiência. Pelo lado da demanda, o

¹⁵ Em 1940, a lenha representava 80% da matriz energética do país, reduzida atualmente a 8% (lenha e carvão vegetal).

Programa de incentivo a fontes alternativas (Proinfa) realiza leilões e contratos de compra de energia gerada a partir de fontes renováveis, inclusive bioeletricidade. Finalmente, foram facilitadas as condições de acesso à rede para receber a eletricidade excedente de usinas sucroalcooleiras (Seabra & Macedo, 2011). Em 2007, a política de desenvolvimento da bioeletricidade se volta para a renovação de usinas de cogeração existentes e na sua substituição por plantas de cogeração de alta eficiência. O BNDES amplia o programa de empréstimos bonificados oferecidos aos industriais do setor, conduzindo a um salto no nível de desempenho dos equipamentos instalados: a partir daí, as novas instalações energéticas são todas com sistemas de alto rendimento.

A bioeletricidade torna-se então um terceiro produto, segundo energético, em grande escala, do setor canavieiro, após o açúcar e o etanol, e se incorpora integralmente no modelo de negócios e na rentabilidade da indústria da cana-de-açúcar. A comercialização de eletricidade, que em 2007 representou em média 1 a 2% do faturamento das usinas, foi de 16% em 2015, segundo o BNDES. Ela representou 7% da matriz elétrica do país em 2016. As melhorias tecnológicas das usinas e das unidades de cogeração devem permitir ampliar o excedente de eletricidade de 80 kWh por tonelada de cana processada para mais de 200 kWh no horizonte 2030, passando de 2,5 a 5 GW_{médios} de energia injetados no sistema interligado nacional (SIN).

VII. Inovação varietal da cana-de-açúcar - um dos principais fatores de sucesso do modelo brasileiro

Outra tecnologia que está no cerne do sucesso do modelo brasileiro diz respeito à própria cana-de-açúcar. A mobilização de produtores de cana em torno da inovação varietal foi formadora do SIT da cana. Novamente, a associação de esforços dos setores privado e público permitiram que os principais progressos fossem realizados. Os laboratórios de genética vegetal e de inovação em variedades de cultivares estão no cerne do mecanismo de formação de capital humano brasileiro.

Desde a década de 1920, o SIT da Cana começa a construir suas competências em inovação varietal, em torno da resposta à crise do vírus mosaico da cana-de-açúcar. Em 1923, a região de São Paulo perdeu 75% de suas colheitas de cana por causa do mosaico. O Estado de São Paulo financiou então a criação da estação de experimentação de cana-de-açúcar de Piracicaba (EECP), na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), ainda hoje uma referência internacional em agricultura tropical, com o objetivo de criar variedades de cana-de-açúcar resistentes ao vírus. A ação da EECP, respondendo a restrições de tempo extremamente rigorosas, privilegiou o método de seleção varietal. O modo de funcionamento da EECP, um centro público, trabalhando em colaboração com os produtores privados de cana, permitiu uma difusão particularmente efetiva das inovações tecnológicas. Os produtores empregaram funcionários especificamente dedicados a garantir a absorção das inovações tecnológicas e dos novos

conhecimentos desenvolvidos pela EECP (Dunham et al., 2011). Isso provou ser muito eficaz: entre 1926 e 1932 as variedades de cana Preta e Rosa, suscetíveis ao vírus do mosaico, foram totalmente substituídas por variedades desenvolvidas na EECP, resistentes ao vírus mosaico (Oliver & Szmècsány , 2003).

Esse maneira de atuar, baseada na cooperação entre empreendedores privados e um centro de pesquisa público, inédito no Brasil (Dunham et al., 2011), deu origem a uma cultura de colaboração e compartilhamento de informação entre os vários atores do SIT da cana, que contribuiu fortemente às funções de inovação e difusão tecnológica do SIT. Essa operação ilustra a forma como o SIT da cana tem contribuído para a estruturação das habilidades tecnológicas do capital humano brasileiro.

Em 1935, o papel da EECP passou a ser desempenhado pelos programas de pesquisa do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). O objetivo passa a ser produzir variedades de cana com maiores rendimentos e resistência a diferentes formas de patologia. O modo de experimentação, baseado na colaboração com produtores privados, foi mantido e incrementado pelo IAC. Em pouco tempo, essas colaborações - espalhadas pelo território - permitiram ao IAC desenvolver variedades de cana-de-açúcar especificamente adaptadas aos diferentes tipos de solo e clima do Estado de São Paulo. Sua pesquisas foram realizadas de tal forma que as inovações desenvolvidas fossem facilmente replicáveis nas empresas parceiras e nos clientes, permitindo uma difusão eficiente e uma boa absorção das tecnologias desenvolvidas no Instituto (Dunham et al., 2011). Ao adaptar as variedades de cana às especificidades locais do capital natural solo, a abordagem do IAC ilustra a maneira como o país conseguiu mobilizar suas habilidades tecnológicas para construir progressivamente uma vantagem econômica competitiva.

As incitações de natureza política também orientam as trajetórias tecnológicas de inovação varietal. Nos anos 1965, o IAA altera a regra de fixação dos preços da cana-de-açúcar: a partir de então, o preço é determinado de acordo com o teor de açúcar da cana, não do seu peso. Essa mudança melhora a qualidade da cana-de-açúcar e passa a orientar a inovação para a criação de variedades de cana com alto teor de açúcar (de Moraes & Zilberman, 2014). Em 1970, o IAA investe na criação de um importante programa de pesquisa e melhora das variedades de cana-de-açúcar: o Planalsucar. Sua criação fortalece a coordenação público-privada dos esforços de pesquisa varietal. Com as mudanças políticas dos anos 1990, que levaram à extinção do IAA, as atividades do Planalsucar foram assumidas por um consórcio de laboratórios agrônômicos de universidades públicas federais (inicialmente seis, atualmente dez) denominada Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA). Suas variedades, de sigla RB, são cultivadas em mais de 65% da área plantada com cana-de-açúcar no país, contribuindo com cerca de 12,3% da matriz energética do Brasil.

