

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

TAMIRES SALDANHA DE SOUZA

**Oportunidades e desafios da biotecnologia na transição agroecológica no
Cerrado: o caso da soja**

Lorena, 2021.

TAMIRES SALDANHA DE SOUZA

**Oportunidades e desafios da biotecnologia na transição agroecológica no
Cerrado: o caso da soja**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de
Lorena como requisito da disciplina Trabalho
de Conclusão de Curso II do curso de
Engenharia Bioquímica.

Orientador: Prof. Dr. Elisson Romanel.

Coorientador: Prof. Dr. Júlio César dos
Santos.

Lorena, 2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema
Automatizado da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Souza, Tamires Saldanha
Oportunidades e desafios da biotecnologia na
transição agroecológica no Cerrado: o caso da soja /
Tamires Saldanha Souza; orientador Elisson Romanel.
Lorena, 2021.
89 p.

Monografia apresentada como requisito parcial
para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia
Bioquímica - Escola de Engenharia de Lorena da
Universidade de São Paulo. 2021

1. Restauração ambiental. 2. Agroecologia. 3.
Cerrado. 4. Biotecnologia. 5. Sustentabilidade. I.
Título. II. Romanel, Elisson, orient.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A VERSÃO FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DA ALUNA TAMIRES SALDANHA DE SOUZA, ORIENTADA PELO PROFESSOR ELISSON ROMANEL.



ASSINATURA DO ORIENTADOR

DEDICATÓRIA

Dedicado este trabalho à Ecosfera e à biodiversidade, que por séculos foram superexploradas pelo ser humano; à Natureza pela perfeição com que conduz a vida e o universo; à juventude pelo potencial de mudança e às futuras gerações.

AGRADECIMENTOS

À minha família, mãe, pai, irmãos, tios, tias e avós, pela educação, carinho, apoio, esforço e compreensão durante minha trajetória acadêmica e toda minha vida.

Aos meus amigos, pelo apoio, paciência e motivação nos momentos de fragilidade e por tudo o que passamos juntos dentro e fora da academia.

Aos meus companheiros de quatro patas, Laika e Gato, pela serenidade transmitida nos momentos de tensão.

Aos meus professores do ensino básico, pelos ensinamentos e por desenvolverem em mim um senso crítico, racional que me permitiu criar meus próprios valores. E por minha capacitação, que me permitiu ingressar em uma Universidade pública de alta qualidade.

Ao Professor Júlio César dos Santos por disponibilizar voluntariamente seu tempo para orientação neste trabalho e pelo conhecimento transmitido durante o curso de Engenharia Bioquímica.

Ao Professor Elisson Romanel pela orientação e atenção neste trabalho e pelo conhecimento transmitido durante o curso de Engenharia Bioquímica.

A todos que contribuíram de alguma forma para meu crescimento e processo de formação acadêmica, obrigada.

*“[...] O pensamento é a força criadora, irmão
O amanhã é ilusório
Porque ainda não existe
O hoje é real
É a realidade que você pode interferir
As oportunidades de mudança
'Tá no presente
Não espere o futuro mudar sua vida
Porque o futuro será a consequência do
presente
Parasita hoje
Um coitado amanhã
Corrida hoje
Vitória amanhã
Nunca esqueça disso, irmão [...]”*

(Racionais MC's)¹

RESUMO

SOUZA, T. S. Oportunidades e desafios da transição agroecológica como agente de adaptação e resiliência às mudanças climáticas no Cerrado. 2021. 93p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo. Lorena, 2021.

O presente trabalho abordou a contribuição brasileira para o aumento e redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE); para a redução da taxa de aquecimento global; e, para a restauração ambiental (através de manejos agroecológicos, com enfoque no Bioma Cerrado). Para o processo de transição, explorou-se as principais biotecnologias brasileiras em sistemas de produção sustentável como forma de identificar as melhores abordagens para uma transição agroecológica do sistema agrário brasileiro. Ademais, foi realizado um levantamento das práticas insustentáveis da agricultura moderna e os meios para reverter as consequências geradas (também por meio da biotecnologia). Assim, foi proposta a sistematização da sustentabilidade através da metodologia emergética e da análise de externalidades para que seja possível tratar todas as dimensões da sustentabilidade de forma concisa, tornando a análise holística. Concluiu-se que o fluxo de valor da agroindústria necessita ser redesenhado a partir dos preceitos da ecologia e da sustentabilidade, a fim de aumentar a resiliência e a adaptabilidade aos eventos climáticos e atingir as metas da Agenda 2030. Ademais, para realizar a transição agroecológica e medir o grau de sustentabilidade das atividades humanas, a metodologia emergética e a análise de externalidades deverão ser empregadas.

Palavras-chave: Restauração ambiental, manejo agroecológico, Cerrado, biotecnologia, sustentabilidade, transição agroecológica.

ABSTRACT

The follow research addressed the Brazilian contribution to the increase and reduction of greenhouse gases emission (GEE); to reduce the rate of global warming and to restore the environmental (through agroecological practices, focusing on Cerrado Biome). For the transition process the main Brazilian biotechnologies in sustainable production systems were explored as a way to identify the best approaches for an agro ecological transition of the Brazilian agrarian system. In addition, a survey of unsustainable practices of modern agriculture and the means to reverse the consequences generated was carried out (also through biotechnology). Thus, it was proposed the systematization of sustainability through the energy methodology and the analysis of externalities so that it is possible to deal with all dimensions of sustainability in a concise way, making the entire analysis holistic. In conclusion the agroindustry value stream must be redesigned in order to increase the adaptability, resist to climate change events and achieve 2030 Agenda Goals - based on ecology and sustainability concepts. Therefore, to measure the level of sustainability of human activities, the energy methodology and external analysis should be applied.

Key-words: Environmental restoration, agroecological practices, Cerrado, biotechnology, sustainability, agroecological transition.

LISTA DE SIGLAS

| | |
|----------|---|
| ABRAPA | Associação Brasileira dos Produtores de Algodão |
| Aprosoja | Associação Brasileira dos Produtores de Soja |
| Bt | <i>Bacillus thuringiensis</i> |
| CBD | Convenção sobre a Diversidade Biológica |
| CNA | Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil |
| CTNBio | Comissão Técnica Nacional de Biossegurança |
| CONAB | Companhia Nacional de Abastecimento |
| DNA | <i>Deoxyribonucleic acid</i> |
| EER | Razão de intercâmbio de energia |
| EIR | Razão de energia invertida |
| ELR | Taxa de carga ambiental |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| EYR | Razão de rendimento emergético ou saldo emergético |
| F | Retroalimentação da economia urbana |
| FBN | Fixação biológica de nitrogênio |
| FP | Florestas plantadas |
| GAAS | Grupo Associado de Agricultura Sustentável |
| GEE | Gases do efeito estufa |
| I | Recursos da Natureza |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IDEC | Instituto de Defesa do Consumidor |
| ILPF | Integração lavoura-pecuária-floresta |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| INPUT | Iniciativa para o Uso da Terra |
| IPCC | <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> |
| M | Materiais da economia |
| MAPA | Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento |

| | |
|----------------|--|
| MATOPIBA | Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia |
| MEC | Ministério da Educação |
| MFV | Mapa do fluxo de valor |
| MMA | Ministério do Meio Ambiente |
| MO | Matéria orgânica |
| N | Recurso não renovável da Natureza |
| ODS | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável |
| OMG | Organismos Geneticamente Modificados |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PDCA | <i>Plan, do, check, act</i> |
| PGM | Plantas Geneticamente Modificadas |
| Qp | Energia potencial em um produto |
| R | Recurso renovável da Natureza |
| Ren | Renovabilidade |
| RPD | Recuperação de pastagens degradadas |
| RR® | <i>Roundup Ready®</i> |
| S | Serviços |
| SAFs | Sistemas agroflorestais |
| SBPC | Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência |
| SPD | Sistema de plantio direto |
| Tr | Transformidade |
| TDA | Tratamento de dejetos animais |
| USD, US\$ | Dólar americano |
| USP | Universidade de São Paulo |
| Y | Emergia total utilizada ($\sum R, N, M, S$) |
| Y _R | Emergia renovável |
| WWF | <i>World Wide Fund for Nature</i> |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 1.1 Objetivo geral..... | 19 |
| 1.2 Objetivo específico..... | 19 |
| 2 METODOLOGIA..... | 20 |
| 3 REVISÃO DA LITERATURA..... | 22 |
| 3.1 Bioma Cerrado, características geográficas, solo e flora..... | 22 |
| 3.2 A expansão da soja e a Revolução Verde..... | 27 |
| 3.3 Biotecnologia aplicada à agricultura..... | 34 |
| 3.4 Agroecologia..... | 39 |
| 3.5 Agroecologia e tendências biotecnológicas na agricultura tropical..... | 49 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 55 |
| 4.1 Contribuições da biotecnologia..... | 55 |
| 4.2 Aplicação da síntese em emergia em ecossistemas de Cerrado para a transição agroecológica da sojicultura..... | 67 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 73 |
| 6 REFERÊNCIAS..... | 78 |
| ANEXOS..... | 88 |

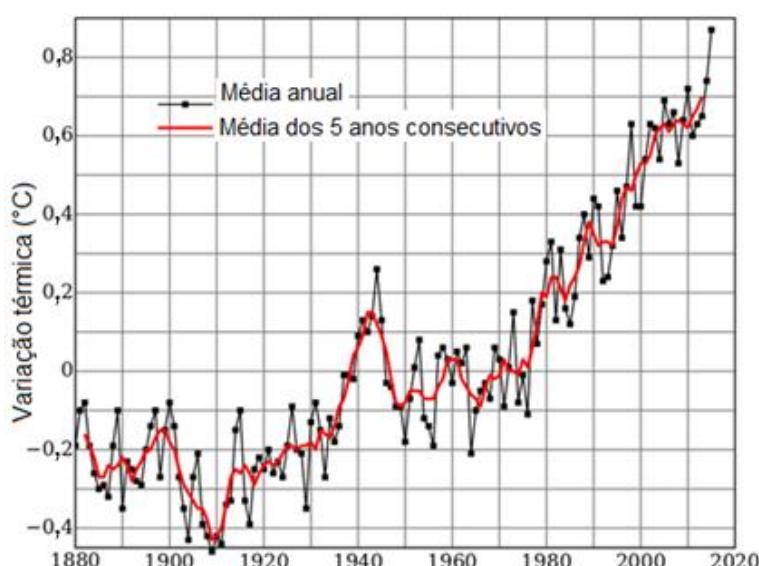
Ecologia é um termo derivado do grego, οἰκολογία (oikologia), formada a partir da junção das palavras oikos e logia, que significam, respectivamente, casa, mordia, lar e estudo, reflexão, razão, lógica. Do mesmo modo, economia, do grego, οἰκονομία (oikonomía) é formada pelas palavras oikos e nomos, que significa administração, organização, distribuição, portanto, administração da casa.²

1 INTRODUÇÃO

A partir da Primeira Revolução Industrial, houve uma expansão desenfreada e insustentável da extração de recursos naturais que está por trás dos inúmeros problemas envolvendo o aumento do número de desastres naturais³ e o desequilíbrio da Ecosfera.^{3,4,5} Entre os maiores agravantes desses problemas estão: a queima de combustíveis fósseis, que contribui com a alta concentração de gases do efeito estufa na Atmosfera; o desmatamento em virtude da agroindústria (impulsionada pelos setores de energia, alimentos e fibras); poluições por produtos petroquímicos e a erosão dos serviços ecológicos e da biodiversidade pela superexploração de recursos naturais.⁶

Concomitante aos avanços tecnológicos e produtivos dos últimos séculos, a temperatura média global cresceu sem precedentes (Figura 1). Na década de 1970, as temperaturas anuais ultrapassaram a média mundial dos dois últimos séculos; o início do novo milênio passou a ser recordista, com a temperatura média acrescida de 0,98°C. A curva de temperatura dos hemisférios, passaram a não sobrepor a partir dos anos 2000,⁵ indicando o desequilíbrio ecológico causado pelas práticas antropogênicas.

Figura 1 – Comportamento da temperatura global entre 1880 e 2020.

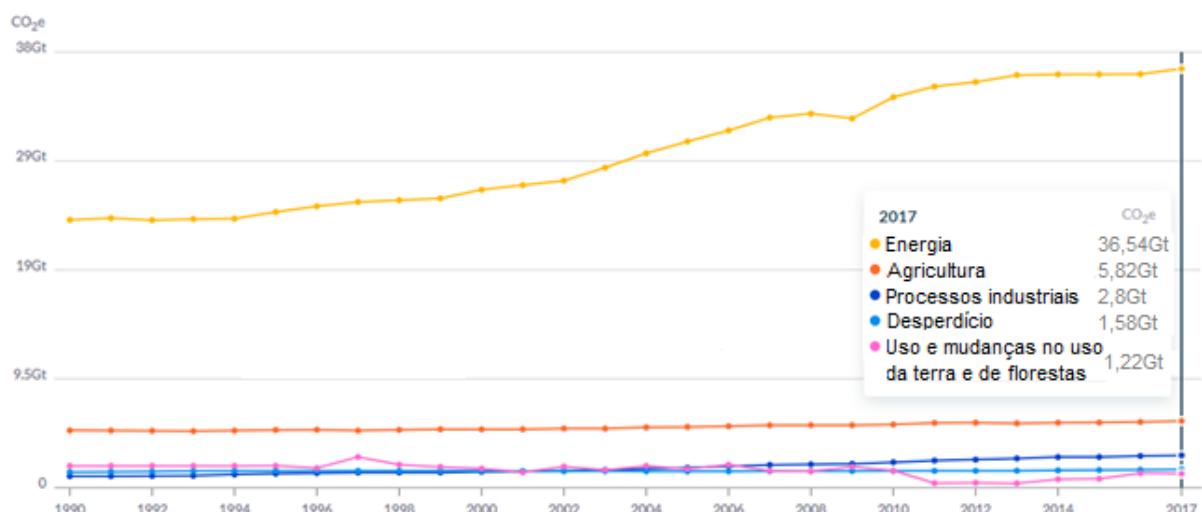


Fonte: NASA⁵, adaptado por Wikimedia Commons, 2018.

“Embora o clima tenha sempre variado de modo natural, a velocidade e a intensidade observadas no aumento da temperatura nesse período são incompatíveis com o tempo necessário à adaptação natural da biodiversidade e dos ecossistemas”.⁷

Os recordes anuais da temperatura terrestre,⁵ foram acompanhados do aumento da concentração de gases do efeito estufa na Atmosfera (Figura 2); sendo o setor energético o maior poluidor, com 76,14% das emissões em 2017, seguido pela agricultura, com 12,23%.⁴ Como maior contribuidor do aquecimento global, o setor energético se vê obrigado a migrar para matrizes de energia limpa, ou livre de qualquer poluição.⁸ Assim, como segundo maior contribuidor, a agroindústria deve assumir sua parte na responsabilidade ambiental.

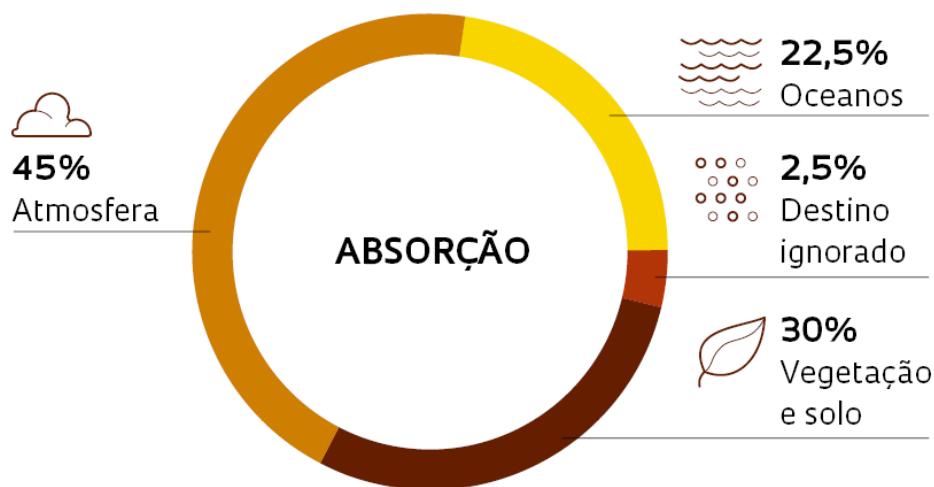
Figura 2 – Histórico de emissão de GEE em CO₂e por setor no mundo, de 1990 a 2017.



Fonte: *Climate Watch*, 2021.⁹

Os principais GEE gerados pela agropecuária são os gases metano (CH₄), carbônico (CO₂) e o óxido nitroso (N₂O),^{4,10} provenientes das fezes do gado, dos alagados de arroz, do uso de fertilizantes químicos e da queima e decomposição de biomassa,² sendo absorvidos pela Ecosfera (Figura 3).

Figura 3 – Distribuição de gases liberados na Ecosfera.



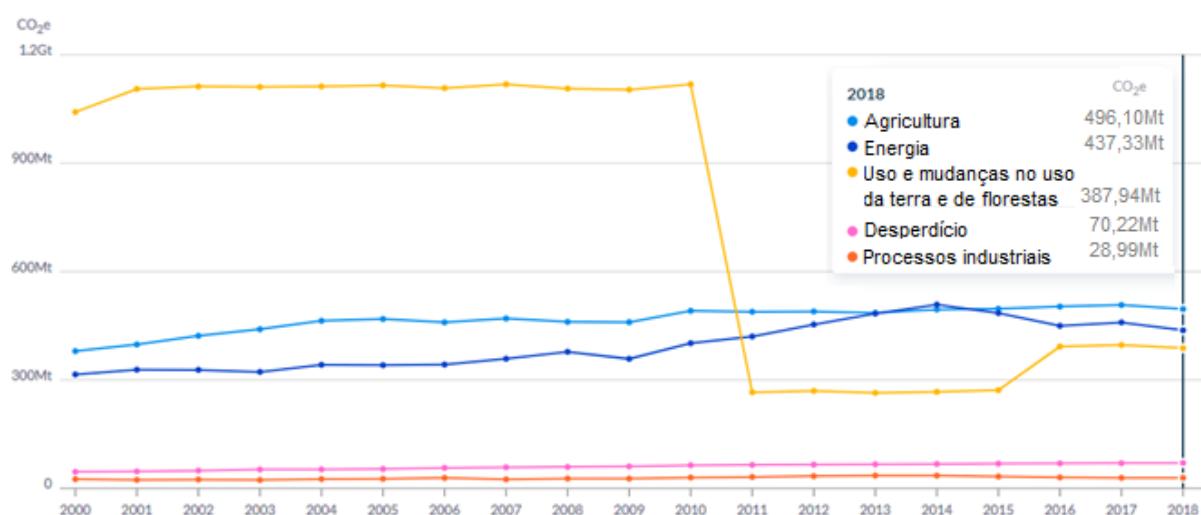
Fonte: FRIEDLINGSTEIN, P. et al. *Global carbon budget*, 2019 apud PIVETTA, 2020.¹⁰

O Brasil ajuda a promover o ciclo da água no planeta, oferece serviços ecológicos necessários para a estabilidade da vida na Terra e auxilia na regulação de gases do efeito estufa (GEE) na Atmosfera.¹¹ No entanto, somente o setor de uso da terra e das florestas nacionais contribuiu com aproximadamente 75% das emissões até 2010 (Figura 4); em 2018 este número caiu para 27,9%, uma redução de 65,36% nas emissões do setor, que por sua vez, contribuiu substancialmente para a redução de GEE desse setor no mundo, dada a influência da maior floresta tropical do planeta.¹⁰

O gráfico de evolução das emissões de GEE por setor no Brasil (Figura 4), mostra uma queda significativa das emissões entre 2010 e 2011.⁹ Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA), o Cerrado é o segundo Bioma brasileiro em emissões de GEE proveniente de desmatamento, depois da Amazônia. O Plano de Prevenção e Controle do Desmatamento no Cerrado foi lançado em 2010, cinco anos após o plano para a Amazônia; também foi instituído o Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélites (PMDBBS).¹² Estas políticas podem ter sido determinantes para a súbita redução nas emissões por “mudanças no uso da terra”.

Comparando os gráficos das Figuras 2 e 4, observa-se que o perfil das emissões de GEE brasileiras difere da mundial, com a agricultura liderando com 35% das emissões gasosas do país e com o setor energético em segundo lugar, surgindo a necessidade de entender o que faz com que a agricultura brasileira esteja em tal posição. No geral, a emissão per capita do Brasil é próxima da mundial; entretanto o setor agrícola apresenta uma lacuna quando comparado à média mundial (Figura 5).⁹ Esta lacuna pode ser uma oportunidade de investimento sustentável para o Brasil, através dos créditos de carbono*.

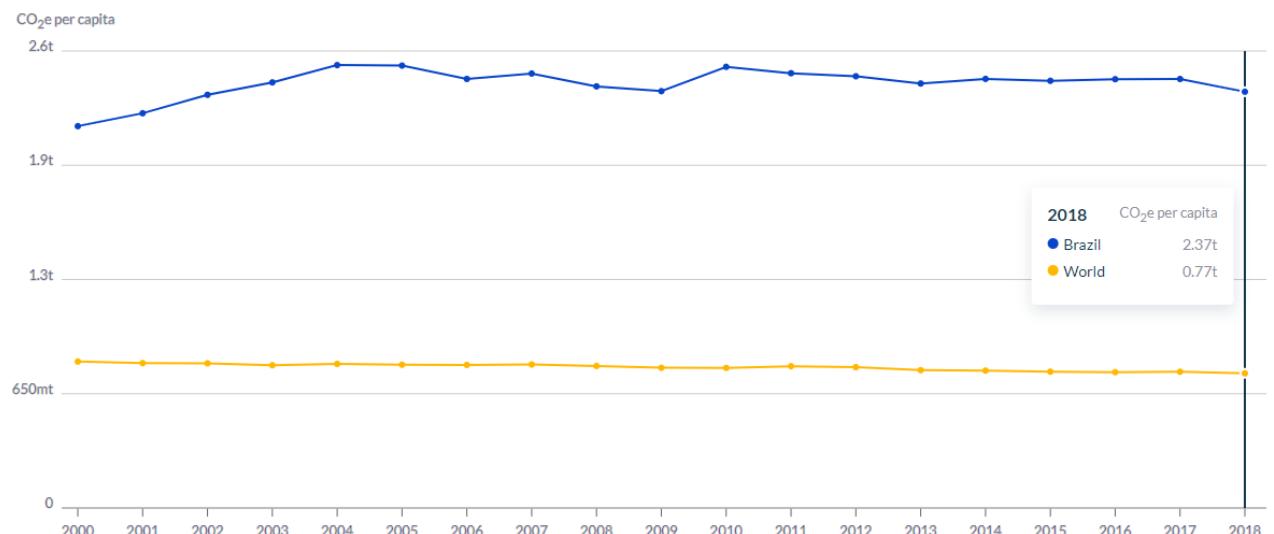
Figura 4 – Evolução das emissões de GEE por setor no Brasil de 2000 a 2018.



Fonte: *Climate Watch*, 2021.⁹

*Créditos de carbono: de acordo com o Artigo 12 do Protocolo de Quioto, cada tonelada de CO₂e que deixar de ser emitida ou for retirada da Atmosfera por um país em desenvolvimento, poderá ser negociada no mercado mundial de créditos de carbono.⁷

Figura 5 – Evolução das emissões de GEE per capita pela agricultura no Brasil e no mundo de 2000 a 2018.



Fonte: *Climate Watch*, 2021.⁹

As preocupações do milênio (alimentar uma população crescente de forma sustentável e mitigar as mudanças climáticas) podem se tornar oportunidades para o Brasil no mercado da sustentabilidade, dado o potencial agroecológico do país. Existe um consenso crescente de que o domínio do atual regime alimentar não é viável e construir um sistema produtivo sustentável é uma tarefa urgente.¹³ Neste contexto, o Brasil comprometeu-se a assumir o papel de fornecer 40% da produção de alimentos para as mais de 9 bilhões de pessoas até 2050.¹⁴ Além disso, o país já havia se comprometido a reduzir, até 2025, 37% dos níveis de emissões de GEE abaixo do nível de 2005 e 43% dos níveis de 2005 até 2030.¹⁵

Este trabalho foi motivado pelo senso de responsabilidade ambiental, apoiando-se sobre o preceito do desenvolvimento sustentável. A Organização das Nações Unidas (ONU) define o desenvolvimento sustentável como “aquele que atende as necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de que as gerações futuras atendam suas próprias necessidades”.¹⁶ Acredita-se que para promoção do desenvolvimento rural sustentável é necessária uma mudança de valores por parte dos agricultores. Uma forma de realizar esta transformação é migrar para sistemas agrícolas de base ecológica que valorizem e incluam os serviços ecológicos nas contas econômicas.

Molina (2020)¹³ explica que há anos a engenharia ecológica enfrenta o desafio de ampliar, em quantidade e escala, os sistemas agroecológicos. Sendo que, há séculos, o arcabouço institucional submete os serviços e recursos naturais ao interesse monetário.^{13,17} Segundo o autor, é necessário “construir um sistema alimentar alternativo e enfrentar a hegemonia das corporações alimentícias”.¹³

Para tanto, a união internacional de Estados dispostos a instaurar a sustentabilidade global e garantir a segurança alimentar, tem sido o principal motor para redesenhar o modelo socioeconômico. A ONU, por exemplo, é a principal organização mundial comprometida a promover tais diálogos, através de inúmeros eventos e acordos internacionais, como a Declaração de Estolcomo (1972),¹⁸ a Convenção sobre a Diversidade Biológica (1992),¹⁹ os Protocolos de Quioto (1997),²⁰ de Cartagena (2000)²¹ e de Nagoya (2014)²² e o Acordo de Paris (2015),²³ assinado na 21ª Conferência das Partes.

Conforme o Acordo de Paris determina, é prioridade manter o aumento da temperatura abaixo de 2 °C com relação aos níveis pré-industriais até 2025, o que significa reduzir para 40Gton a emissão de gases do efeito estufa (GEE), aumentando os esforços para limitar a 1,5 °C o aumento da temperatura até 2100.²³ Uma das empreitadas mais recentes da Organização são os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Também criado em 2015, os 17 ODS compõem a agenda 2030, sendo que, cinco estão diretamente ligadas a proposta deste trabalho (objetivos 2, 12, 13, 14 e 15, Figura 6).²⁴

Figura 6 – Objetivos de desenvolvimento sustentável 2, 12, 13, 14 e 15.



Fonte: Plataforma agenda 2030.²⁴

Entende-se que, para o desenvolvimento sustentável da agricultura, de modo que esta possa ser uma ferramenta chave na restauração do equilíbrio climático e na

conservação de ecossistemas, é necessário realizar a transição agroecológica dos meios de produção e reproduzi-lo em escala industrial. Como estratégia de investigação das oportunidades para uma transição ecológica, o Bioma Cerrado foi adotado como objeto de estudo, principalmente por seu potencial agrícola e sua função no equilíbrio ecossistêmico brasileiro, conforme prioriza a Agenda 21.²⁵

1.1 Objetivo Geral

Propor alternativas às tecnologias agrícolas prejudiciais ao meio ambiente.

1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Identificar e sugerir biotecnologias inseridas na transição agroecológica;
- ✓ Propor métodos, pesquisas e soluções biotecnológicas plausíveis para a transição ecológica em sistemas de sojicultura no Cerrado.

2 METODOLOGIA

Para assimilar o movimento geral da transformação dos sistemas agrários no tempo e no espaço, foi necessária uma abordagem dinâmica capaz de expressar tais mudanças sob a forma de uma “teoria da evolução e diferenciação dos sistemas agrários”.²⁶ Para tanto, foram estudados os aspectos históricos, ecológicos e tecnológicos.

Pode-se pontuar o conjunto de formas locais, variáveis no espaço e no tempo, para descrever um sistema agrário consolidado em determinada região e período, e observar que são tão diversas quanto as próprias observações. Assim, obtém-se a expressão teórica de um tipo de agricultura historicamente constituído e geograficamente localizado.²⁶ Tais considerações permitem analisar as tecnologias agrícolas sob o ponto de vista ecológico. Portanto, para a proposta do trabalho, foi necessário iniciar com uma investigação multidisciplinar, que empregou a seguinte estratégia:

Etapa 1: Foi definido como objeto de estudo a transição agroecológica da sojicultura no Bioma Cerrado, dada sua importância econômica, alimentar e ecológica para o Planeta.

Etapa 2: Foi realizada uma revisão histórica da agricultura para a compreensão das implicações da atividade sobre o equilíbrio ambiental. Estudou-se as tecnologias agrícolas e seus impactos ambientais.

Etapa 3: Realizou-se a caracterização do ambiente, suas condições climáticas e biodiversidade predominante do Bioma Cerrado. Foram estudadas as condições de conservação da flora e fauna, características da cobertura vegetal e suas alterações e características físico-químicas e microbiológicas do latossolo. A literatura consultada se deu na plataforma digital do IBGE.

Etapa 4: Estudaram-se conceitos básicos de sistemas agrários genéricos e da soja *Roundup Ready®* no Cerrado. Foram estudadas as características da cultura, manejos empregados, tecnologias disponíveis, serviços ecológicos associados, agrobiodiversidade requerida, recursos humanos, contexto socioambiental e políticas

envolvidas. A busca por literaturas pertinentes à sojicultura foi realizada nas plataformas digitais da EMBRAPA, em relatórios de sustentabilidade de organizações não governamentais e artigos publicados em revistas científicas.

Etapa 5: Estudaram-se conceitos básicos de ecologia e sustentabilidade com a finalidade de (a) compreender os problemas gerados pelas práticas da agricultura convencional e (b) aplicá-la à transição agroecológica da sojicultura no Cerrado. As literaturas consultadas foram livros de ecologia, agricultura tropical e biotecnologia.

Etapa 6: Estudou-se a relação causa-efeito da subordinação dos aspectos ecológicos à eficiência socioeconômica decorrentes da agricultura convencional. Com base na revisão da literatura, identificaram-se oportunidades e desafios na integração de biotecnologias agrícolas para a transição ecológica no Cerrado.

Etapa 7: Como guia para sustentabilidade no processo de transição agroecológica da produção agrícola convencional, foram empregados os conceitos e metas ratificadas pela ONU no Acordo de Paris e publicadas na Plataforma Agenda 2030.

Etapa 8: De forma geral, a busca por literaturas pertinentes foi realizada nas plataformas digitais do Governo brasileiro e de organizações não governamentais, sobretudo os relatórios da Organização das Nações Unidas (ONU); bases de dados da *Web of Science*, *Scopus* e Google Acadêmico; diretamente nas revistas *Science* e *Nature* e no acervo digital da Universidade de São Paulo (USP).

Etapa 9: O âmago do trabalho gerou uma discussão de duas etapas. A primeira, entorno dos esforços brasileiros para adequação à agenda 2030 e propostas no sentido de intensificá-los. A segunda foi guiada pelo estudo de caso que avaliou sistemas de sojicultura através da metodologia emergética.

Etapa 10: Através da revisão da literatura e da discussão, os resultados apresentados foram dispostos como inferências acerca da aplicação de biotecnologias modernas e milenares na produção agroecológica. Os resultados se apresentam, também, como indicações e sugestões para futuras investigações.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Para fins de contextualização do tema abordado, uma série de definições e conceitos foram estabelecidos. Tratou-se de uma revisão multidisciplinar, cujo potencial biotecnológico se encontra dentro da economia da própria Natureza.

3.1 Bioma Cerrado, características geográficas, solo e flora

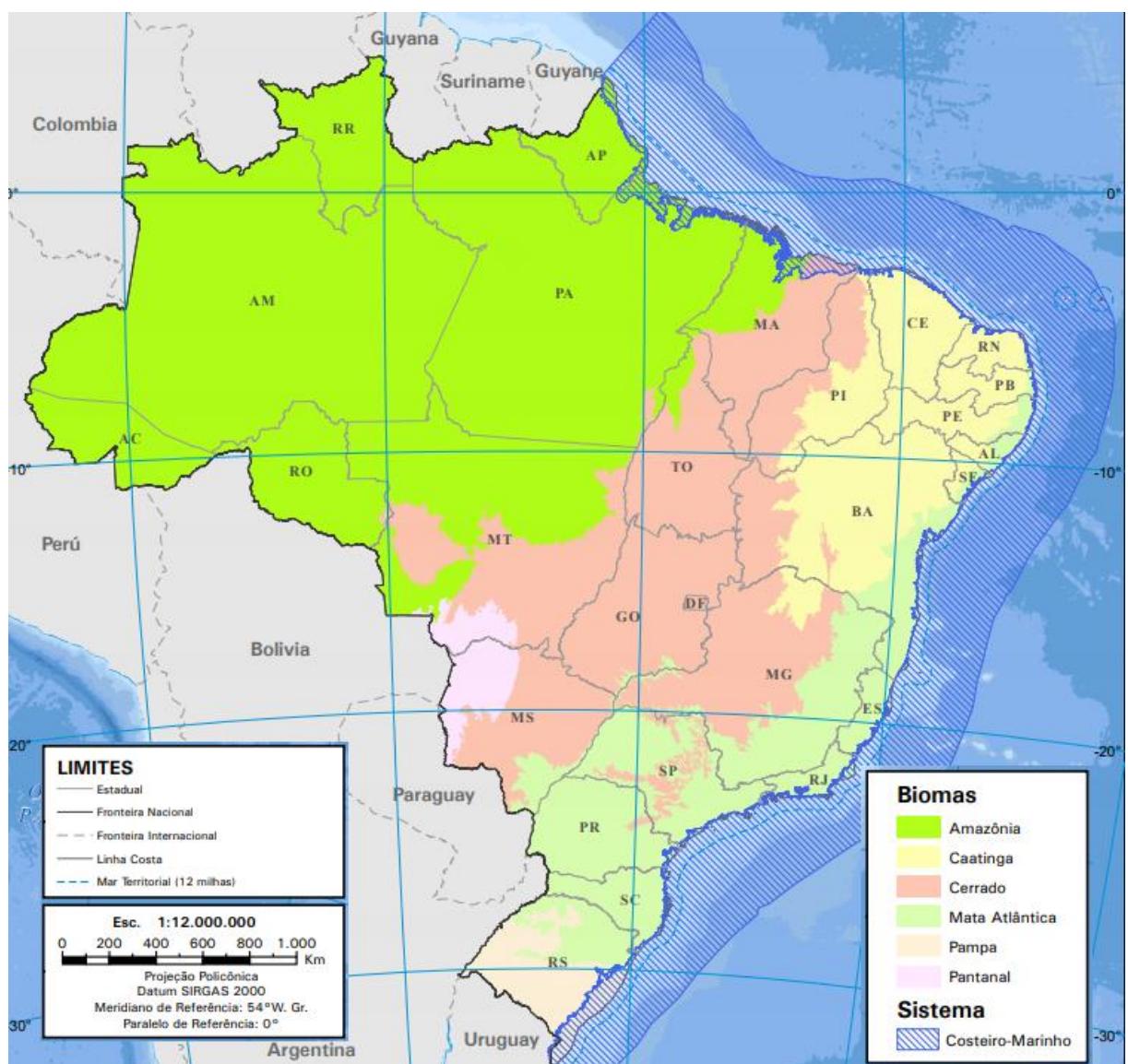
A distribuição territorial se deu pela definição dos biomas brasileiros e pela cobertura e uso da terra, segundo a definição do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).²⁷

Bioma, palavra derivada do grego bio = vida e oma = sufixo que pressupõe generalização (grupo, conjunto), deve ser entendido como a unidade biótica de maior extensão geográfica, compreendendo várias comunidades em diferentes estágios de evolução, porém denominada de acordo com o tipo de vegetação dominante. Assim, na configuração do Mapa de Biomas do Brasil, o conceito leva ao entendimento de que um bioma: a) Constitui um conjunto de tipos de vegetação, identificável em escala regional, com suas flora e fauna associadas; b) É definido pelas condições físicas predominantes, sejam climáticas, litológicas, geomorfológicas, pedológicas, assim como uma história evolutiva compartilhada; e c) É dotado de diversidade biológica singular. (IBGE, 2019, p. 149)²⁷

De forma geral, “os biomas são um primeiro recorte possível da heterogeneidade da agricultura nacional em macroescala”. Os principais biomas do mundo são Tundra, Taiga, Floresta Temperada, Floresta Tropical, Savana, Campo (Pradaria ou Estepe) e Deserto. A Savana brasileira, conhecida como Cerrado, é o segundo maior bioma do país, com mais de 2 milhões de km² (24% do território nacional). Seu clima é predominantemente tropical quente subúmido, com uma estação seca e outra chuvosa. Possui áreas limítrofes com a Caatinga, Amazônia, Mata Atlântica e em menor extensão, com o Pantanal (Figura 7). Vale ressaltar que

há porções savânicas dentro da Amazônia que não pertencem ao Cerrado, são consideradas áreas de transição entre os Biomas.²⁸

Figura 7 – Distribuição geográfica dos Biomas brasileiros.



Fonte: IBGE, 2019.²⁷

A geologia do Bioma Cerrado é a mais complexa e diversificada do país. Seu relevo é distribuído em altitudes diferenciadas, constituindo unidades bem definidas entre planaltos, depressões e planícies, sendo os planaltos de topo plano predominantes no Bioma.²⁷ Os compartimentos de relevo abrigam “muitas plantas endêmicas, em ambientes muito sensíveis a impactos e de difícil regeneração” e não apenas no Cerrado. Infelizmente, estes locais contêm aproximadamente 70% de área

plantada com soja.²⁹ Segundo o censo agropecuário de 2017 realizado pelo IBGE a explicação se encontra nas condições favoráveis ao plantio da *commodity*.

Essa distribuição se deve, principalmente, ao fato de ser uma commodity cujo plantio está associado a condições da alta mecanização, cuja aplicação necessita ser feita em áreas planas ou levemente onduladas. Soma-se a esse fator a predominância de Latossolos nessas áreas, o que também favorece o plantio, por sua profundidade e capacidade de retenção de água e nutrientes. (IBGE, 2017, p.1)³⁰

Os solos do Cerrado em sua maioria, são bem drenados, distróficos, ácidos e com altos teores de alumínio trocável (tóxico às plantas), típico de latossolos. Essa classe de solo é pobre em cálcio, magnésio e potássio, que são frequentemente lixiviados.³¹

Em documento produzido pela EMBRAPA (2009),³² Ana Mazzocato explica que em condições de baixo pH, o Al³⁺ permanece ligado aos minerais de argila e são dissolvidos, ficando disponível para as raízes, sendo que a presença de matéria orgânica no solo minimiza a toxicidade do íon, bem como a correção de pH. A intoxicação por alumínio causa redução das raízes, diminuindo sua produtividade, por isso grande parte das plantas de Cerrado são tolerantes ao Al³⁺.³³

Quanto à composição bacteriana, Maria Silva (2012)³⁴ relatou 18 filos em solo de Cerrado, entre os quais AD3, *Acidobactérias*, *Actinobactérias*, *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Firmicutes*, *Planctomycetes*, *Proteobactéria*, *Verrumicrobia* e WSP-2 foram as mais abundantes, com frequência maior que 1%. As demais, foram *Armatimonadetes*, *Chlamydie*, *Elusimicrobia*, *Gemmatimonadetes*, BRC1, TMG e TM7. As amostras foram recolhidas ao longo de um ano, abrangendo as estações chuvosa e seca e seus períodos de transição. A análise da comunidade bacteriana do solo foi realizada por pirosequenciamento*.

*Pirosequenciamento é um método de sequenciamento de DNA.

A análise da composição e estrutura bacteriana se deu em áreas nativas (Reserva Ecológica do IBGE), áreas com invasão por gramíneas exóticas (*Melinis minutiflora*) e nativas (*Echinolaena*) e em áreas convertidas a pastagem e plantio de arbóreas (Paracatu, Minas Gerais). Os resultados indicaram alterações induzidas pela adição de nutrientes, pela invasão biológica em áreas nativas, pela conversão em pastagem e manejo e pela sazonalidade das chuvas.³⁴

Para comunidades fúngicas, um estudo avaliou a influência da prática de monoculturas de soja e algodão sobre a comunidade em solo do Cerrado no município de Montividiu, Goiás. Foram identificadas 109 espécies de fungos pertencentes a 42 gêneros. Os mais abundantes foram *Trichoderma* ssp. e *Fusarium solani*, que apresentaram uma espécie patogênica a plantas. Os solos de área nativa e os cultivados apresentaram diferentes espécies predominantes; enquanto o solo não cultivado apresentou espécies dos gêneros *Penicillium* e *Absidia*, os solos cultivados apresentaram similaridade de espécies entre si e um número maior de fitopatógenos e antagonistas. A área mais rica em espécies foi a cultivada com algodão. O estudo concluiu que o elevado número de espécies de fungos em solos cultivados, indica que o manejo adotado nos sistemas agrícolas da região contribui de forma positiva para a manutenção da biodiversidade de fungos.³⁵

Considerado o berço das águas, o Cerrado abriga os aquíferos subterrâneos Bambuí, Urucuia e Guarani, sendo que, três das maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Tocantins-Araguaia, São Francisco e Prata) têm origem neste bioma. Um serviço ecossistêmico importante para a regulação da umidade é a presença dos aquíferos, que são abastecidos pelas águas infiltradas no Cerrado, contudo, sua irrigação tem sido prejudicada em função das mudanças na cobertura vegetal desde 1970.¹¹

Em áreas de chapadas, as plantas nativas costumam apresentar raízes profundas e ramificadas o bastante para alcançar os aquíferos nas profundezas dos latossolos.¹¹ 75% do Cerrado é recoberto por formações campestres de Savana, “um estrato arbóreo sem dossel contínuo, acompanhado ou não de um estrado arbustivo, e um herbáceo”,²⁷ sendo que, a Savana Arborizada é a composição vegetal que melhor reflete as condições ambientais predominantes. Ricas em espécies adaptadas

à seca e ao fogo, apresentam estrutura e funcionalidades que minimizam a perda de água por evaporação (xenomórficas).²⁷

O Cerrado é a savana com a maior biodiversidade do mundo. Foi estimado que o Bioma possui 160 mil espécies de seres vivos, dos quais mais de 12 mil são plantas (Figura 8), 90 mil insetos, 1578 espécies de animais terrestres (incluindo anfíbios), 1.000 espécies de peixe e 40mil espécies de fungos. Infelizmente, 266 espécies da fauna e 637 da flora estão ameaçados de extinção, sendo que apenas 8,3% de seu território é legalmente protegido.²⁸

Figura 8 – Número de espécies da fauna e flora do Bioma Cerrado.