Também em 1970, é fundado o Centro de Tecnologia da Coopersucar (CTC)¹⁶, primeiro centro de pesquisas criado por uma cooperativa privada de produtores, a Coopersucar, que se desenvolveu graças a parcerias com o IAA e depois com o IAC¹⁷. Ele foi instalado em Piracicaba, o centro geográfico do que se tornou o cluster industrial da cana no Brasil. Com o passar do tempo se expandiu fora da Cooperativa, tornando-se o Centro de Tecnologia Canavieira, privado, mas com participação pública no capital, do Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES), e na orientação dos programas de P&D.

Entre 1995 e 2006, o trabalho dos diversos centros especializados de pesquisa sobre a criação de novas variedades de cana-de-açúcar, e que "herdou" a cultura introduzida pela EECF, permitiu a criação de 82 novas variedades de cana, participando de um aumento anual médio de produtividade de 1% durante este período (Paraizo, 2013). Mais de 500 variedades de cana-de-açúcar estão disponíveis no mercado, 20 delas respondem por 80% da área plantada. Atualmente, os programas de cultivares de cana mais importantes no país são os da RIDESA, CTC, IAC, Canavialis e, mais recentemente, Vignis, que desenvolve novas variedades de canas de alto conteúdo em fibras, conhecidas como cana-energia. Essas novas variedades, menos exigentes em termos de solo e clima, permitem implantar culturas energéticas altamente produtivas, que podem atingir mais de 200 t/ha e podem ser plantadas em terras degradadas, contribuindo para sua recuperação.

O advento da cana-energia, com alto potencial de aumento expressivo da produção de biomassa, oferece um novo cenário, que atende o desenvolvimento do etanol celulósico, ou de segunda geração (E2G), e das biorefinarias, com múltiplos ganhos: energéticos sem dúvida, mas também benefícios econômicos, sociais e ambientais. Essa foi a aposta do BNDES, que em conjunto com a FINEP implantou o Plano de Apoio à Indústria Sucroenergética e Sucroquímica (PAISS), apoiado em parcerias público-privadas (PPP) que fomentaram o desenvolvimento da cana-energia, e a instalação no país das primeiras duas unidades de produção de E2G em escala comercial.

VIII – Agroecologia – mais uma guinada do SIT da cana

¹⁶ A criação do CTC resulta da iniciativa da Copersucar em 1968 de trazer um especialista internacional em genética da cana-de-açúcar, o geneticista havaiano Dr. A.J. Mangelsdorf, para criar um programa de melhoramento genético que beneficiaria os membros da cooperativa.

¹⁷ Desde a década de 1970, um acordo de cooperação permitiu ao IAC operar parte da Estação de Inovação Varietal Camamu pertencente ao CTC. Camamu tem a distinção de estar localizado em uma latitude ideal para a floração da cana-de-açúcar, condições ideais para a criação de novas variedades de cana-de-açúcar por cruzamentos. Como parte deste acordo de cooperação, o IAC organizou a transferência de 678 novas variedades de cana importadas do exterior, tornando-se o maior banco de genes de cana-de-açúcar do mundo, um centro estratégico para inovação varietal da cana-de-açúcar (Figueiredo, 2010, citada por Pedro, 2013).

Outro evento, mais "sistêmico", cuja origem remonta à década de 1990, vem dar início a uma nova transformação do modelo da agroindústria canavieira, que se desvenda na segunda metade da 1ª década deste século: a mecanização da cultura da cana, que gera um novo produto, a palha da cana-de-açúcar. Essa biomassa deixada no chão pela mecanização da cultura de cana é o ponto de partida de uma nova mudança tecnológica e cultural muito mais ampla no SIT da cana: a transição agroecológica. Ela consiste de duas grandes vertentes, a primeira é a transição mecânica, e a segunda é a passagem à agricultura sobre cobertura vegetal (SCV) e o cultivo direto. Cada uma dessas vertentes transforma a cultura da cana-de-açúcar em uma alavanca para regenerar solos tropicais degradados.

Como para as outras reviravoltas do modelo, essa também é impulsionada, orientada e apoiada pelo governo. Mas dessa vez ela é singular em sua natureza e ambição: seu objetivo é a conversão agroecológica do modelo brasileiro de cana-de-açúcar. O objetivo ambiental apoia na realidade uma ambição industrial, de garantir a sustentabilidade do modelo, inicialmente reforçando a vantagem comercial do etanol de cana, assegurando que ele atenda aos critérios sociais e ambientais dos mercados de importação globais.

Em 2007 o Brasil estava produzindo etanol a um custo entre US\$ 30 e US\$ 35 por barril de petróleo, folgadoamente rentável mesmo sem subvenção (Nass, Pereira e Ellis, 2007), em um clima econômico global de ansiedade em relação ao aumento dos preços do petróleo. A fim de limitar a dependência das importações do Golfo, os principais países importadores, principalmente a Europa¹⁸ e os Estados Unidos¹⁹, consideraram seriamente o aumento da incorporação de biocombustíveis no seu *mix* de combustível. O Brasil vislumbra então a oportunidade de se posicionar como o principal fornecedor de um novo mercado global de biocombustíveis, a partir do desenvolvimento maciço do seu segmento etanol, que dispõe de fortes margens de crescimento da sua produção. Garantir um etanol sustentável, social e ambientalmente, é condição indispensável ao sucesso da expansão internacional.