Fonte: Agência IGBE de notícias, 2014.²⁹

As principais alterações decorrentes da intensificação da agricultura no Bioma, foram a incorporação de gramíneas africanas do gênero *Brachiaria* nos campos de pastagem e pelo plantio de soja. Diferentemente da cobertura vegetal nativa, as culturas exógenas não possuem raízes profundas capazes de escoar a água das chuvas para repor os aquíferos, fazendo com que o Cerrado fique cada vez mais seco.¹¹

3.2 A expansão da soja e a Revolução Verde

Originária do Leste da Ásia, as primeiras citações do grão aparecem no livro Pen Ts'ao Kong Mu em aproximadamente 2.883 a.C.. O cruzamento entre duas espécies de soja selvagens chamaram a atenção dos chineses, que iniciaram sua domesticação em 600 anos a.C.. Era uma planta sagrada³⁶ utilizada nas produções de tofu, óleos e molhos.³⁷ Segundo os registros, eram plantas rasteiras que cresciam ao longo de rio Yangtse, no Norte da China, cujo processo de expansão para os demais países asiáticos e para a Europa foi lento.^{36,37}

Na Europa do século XVIII, pesquisadores iniciaram estudos com brotos de soja para produção de óleo e nutriente animal. Apenas na segunda década do século XX, após a Primeira Guerra Mundial, as indústrias passaram a ter interesse comercial na soja.³⁷ No Brasil, apesar dos registros de plantios de soja em 1882 na Bahia e em 1908 com os imigrantes japoneses,³⁷ sua expansão no país começa em 1966, na região Sul do país como cultura de verão, em sucessão ao trigo.³⁶

A produção de suínos e ovinos no país, tornou a sojicultura uma necessidade estratégica, dada a demanda por farelo de soja na nutrição animal. Conforme o aumento do interesse mundial no grão, o Brasil passou a investir na “tropicalização” da soja, impulsionada principalmente pela EMBRAPA,³⁷ que, concomitante à Revolução Verde, trouxe prosperidade à cultura.²⁸ Assim, variedades de soja mais adaptadas às condições de clima e solo tropical foram desenvolvidas com a finalidade de tornar a região mais produtiva.²⁸

Grande parte desta prosperidade ocorreu no Bioma Cerrado, que até meados de 1960 tinha a economia baseada na agropecuária de subsistência, suportada pelas pastagens nativas, desde a Era colonial. Naquela época, havia um paradigma que foi desmantelado com a Revolução Verde. Os solos ácidos, profundos e de baixa fertilidade, foram considerados por muito tempo, improdutivos, “somente árvores e arbustos tortuosos poderiam sobreviver nesse tipo de solo com baixa aptidão agrícola”. Ao superar essas dificuldades, o Cerrado se tornou o principal produtor de

grãos do país, destacando a soja, o milho, o algodão e o café; além dos grãos, é um grande produtor de carne bovina e cana-de-açúcar.²⁸

De 1977 a 2000, foram conduzidos vários experimentos de campo, a pesquisa constatou que foi possível produzir 3 toneladas/hectare (ton/ha) de soja e 6 ton/ha de milho. Foram estabelecidos quantidades e procedimentos para aplicação de fertilizantes e calcário em proporção suficiente para atender as necessidades das culturas da forma mais eficiente possível. Edson Sano (2019), cita 5 ton/ha de calcário na superfície do solo para correção de pH.²⁸ Quanto as necessidades nutricionais da soja, o elemento mais exigido pela soja é o nitrogênio, cuja absorção direta do solo é de 25% a 35% e em maior proporção pela fixação biológica (65% a 85%). Em seguida estão o potássio, o enxofre e o fósforo.³⁸

A Figura 9 traz a ilustração do pesquisador aposentado da EMBRAPA, Doutor Plínio de Souza, onde observa-se a evolução do plantio de soja no Brasil.²⁸

Figura 9 – Evolução da distribuição aproximada do plantio de soja no Brasil nos anos de 1960, 1975 e 2002.



Fonte: Dr. Plínio Itamar de Souza (*apud* Edson Sano, 2019). Dados não publicados.²⁸

Segundo o *Report 2014* da organização WWF, “a área total dedicada à soja ocupa mais de 1 milhão de km², isso equivale à área total da França, Alemanha, Bélgica e Holanda juntas”.³⁹ A Tabela 1 apresenta os dados colhidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e corrobora com a ilustração do Dr. Plínio de Souza, apresentado anteriormente.

Tabela 1 – Dados do estudo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

| Safra | Cultura | Área plantada (mi ha) | Aumento (%) |
|-----------------------|----------------------|--------------------------|-------------|
| 2000/2001 a 2013/2014 | Soja, milho, algodão | 9,33 para 17,4 | 87% |
| 2000/2001 a 2013/2014 | Soja | 7,5 para 15,7 | 108% |
| 2013/2014 | Soja | 16 | NA* |

*Não se aplica.

Fonte: Agrosatélite, 2015 (*apud* Edson Sano, 2019). Adaptado.²⁸

O sucesso da soja no Brasil, inserido no contexto da Revolução Verde, provocou a expansão insustentável da sojicultura brasileira. A difusão de gêneros alimentícios de clima temperado para o ambiente tropical e subtropical; junto aos insumos sintéticos; a substituição da mão de obra por máquinas de alto custo energético (cuja fonte não é renovável); o maior controle de irrigação e drenagem; o controle de pragas através de agrotóxicos e o desenvolvimento da biotecnologia moderna, principalmente o melhoramento genético de plantas, caracterizaram a Revolução Verde.^{26,40,41,42,43}

O novo modelo agrícola passou a apresentar seus inconvenientes em apenas 20 anos de cultivo.⁴¹ Paulo Lopes e Keila Lopes (2011),⁴⁴ resumem a agricultura convencional da época à artificialização e simplificação dos agroecossistemas.

O novo sistema de cultivo adotado, conjugando apenas a melhoria da fertilidade química do solo, o terraceamento e a semeadura em contorno como práticas conservacionistas, desencadeou, num primeiro momento, a sensação de um agronegócio promotor de desenvolvimento regional e, num segundo momento, transformou-se na principal causa de degradação dos solos. (MAPA; EMBRAPA, 2008, p. 1253)⁴⁵

Entre as consequências observadas em função das práticas características da Revolução Verde estão a compactação, erosão e salinização do solo; intoxicação crônica e aguda dos trabalhadores rurais; contaminação dos solos e das águas por fertilizantes químicos e agrotóxicos; emissão de gases do efeito estufa (GEE) por fertilizantes nitrogenados; aparecimento de pragas resistentes aos agrotóxicos; susceptibilidade e surgimento de novas pragas e aumento da dependência em relação aos países mais ricos que detinham as tecnologias indispensáveis ao cultivo.^{4,26,40,41,44}

Essas implicações comprometeram as relações ecológicas em diversos ecossistemas, fragilizando sua estabilidade, resiliência e adaptabilidade.⁴⁴

Bird (1988, *apud* Alan Matos, 2010)⁴⁰ identificou as seguintes práticas insustentáveis do modelo convencional proporcionado pela Revolução Verde:

- a) utilização de soluções paliativas para problemas estruturais;
- b) utilização de soluções universais para problemas específicos locais;
- c) utilização de insumos externos e máquinas de alto custo energético;
- d) subordinação dos aspectos ecológicos à eficiência econômica.

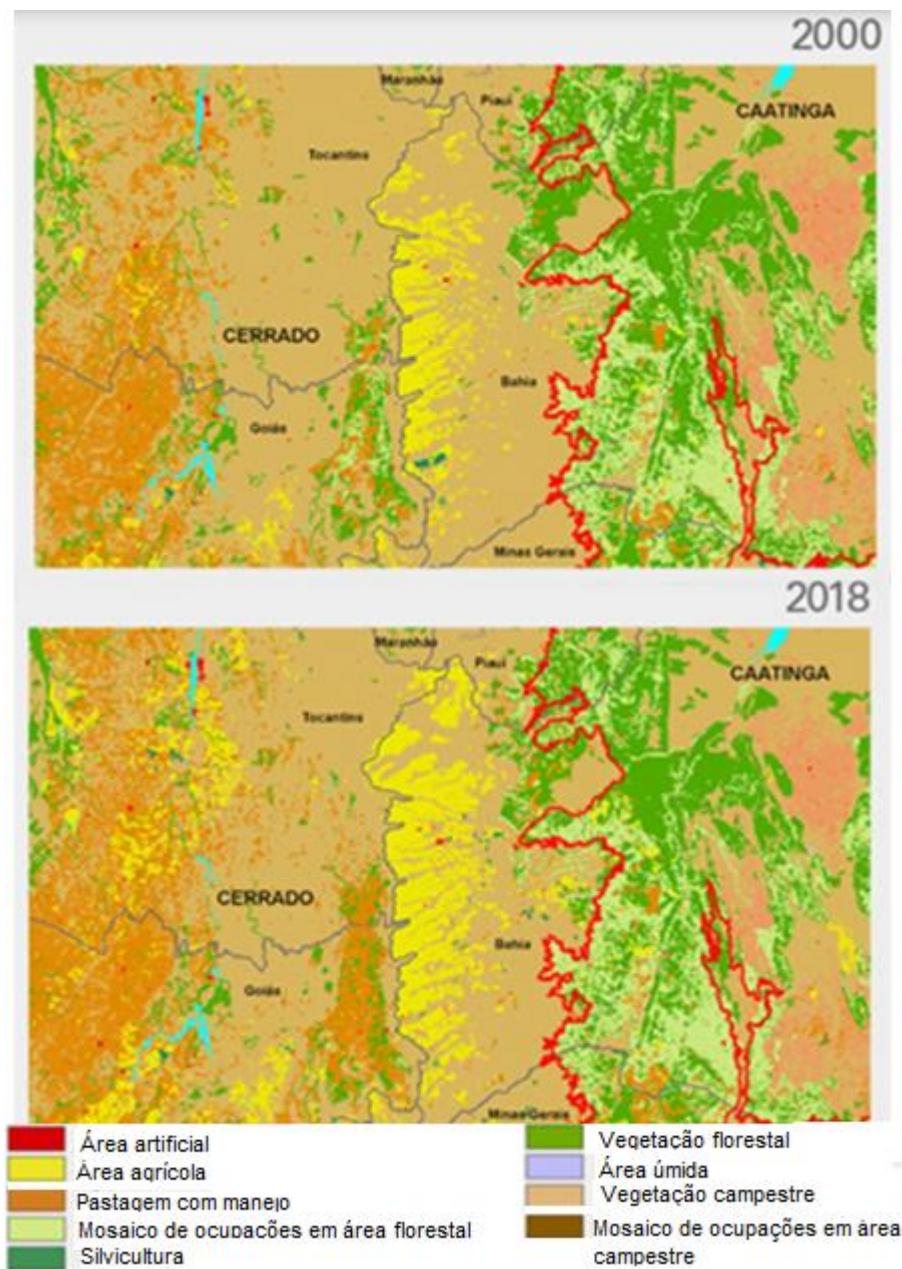
Atualmente, o interesse comercial na soja provém, sobretudo, da produção de rações animais, também é empregada nas produções alimentícias, no setor de cosméticos e biocombustível. Seus principais produtos são o farelo de soja, a lectina e óleo vegetal. A contínua expansão da soja no país foi impulsionada principalmente pelo aumento em 294% na produção de suínos, 353% na produção de ovos e 711% na produção de frango entre 1967 a 2007. De 2000 a 2009, a China duplicou o consumo da soja; segundo a projeção da FAO, espera-se um aumento de 515 milhões de toneladas do grão até 2050.⁴⁶

Segundo Edson Sano (2019)²⁸, apesar do Cerrado ser o Bioma mais desmatado (em termos de área absoluta) é também o único lugar do mundo capaz de produzir a quantidade de alimentos e energia que produz, preservando aproximadamente 50% do ecossistema. Esta resiliência torna a região um importante polo agrário, capaz de fornecer grande parte dos alimentos requeridos para 2050.

A região do MATOPIBA (Figura 10), porção do Cerrado composta por áreas dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, é onde está a maior parte da vegetação intacta, no entanto é a nova principal fronteira agrícola do Brasil.¹¹ Metade dos correntões* para desmatamento estão no MATOPIBA,²⁸ o que torna urgente a necessidade de intervenções políticas de cunho ambiental, de modo a promover o avanço sustentável da nova fronteira.

*Os correntões são ligados às grandes máquinas de tração que atravessam a floresta derrubando as árvores à frente.¹¹

Figura 10 – Contas econômicas: uso da terra nos Biomas brasileiros Região MATOPIBA 2000 e 2018.

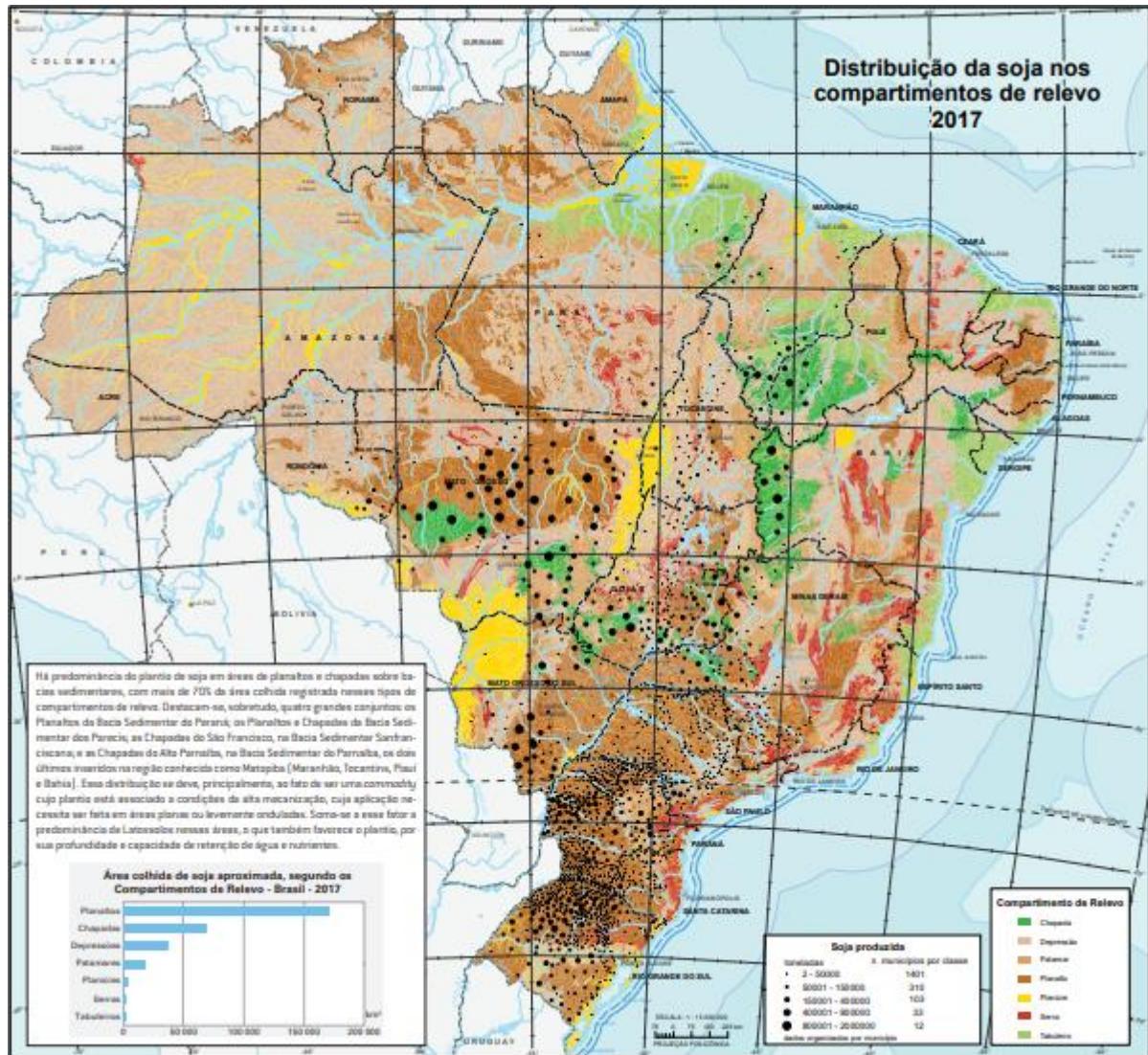


Fonte: IBGE, 2018.⁴⁷

No MATOPIBA a área de vegetação florestal e, em maior grau, a área campeste, foram substituídas, sobretudo, por áreas agrícolas e de pastagem.⁴⁷ Só no Oeste do estado da Bahia, estima-se que entre 1993 e 2002 o plantio de soja tenha aumentado de 380.000 ha para mais de 1 milhão de ha.⁴⁶ No leste baiano, de 2000 a 2018, duas áreas de silvicultura dão espaço à agricultura, no entanto, observa-se

pequenas áreas de silvicultura no Centro-Oeste do estado e no Norte de Minas Gerais.⁴⁷ O registro mais atual da distribuição da soja no país foi realizado em 2017 pelo IBGE (Figura 11), de acordo com o Instituto, 70% da soja encontra-se em áreas de planaltos e chapadas,³⁰ compartimentos de relevo que abrigam grande parte da flora nativa e endêmica do Cerrado e da Mata Atlântica.²⁹

Figura 11 – Distribuição da soja nos compartimentos de relevo, 2017.