Nesse contexto, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)²⁰, em parceria com o Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), realiza uma série de estudos que convergem em 2007 numa estratégia a ser implementada para produzir biocombustíveis em quantidade suficiente para atender à demanda global esperada, com qualidade correspondente aos critérios dos mercados europeu e norte-americano. Suas conclusões estão na origem da presente transição agroecológica do SIT brasileiro

¹⁸ A diretiva de 2003, que impôs aos países membros da União Europeia de fixar objetivos nacionais para os biocombustíveis contribuindo para o objetivo comunitário de 5,75% até 2010, é acompanhada em 2009 de exigências de sustentabilidade.

¹⁹ O *Energy Independence and Security Act* estipula a meta de 136 bilhões de litros de etanol em 2022 (Kaup, Nitsch, & Menezes, 2011), sendo 14% biocombustíveis avançados, ou seja capazes de reduzir de pelo menos 50% as emissões de CO₂ em relação à gasolina, categoria em que o etanol de cana se enquadra (Goldemberg, 2008; Nogueira, Seabra, Best, Leal, & Poppe, 2008).

²⁰ Organização Social cujo Contrato de Gestão com o Estado Brasileiro é supervisionado pelo Ministério de Ciência Tecnologia e Inovação.

da cana-de-açúcar. Na sua esteira outros trabalhos são elaborados, considerando que os impulsionadores dessa mudança são duplos: a aceleração da mecanização, porque permite interromper a prática de queimar o canavial antes da colheita e o desenvolvimento de um modelo intensivo de cultura agroecológica, baseado no cultivo sob cobertura vegetal.

Em 2008, confirmando seu anseio de difusão global dos biocombustíveis, o governo brasileiro organiza a Conferência Internacional de Biocombustíveis, com cinco dias de duração, os dois últimos dedicados a um segmento intergovernamental de Alto Nível, acolhendo representantes de governos de uma centena de países e de organismos internacionais. Na ocasião é lançada a obra Bioetanol de Cana-de-Açúcar: Energia para o Desenvolvimento Sustentável, publicada pelo BNDES e o CGEE, com revisão da CEPAL e da FAO, editada em 4 línguas: português, espanhol, francês e inglês. Sua publicação visa compartilhar globalmente a experiência brasileira com a valorização energética dos produtos da cana.

VIII.1. O CTBE

Para dotar o SIT da cana dos meios de atingir sua ambição, o governo brasileiro encomenda ao CGEE o desenho de uma ferramenta de pesquisa, experimentação e difusão das inovações necessárias para a transição ecológica da cultura da cana: o Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), integrante do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), localizado em Campinas, no estado de São Paulo, inaugurado em 2010. Suas instalações são abertas a usuários empresariais e tecnológicos: produtores, indústria de equipamentos e máquinas agrícolas, academia e órgãos financiadores parceiros da agenda de pesquisa e desenvolvimento do Centro.

O CTBE, criado como centro de pesquisa dedicado a explorar novas oportunidades de inovação na agroenergia canavieira, se organiza para melhorar a produção e o processamento da cana, e o desenvolvimento de biorefinarias. Na produção ele analisa operações de trato de soqueiras e transporte, plantio e colheita da cana com mecanização de baixo impacto que contemple redução do pisoteio do solo pelas máquinas, viabilização do plantio direto sobre a palha, desenvolvimento de processos alternativos de plantio e colheita, e aumento da eficiência nutricional da cana-de-açúcar com emprego da agricultura de precisão. No que diz respeito ao processamento para conversão de biomassas em produtos de interesse industrial, sua atuação envolve engenharia bioquímica, metabólica e de bioprocessos, biocatálises, catálises químicas, separações físico-químicas, etc.; isso para estabelecer rotas de processamento de material lignocelulósico em biocombustíveis, novos materiais, intermediários químicos, etc.; para tal, o CTBE dispõe de uma Planta Piloto para Desenvolvimento de Processos que examina rotas tecnológicas de produção de etanol e outros compostos derivados da biomassa. A Biorefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC), ferramenta de simulação computacional do Centro, é voltada para otimizar conceitos e processos presentes em uma biorefinaria: avaliar os aspectos de sustentabilidade (econômicos, ambientais e

sociais) de diferentes arranjos produtivos; analisar o estágio de desenvolvimento de novas tecnologias de produção de etanol celulósico (segunda geração) e produtos derivados para química verde; entre outras, emprega metodologias como Matriz Insumo Produto e Análise de Ciclo de Vida.

VIII.2. Colheita mecânica

O abandono gradual da colheita manual, e da prática à ela associada de queima prévia do canavial, substituída pela colheita mecânica, é motivado por reivindicações ambientais e de saúde pública que remontam ao final da década de 1990²¹. Em resposta às queixas da sociedade civil sobre o incômodo causado pelos incêndios de cana, os governos do estado de São Paulo e federal, tentam várias vezes legislar para impedir a prática da queima, até que em 2007 os empresários do setor se convencem a aceitar a antecipação de 2021 para 2014 da obrigação de operar 70% da transição colheita manual - mecânica. O novo acordo é um sucesso: em São Paulo, maior produtor, a mudança atinge 80% da área colhida em 2012 e chega a praticamente 100% em 2014 (<https://www.jornalcana.com.br>, consultado em 27/11/2015).

A colheita mecânica sem queima dos campos permite deixar no chão entre 10 e 20 toneladas de resíduos vegetais de cana-de-açúcar por hectare, essencialmente palha, contra três toneladas em colheita manual (De Oliveira, Trivelin, Penatti e De Cássia Piccolo, 1999, Deza ZM et al., 2005, Vitti et al., 2011). Essa palha representa 1/3 do potencial energético total da cana-de-açúcar. Com o incremento das tecnologias para recuperação de energia da cana, o conteúdo energético dessa palha pode ser rapidamente valorizado como combustível em centrais de cogeração e em reatores de hidrólise celulósica para produção de combustíveis líquidos (etanol, diesel, querosene de aviação). A diversificação dos usos potenciais aumenta a pressão competitiva sobre a mobilização de palha como insumo.