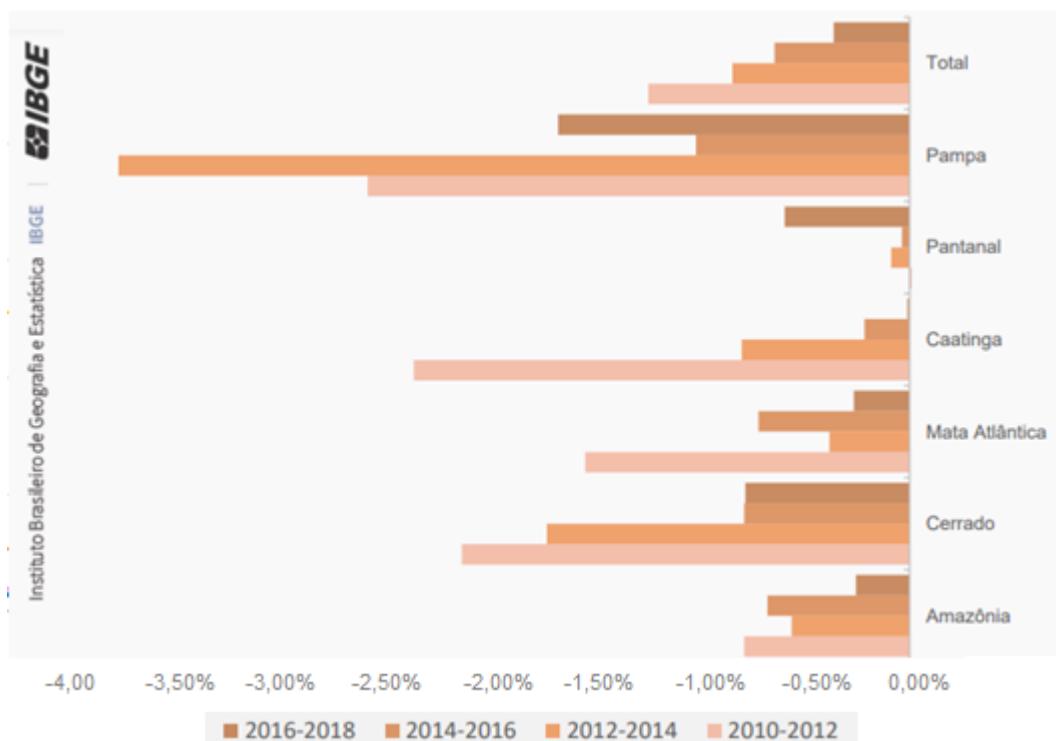


Fontes: IBGE, 2017.³⁰

A contribuição total da agricultura no uso das terras do Cerrado passou de 17 mil km² em 2000 para 66 mil km² em 2018. Apesar da expansão das fronteiras

agrícolas no Cerrado, o saldo de mudanças de áreas naturais (Figura 12) fornecido pelo IBGE, aponta significativa redução deste indicador.⁴⁸ Contudo, é o segundo bioma com o maior número de espécies “criticamente em perigo” (Figura 13).²⁹

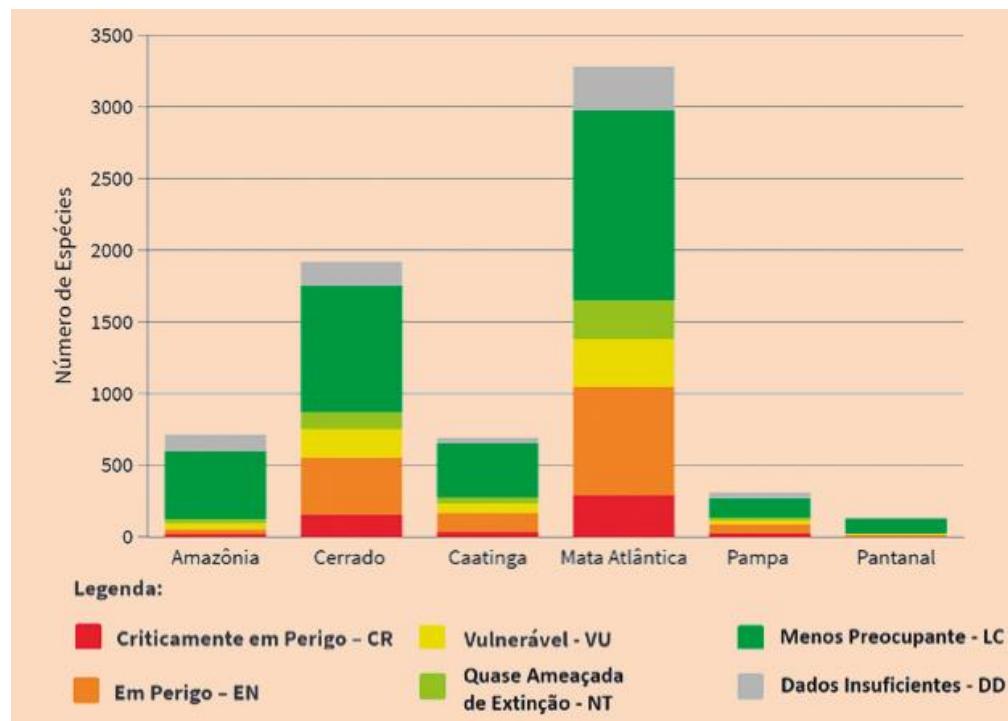
Figura 12 – Saldo de mudanças de áreas naturais nos Biomas brasileiros, entre 2010 e 2018.



Fonte: IBGE, 2020.⁴⁸

De acordo com Caio Belandi, editor da Agência IBGE Notícias, os dados das Contas de Ecossistemas “o Uso da Terra nos Biomas Brasileiros (2000-2018)”, divulgados em setembro de 2020 (Figuras 8 e 9), apontam uma perda da cobertura natural de 269,8 mil km² para a Amazônia e 152,7 mil km² para o Cerrado. Todos os biomas tiveram saldo negativo, as coberturas florestais e campestres, por exemplo, foram substituídas principalmente por áreas de pastagem com manejo, de 248,8 mil km² em 2000 para 426,6 mil km² em 2018.⁴⁸

Figura 13 – Estado da flora terrestre em 2014.

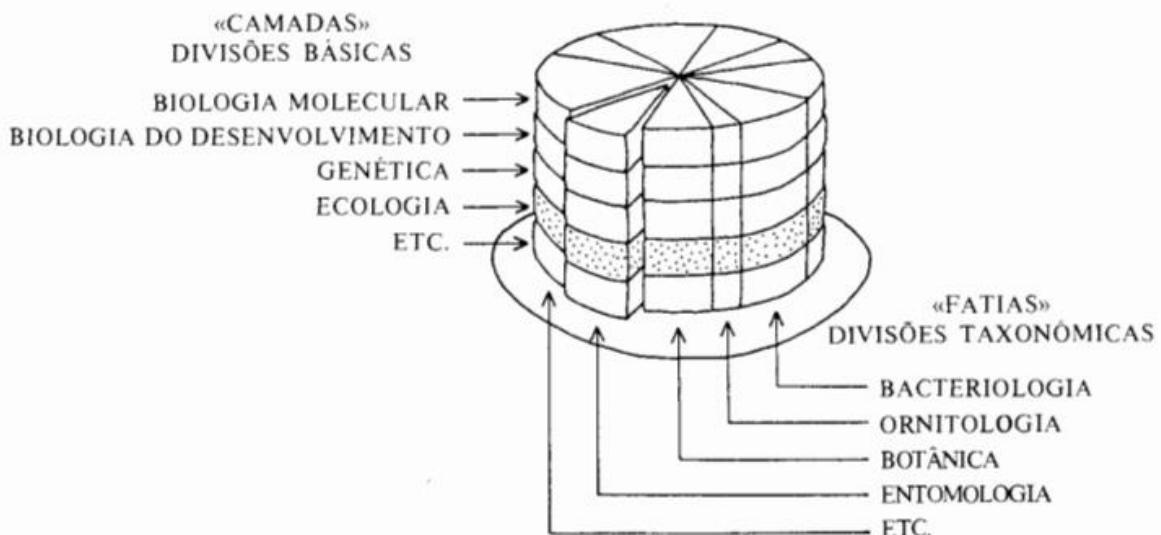


Fonte: IBGE, 2014.²⁹

3.3 Biotecnologia aplicada à agricultura

Para Ralph W. F. Hardy (1985 p.99, *apud* José S. Silva, 1990, p.5),⁴⁹ “biotecnologia é a tecnologia que torna possível o uso de sistemas biológicos como um produto, como um processo ou como um serviço”. Esta definição serve de subsídio para compreender a engenharia de sistemas biológicos e sua amplitude. A respeito da biologia, Eugene P. Odum (2001)⁵⁰ considera as seguintes divisões (Figura 14):

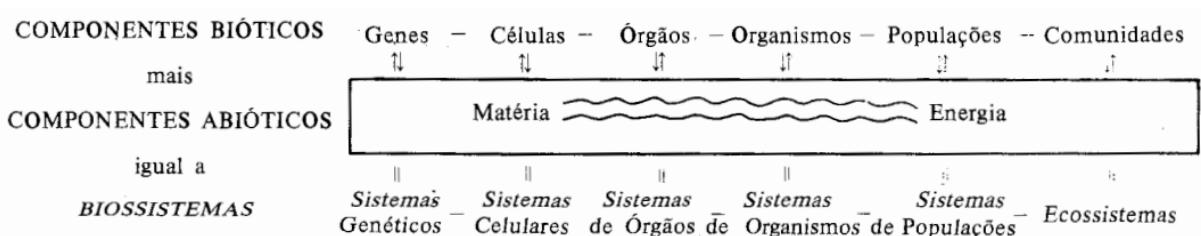
Figura 14 – O “bolo em camadas” da biologia, ilustrando as divisões básicas (horizontais) e taxonômicas (verticais).



Fonte: Odum, 2001.⁵⁰

De acordo com a figura, as divisões da biologia são tão diversas quanto suas divisões taxonômicas. Alguns exemplos de sistemas biológicos são dados por Odum (2001)⁵⁰ (Figura 15).

Figura 15 – Espectro dos níveis de organização de sistemas biológicos.



Fonte: Odum, 2001.⁵⁰

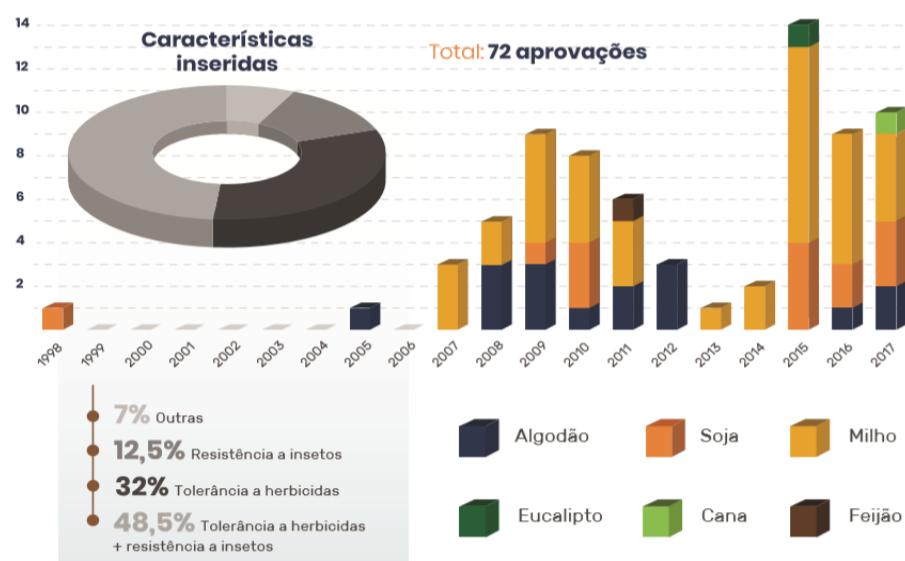
As biotecnologias em ascensão fornecem ferramentas para o desenvolvimento da agricultura em sua totalidade. Em relação aos sistemas genéticos, uma empreitada mais sustentável no emprego de herbicidas e pesticidas deu início à primeira geração de plantas geneticamente modificadas (PMGs), através do aumento da tolerância ou

resistência a herbicidas, a doenças e pragas, como a soja e o milho *Roundup Ready*[®] (RR[®]) e o milho e o algodão Bt.^{41,51}

No Brasil, o cenário das tramitações do plantio de transgênicos foi polêmico e caótico. Por um lado, grandes empresas de biotecnologia demonstravam interesse em estabelecer políticas com o país; por outro, inúmeras instituições representantes da sociedade civil e do meio ambiente opunham-se ao plantio de culturas transgênicas no país. Tanto que, ainda em 1998, o Instituto de Defesa do Consumidor (IDEC), o Greenpeace e a Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), conseguiram uma liminar contra o pedido de cultivo comercial da soja *Roundup Ready*[®] da Monsanto.^{51,52} Porém, em 2005, com a aprovação da nova Lei de Biossegurança, houve a estabilização da situação legal dos organismos geneticamente modificados (OGMs) no país (Figura 16).^{51,53}

Nesta perspectiva, a EMBRAPA identificou a carência de resultados no tocante à avaliação de riscos ambientais e segurança alimentar destes organismos. Desta forma, assumiu para si o trabalho de dispor sobre protocolos de avaliação de riscos, cuidadosamente elaborados e, oferecer padrões de estudos altamente confiáveis através do projeto Rede de Biossegurança: Organismos Geneticamente Modificados – BioSeg.⁵⁴

Figura 16 – Aprovações de plantas transgênicas no Brasil



Fonte: Agroconsult, 2018.⁵³

Desde então, a liberação de PGMs e sua área de plantio só aumentou. O sucesso da tecnologia foi mundial. Em 2017 foram plantados 189,8 milhões de ha com transgênicos, com domínio de quase 50% por soja (ANEXO A).⁵³ De toda soja plantada em 1998 no Brasil, 6,1% foram transgênicas, enquanto em 2017 foram 92,3%. Este fato resultou no crescimento de 300% na produção de soja, enquanto a área plantada cresceu apenas 170%;⁵³ sendo que, a safra de 2019/2020 teve 84,2% de toda área destinada à agricultura (7,6% do território brasileiro)⁵⁵ ao cultivo de PGMs.^{56,57} É importante ter em mente que apesar da soja RR® ter potencial prejudicial ao meio ambiente, os benefícios financeiros permitiram a ascensão econômica do país, bem como o importante papel na segurança alimentar mundial.

A soja RR® desenvolvida pela Companhia Monsanto em 1980 e comercializada em 1996; possui material genético que permite seu crescimento sob a ação herbicida do glifosato⁵⁸ que, por sua vez, apresenta ação sistêmica de amplo espectro, sendo considerado seletivo somente para culturas RR®, como as de soja e milho.⁵¹ A proposta do cultivo da soja RR® foi a redução no volume de glifosato aplicado nas lavouras da cultura.^{51,58}

Outro transgênico largamente adotado no Brasil foi o milho-Bt, amplamente resistente a pragas. Esta tecnologia emprega o gene da bactéria *Bacillus thuringiensis*, capaz de produzir uma toxina que se instala no intestino dos lepidópteros (ordem de insetos que inclui borboletas e mariposas) e coleópteros (inclui besouros e joaninhas).⁵⁹ O algodão Bt foi, também, uma das primeiras culturas transgênicas a serem criadas. Isso se deu pelo algodão convencional ser uma planta extremamente suscetível às pragas, de modo que, 25% de todos os inseticidas agrícolas do mundo são consumidos na produção de algodão. Assim como a soja RR®, a razão para adoção do algodão Bt foi a promessa de um aumento de produtividade e redução do uso de agrotóxicos, sendo a principal alternativa dos países em desenvolvimento como opção mais sustentável.⁶⁰

Conforme a regulação desta tecnologia em diferentes etapas da cadeia produtiva, novos eventos foram aprovados no Brasil, entre 2005 e 2012, foram aprovadas cerca de 40 PGMs. Das culturas liberadas pela CTNBio para uso comercial, quase todas são resistentes a herbicidas, insetos e vírus; dos quase 100 eventos

transgênicos aprovados de 1998 a 2019, 17 foram de soja, 52 de milho, 22 de algodão, cinco de cana-de-açúcar, um de feijão e um de eucalipto.⁶¹

Mais recentemente (2019-2021), a EMBRAPA Rondônia, motivada pela previsão do IPCC para “diminuição das chuvas nas regiões Centro-Oeste, Nordeste e Norte do Brasil, com aumento nos períodos de seca e na temperatura do ar nos biomas da Amazônia, Cerrado e Caatinga”, criou cafeeiros voltados para mitigação dos impactos causados pelas mudanças climáticas.⁶²

Quanto a outras biotecnologias inseridas no contexto da transição agroecológica, os bioinsumos estão em maior desenvolvimento no país. São divididos em: produção de biofertilizantes; biopraguicidas; bioinseticidas; bioenergia; bioestimulantes; fitormônios; reguladores de crescimento vegetal; inoculantes (vírus, bactérias e fungos) e macrorganismos como polinizadores, parasitóides e ácaros predados.⁶³

“O bioinsumo que mais impacta economicamente a agricultura brasileira é o inoculante à base de bactérias fixadoras de nitrogênio do gênero *Bradyrhizobium* na soja.” Mais recentemente, inoculantes à base de *Azospirillum* (uma bactéria promotora de crescimento vegetal), foi incorporada à inoculação simultânea com o *Bradyrhizobium* em cultura de soja, em um processo chamado coinoculação, que resulta em mais produtividade. O *Azospirillum* também pode ser coinoculado com *Rhizobium* no feijoeiro ou sozinho em gramíneas como milho, trigo, arroz e pastagens. Por fim, o custo-benefício do inoculante que substitui o fertilizante nitrogenado mineral torna o uso deste agrotóxico inviável, pois, os resultados na economia anual são de bilhões de dólares para o Brasil.⁶⁴

O desenvolvimento da indústria de bioinsumos (as biofábricas), juntamente com a pesquisa pública-privada, proporcionou a geração de novas formulações que deram ao produtor maior garantia de eficiência e segurança em seu uso.⁶⁴ De acordo com Amélio Dall’Agnol e Marco Antonio Nogueira, pesquisados da EMBRAPA Soja:

O setor de bioinsumos movimenta perto de R\$ 1.0 bilhão por ano no Brasil e cresce a uma taxa anual superior a 10%. Entre 2015 e 2019, 40 novas empresas produtoras de bioinsumos ingressaram no setor no país, que,

juntamente com as que já estavam operando antes de 2015, no final de 2019 totalizavam 80 biofábricas, indicando que mais da metade delas existem há menos de 5 anos. O registro de novos produtos biológicos, por sua vez, cresceu de apenas 3, em 2011 para 106, em 2018. (DALL'AGNOL, NOGUEIRA, 2020, p. da web).⁶⁴

Apesar da indústria de bioinsumos estar em crescimento, uma forte tendência em agroecossistemas é a produção *on farm*, ou seja, a produção de bioinsumos dentro da propriedade rural. Sobretudo para auto abastecimento, tornando a produção mais diversificada (portando mais complexa) e reduzindo os custos com *input* externos.⁶³ Um exemplo simples é o tratamento de dejetos animais, que além de contribuir para a redução das emissões de metano, produz biofertilizante ou biogás,⁶⁵ reduzindo os custos de produção.

Neste sentido, o espectro mais à direita dos biossistemas (Figura)⁵⁰ é contemplado. Utilizando-se dos conceitos de ecossistemas para produções agrícolas, a biotecnologia envolvida tornou-se mais complexa.

3.4 Agroecologia

Os movimentos de agricultura alternativa (1920) que ajudaram a construir os conceitos de agroecologia e sustentabilidade, estavam inseridos em um contexto de pré-Revolução Verde e modernização agrícola. As consequências provenientes dos modelos de produção da época, fez eclodir um movimento sociopolítico, que posteriormente viria a ser definido como movimento agroecológico. É interessante explanar que nos primeiros anos da contracultura*, os estudiosos dessa vertente foram alvos de fortes críticas e rechaças. Foram tidos pelos agrônomos como inimigos do progresso rural.³⁹ Apesar da repressão pelos agrônomos, a importância e impacto do movimento foi tanto, que um campo de estudo foi criado para estabelecer princípios e práticas agroecológicas.^{39,66,67,68}

*Contracultura: mentalidade dos que rejeitam e questionam valores e práticas da cultura dominante da qual fazem parte.

Assim, para compreensão da agroecologia, adotou-se a seguinte definição de ecologia fornecida por Eugene P. Odum (2001):⁵⁰

Estudo das relações dos organismos ou grupos de organismos com o seu ambiente, ou a ciência das interrelações que ligam os organismos vivos ao seu ambiente. Uma vez que a ecologia se ocupa especialmente da biologia de grupos de organismos e de processos funcionais na terra, no mar e na água doce, está mais de harmonia com a moderna acepção definir a ecologia como o estudo da estrutura e do funcionamento da natureza, considerando que a humanidade é uma parte dela. (ODUM, 2001, p.4)⁵⁰

Para Reiniger, Wizniewsky e Kaufmann (2017, p. 33),⁶⁹ Stephen R. Gliessman é um clássico da Agroecologia, uma de suas obras mais relevantes para a compreensão dos agroecossistemas é “Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável”, a obra apresenta um profundo estudo dos princípios da sustentabilidade na agricultura. “O autor, ecólogo de formação, fundamenta seus estudos na aproximação da agronomia à ecologia, levantando a bandeira da ecologização das práticas agrícolas.”