O aparelho de inovação tecnológica do SIT da cana se mobiliza para sua valorização visando, entre outras rotas tecnológicas, adaptar as câmaras de combustão das centrais de cogeração para serem alimentadas com o novo produto. Assim nasce o Projeto Sucre, do CTBE, que visa o aproveitamento da palha da cana-de-açúcar para geração de bioeletricidade no setor sucroenergético. Como nas ocasiões anteriores de introdução de inovação pelo SIT da cana, a equipe do Projeto trabalha junto com as usinas parceiras, fabricantes de equipamentos e equipes de universidades públicas para solucionar os gargalos tecnológicos dessa trajetória.

Mas essa valorização energética é tributária da determinação da quantidade ideal de palha a ser deixada no campo, componente agrônomo do Projeto Sucre. A palha de cana-de-açúcar constitui o essencial dos resíduos vegetais que fornecem o expressivo potencial do sistema de plantio SCV. Do ponto de vista agrônomo, a

²¹ Além de que as condições de trabalho muito difíceis dos cortadores de cana e a precariedade de seus empregos serem alvo de fortes críticas por associações de direitos humanos e outras.

quantidade de palha que é apropriada deixar no solo não é a mesma nas diferentes áreas de cultivo da cana-de-açúcar. Esse ótimo difere de acordo com cada região, em função das características do território, das especificidades do capital natural local, mas também das infraestruturas de produção e transformação de energia. Um bom conhecimento dos sistemas de produção SCV vai permitir avaliar o ótimo econômico e ecológico para a taxa de supressão de palha. A definição desse ótimo contribui para o desenvolvimento da "inteligência do território" que o SIT da cana aporta ao país.

Mas as vantagens da colheita mecânica de cana-de-açúcar são parcialmente comprometidas pela compactação do solo, redução significativa da sua porosidade, que atinge entre 48,6% e 39,8% nos primeiros 5 cm (Bolonhezi, 2015). Ela destrói seu ecossistema vivo, que garante sua fertilidade e a produtividade agrícola diminui. A compactação do solo provocada pelo tráfego de veículos nos canaviais é observável até uma profundidade de 40 cm (Håkansson, Voorhees, & Riley, 1997, Vasconcelos, 2002).

Outra missão do CTBE então é conceber uma máquina leve - para limitar a compactação do solo - e capaz de plantar a cana-de-açúcar sem cultivo (sem revolver o solo) em condições industriais. Esse novo maquinário agrícola é necessário para reverter o paradoxo cultural da cana-de-açúcar: ao importar métodos e ferramentas agrícolas dos países de clima temperado, os países tropicais amoldaram seus solos e culturas a máquinas e práticas que não foram projetadas para eles. O desafio para o CTBE é corrigir essa contradição, invertendo a lógica equivocada e adaptando máquinas e métodos de cultivo às especificidades dos solos tropicais. Fiel ao método SIT brasileiro da cana, o projeto, desenvolvido no CTBE pela unidade de pesquisa mecanização de baixo impacto, combina pesquisa pública e indústria privada.

A máquina em questão é conhecida, de acordo com a sua função, como Estrutura de Tráfego Controlado (ETC), pois ela traz como o principal inovação é uma redução drástica da superfície de rodagem dos pneus e assim da área compactada. A ETC possibilita a realização de todas as operações culturais de plantio, adubação e colheita. Em comparação com as máquinas agrícolas convencionais, ela reduz a superfície do solo compactado de 60% para 13%. O projeto tem financiamento de R\$ 16 milhões com recursos do Fundo Tecnológico do BNDES. O parceiro empresarial é a Jacto, fabricante de equipamentos agrícolas. O objetivo é a produção em escala comercial de máquinas agrícolas em 2019. De acordo com simulações de CTBE, a ETC deverá permitir uma redução geral no custo da colheita de 50%. Em termos de consumo de combustível, a ETC permite reduzir de 1 a 0,6 litros de diesel o consumo na colheita de uma tonelada de cana. Além disso, a capacidade de colheita diária é planejada em 3.000 toneladas, contra 700 toneladas para máquinas convencionais.

VIII.3. O capital natural solo

A palhada assim deixada no campo, detritos da colheita, protege o solo da erosão e restaura sua fertilidade natural. Esse é o ponto de partida para a transição agroecológica do modelo, que permite a reconstituição das terras tropicais, para restaurar o capital natural solo. Essa camada de vegetação mantém um microclima: as amplitudes térmicas do solo são reduzidas, o teor de água e de matéria orgânica são aumentados em 50% e 25%, respectivamente, no nível do solo superior (Z. M. De Souza et al., 2005). A cobertura de matéria orgânica deixada no chão também atua como uma esponja, diminuindo a velocidade de infiltração de água no solo, o que limita o escoamento superficial e permite que ele armazene mais umidade (Garby, Vitorino, Tomasini, Bergamin e Panachuki, 2011). A palha limita o impacto desestruturante das gotas de chuva e o efeito erosivo do escoamento superficial (Cogo, Levien, & Schwarz, 2003). Essas melhorias físicas e orgânicas no solo se traduzem em aumento da produtividade agrícola (Tim, 2002).

O cultivo do solo é um método importado da agricultura de clima temperado que aumenta temporariamente a fertilidade do solo através do armazenamento de carbono orgânico, estimula sua respiração e a mineralização do carbono incorporado. Esse método é adequado para aqueles solos, mesmo se os empobrece no longo prazo. Em climas tropicais, a mineralização do solo já é muito rápida mesmo sem cultivo, e sua lavragem o expõe ao esgotamento e destruição por erosão acelerada. Em média a cada cinco anos a prática da aragem esvazia o solo de seu estoque de carbono orgânico transformando-o em carbono atmosférico. O revolvimento da terra de uma lavoura de cana (aragem pré-reforma) resulta na emissão de 8,4 toneladas de CO₂ por hectare (La Scalla et al., 2006, citado por Carvalho, Braunbeck, & Chagas, 2012).

A agricultura sem lavoura, sobre cobertura vegetal (SCV), é mais adaptada aos solos tropicais, permite manter no solo uma camada de matéria vegetal, uma massa orgânica que protege o solo e o enriquece quando se decompõe. Ela restaura o solo e armazena CO₂ atmosférico. As plantações SCV são associadas a uma rotação de culturas: a cada 5 anos, um ciclo de cultivo de um ano de leguminosas permite enriquecer naturalmente o solo com nitrogênio extraído da atmosfera. Mas, para ser aplicado ao cultivo de cana-de-açúcar, o método de cultivo SCV requer a invenção de procedimentos e tecnologias especificamente adaptados à cana-de-açúcar, desafio a ser enfrentado pelo SIT da cana. A transição para uma agricultura SCV e sem preparo direto permite perpetuar os benefícios da manutenção da cobertura orgânica proporcionada pela mecanização. Os benefícios para o solo são vários.

A nível físico, a camada de resíduos vegetais deixada no chão atua como um manto protetor, reduz a ação destrutiva dos pingos de chuva e reduz o escoamento, que remove matéria orgânica e nutrientes (P, K, Ca, Mg) (Garby, Vitorino, Tomasini, Bergamin e Panachuki, 2011). A porosidade dos solos é melhorada e sua capacidade de armazenamento de água aumenta (Sparovek & Schnug, 2001; Z. M. De Souza et al., 2005). O aumento das micro e macro porosidades do solo se traduz

pela redução da erosão de um fator 10 (Prove et al., 1995, citado por Bolonhezi, 2014).

Pelo lado químico, os solos são menos ácidos e possuem maior disponibilidade de fósforo, fosfato, cálcio e magnésio. O nitrogênio do solo também aumenta (R. A. Souza et al., 2012; Franco, Vitti, Faroni, Cantarella e Trivelin, 2007). Passa de 1,13 g/kg em solos submetidos a um sistema de colheita convencional para 2,10 g/kg em solos sujeitos a um sistema de colheita mecanizada, a comparar com 3,14 g/kg em solo florestal (R. A. Souza et al., 2012).

Do ponto de vista biológico, a análise das frações dos diferentes tipos de carbono orgânico indica que o solo é mais rico em nutrientes, têm mais vida, mas acima de tudo sua fertilidade é mais resiliente. Os solos podem alimentar as plantas por mais tempo, proporcionando-lhes nutrientes de forma mais consistente e durante um período de tempo mais longo (R. A. Souza et al., 2012). Isso também se reflete no aumento da sua capacidade de fornecer os serviços ecossistêmicos de armazenamento e purificação da água, e manutenção da biodiversidade.

Em se tratando de métodos culturais recentes, alguns riscos são apontados, tais que: (i) aumento da incidência de ervas daninhas, requerendo o uso de herbicidas químicos, com efeitos perigosos sobre o meio ambiente e a saúde humana (Macedo, Botelho e Campos, 2003); (ii) incremento de incêndios (Rossetto, Cantarella, Dias, Landell e Vitti, 2008); e (iii) fraco enraizamento, provocando instabilidade das plantas e dificuldade para a colheita mecânica (Vasconcelos, 2002; Magalhães et al., 2012). Embora não negligenciáveis, os riscos identificados são baixos para um modelo ainda em fase embrionária, especialmente comparando-se às vantagens já mencionadas. Eles fazem parte dos ajustes que qualquer sistema tecnológico tem que realizar durante o período de aprendizagem, tarefa para o SIT da cana.

O enriquecimento do solo em carbono mostra que a transição agroecológica experimentada no Brasil para a cana-de-açúcar possibilita que os solos funcionem como dissipador de CO₂ atmosférico. Diferentes estudos medem o enriquecimento em carbono de solos de canaviais convertidos em cultura SCV e cultivo direto. Os resultados desses estudos convergem em torno de 1,5 toneladas de carbono armazenado por ano e por hectare, equivalente a 6 toneladas por ano por hectare de CO₂ atmosférico (Segnini, 2007, citado por Bolonhezi, 2014; Cerri et al., 2004). Em terras onde a prática de queima do canavial foi abandonada por oito anos foi medida uma taxa média anual de acúmulo de carbono nos primeiros 20 cm de solo de 122 g.m⁻² de solo, equivalente a 4,4 t/ha/ano de armazenamento de CO₂ (Galdos et al., 2009).

A dinâmica de armazenamento de CO₂ perdura até que a respiração dos micro-organismos do solo gerem tanto carbono atmosférico quanto o solo é capaz de absorver; o solo está então em equilíbrio. Esse estado de equilíbrio depende das condições climáticas e do regime de exploração do solo, podendo durar entre várias décadas até vários séculos. Assim, os solos sujeitos a uma transição para cultura

SCV são em princípio capazes de se comportar como sumidouros de carbono atmosférico por décadas ou por séculos.

VIII.4. Performance agrícola

As melhorias da estrutura físico-química e da biologia do capital natural solo são agronomicamente traduzidas por um aumento nos rendimentos de 15% a 36%, dependendo dos estudos²², resultando numa agricultura mais eficiente. A massa de raiz da cana também aumenta em torno de 1,7 t/ha (Bolonhezi, 2014).

O resultado econômico também é favorável aos sistemas de cultivo sobre cobertura vegetal. A abolição da operação de lavra permite uma redução no consumo de combustível da ordem de 75% em relação à agricultura convencional (Halping 2011 citado por Bolonhezi, 2014).

As culturas SCV conduzem a uma diminuição da dependência de insumos químicos e, portanto, um menor custo de produção: a redução medida no cultivo de cana-de-açúcar no Brasil é de 13 a 28% em comparação com o método convencional.

Além de ser mais produtiva, a agricultura SCV também é mais exigente em termos de capital humano e conhecimento aprofundado das especificidades locais do capital natural. Essa construção conjunta dos diferentes componentes do capital, humano e natural, é uma contribuição formidável do SIT da cana para os desafios de desenvolvimento do país.