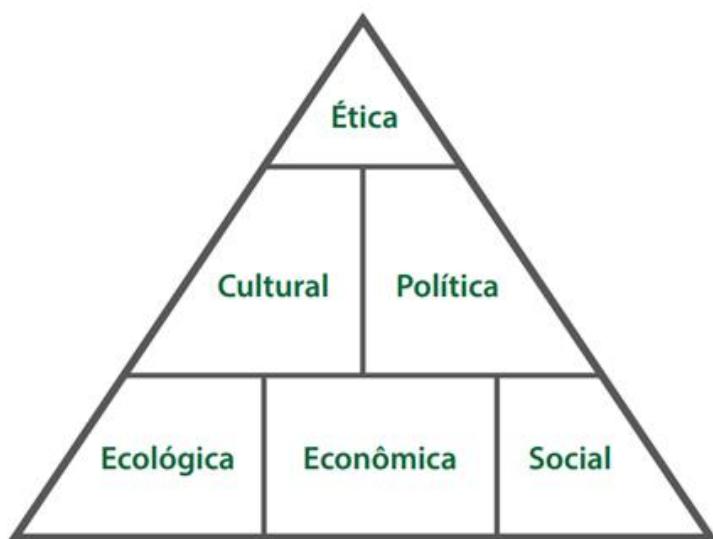
O Marco Referencial em Agroecologia publicado em 2006 pela EMBRAPA,⁷⁰ apresenta uma reflexão sobre o conceito e definição de agroecologia, referenciado os autores Miguel Alteri, Stephen Gliessman. Segundo a EMBRAPA:

Pela definição etimológica (agro + ecologia), a Agroecologia seria a “ecologia dos sistemas agrícolas”, ou seja, o meio natural inerente a qualquer forma de produção agrícola. A esta definição etimológica contrapomos outra, de caráter humano: a Agroecologia como área de conhecimento social e culturalmente construída. Nesse sentido, o (re)nascimento da Agroecologia vem como resposta a situações objetivas e interesses convergentes hoje na sociedade. O termo Agroecologia foi assim cunhado para demarcar um novo foco de necessidades humanas, qual seja, o de orientar a agricultura à sustentabilidade. (EMBRAPA, 2006, p.1)⁷⁰

Numa perspectiva ampla, os princípios da agroecologia estão divididos em seis dimensões (Figura 17). Todas as dimensões são igualmente importantes e interdependentes. A base da pirâmide, composta das dimensões ecológica, econômica e social, é responsável pela busca constante pela sustentabilidade na agricultura; a cultura e a política são alicerces fundamentais que permitem o avanço

e sustentação da agroecologia; por fim, a dimensão ética é o compromisso com todos os princípios e orienta as demais dimensões, influenciando-as diretamente.⁷¹

Figura 17 – Pirâmide multidimensional da sustentabilidade aplicada à agroecologia.



Fonte: Caporal e Costabeber, 2004,⁷¹ adaptado por Reiniger, Wizniewsky e Kaufmann, 2017.⁶⁹

Como não se pode definir a Dimensão Ecológica sem considerar as demais Dimensões, “não importa quais sejam as estratégias para a intervenção técnica e o planejamento do uso dos recursos naturais”, desde que a abordagem seja holística e tenha enfoque sistêmico, “dando tratamento integral a todos os elementos do agroecossistema que venham a ser impactados pela ação humana.”⁷¹

Para o estudo, trabalhou-se com a dimensão ecológica isoladamente apenas para seu desenvolvimento no plano teórico, pois na prática, não se pode analisar cada ação sob uma única dimensão e esperar que o resultado seja de fato sustentável.⁶⁹ Assim, para uma abordagem mais eficiente da contribuição biológica e biotecnológica nos processos de regulação da Ecosfera e da manutenção de agroecossistemas, os serviços ecológicos estão divididos em:⁷²

- a) serviços de abastecimento: alimentos, fibra e água potável.
- b) serviços de manutenção e regulação: controle de pragas, polinização e depuração da água.
- c) serviço de suporte: reciclo de nutrientes, solo e fotossíntese.

d) serviços culturais: recreação, turismo e estética.

Só é possível substituir as práticas de manejo convencionais por práticas agroecológicas, dominando os conceitos de ecossistema, agroecossistema, suas propriedades e processos. Assim, Eugene Odum⁵⁰ define o ecossistema:

Os organismos vivos e o seu ambiente inerte (abiótico) estão inseparavelmente ligados e interagem entre si. Qualquer unidade que inclua a totalidade dos organismos (isto é, a <<comunidade>>) de uma área determinada interagindo com o ambiente físico por forma a que uma corrente de energia conduza a uma estrutura trófica, a uma diversidade biótica e a ciclos de materiais (isto é, troca de materiais entre as partes vivas e não vivas) claramente definidos dentro do sistema é um sistema ecológico ou ecossistema. (ODUM, 2001, p.11)⁵⁰

No que diz respeito à produção agroecológica, empregou-se o conceito oferecido por Gliessman (2002),⁷³ que trata o agroecossistema como um local de produção agrícola. O conceito de agroecossistema oferece uma referência para analisar sistemas de produção de alimentos em sua totalidade, incluindo o complexo conjunto de entradas e saídas e as interações entre suas partes.

Em suas considerações, Gliessman (2002),⁷³ aborda o equilíbrio dinâmico e estável de ecossistemas inseridos no espaço e no tempo, trazendo a perspectiva de que as fronteiras do sistema ecológico podem ser arbitrariamente definidas, o que permitiu a engenharia destes sistemas pelos seres humanos.⁷⁴

Segundo a EMBRAPA (2006),⁷⁰ “para que a agroecologia cumpra seu papel, é necessário que produza mudanças na sociedade, colocando os alicerces para uma gradual transformação das bases produtivas e sociais da agricultura.” Desta forma, a transição agroecológica passou a ser um conceito associado à agroecologia, com funções dentro e fora do sistema de produção. Sendo que, “não há necessidade de filiar-se a uma ou outra escola de agricultura de base ecológica”, o importante é a “opção ética por um meio ambiente equilibrado e por uma sociedade sem pobreza.”⁷⁰

Para a transição agroecológica, deve-se medir o grau de sustentabilidade da produção no estado atual para então criar metas mensuráveis para a transição. A criação e monitoramento dos indicadores de sustentabilidade das diferentes dimensões só é possível considerando as leis do sistema natural, pois “é impossível

avaliar com os critérios de um subsistema econômico, o sistema que o contém (“sistema natural”), sendo necessário fazer uso de uma unidade de medida do sistema de maior dimensão para medir as contribuições dos subsistemas.⁷⁵ Assim, apresenta-se a metodologia emergética para a padronização métrica dos sistemas.

A metodologia emergética para avaliar o desempenho termodinâmico das atividades humanas, foi desenvolvida por Howard T. Odum (1988),⁷⁶ correspondendo a uma visão sistêmica da relação Natureza-economia e permite determinar “o grau” de uso de recursos renováveis nas atividades produtivas.⁷⁵ Segundo Howard T. Odum e Elisabeth C. Odum (2000, *apud* Miguel Bacic, *et al.*, 2020)⁷⁵

A metodologia emergética mede todas as contribuições (fluxo de massa, energia, monetária e informação) em termos equivalentes (emergia solar) e depois, agrupa os fluxos conforme suas fontes (R: renovável, N: não-renovável, M: material, S: serviços) e calcula os índices de emergia para analisar o desempenho de sistemas; que podem ser ambientes preservados, unidades rurais, pessoas, setores da economia, países e a Biosfera. Além da capacidade de analisar um sistema em estado estacionário, a metodologia emergética permite visualizar a variação de um sistema em longos períodos, usando a técnica de modelagem e simulação. (BACIC, *et al.*, 2020, p. 11)⁷⁵

A metodologia empregada na análise comparativa, é embasada na Teoria Geral dos Sistemas, na Ecologia e na Termodinâmica; os princípios de funcionamento seguem as características de sistemas abertos e foram propostos por Odum (2001, *apud* Miguel Bacic, *et al.*, 2020):⁷⁵

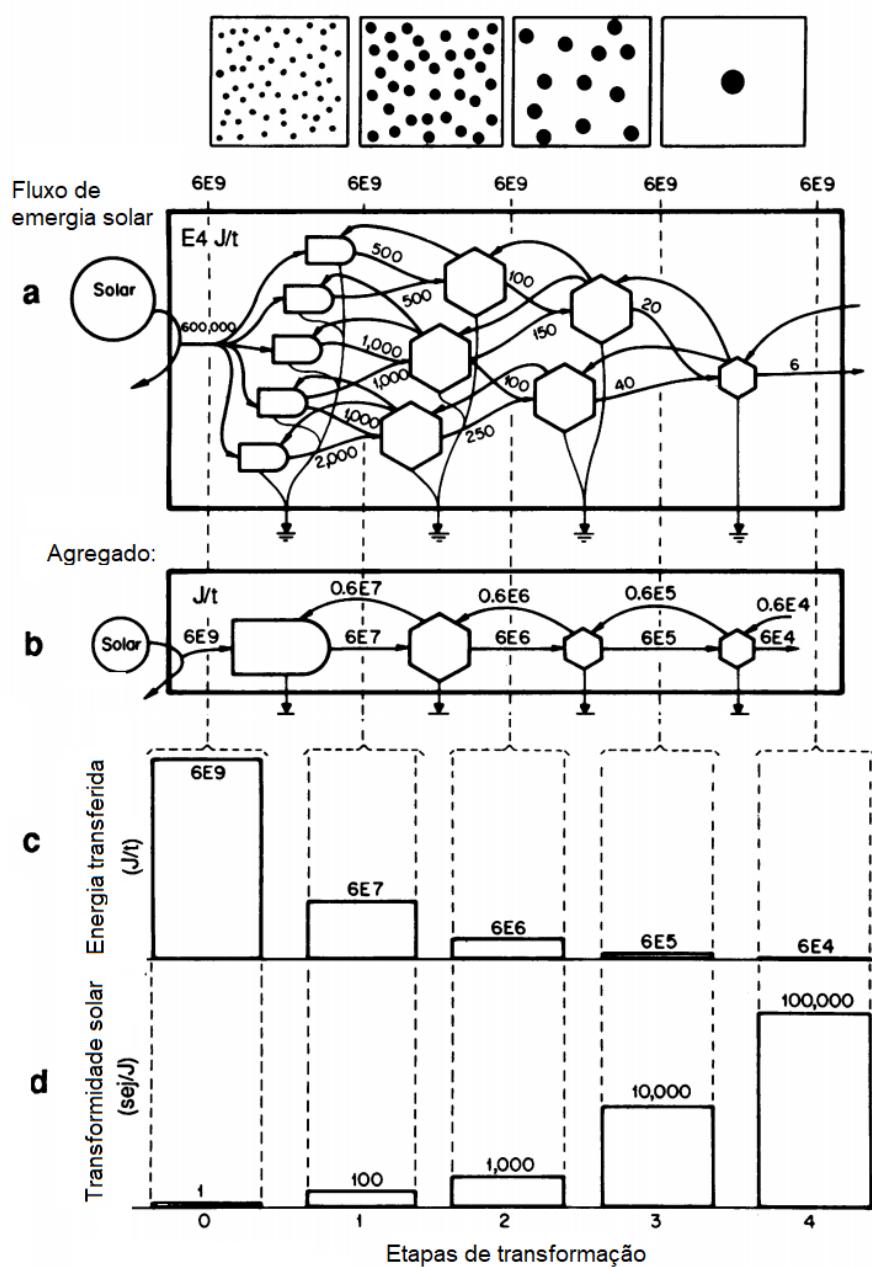
- a) existe uma hierarquia universal de energia;
- b) há a capacidade de autorregulação para avançar na evolução;
- c) possui tendência a maximizar o fluxo de energia potencial disponível;
- d) há formação de redes para aproveitar os recursos disponíveis;
- e) existe um mecanismo de produção lenta de recursos e um fluxo frenético de consumo;
- f) há oscilação entre situações de riqueza e pobreza de recursos e de modelos organizacionais: competição excludente e colaboração inclusiva.

Para melhor compreender a hierarquia de energia nos processos de transformação energética de sistemas abertos (integrados), os fluxos e

transformações de energia são apresentados na Figura 18, em que, cada produtor é responsável pelo consumo de uma parte da energia, por sua transformação e transferência. As transformações emergéticas implicam na redução da energia transferida (J) e no aumento de sua transformidade (sej/J), ou seja, o modelo considera que uma energia de maior qualidade é disponibilizada para o próximo consumidor à cada etapa. A energia de maior qualidade indica que mais processos foram necessários para produzir aquela quantidade de energia, significando que o “preço” para utilizar a fonte de energia produzida pela Natureza é maior.⁷⁶

O modelo supõem um sistema de retroalimentação em cada produtor/consumidor, buscando operar a uma eficiência que disponibilize o máximo de energia útil, pois a retroalimentação reforça as entradas energéticas minimizando as perdas e melhorando a eficiência.⁷⁷

Figura 18 – Hierarquia energética de transformação de energia com retroalimentação e caminhos de reciclagem omitidos.



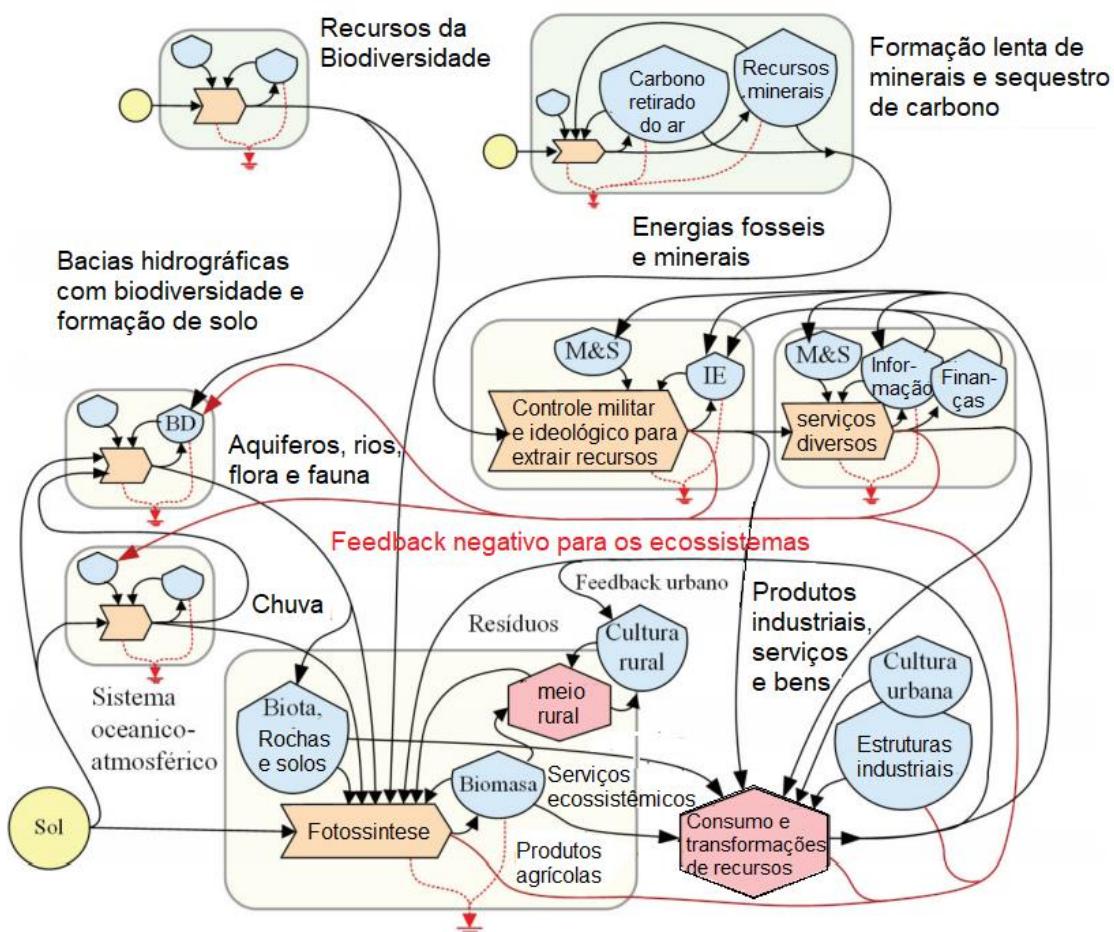
Fonte: Odum, 1988.⁷⁶

(a) fluxo de energia em teia; (b) cadeia de transformação de energia formada pela agregação da teia; (c) gráfico de fluxos de energia em cada estágio na hierarquia e (d) transformações solares para cada nível na hierarquia.

Acrescentando a análise de externalidades, conforme Bacic, Ortega e colaboradores (2020)⁷⁵ sugerem, e, aplicando o método de Odum para definir as

contribuições (fluxo de massa, energia, monetária e informação) em termos de emergia solar, tem-se o seguinte diagrama da Biosfera atual (Figura 19):

Figura 19 – Diagrama simplificado da Biosfera atual.



Fonte: Miguel Bacic, Enrique Ortega, José Gusman-Ferraz e Ana Beatriz dos Santos, 2020, adaptado.⁷⁵

Observa-se a presença de feedback negativo conferido pelos meios de produção socioeconômico, consolidados pela industrialização das atividades humanas.⁷⁵ Essa concepção é essencial para analisar os avanços e retrocessos na sustentabilidade de ecossistemas.

Sabe-se que a busca por indicadores capazes de retornar informações precisas dos processos em consideração, deve ter em conta as unidades monetária, de tempo, massa e energia, contemplando a integração do sistema socioeconômico ao sistema de economia da Natureza e atendendo às necessidades impostas pela agenda 2030.

Assim, apesar de Lia Reiniger, José Wizniewksky e Marielen Kaufmann (2017)⁶⁹ apontarem fatores para definição dos indicadores, Caporal e Costabeber reforçam:⁷¹

O maior desafio, entretanto, está em estabelecer indicadores que sejam capazes de mostrar os avanços e/ou retrocessos nos níveis de sustentabilidade relativa de um dado agroecossistema. Por suposto, isto nos remete à necessidade de urgentes esforços de pesquisa para estabelecer indicadores e metodologias para medi-los, e isso deveria ser feito nas condições reais dos diferentes agroecossistemas. (CAPORAL E COSTABEBER, 2004, p.111)⁷¹

Assim, para medir o desempenho de sistemas abertos, Odum (2000b, *apud* Bacic *et al.* 2020)⁷⁵ estabelece os seguintes índices de emergia:

- a) transformidade (Tr): valor unitário de emergia. É o valor inverso da eficiência ecossistêmica. Permite comparar o desempenho. A transformidade solar de um recurso produzido por um sistema é obtida ao dividir a emergia total pela energia do recurso produzido.

$$Tr = Y/Qp = \text{Emergia utilizada} / \text{Energia potencial contida em um produto} \quad (1)$$

Esse indicador pode ser referido a um produto específico do sistema ou a soma de diferentes produtos, incluindo coprodutos de impacto negativo (externalidades negativas);

- b) razão de rendimento emergético, ou saldo emergético (EYR): Revela qual é o saldo líquido para a etapa seguinte da cadeia trófica e calcula-se:

$$EYR = Y/F = \text{Emergia} / \text{Economia} \quad (2)$$

$$EYR = Y/F \Rightarrow (R+N+F) / F = 1 + [(R+N)/F] = 1 + (\text{Natureza} / \text{economia}) \quad (3)$$

A razão de rendimento avalia a viabilidade das fontes de energia. Quando o valor deste índice é próximo de um, significa que não há saldo de emergia e por tanto, de sustentar uma cadeia de transformação;

- c) renovabilidade (%Ren): Mede a proporção de recursos renováveis usados. Avalia a independência do sistema em relação às fontes de energia não renovável. Com os valores dos fluxos de emergia se pode calcular a razão entre as energias dos recursos renováveis do total de recursos;

$$\%Ren = (R/Y) * 100 \Rightarrow \%Ren = (Y_R/Y) * 100 \quad (4)$$

d) razão de emergia invertida (EIR): Permite saber se os recursos da economia “serão uma boa contrapartida” aos recursos naturais. Indica o quão econômico é o processo estudado.

$$EIR = F/I = \text{economia / Natureza} = \text{recursos comprados / recursos gratuitos} \quad (5)$$

e) carga ambiental (ELR): Mede o impacto sobre o meio ambiente. Indica a proporção de emergia não renovável ($N+F$) em relação a emergia renovável (R). Nesta fórmula, F é considerado como não renovável, pois F possui essa característica na maioria dos países industrializados;

$$ELR = (N+F)/R = \text{recursos não renováveis / recursos renováveis} \quad (6)$$

f) razão de intercâmbio de emergia (EER): é a proporção entre a emergia cedida ao consumidor e a emergia recebida pelo produtor em uma transação comercial.

$$EER = Y/[\text{produção} * \text{preço} * (\text{emergia/USD})] \quad (7)$$

É interessante notar que as nações desenvolvidas, ao comprar matérias-primas de países em desenvolvimento pagam um preço muito menor pelo produto recebido, pois a emergia do dinheiro recebido pelos vendedores é muito menor que a emergia contida nas matérias-primas adquiridas por seus compradores;

Onde:

R = recursos renováveis provenientes da biosfera, hidrosfera e os acúmulos internos mobilizados pela biodiversidade (recursos renováveis indiretos);

N = fontes não renováveis da Natureza: erosão e destruição do capital biológico;

$$\text{Contribuições da Natureza: } I = R+N \quad (8)$$

$$R = R_1 + R_2 \quad (9)$$

S = serviço da economia: forças sociais de origem local, regional, nacional ou internacional, ou gastos para cuidar do impacto sobre o meio ambiente (valores pouco quantificados);

M = materiais da economia;

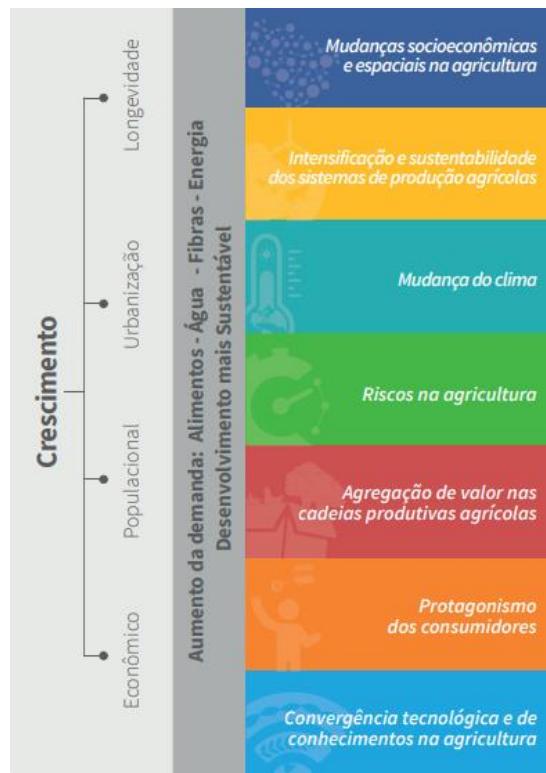
F = retroalimentação da economia urbana;

Y = soma de R, N, M e S: emergia total utilizada.