VIII.5. RenovaBio

Um novo ciclo de desenvolvimento dos biocombustíveis se prepara no país respaldado pela Lei no 13.576 de dezembro de 2017, que dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Essa nova política é composta por ações, atividades, projetos e programas, voltados para viabilizar uma oferta de energia cada vez mais sustentável, competitiva e segura, observados os seguintes princípios: (i) previsibilidade para a participação dos biocombustíveis na matriz energética, com ênfase na sustentabilidade da agroindústria e na segurança do abastecimento; (ii) resguardo dos interesses do consumidor quanto a preço, qualidade e oferta de produtos; (iii) eficácia dos biocombustíveis em contribuir para a preservação ambiental, mitigação efetiva de poluentes locais e de emissões de GEE, em atendimento aos compromissos do país no âmbito do Acordo de Paris sob a Convenção do Clima (UNFCCC); (iv) contribuição do mercado de biocombustíveis para a geração de emprego e renda, inclusão econômica e social, e para o desenvolvimento regional, bem como para a promoção de cadeias de valor relacionadas à bioeconomia sustentável; (v) avanço da eficiência energética na produção, na comercialização e no uso de biocombustíveis em veículos, máquinas e equipamentos, inclusive com mecanismos de avaliação de ciclo de vida; e (vi) impulso ao desenvolvimento tecnológico e à inovação, visando consolidar a base

²² 15% (Bolonhezi, 2015); 36% Duarte Júnior & Coelho, (2008); Outros (Carvalho et al., 2012; Castro Filho, Muzilli, & Podanoschi, 1998; Vezzani & Mielniczuk, 2011).

tecnológica, aumentar a competitividade, e acelerar a inserção comercial de biocombustíveis avançados e de novos bioprodutos.

A lei é regulamentada pelo Decreto 9.308 de março de 2018, que trata da definição das metas compulsórias anuais de redução de emissões de GEE para a comercialização de combustíveis, a serem desdobrada pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) em metas individuais, aplicadas a todos os distribuidores de combustíveis, proporcionais à respectiva participação de mercado na comercialização de combustíveis fósseis no ano anterior. Ele institui o Comitê RenovaBio, composto por representantes de cinco ministérios, assim como convidados de órgãos da administração pública federal, estadual e municipal, de entidades públicas e privadas do mercado de biocombustíveis, e técnicos e especialistas do setor.

A implementação plena do RenovaBio está prevista para 2020, utilizando como ferramentas (i) as adições compulsórias de biocombustíveis aos combustíveis fósseis; (ii) os incentivos fiscais, financeiros e creditícios; (iii) os Créditos de Descarbonização (CBIO), a serem emitidos por banco ou instituição financeira contratados, e negociáveis em mercados organizados, inclusive leilões; e (iv) a Certificação da Produção Eficiente (energética-ambiental) de Biocombustíveis, com base na diferença entre a intensidade de carbono do combustível fóssil substituto e a intensidade de carbono estabelecida no processo de certificação pelas firmas inspetoras, organismos credenciados.

Como resultado, espera-se que a oferta de etanol atinja de 43 a 54 bilhões de litros em 2030, contra os atuais 27 bilhões de litros. Investimentos da ordem de R\$ 70 bilhões são previstos, no campo e na indústria. O processamento da vinhaça e da torta de filtro pode permitir que sejam gerados de 7 a 8 MMNm³ de biogás nesse horizonte. A participação do biodiesel, cujo percentual mandatório de mistura no diesel foi elevado para 10% em março de 2018 e deve aumentar progressivamente até 15%, também deve crescer significativamente, evoluindo de 5,7 para 11 bilhões de litros.

IX Conclusão

As bioenergias foram criticadas pelo risco de seu desenvolvimento exercer pressão sobre a segurança alimentar. Além disso, diversas tentativas de desenvolver cadeias de abastecimento agro-energético foram desencorajadas pela queda nos preços do petróleo. No entanto, esta análise mostra que as agro-energias têm sido no Brasil uma ferramenta para apoiar um setor agrícola com foco alimentar, e que elas têm progredido no sentido de serem competitivas com os combustíveis fósseis. Nessas condições, as agroenergias reforçam a segurança alimentar. Além disso, seu desenvolvimento permitiu ao Brasil estruturar um Sistema de Inovação Tecnológica através do qual o país adquiriu progressivamente habilidades tecnológicas expressivas. O SIT da cana assegurou as funções de importação,

adaptação, difusão e inovação tecnológica, na medida em que tem sido e continua sendo um motor de desenvolvimento para o país. Através do SIT da cana, o Brasil adquiriu o domínio das trajetórias tecnológicas das indústrias do setor e conseguiu direcioná-las para responder às diferentes crises atravessadas. A última mudança no modelo é a conversão agroecológica do modelo de produção de cana-de-açúcar: após a formação de capital humano e técnico, o SIT da cana restaura o capital natural solo.

A introdução de matérias-primas, processos e produtos inovadores, como a cana-energia, materiais lignocelulósicos, etanol 2G e biogás pode reforçar o desempenho positivo dos biocombustíveis, melhorando a performance econômica para atender a necessidades sociais mais amplas, permitindo ao mesmo tempo, a mitigação climática de forma muito mais efetiva. As emissões evitadas pelo uso de etanol, biodiesel e bioeletricidade da cana em 2017 foram respectivamente de 47 MtCO_{2eq}, 10 MtCO_{2eq} e 3 MtCO_{2eq}, somando 60 MtCO_{2eq}. Esse novo cenário abre a perspectiva de ampliar o consumo global de biocombustíveis, afastando infundadas preocupações decorrentes da eventual competição pelo uso da terra.