3.5 Agroecologia e tendências biotecnológicas na agricultura tropical

Com a proximidade dos prazos das metas internacionais (do Acordo de Paris, 2015), o Agropensa junto da EMBRAPA (2018), lançaram a “VISÃO 2030 O Futuro da Agricultura Brasileira”,¹⁵ que explora as “sete megatendências” em decorrência do crescimento econômico e populacional e da maior longevidade (Figura 20).

Figura 20 – O futuro da agricultura brasileira: principais sinais e tendências em cada megatendência.



Fonte: Agropensa, 2018.¹⁵

O desdobramento atribuído a cada megatendência, se dividem em outras sete tendências, das quais:

Mudanças socioeconômicas e espaciais na agricultura: Dinamicidade espacial da população e produção; produção e renda mais concentradas; escassez de mão de obra no meio rural; concentração do processamento e distribuição de alimentos; avanços em análises espaciais de uso da terra nos biomas; ampliação da gestão territorial estratégica; expansão da multifuncionalidade do meio rural.

Intensificação e sustentabilidade dos sistemas de produção agrícolas: Expansão sustentável e sistêmica da agricultura; maior preservação dos recursos naturais; crescimento da produção agrícola especializada; avanços em adequação ambiental e em serviços agroambientais das propriedades rurais; redução de perdas e desperdícios de alimentos; influência crescente de acordos internacionais e marcos regulatórios; expansão dos incentivos à diversidade produtiva animal e vegetal.

Clima: Elevação da temperatura média mundial; crescentes vulnerabilidades; incremento do fomento em ciência & tecnologia; novas tecnologias de adaptação e mitigação; sistemas agropecuários de baixa emissão de carbono; aumento dos acordos e compromissos mundiais; valoração da agricultura sustentável nas negociações internacionais.

Riscos na agricultura: Incertezas geopolíticas globais; aumento dos riscos econômicos, sociais e ambientais; persistência de gargalos em logística e armazenagem; maior pressão por sanidade agropecuária; elevação dos riscos associados ao mercado e do ambiente de negócios; gestão integrada de riscos em expansão, novas ferramentas de gestão de risco.

Agregação de valor nas cadeias produtivas agrícolas: Uso mais intenso da biodiversidade; crescente oportunidade para turismo, gastronomia e produtos regionais; alimentos mais nutritivos e saudáveis; rastreabilidade, rotulagem e certificação mais intensos; inovações em nanotecnologia, biotecnologia e automação; avanços em bioeconomia; desenvolvimento de novos materiais e bioproductos.

Protagonismo dos consumidores: Plataformas digitais nas relações de consumo; empoderamento individual; cocriação de produtos e serviços;

crescente preocupação com sustentabilidade e bem-estar animal; maior demanda por praticidade e saudabilidade; aumento do consumo de produtos orgânicos; crescimento de mercados especializados e de nichos.

Convergência tecnológica e de conhecimentos na agricultura: Novos arranjos institucionais em ecossistemas de inovação; inovações em biologia sintética e engenharia genética; análises sistêmicas via bioinformática; ampliação do compartilhamento de dados; automação e robotização; transformação digital mais intensa no uso de tecnologia informação e comunicação, acelerado desenvolvimento de inteligência cognitiva computacional e da internet das coisas. (MAPA; EMBRAPA, 2018, p. 151)¹⁵

Segundo a publicação da EMBRAPA “Visão 2030”, o Brasil investe em processos de intensificação sustentável, “com destaque para o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação à Mudança do Clima para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC)”, vinculado ao MAPA. Os esforços do Ministério estão direcionados para a recuperação de pastagens degradadas (RPD); integração de lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e sistemas agroflorestais (SAFs); sistema de plantio direto (SPD), fixação biológica de nitrogênio (FBN); florestas plantadas (FP) e tratamento de dejetos animais (TDA).¹⁵

Os principais indicadores do Plano ABC são: a) área de pastagem recuperada; b) área implantada com ILPF e SAFs; c) área manejada sob SPD; d) área cultivada com FBN; e) área implantada com florestas; f) volume de biogás processado; g) volume de metano utilizado na geração de energia; h) energia elétrica gerada a partir do uso de biogás; i) ações de adaptação de plantas e de sistemas produtivos e, j) área com ações de adaptação nas regiões mapeadas.⁷⁸

O plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura dispõe da operação do plano ABC e seu monitoramento. O plano de operacionalização foi finalizado em 2020 e os resultados publicados pela Agroicone e pela Iniciativa para o Uso da Terra (INPUT) (Tabela 2).⁶⁵

Tabela 2 – Resumo dos resultados do plano de operacionalização de Plano ABC.

| Ações do Plano ABC | Meta (mi de ha) | Resultado (mi de ha) | Mitigação em g CO ₂ eq |
|--------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| RPD (2010-2017) | 15,0 | 10,44 | 39,57 a 57,52 |
| ILPF (2010-2016) | 4,0 | 5,83 | 22,10 a 36,40 |
| SPD (2010-2017) | 8,0 | 12,72 | 23,28 |
| FBN (2010-2017) | 5,5 | 10,64 | 17,98 a 19,47 |
| FP (2010-2018) | 3,0 | 0,784 | 26,05 a 26,59 |
| TDA (2010-2019) | 4,4 mi de m ³ | 38,3 mi de m ³ | 391,20 |

Fonte: Rodrigo Lima, Leila Harfuch e Gustavo Palauro, 2020, adaptado.⁶⁵

O documento produzido prevê ainda, propostas para uma nova fase do Plano ABC 2021-2030, mencionando a intensificação das práticas de sistemas de produção orgânico, agroflorestal, integrados e regenerativos; incentivo à polinização em culturas de grão, frutas e outras; recomposição vegetal nativa; uso de insumos biológicos e manejo integrado de pragas; adoção de culturas de diversificação e cobertura do solo e adubação verde. Além das práticas ABC, constam estratégias para o monitoramento do programa; assistência técnica e extensão rural; regionalização e governança Federal e Estadual; promover a agropecuária de baixo carbono; financiamento e integração de instituições e organizações.⁶⁵

A EMBRAPA, por meio da EMBRAPA Rondônia,⁷⁹ EMBRAPA Agropecuária Oeste⁸⁰, EMBRAPA Agrossilvipastoril,⁸¹ EMBRAPA Gado e Corte⁸² até a EMBRAPA Pesca e Aquicultura,⁸³ têm promovido pesquisas e projetos incentivando a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF, Figura 21).

A segundo a Empresa Brasileira, a ILPF:

Trata-se de uma estratégia de produção agropecuária que integra diferentes sistemas produtivos, agrícolas, pecuários e florestais dentro de uma mesma área. Pode ser feita em cultivo consorciado, em sucessão ou em rotação, de forma que haja benefício mútuo para todas as atividades. (EMBRAPA, web)⁸⁴

Figura 21 – Sistemas de produção integrada.



Fonte: EMBRAPA.⁸⁴

Em uma de suas páginas na web “Tema”, no espaço temático da Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, a EMBRAPA escreve:

Se não bastassem todos os benefícios mencionados, os sistemas ILPF são ambientalmente corretos. Ao possibilitarem maior produção em um mesmo espaço, eles reduzem a pressão pela abertura de novas áreas e pelo desmatamento. Além disso, é um sistema produtivo que ou tem de baixa emissão líquida de gases causadores de efeito estufa, ou que sequestra carbono, contribuindo para reduzir o aquecimento global. (EMBRAPA, web)⁸⁴

No que se refere ao plantio agroecológico, os produtos orgânicos são os que melhor representam a atividade no país, e, por possuírem uma legislação que estabelece os critérios de produção e processamento^{85,86} e requerem certificação para reconhecimento legal do produto,⁸⁷ a contabilização destas propriedades as tornam representativas e fiéis ao modelo agroecológico. Ainda assim, os últimos três anos (2017 a 2019) da pesquisa (Figura 22) não apresentaram aumento significativo no número de produtores certificados, embora o registro de produtores orgânicos tenha crescido 33,5% de 2012 a 2019 e a sustentabilidade tenha se intensificado.⁸⁸

Figura 22 – Número de produtores orgânicos cadastrados no Ministério da Agricultura.



Fonte: MAPA, 2019 *apud* Débora Brito, Coordenação geral de Comunicação do MAPA, 2019.⁸⁸

Existe um estigma popular de que a produção orgânica é mais cara e menos produtiva, apesar desta percepção errônea, o agricultor Rogério Vian mostrou que a produção de soja orgânica em grandes quantidades é possível e mais barata. O presidente do Grupo Associado de Agricultura Sustentável (GAAS), realizou a transição de sua produção (convencional) para o sistema orgânico, o processo de retirada total de agrotóxicos durou nove anos. Dos 12 anos de produção orgânica no interior de Goiás, o agricultor relembrou que o primeiro ano de produção orgânica rendeu 28 sacas por ha e conta que em 2020 a colheita rendeu 60 sacas por ha, equivalente a uma produção convencional, cujo tratamento químico aumenta em 26% o custo em relação ao orgânico. Ainda, “o custo da produção convencional é de R\$ 3.500 por hectare. Na produção orgânica, o meu custo ficou em R\$ 2.000 por hectare”, afirma.⁸⁹

Algumas das práticas utilizadas pelo agricultor orgânico são o emprego de pó de rocha como nutriente; controle integrado de pragas, com utilização de enxada rotativa para o controle de ervas daninhas; para proteção contra insetos, Rogério emprega uma mistura de sulfato de cobre, cal e água (calda bordalesa) e microrganismos cultivados por ele,⁸⁹ constituindo um conjunto de práticas milenares.

4 DISCUSSÃO

4.1 Contribuição da biotecnologia

De modo geral, o desenvolvimento da agroecologia como ferramenta biotecnológica, permitiu ao ser humano acessar as informações da Natureza necessárias ao desenvolvimento sustentável. Conforme a investigação, identificou-se diferentes frentes de estudo que buscam o desenvolvimento sustentável, as mais relevantes para aplicação em território rural nacional estão organizadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Relação das tecnologias de maior potencial agroecológico para o desenvolvimento sustentável brasileiro.

| Área de conhecimento | Tecnologia | Valor agregado à produção |
|-------------------------|--|--|
| 1 - Cultural | a) Saberes empíricos; a) Bioprocessos; | a) Controle alternativo de pragas (repelentes naturais); misturas nutritivas com rochas minerais; a) Desenvolvimento de bioproductos (bioinssumos, bioenergia); eficiência nutricional e energética; |
| 2 - Biologia e Ecologia | b) Biorremediação; c) Melhoramento genético; d) Indicadores biológicos; e) Integração de bioprocessos (bioprodução <i>on farm</i>); f) <i>Design</i> de agroecossistemas; g) Indicadores ecológicos; | b) Benefício indireto, combate à poluição, conservação dos serviços e recursos do solo, da água e dos minerais; c) Produtividade, qualidade nutricional, fármacos; d) Qualidade, biossegurança, eficiência, sustentabilidade, gerenciamento e tomada de decisão; e) Redução de <i>input</i> e custo; valorização dos processos ecológicos; f) Eficiência, sustentabilidade e biossegurança; g) Qualidade, eficiência, sustentabilidade, gerenciamento, tomada de decisão; |

| Área de conhecimento | Tecnologia | Valor agregado à produção |
|----------------------------|--|---|
| 3 - Ciência dos solos | a) Bioprocessos; b) Relações ecossistêmicas e metabolismos; c) Indicadores bioquímicos; d) Transição ecológica; | a) Opções de microrganismos eficientes; FBN; coinoculação; fixação de GEE no solo e nas plantas; b) Suporte, resiliência, controle fitossanitário, manutenção das condições básicas; c) Qualidade, eficiência, sustentabilidade, gerenciamento, tomada de decisão; d) Adaptabilidade, resiliência, sustentabilidade e conservação dos serviços e recursos do solo; |
| 4 - Engenharia | a) <i>Design</i> de agroecossistemas; b) Manutenção; c) Otimização; d) Automação; | a) Eficiência, sustentabilidade e biossegurança; b) Bom funcionamento do sistema; c) Melhoria contínua, produtividade, eficiência; d) Eficiência; |
| 5 - Sistemas de informação | a) <i>Bigdata</i> ; b) Inteligência artificial; c) Internet das coisas*. | a) Banco de dados integrados, informação, gerenciamento e tomada de decisão; b) Agilidade do fluxo de informação, descentralização das tomadas de decisão; c) Segurança no armazenamento de dados; |

Fonte: Elaboração própria.

Alguns dos desdobramentos tecnológicos das áreas do conhecimento identificadas na Tabela 3 foram considerados para avaliação de seu potencial agroecológico e estão dispostos nas seguintes alíneas:

a) solos;

Vários serviços ecológicos de suporte e manutenção estão relacionados aos ecossistemas do solo, responsáveis pelo desenvolvimento das plantas e da micro e macrobiota. De acordo com Guilherme e colaboradores (2019),²⁸ o solo é material biologicamente ativo e representa uma parte vital dos ecossistemas:

O solo – o meio principal para o crescimento das plantas – é uma camada de material biologicamente ativo, resultante de transformações complexas que envolvem o intemperismo de rochas e minerais, a ciclagem de nutrientes e a produção e decomposição de biomassa. (GUILHERME; LOPES; SIQUEIRA, 2019, p. 207).²⁸

Portanto, o estudo das propriedades bioquímicas e microbiológicas do solo, permite a compreensão dos mecanismos metabólicos que promovem tais serviços, e sua relação com a composição química da Atmosfera⁹⁰ em um Planeta de mudanças ambientais.

Estudos como os de González e colaboradores (2021),⁹¹ revelam as inúmeras interações bacterianas com raízes de diferentes culturas e suas funções, permitindo desenvolver plantações mais resistentes, com estratégias de biofortificação e abordagens de sequestro de carbono. A descoberta possui também aplicações potenciais em nutrição vegetal e humana e na qualidade e segurança alimentar.

Além disso, o conjunto solo-vegetação é capaz de armazenar 30% dos gases liberados na Ecosfera,¹⁰ desta forma, a busca por compreender a utilização destes gases pelas plantas pode ser uma estratégia crucial para o aproveitamento dos GEE e para nutrição das plantas em solos com baixa matéria orgânica, como os do Cerrado.

Em sua pesquisa, Salas-Gonzales (*et al.*, 2021)⁹¹ revelaram que estratégias baseadas na microbiota para controle da suberização* de raízes representa uma oportunidade de criar plantações mais resilientes. Eles descobriram que as barreiras de difusão da raiz influenciam a composição da microbiota da rizosfera que, reciprocamente influencia a função da barreira de difusão da raiz e, determinaram que a suberização da endoderme, é importante para a adaptação da planta a meios

praticamente estéreis e com baixa quantidade de nutrientes, como é o caso do Cerrado.²⁸ Segundo os autores do artigo:

No geral, as bactérias com flexibilidade metabólica para usar fontes de energia orgânica e inorgânica provavelmente têm uma vantagem seletiva em ambientes de solo. Na maioria dos solos, o carbono orgânico é o principal fator que limita o crescimento microbiano; isso reflete a variabilidade espaço-temporal inerente na disponibilidade de carbono orgânico dos solos, junto com a recalcitrância de muitos polímeros orgânicos e a intensa competição por compostos mais degradáveis. Assim, a capacidade de consumir fontes alternativas de energia é provavelmente crítica para a adaptação e resiliência de muitos táxons. H₂ e CO são compostos ideais a este respeito, uma vez que estão prontamente disponíveis em fontes atmosféricas e edáficas; da mesma forma, seu alto conteúdo de energia, baixa energia de ativação e difusibilidade em células microbianas tornam esses gases confiáveis para persistência. (BAY; DONG; BRADLEY, *et al.*, 2021, p. 250)⁹⁰

Esta estratégia pode contribuir com a produtividade das plantações no Cerrado, pois a baixa quantidade de MO representa um fator limitante tanto para a agricultura convencional, como para a exploração de seu potencial agroecológico. Para contornar essas limitações de forma sustentável, pode-se fazer uso da metagenômica** para compreensão de suas propriedades biológicas e interações ecológicas, tal qual os estudos apresentados.

Por fim, acredita-se que, a identificação de bactérias fixadoras de carbono presentes em solos, rochas e outros ecossistemas minerais, possa contribuir (em grande escala) para recuperação da homeostase dos gases atmosféricos, evitar a máxima temperatura projetada e frear o aquecimento global; cabendo à ciência desenvolver soluções inovadoras para remoção dos demais GEE. Desta forma, reforça-se a necessidade da intensificação da metagenômica.

*A suberina é uma cera sintetizada pelas células do súber das plantas vasculares com crescimento secundário. A suberização (ou suberificação) é a impregnação da parede celular com suberina ou deposição de lamelas de suberina cobrindo a parede das raízes.

**Metagenômica é a análise genômica de um determinado ambiente (exemplo: solo, água, ar).

a) bioinsumos e produção integrada;

Quanto à produção agrícola integrada, a EMBRAPA afirma que “os sistemas ILPF podem ser adaptados para pequenas, médias e grandes propriedades, em todos os biomas brasileiros”,⁸⁴ o que torna o sistema ideal para reproduzibilidade na transição ecológica. Ademais, a ideia de integração de diferentes produções pode ser extrapolada para a produção *on farm* de bioinsumos, reduzindo a necessidade de insumos externos e diversificando a produção. Este modelo valoriza a agrobiodiversidade e pode ser um aliado na preservação ambiental ao incorporar espécies nativas para compor a agrobiodiversidade local, tornando o sistema mais resiliente.

Um exemplo simplificado do fluxo de biomassa é capaz de demonstrar a complementariedade de sistemas integrados LPF, a biomassa seca deixada pelas folhas das árvores ou pelos restolhos da lavoura, resguardam a umidade do solo e sua matéria orgânica, contribuindo com a qualidade do solo para as próximas semeaduras e na sucessão do capim; bem como os dejetos animais deixados pela propriedade renovam a fertilidade do solo. O manejo da biomassa e dos dejetos gerados por meio de uma simples compostagem, pode otimizar este processo ou servir para outras finalidades, como a produção de bioenergia (combustível e/ou gás) e multiplicação da macrofauna. Este processamento via compostagem caracteriza uma produção integrada de bioinsumo (ou produção *on farm*).

As tecnologias para a produção de bioinsumos variam das mais simples, como a seleção de microrganismos selvagens detritívoros e decompositores para produção de fertilizante (compostagem), até as mais complexas, como a regulação do crescimento vegetal por bactérias inoculantes. Sendo que, não é qualquer biotecnologia que pode ser empregada em processos *on farm* ou sem supervisão técnica.

As opções de bioinsumos que se referem a fitossanidade, por exemplo, são tão diversas quanto os problemas de sanidade vegetal. No caso de uma infestação de pulgões, a solução pode estar tanto em um inseticida bioquímico, quanto em um predador natural ou um patógeno da espécie alvo. Da mesma forma, as soluções para nutrição e manutenção da qualidade do solo e para o desenvolvimento vegetal são

tão numerosas quanto a especificidade dos casos. Portanto, um estudo de caso deve ser conduzido para uma tomada de decisão agroecológica, de modo a causar o menor distúrbio possível no agroecossistema. Por tanto, entende-se que a variedade de opções tecnológicas é importante para garantir a acessibilidade dos produtores rurais às biosoluções.

A aplicação de bioinsumos inoculantes tende a ser a mais rigorosa em termos de segurança, por isso a competência técnica especializada é requerida, tornando-se um fator de acesso excludente. Uma alternativa aos inóculos, seriam as bactérias endofíticas. Segundo a EMBRAPA Agrobiologia, o conceito de endofítico possui interpretações divergentes, as que melhor caracterizam este tipo de microrganismo são, a definição dada pela EMBRAPA:

Bactérias endofíticas são organismos que se caracterizam pela associação íntima com a planta hospedeira, despertando grande interesse agronômico. Estes organismos oferecem a vantagem de estarem completamente compatibilizados com o hospedeiro, e permitem a utilização de plântulas já colonizadas por estirpes selecionadas antes das etapas de cultivo comercial, evitado a necessidade do estabelecimento dos potenciais inoculantes. (EMBRAPA, 2003, p. 7)⁹²

e a de Kloepper *et al.*, (1997a*, apud EMBRAPA Agrobiologia, 2003)⁹² que as define como:

Aquelas espécies isoladas de tecidos esterilizados superficialmente, ou extraída de tecidos vegetais internos, e que não causam danos nem produzem sintomas de patogenicidade, incluindo tanto colonizadores de comportamento neutro, bem como simbiontes. (EMBRAPA, 2003, p. 9)⁹²

Wilson (1995**, apud EMBRAPA Agrobiologia),⁹² complementa afirmando que estes microrganismos causam infecções não aparentes e assintomáticas, sem

*KLOEPPER, J. W.; QUADT-HALLMANN, A.; MAHAFFE, W. F; HALLMANN, J. *Recent studies on microbial ecology of bacterial endophytes in plants*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 1997^a. CD ROM.

** WILSON, D. *Endophyte – The evolution of a term, and classification of its use and definition*. **Oikos**, Copenhagen, v. 73, p. 274-276, 1995.

apresentar patogenicidade. Portanto, os microrganismos neutros e simbiontes possuem mecanismos de infecção semelhante aos patogênicos, requerendo o entendimento dos processos de expressão e regulação destes genes nas relações endofíticas. Tal compreensão gera aplicabilidade no estímulo da produção de fitormônios (e outros bioinsumos) por bactérias endofíticas.

A falta de exigência de um inoculante para culturas endofíticas representa uma vantagem para o produtor rural, por tanto, defende-se o estudo da viabilização desta biotecnologia para o desenvolvimento rural sustentável.

b) biossegurança e competências técnicas;

A chancela dos presidentes do Grupo Associado de Agricultura Sustentável (GAAS), da Associação Brasileira dos Produtores de Soja (Aprosoja Brasil), da Associação Brasileira dos Produtores de Algodão (ABRAPA) e da Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), indica a necessidade de uma ratificação dos meios de produção de base ecológica que conduza à transição agroecológica.⁹³ A carência foi observada pela falta de definições públicas sobre estas práticas, separando a agricultura em convencional ou orgânica. Estas definições são pouco flexíveis e dificultam a transição.

Não obstante, no terceiro painel do “Seminário Produção *on Farm* de Bioinsumos: eficiência, segurança e regulamentação”, mostra a importância dessa discussão. O consultor de tecnologia da CNA Reginaldo Minaré, reforça a necessidade da regulamentação e registro dos produtores rurais que trabalham com bioprodução *on farm*, a necessidade de um técnico responsável e certificação técnico-sanitário, mesmo se tratando de práticas milenares.⁶³

Sob a perspectiva da biossegurança, principalmente por parte de inoculantes e da condução de processos biológicos pelo produtor rural, pergunta-se quais são os riscos que nos deixam em situação de vulnerabilidade na possibilidade de irregularidades? A Tabela 4, pontua e descreve situações de risco a mamíferos e possíveis soluções:⁶³

Tabela 4 - Análise de riscos a mamíferos.

| Situação | Solução |
|--|---|
| Baixo rigor asséptico em ambientes de produção; | Equipamentos mínimos para manter assepsia do local: autoclave, infravermelho e ambientes estéreis; |
| Meios de cultura inespecíficos para o microrganismo com qual se está trabalhado, de fontes duvidosas ou sem pureza definida; | Utilizar inóculos de alta pureza, registrados, devidamente rotulados e com as orientações de uso; manipulação rigorosa e frequentes análises toxicológicas; |
| Ausência de conhecimento técnicos de operadores; | Presença de técnico responsável com conhecimento em microbiologia e treinamento adequado de operadores. |

Fonte: Álvaro Salles, diretor executivo do Instituto Mato-Grossense do Algodão (IMA), 2021, adaptado.⁶³

Entre os riscos a mamíferos, estão as epidemias e pandemias Álvaro Salles (2021),⁶³ afirma que “assim como no ambiente há microrganismos que nos traz enfermidades, as plantas também são acometidas por doenças, os microrganismos se multiplicam da mesma forma”. Ao integrar os processos biológicos na propriedade sem a devida atenção à biossegurança e aos aspectos ecológicos, coloca-se a segurança dos trabalhadores e a segurança alimentar em risco.

Por outro lado, sob o contexto de desenvolvimento sustentável, é inaceitável ignorar a pirâmide multidimensional da agroecologia. Portanto, deve-se pensar questões como acessibilidade às adequações, sua real necessidade; incentivo público e privado, à permanência no campo, criação de novos cursos técnicos com base nas atuais necessidades do meio rural e reestruturações de cooperativas; buscando abranger pequenos a grandes produtores em transição agroecológica.

É irrevogável que a agricultura familiar deve ter espaço prioritário no desenvolvimento rural sustentável, entretanto, são os grandes latifundiários, produtores de monoculturas e culturas transgênicas os maiores poluidores do setor agrícola. Por isso, faz-se necessário uma conscientização direta, com base nas evidências do aumento de produtividade com manejo de base ecológica. Assim, um

dos desafios do Brasil na transição agroecológica, é criar mecanismos que mobilizem a transição de grandes fazendas, aproveitando os serviços que os pequenos e médios produtores podem oferecer.

Uma dificuldade para suportar a transição ecológica de sistemas agrícolas é a mão de obra especializada. Dos produtores rurais que não podem pagar por ela, muitos não possuem instrução técnica especializada. O aporte do Estado (Governo Federal, Ministérios, universidades, institutos e outros) em parceria com o setor privado é fundamental para garantir o aumento da mão de obra rural.

São poucos os produtores orgânicos que possuem conhecimentos e habilidades como as de Rogério Vian. O presidente do GAAS é um exemplo do perfil desejado para “nova agricultura”, ele se reconhece como “técnico agrícola, engenheiro agrônomo e agricultor sustentável”, afirma.⁸⁹ Assim, espera-se que em contato com o conhecimento técnico e das ferramentas disponíveis, o produtor rural (de pequenas a grandes áreas agricultáveis) seja capaz de realizar a autogestão de sua produção e dos processos integrados.

Por tanto, para contemplar as seis dimensões da agroecologia, propõem-se a tutela dos bioprocessos integrados à agroecossistemas por técnicos de bioprocessos. A necessidade de mão de obra especializada no espaço rural abre oportunidade para o desenvolvimento profissional dos membros da comunidade. Assim, como forma de aumentar o acesso ao conhecimento, diferentes parcerias são necessárias para disponibilizar os cursos técnicos que se fazem necessários em bioprocessos *on farm* ou em biofábricas.

Assim, torna-se imprescindível a presença de engenheiros bioquímicos, engenheiros de bioprocessos, ecólogos e biotecnólogos que proponham diferentes níveis de gerenciamento agroecológico para adequação das propriedades rurais às novas condições de trabalho, na adequação da infraestrutura e antecipação de riscos de forma inteligente.

c) transgênicos;

Atualmente, a agroecologia e as monoculturas transgênicas podem parecer, num primeiro momento, imiscíveis; apesar desta impressão, a concepção de que monoculturas transgênicas não são (e não podem ser) agrosustentáveis, não pode ser verdadeira. Esta construção engessa o desenvolvimento da sustentabilidade em

sistema de monoculturas transgênicas. A biotecnologia de OGMs potencializa a capacidade de produção de alimentos, fármacos e biocombustível, permitindo a humanidade enfrentar o desafio de prover o bem-estar às mais de 9 bilhões de pessoas em 2050, de forma sustentável.¹⁴

A verdade é que a alta produtividade de culturas transgênicas é um fator de sustentabilidade à medida que não interfere “estatisticamente” nas relações ecossistêmicas. É preciso ter em mente que a adoção de culturas transgênicas, como as de soja e milho, estão próximas do máximo (Figura 23) o que torna sua ecologização imprescindível.

Figura 23 – Adoção de culturas transgênicas no Brasil de 1998 à 2017.



Fonte: Agroconsult, 2018.⁵³

Em estudo sobre os impactos ecológicos das culturas transgênicas na saúde de agroecossistemas, Miguel A. Altieri (2000),⁹⁴ abordou a teoria ecológica que sugere que a intensificação do plantio de monoculturas transgênicas podem criar condições ambientais críticas, desde de o fluxo gênico entre culturas transgênicas e parentes selvagens, a aceleração na seleção de indivíduos resistentes; impactos na fauna do solo e em organismos não alvo.

No caso da soja RR®, sua especificidade ao glifosato fragiliza o sistema à medida que cria o ciclo vicioso dependente do herbicida, o que seleciona ervas

daninhas resistentes ao glifosato, além de contaminar solos, corpos d'água e a biodiversidade. Portanto, entende-se que a biotecnologia empregada na soja RR® a tornou prejudicial, não por ser transgênica, mas porque projeto desta semente não foi ecologicamente planejado. Ademais, fica evidente a necessidade da diversidade genética nos agrossistemas para a sanidade das plantas. Desta forma, tem-se que o plantio de soja transgênica deve ser priorizado em projetos de transição agroecológica.

De forma geral, independente do agroecossistema empregar tecnologia transgênica, sua gerência deve se apoiar nos serviços ecológicos de abastecimento, manutenção e suporte. Contudo, defende-se a priorização dos processos Naturais e a avaliação da real necessidade de novas PGM, deixando num segundo plano, a utilização da transgenia. Acredita-se que há necessidade de estudar as alternativas a esta tecnologia antes de aplicá-la, principalmente no que se refere a eficiência na absorção de nutrientes, no controle fitossanitário e na resistência a determinadas condições ambientais, pois é possível que a solução para tal problema esteja na simbiose entre a microbiota do solo e as raízes das plantas.

Atualmente o Brasil conta com muitas variedades de soja. Entre transgênicas e convencionais, a Embrapa possui três portfólios de cultivares de soja: Sistema intacta, soja RR® e o sistema de produção convencional, este, com mais de 270 cultivares convencionais. Entre elas, “a soja BRS 284 (convencional) ganhou sucessivos concursos nacionais de produtividade, onde concorreu em condições de igualdade com as outras tecnologias de soja disponível”, outro reconhecimento de que as cultivares convencionais estão voltando a ganhar espaço no mercado.⁹⁵

Segundo a EMBRAPA,⁹⁵ a soja BRS 284 conta com a resistência ao cancro da haste, à mancha “olho-de-rã”, à podridão parda da haste e moderada resistência ao nematoide de galha, apresenta melhor desempenho em áreas com altitudes menores que 700 metros, seu ciclo e porte viabilizam a segunda safra de milho. Seu desempenho em baixas altitudes representa uma redução da pressão agrícola nas áreas de planalto do Cerrado e da Mata Atlântica, onde atualmente a cultura compete com a vegetação nativa.

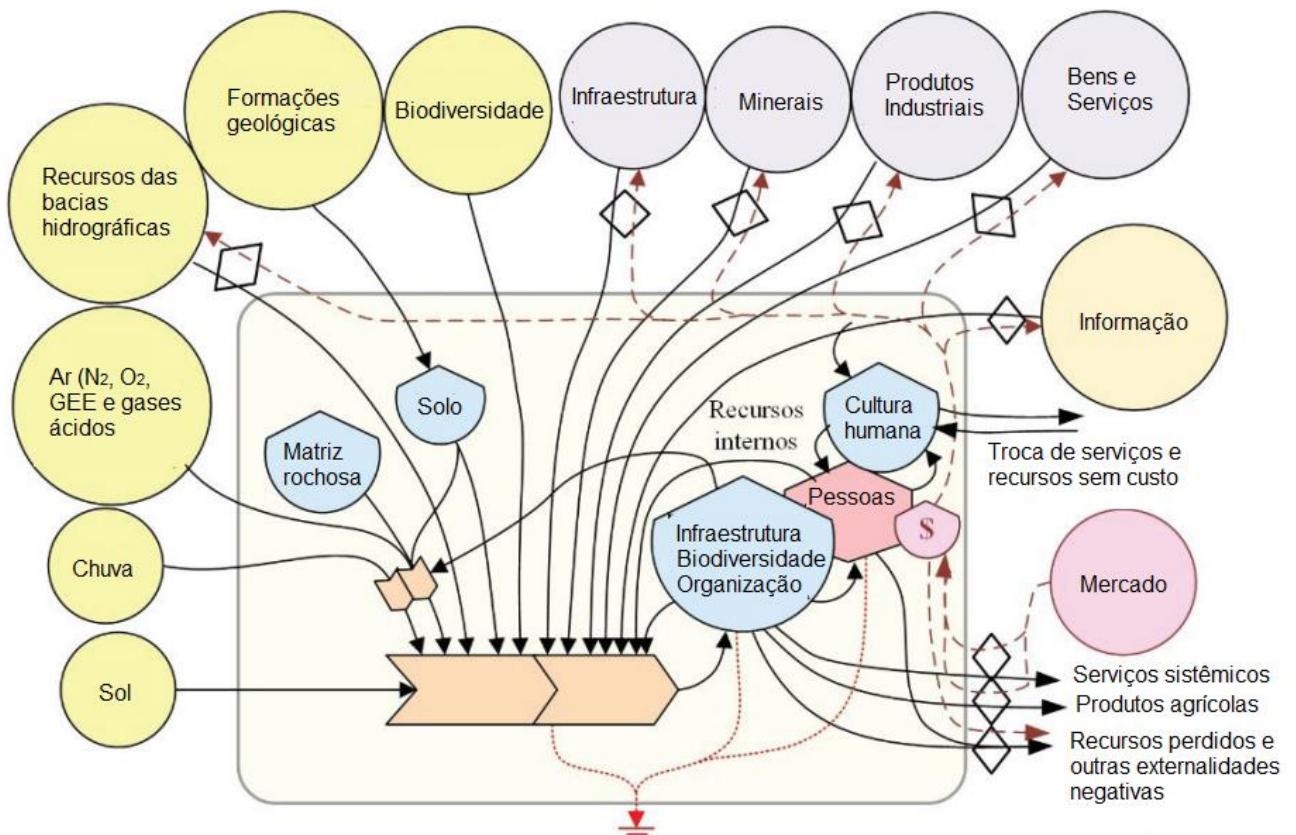
Espera-se que, com a incorporação de práticas ecológicas em sistemas de monoculturas transgênicas de soja RR®, o produtor rural reconheça a viabilidade econômica da soja convencional e opte por mudar a escolha das sementes e por realizar a transição agroecológica.

Os OGMs também representam uma tecnologia de alto potencial para criação de resiliência, adaptabilidade e mitigação dos impactos climáticos nas plantações de diferentes regiões do Brasil, acelerando as respostas de plantas e animais frente as mudanças ambientais. Neste sentido, os programas de aperfeiçoamento genético da EMBRAPA têm sido realizados com base nas previsões do Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC) e prioriza a concepção de plantas resistentes a seca e a altas temperaturas do ar.⁶² Por outro lado, existem tecnologias com potencial de serem alternativas competitivas aos transgênicos, como as culturas produtoras de bactérias que ajudam a planta a conviver com a seca, como o *Bacillus aryabhattai*.⁹⁶

4.2 Aplicação da síntese em emergia em ecossistemas de Cerrado para a transição agroecológica da sojicultura

Deve-se reconhecer que, grande parte da produção agroindustrial do Brasil vem das monoculturas de soja transgênica e uma quantidade considerável de propriedades que a cultivam se localizam no Cerrado. Com isso, definiu-se tanto a soja convencional quanto a soja RR® em ecossistemas do Cerrado como modelo para a transição ecológica. Neste sentido, um estudo de caso foi conduzido seguindo a metodologia emergética. Miguel Bacic, Enrique Ortega e colaboradores (2020),⁷⁵ utilizaram os seguintes diagramas (Figuras 24 e 25) na contabilidade dos sistemas de sojicultura.

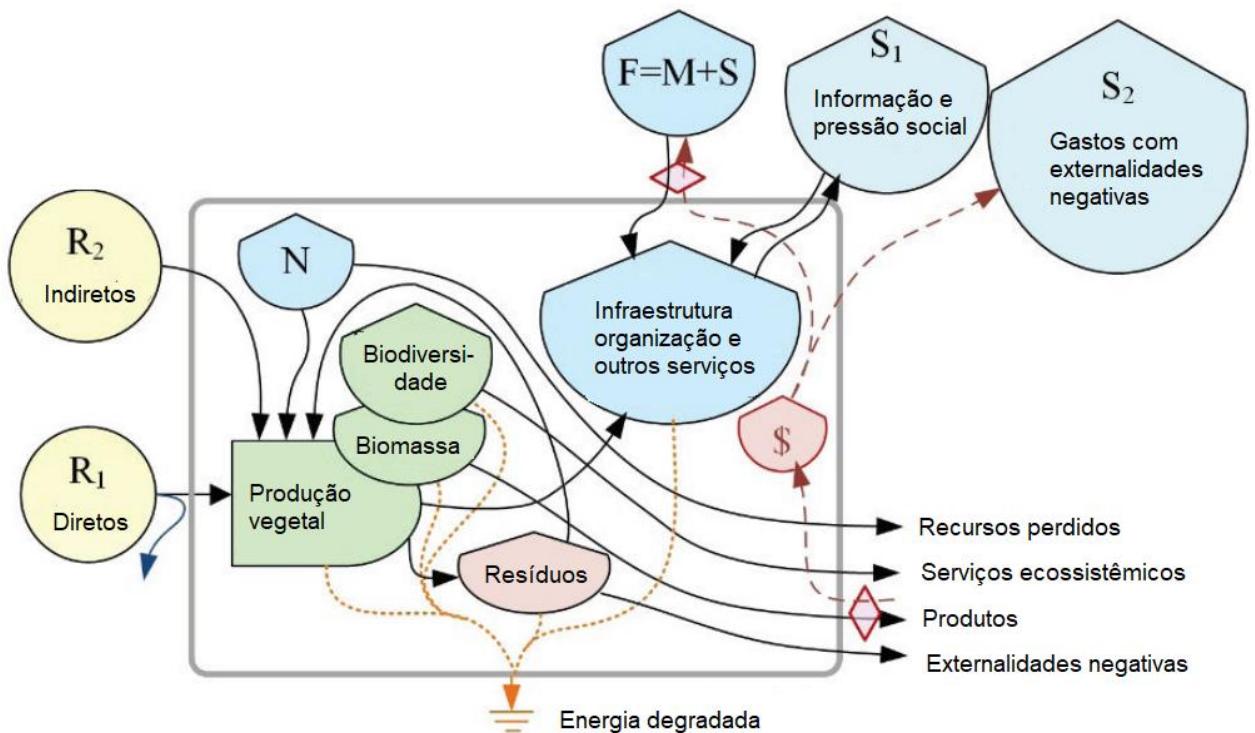
Figura 24 – Diagrama simplificado de um sistema de produção rural.



Fonte: Miguel Bacic, Enrique Ortega, José Gusman-Ferraz e Ana Beatriz dos Santos, 2020,
adaptado.⁷⁵

O segundo diagrama evidencia as perdas, as externalidades negativas e a pressão antropológica do sistema, que por sua vez podem ser mitigadas através da síntese em emergia para tomada de decisão.

Figura 25 – Diagrama de fluxos agregados de um sistema rural.



Fonte: Miguel Bacic, Enrique Ortega, José Gusman-Ferraz e Ana Beatriz dos Santos, 2020,
adaptado.⁷⁵

O estudo de caso comparou a performance de três diferentes sistemas de sojicultura (orgânica, convencional e transgênica) através da metodologia emergética. O estudo concluiu que o sistema orgânico de produção é mais sustentável que os demais, corroborando com a fala do agricultor Rogério Vian, que afirmou que a produção orgânica é tão rentável quanto a convencional e possui menor custo de produção.⁸⁹ Os resultados do estudo (Tabela 5) mostram que, nos indicadores abaixo, o sistema orgânico apresentou o melhor desempenho.