O sucesso do modelo brasileiro reside em um forte apoio político, juntamente com um quadro institucional cuja complexidade foi resolvida ao longo das décadas de sua história e das crises que ele superou. Para todos os países onde o reforço econômico dos setores agrícolas é um problema, a compreensão da história do modelo brasileiro de agro-energias é rica em ensino. Para os países tropicais em particular, as inovações da ecologia agroindustrial desenvolvidas pelo Brasil são valiosas porque todos estão preocupados com a erosão do solo. O desafio do SIT da cana hoje é industrializar suas últimas inovações e aprender a se exportar, porque o desenvolvimento agrícola e a produção de energia local continuam a ser questões importantes de desenvolvimento internacional.

Referências

- Barros Meira, R. (2003). *O emprego do álcool como agente de luz, força motriz e calor: Uma solução para a crise açucareira da primeira república* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Bolonhezi, D. (2014). AGRICULTURA CONSERVACIONISTA NO SISTEMA DE PRODUÇÃO DA CANA-DE- AÇÚCAR. In *Symposio para conservação do solo e da Água para Cana-de-Açúcar*.
- Bolonhezi, D. (2015). Plantio Direto e calagem na reforma da CANA CRUA, 75–77.
- CARLÍ, D. (1979). Os Caminhos da Energia. *IAA*.
- Carvalho, J. L. N., Braunbeck, O. A., & Chagas, M. F. (2012). Implantação Do Plantio Direto De Cana-De-, 1–39.
- Cassuto, D. N. (2013). the Evolution of the Brazilian Regulation of Ethanol and Possible Lessons for the United States. *Pace Law Faculty Publications*, 477.
- Castro Filho, C., Muzilli, O., & Podanoschi, a L. (1998). Estabilidade Dos Agregados E Sua Relação Com O Teor De Carbono Orgânico Num Latossolo Roxo Distrófico , Em Função De Sistemas De Plantio , Rotações De Culturas E Métodos De Preparo Das Amostras. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, (3), 527–538.
- Cerri, C. C., Bernoux, M., Feller, C., Correa de Campos, D., de Luca, E. F., & Eschenbrenner, V. (2004). Sucre et sequestration du carbone sugarcane and carbon sequestration. *Documentation IRD*, 20.
- CGEE. (2007). *Estudo Prospectivo de Solo, Clima e Impacto Ambiental para o Cultivo da Cana-de-Açúcar e Análise Técnica/Econômica para o Uso do Etanol como Combustível*.
- Cogo, N. P., Levien, R., & Schwarz, R. a. (2003). Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 27(4), 743–753. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000400019>
- de Arruda Veiga Filho, A., & Ramos, P. (2006). Proalcohol e evidencias de concentração na produção e processamento da cana de açúcar. *Informacoes Economicas*.
- de Moraes, M. A. F. D., & Zilberman, D. (2014). *Production of Ethanol from Sugarcane in Brazil: From State Intervention to a Free Market* (Vol. 43). Springer Science & Business Media.
- De Oliveira, M. W., Trivelin, P. C. O., Penatti, C. P., & De Cássia Piccolo, M. (1999). Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 34(12), 2359–2362. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999001200024>
- De Souza, Z. J. (2000). A CO-GERAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR SUCROALCOOLEIRO : DESENVOLVIMENTO E SITUAÇÃO ATUAL.
- De Souza, Z. M., Prado, R. D. M., Paixão, a. C. S., & Cesarin, L. G. (2005). Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*,

40(3), 271–278. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000300011>

Duarte Júnior, J. B., & Coelho, F. C. (2008). Adubos verdes e seus efeitos no rendimento da cana-de-açúcar em sistema de plantio direto. *Bragantia*, 67(3), 723–732. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000300022>

Dunham, F. B., Bomtempo, J. V., & Fleck, D. L. (2011). A Estruturação do Sistema de Produção e Inovação Sucroalcooleiro como Base para o Proalcoool. *Revista Brasileira de Inovação*, 10(1), 35–72.

Farias, T. (2011). Análise do arcabouço legislativo do álcool combustível no Brasil. *Revista Direito E Desenvolvimento*, 57–72.

Franco, H. C. J., Vitti, A. C., Faroni, C. E., Cantarella, H., & Trivelin, P. C. O. (2007). Estoque de nutrientes em resíduos culturais incorporados ao solo na reforma de áreas com cana-de-açúcar. *STAB*, 25(6).

Furtado, A. T., Scandiffio, M. I. G., & Cortez, L. A. B. (2011). The Brazilian sugarcane innovation system. *Energy Policy*, 39(1), 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.023>

Galdos, M. V., Cerri, C. C., & Cerri, C. E. P. (2009). Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma*, 153(3–4), 347–352. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.08.025>

Garbiate, M. V., Vitorino, A. C. T., Tomasini, B. A., Bergamin, A. C., & Panachuki, E. (2011). Erosão em entre sulcos em área cultivada com cana crua e queimada sob colheita manual e mecanizada. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 35(6), 2145–2155. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600029>

Goldemberg, J. (2008). The Brazilian biofuels industry. *Biotechnology for Biofuels*, 1(1), 6. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-1-6>

Goldemberg, J., 2017. O Proálcool visto no exterior. Publicado em: Valor Econômico (Opinião) em 5 de Janeiro de 2017.

Håkansson, I., Voorhees, W. B., & Riley, H. (1997). Proceedings 11th Conference of ISTRO: Tillage and Traffic in Crop Production Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil and Tillage Research*, 11(3), 239–282. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90003-7](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987(88)90003-7)

International Sugar Organization. (2012). *Perspectives des productions de sucre et d' éthanol au Brésil. Mecas* (Vol. 5).

ipea. (2010). biocombustíveis no Brasil: Etanol e Biodiesel. *Comunicados Do IPEA*, n 53.

Kaup, F., Nitsch, M., & Menezes, T. (2011). Brazil's aspiration for a massive worldwide substitution of gasoline by 2025. In *Nordic Bioenergy Conference* (pp. 1–11).

Lynd, L. R., Sow, M., Chimpango, A. F., Cortez, L. A., Brito Cruz, C. H., Elmissiry, M., ... van Zyl, W. H. (2015). Bioenergy and African transformation. *Biotechnology for Biofuels*, 8(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s13068-014-0188-5>

Macedo, N. M., Botelho, P. S. M., & Campos, M. B. S. (2003). Controle químico de cigarrinha-da-raiz em cana-de-açúcar e impacto sobre a população de artrópodes.

Stab Açúcar, Álcool Subprodutos, 21.

- Magalhães, P. S. G., Nogueira, L. A. H., Canatarella, H., Rossetto, R., Franco, H. C. J., & Braunbeck, O. A. (2012). *Agro-industrial technological paths, in Sustainability of sugarcane bioenergy. CGEE report.*
- Melo, J. (1942). A política do álcool-motor no Brasil. *IAA.*
- Michellon, E., Santos, A., & Juliano, R. (2008). Breve Descrição do Proálcool e Perspectivas Futuras para o Etanol Produzido no Brasil. In *Estrutura, Evolução e dinâmica do sistemas alimentares e cadeias agroindustriais.* (pp. 1–16).
- Ministério de Minas e Energia. (2014). Boletim mensal dos combustíveis renováveis. *Boletim Mensal Dos Combustíveis Renováveis, 76, 23.*
- Ministério de Minas e Energia. (2016). Boletim mensal dos combustíveis renováveis. *Boletim Mensal Dos Combustíveis Renováveis, 76(Maio 2014), 23.*
- Nass, L. L., Pereira, P. A. A., & Ellis, D. (2007). Biofuels in Brazil: An overview. *Crop Science, 47(6), 2228–2237.* <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.03.0166>
- Nogueira, L. A. H., Seabra, J. E. A., Best, G., Leal, M., & Poppe, M. K. (2008). Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. *BNDES, Rio de Janeiro, 316.*
- Oliver, G. D. S., & Szmrecsány, T. (2003). A Estação Experimental de Piracicaba e a modernização tecnológica da agroindústria canavieira (1920 a 1940). *Revista Brasileira de História, 23(46), 37–60.* <https://doi.org/10.1590/S0102-01882003000200003>
- Paraizo, D. (2013). Melhoramento genético da cana e biotecnologia. *Nova Cana, pp. 1–14.*
- Pedro, G. (2013). Mapeamento dos esforços tecnológicos dos programas de melhoramento genético de cana-de-açúcar no Brasil . Resumo. In *XV Congresso Latino Iberoamericano de gestão de Tecnologia.*
- Pereira de Carvalho, S., & De Oliveira Carrijo, E. L. (2007). POLÍTICAS SETORIAIS E MACROECONÔMICAS A produção de álcool : do PROÁLCOOL ao contexto atual. In *Sober, XLV Congresso da Sober, Conhecimentos para agricultura do futuro.*
- Queda. (1972). A intervenção do Estado e a agroindústria açucareira paulista. Dissertação de Doutorado.
- Ramos, P. (1991). *agroindustria canavieira e propriedade funduaria no brasil.*
- Ramos, P. (2007). OS MERCADOS MUNDIAIS DE AÇÚCAR E A EVOLUÇÃO DA. *Economia Aplicada, Sao Paulo, 559–585.*
- Rossetto, R., Cantarella, H., Dias, F. L. F., Landell, M. G. A., & Vitti, A. C. (2008). Manejo conservacionista e reciclagem de nutrientes em cana-de-açúcar tendo em vista a colheita mecânica. *Informações Agrônomicas.*
- Santiago, A. D., Ivo, W. M. P. de M., Barbosa, G. V. de S., & Rosseto, R. (2006). Impulsionando a Produtividade e a Produção Agrícola da Cana-de-Açúcar no Brasil. In *Embrapa, International Workshop on Agricultural Development* (pp. 1–4).
- Scandiffio, M. I. G. (2005). *Análise Prospectiva do Álcool Combustível no Brasil - Cenários*

2004-2024. Retrieved from
[http://libdigi.unicamp.br/document/?down=vtls000374448%5Cn\(In:%5Cn02.02.10](http://libdigi.unicamp.br/document/?down=vtls000374448%5Cn(In:%5Cn02.02.10)

- Seabra, J. E. a, & Macedo, I. C. (2011). Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. *Energy Policy*, 39(1), 421–428. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.10.019>
- Shikida, P. F. A., & Perosa, B. B. (2012). Álcool combustível no Brasil e path dependence. *Revista de Economia E Sociologia Rural*, 50(2), 243–262. <https://doi.org/10.1590/S0103-20032012000200003>
- Souza, R. A., Telles, T. S., Machado, W., Hungria, M., Filho, J. T., & Guimarães, M. D. F. (2012). Effects of sugarcane harvesting with burning on the chemical and microbiological properties of the soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 155(July), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.03.012>
- Sparovek, G., & Schnug, E. (2001). Soil tillage and precision agriculture a theoretical case study for soil erosion control in Brazilian sugar cane production. *Soil and Tillage Research*, 61(1–2), 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00189-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00189-1)
- Tim, L. C. (2002). *Efeito do manejo da palha da cultura da cana-de-açúcar nas propriedades físico-hídricas de um solo. Piraçicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Tese de doutorado.*
- Torres da Veiga Pereira, G. (2007). *O Setor a Lcooleiro : O Setor Alcooleiro :*
- Vasconcelos, A. C. M. (2002). *Desenvolvimento do sistema radicular da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.*
- Vezzani, F. M., & Mielniczuk, J. (2011). Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 35(1), 213–223. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100020>
- Vitti, A. C., Franco, H. C. J., Trivelin, P. C. O., Ferreira, D. A., Otto, R., Fortes, C., & Faroni, C. E. (2011). Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana-planta. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 46(3), 287–293. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000300009>