Tabela 5 – Principais indicadores considerados na análise de sustentabilidade dos sistemas de sojicultura.

| Indicador | Sistema orgânico | Sistema convencional | Sistema soja RR® |
|-----------------------------------|------------------|----------------------|------------------|
| Transformidade sistêmica (sej/J) | 2.046 | 94.400 | 198.733 |
| Renovabilidade | 87% | 26% | 15% |
| Índice de rendimento emergético | 1,38 | 1,23 | 1,12 |
| Emergia invertida | 2,62 | 4,42 | 4,97 |
| Taxa de troca de energia (USD/kg) | 1,19 | 3,02 | 4,97 |
| Lucro por kg (US\$/kg) | 0,85 | 0,17 | 0,18 |

Fonte: Miguel Bacic, Enrique Ortega, José Gusman-Ferraz e Ana Beatriz dos Santos, 2020, adaptado.⁷⁵

Os valores contidos na Tabela 5, permitem algumas inferências sobre os sistemas de produção analisados. A menor transformidade do sistema orgânico, por exemplo, indica sua alta eficiência na disponibilização de energia útil. Enquanto os altos valores para os demais sistemas se explicam pelo uso intensivo de insumos industriais, *input* externo, de alto custo energético, que aumenta a transformidade do sistema.

A renovabilidade da opção orgânica é três a seis vezes maior que as opções que utilizam agroquímicos e fontes de energia não renováveis. O índice de rendimento emergético do sistema orgânico também é maior que os outros sistemas e, portanto, têm um saldo de emergia maior para ser usada por outros sistemas. A razão de emergia invertida do sistema orgânico é menor que as demais, exigindo menos recursos da economia (M e S). A taxa de intercâmbio de emergia da sojicultura orgânica está próxima ao valor de equilíbrio (1,0), portando, pode-se dizer que seu preço é mais justo que os outros modelos produtivos.⁷⁵ Miguel Bacic, Enrique Ortega e colaboradores ressaltam que:

É interessante notar que o preço justo da soja orgânica é próximo ao valor de mercado, o consumidor paga um preço adequado que garante a produção ecológica sem externalidades negativas e gerando externalidades positivas importantes, como trabalho rural de boa qualidade e serviços ecossistêmicos. (BACIC, et al., 2020, p. 28)⁷⁵

Desta forma, sugere-se que os diagramas acima (Figuras 21 e 22) sejam utilizados como modelo para mapear o atual fluxo de valor e projetar o fluxo futuro em propriedades rurais em transição ecológica. Ademais, um estudo sobre as implicações energéticas do século XXI na transição agroecológica mostrou a necessidade de uma abordagem que priorize o acesso aos recursos locais e incorpore análises de intensidade de energia na governança do uso da terra.⁹⁷

Assim, chega-se à etapa que esta discussão pretende: elencar os próximos passos para projetos de transição ecológica em agrossistemas. Para tanto, definiu-se o ecossistema, a propriedade rural e a cultura: planaltos de topo plano no Cerrado; propriedades de grande, médio e pequeno porte; soja convencional e transgênica.

Próximos passos:

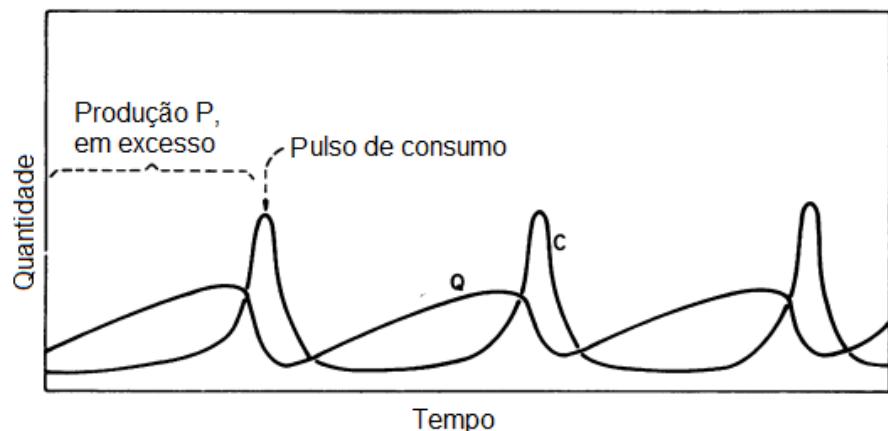
- 1- Análise florística para definição das áreas de estudo e contribuição em serviços ecossistêmicos. Critério: proximidade com espécies nativas e endêmicas;
- 2- Definir randomicamente as propriedades de acordo com seu tamanho e localização;
- 3- Reconhecer as condições atuais da área: análises de solo (conservação, físico-química, microbiológica etc.), fitossanitária, estado de conservação e saúde do ecossistema circunstante;
- 4- Reconhecer as práticas de manejo utilizadas em todos os sistemas integrados, análise sanitária dos bioprocessos integrados (se houver), análise emergética e de externalidades negativas de todo o fluxo de valor;
- 5- Estabelecer condições básicas para o fluxo de valor futuro, análise de externalidades positivas;
- 6- Definir indicadores agroecológicos;
- 7- Monitorar a sustentabilidade da transição;
- 8- Verificar os resultados obtidos;
- 9- Padronizar quando os resultados atingirem o esperado;
- 10- Agir na causa do problema quando os resultados não atingirem o esperado;
- 11-Reinic平ar o ciclo a partir da etapa 5 para o monitoramento contínuo do desempenho agroecológico da propriedade.

A sugestão de próximos passos é um esboço inicial para considerações mais detalhadas, retiradas de estudos não considerados neste trabalho. Desta forma, obras como as de Gliessman, Odum e Ortega, são a base para se definir modelos sustentáveis. Ao definir as condições de espaço e tempo e os limites do agroecossistema, é possível maximizar a sustentabilidade agrícola, em qualquer local e período. Esta mesma otimização pode ser realizada em sistemas maiores e outros subsistemas para atingir a sustentabilidade em todas as seis dimensões descritas por Capora e Costabeber (2004).⁷¹

As ciências emergentes do século XX e XXI, estão em pleno desenvolvimento e as dificuldades identificadas vêm sendo superadas. A engenharia, a genética, a biologia, a ecologia e a economia circular; o desenvolvimento tecnológico, como a tecnologia da informação, que utiliza drones e satélites para coleta e integração de *bigdata*; a biotecnologia, como apresentado, aplicadas à agricultura, estão quebrando alguns paradigmas infundadamente criados. Assim, o gerenciamento da transição agroecológica será mais eficiente quanto melhor a capacidade dos dados interagirem entre si, em vista de retornar informações claras que auxiliem na tomada de decisão.

Para além da agroecologia no Cerrado, Odum (1988)⁷⁶ sugere pulsos de consumo (Figura 26), o que implica dizer que a sustentabilidade de um sistema autossuficiente não é composta de uma estabilidade contínua, pois nele sempre haverá períodos de escassez de recursos, dada a característica inerente dos sistemas abertos: da produção lenta de recursos e um fluxo frenético de consumo; além das oscilações entre situações de riqueza e pobreza de recursos e de modelos organizacionais: competição excludente e colaboração inclusiva.

Figura 26 – Pulsos de consumo frenético e lenta produção de recursos.



Fonte: Fonte: Odum, 1988, adaptado.⁷⁶

Desta forma, o sucesso de um sistema autossustentável está em sua capacidade de auto-organização, de modo que a espécie humana, através da tentativa e erro, reúna informações fundamentais para compreender a sustentabilidade como a capacidade de auto-gestão (processo evolutivo que envolve a auto-organização da Biosfera).⁷⁶

5 CONCLUSÃO

Paralelamente e síncrono as mudanças dos últimos 100 anos e acompanhando as tendências da agricultura alternativa, Roberto Moreira (2000)⁴² descreve três caracteres adquiridos pela crítica à Revolução Verde no Brasil, os caracteres: técnico, social e econômico. De modo geral, eles compreendem, respectivamente, os aspectos filosóficos das relações do ser humano com a Natureza; o domínio dos latifundiários sobre a formação social brasileira; e associada a crise do petróleo, a consciência da necessidade de migrar para matrizes energéticas alternativas.⁴²

Desta forma, as resoluções tomadas pelo Brasil para solucionar os problemas decorrentes das práticas insustentáveis descritas por Bird (1988 *apud* Alan Matos, 2010).⁴⁰ Concluiu-se que “os problemas locais decorrentes de soluções universais”, foram superados no Brasil com o início das pesquisas voltadas à agricultura tropical, a partir de 1970. No que se refere a adoção de insumos químicos, o Programa Nacional de Bioinsumos⁹⁸ lançado em 2020 pretende aumentar a disponibilidade e regulamentar sua produção. Sua integração ao agroecossistema (ou produção *on farm*) possibilita ainda, a autossuficiência em determinados insumos, como biofertilizantes e matéria orgânica.⁶³ Quanto ao uso de máquinas de alto custo energético, as inovações em bioenergia têm dispendido esforços dos setores automobilístico, de abastecimento elétrico e empresas de base petroleira.

Por fim, a “subordinação dos aspectos ecológicos à eficiência econômica”, encontra resistência em empresas que não aderiram à política de desenvolvimento sustentável e de posseiros “conservadores” ou que agem de forma criminosa. Para sanar este problema, a fiscalização e sansão das Leis devem aumentar, iniciativas público-privada para incremento do alcance de informações sobre as vantagens econômicas e a importância da mudança na base agrária devem ser impulsionadas e os incentivos às práticas de produção sustentável devem ser capazes de atrair os grandes produtores para o novo modelo agrícola.

Quanto ao papel da agroecologia, num primeiro momento, a produção *on farm* integrada parece atender às necessidades de pequenos a grandes produtores,

constituindo uma poderosa ferramenta para promoção do desenvolvimento rural sustentável, com o potencial de reequilibrar o carbono atmosférico, tornando-se um elemento-chave na redução da aceleração das mudanças climáticas. Portanto, o agricultor do século XXI tem duas missões principais: a) garantir a segurança alimentar e a sustentabilidade do planeta, contribuindo com ações locais; b) contribuir com o controle do balanço de GEE.

É importante destacar que a biodiversidade e suas interações são vitais para a manutenção da vida no planeta, se não, os serviços ecológicos proporcionados por ela não existiriam.¹⁹ Por isso é importante compreender como essas interações são afetadas pela forma de manejo e desenvolver técnicas mais apropriadas (ou que causem menos distúrbio) ao sistema, reproduzindo-as e gerenciando-as na agricultura.

O resultado das pesquisas na literatura com a finalidade de sugerir medidas, pesquisas e soluções biotecnológicas para o desenvolvimento sustentável da agricultura tropical, mostraram que a agricultura orgânica tem potencial para garantir a segurança alimentar global, usando sistemas complexos para preservar a seguridade ecossistêmica e climática.⁷⁵

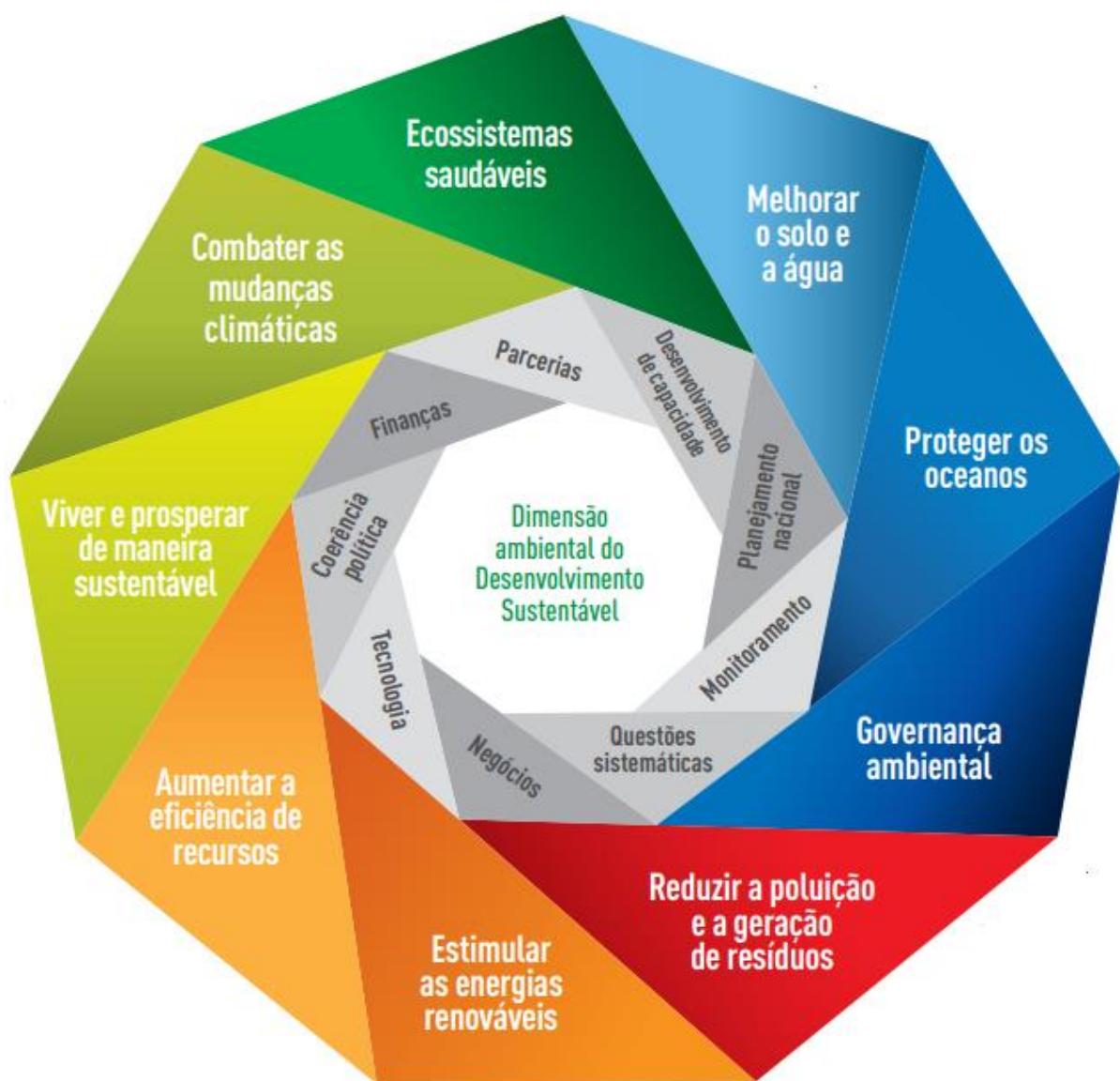
É possível constatar também, que modelos agroecológicos promovem o aumento de oportunidades de emprego no espaço rural, tanto para mão de obra operária quanto técnica, tornando-se um fator promotor da fixação da população no meio rural e êxodo urbano.

Assim, enxerga-se na agrobiotecnologia potencial para extrair as informações sobre a Natureza. Tais informações são necessárias para construção de uma percepção humana mais fiel do funcionamento da Natureza, contribuindo com inovações sustentáveis, capazes de otimizar a eficiência emergética para atingir a máxima potência de *output* em sistemas biológicos.

Por tanto, os estudos e considerações de Gliessman, Odum, Bacic, Altieri e Ortega, são a base para se definir modelos matemáticos que permitam gerenciar a sustentabilidade da Ecosfera e dos diferentes subsistemas (naturais ou antropogênicos), sua melhoria contínua e as contas econômicas como um todo.

Entretanto, as imposições para o desenvolvimento sustentável condicionam a uma abordagem ampla e complexa, constituindo uma dificuldade para tratar o todo. Desta forma, faz-se necessário tratá-lo por partes, mantendo-se a visão holística. Assim, para a dimensão ecológica (ambiental) do desenvolvimento sustentável deve se basear nas considerações levantadas pela ONU meio ambiente no Brasil (2019) (Figura 27).¹⁵

Figura 27 – Dimensão ambiental do desenvolvimento sustentável.



Fonte: ONU Meio Ambiente no Brasil, 2017/2019.⁹⁹

Para atingir o objetivo de produzir 40% de alimentos para humanidade até 2050 e promover a adaptabilidade às mudanças climáticas, a agricultura brasileira deve ser redesenhada sob os preceitos da agroecologia (portanto, da sustentabilidade) e fazer uso das inovações tecnológicas desenvolvidas através das informações presentes na própria Natureza. Entretanto, deve-se considerar a limitação dos recursos e os mecanismos de autorregulação do sistema,⁷⁶ o que significa admitir que, apesar os esforços mundiais, não será possível suportar o aumento exponencial da população. É preciso reconhecer, através da história da humanidade e da agricultura, que os pulsos de consumo que ocorreram durante os milênios, promoveram fome, mazelas sociais, enfermidades e outros mecanismos de controle populacional,²⁶ que por sua vez, assemelham-se ao episódio da pandemia pela Covid-19.

Conclui-se que a limitação dos recursos, o aumento populacional e as alterações climáticas são elementos chaves para compreender como a espécie humana pode agir no sentido de mitigar os impactos decorrentes das características de sistemas abertos, não de forma a controlá-los, mas administrá-los.

Neste sentido, recomenda-se a utilização dos sistemas pré-definidos e a leitura das obras de Howard T. Odum, para o estudo de ecologia, economia da Natureza e metodologia emergética; Stephen R. Gliessman, para o estudo da agricultura sustentável e transição agroecológica; William J. Mitsch, para o estudo da engenharia ecológica; Manuel G. Mollina para o estudo de escalonamento de modelos agrossustentáveis.

Espera-se que a padronização da métrica utilizada para os diferentes sistemas (sobretudo o econômico e ecológico) auxilie na construção dos indicadores dos ODS, contabilizando contribuições que aparecam ser subjetivas, como a exploração turística dos ecossistemas. Contudo, as dificuldades em quantificar e desenvolver tais indicadores não foi totalmente explorada neste estudo, portanto, faz-se necessário um estudo em profundidade da metodologia emergética e dos indicadores dos ODS.

Bacic⁷⁵ e colaboradores (2020), sugerem estudos para desenvolver mais os conceitos de externalidades negativas, especialmente aquelas relacionadas com as alterações climáticas. Também, incluir as externalidades positivas, entre elas:

- a) verificar como recuperar a capacidade de planejamento e gestão, local e regional e, como fixar pessoas no meio rural;
- b) estudar como preservar os ecossistemas e os serviços ecossistêmicos;
- c) desenhar e implantar sistemas integrados agrícolas, pecuários e florestais com autossuficiência alimentar, energética e em recursos renováveis;
- d) estudar os meios para desenvolver uma cultura que se apoie nos recursos e valores locais de forma a recuperar a resiliência natural e social, descentralizando serviços públicos (saúde, educação etc.) para empoderar as localidades;
- e) estudar como introduzir o *Global Reporting Initiative* nas atividades agrícolas;
- f) estudar os sistemas industriais para que evidenciem seu grau de sustentabilidade mostrando suas interações com a biosfera e os ecossistemas;
- g) estudar como calcular o grau de sustentabilidade de uma atividade observando a cadeia produtiva completa, desde a extração de insumos básicos até a devolução dos recursos utilizados, em boas condições, ao meio ambiente. (CAVALETT E ORTEGA, 2009, apud Bacic, et al., 2020, p. 30)⁷⁵

Por fim, acrescenta-se a esta lista a) a necessidade de projetar novos produtos que sejam desenhados para retornar à cadeia produtiva, na forma de retroalimentação do sistema; b) a necessidade de inovar em processos bioquímicos para tratar o lixo gerado por projetos de produtos não ecológicos; c) estudar a aplicação de biotecnologias no projeto de novos materiais; d) estudar aplicações biotecnológicas para recuperação da qualidade da água, do solo e do ar.

Conclui-se também que a atual dicotomia entre economia e Natureza, nunca existiu, foi criada ao decorrer do desenvolvimento humano,¹⁰⁰ que agora é capaz de compreendê-la. Pode-se dizer que, o projeto de um fluxo de valor autossustentável está implícito nas ideias de Odum e a sutileza dessa compreensão pode permitir a espécie de organismo superior mais abundante do Planeta restaurar a homeostase do sistema (através de sua capacidade auto-organização).

6 REFERÊNCIAS

- 1 Racionais MC's. **A vida é desafio**. São Paulo, Cosa Nostra Fonográfica, 2002. Faixa 10, 1CD ROM (107 min).
- 2 KOUTANTOS, D. **Palavras que cheiram mar 2**: Etimologia de mais de 1000 palavras gregas usadas em português. [online]: [20--]. 163 p. Disponível em: <https://www.eduportal.gr/wp-content/uploads/2011/02/www.eduportal.gr_media_files_legeis_2.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2021.
- 3 *FOOR AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATION (Roma). Commission on genetic resources for food and agriculture. The state of the world's biodiversity for food and agriculture*. [online]: UN, 2019. 576 p. Disponível em:
- 4 GIRARDI, G. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. São Paulo: EMBRAPA e Unicamp, 2008, 82 p.
- 5 NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **GISS surface temperature analysis**. Estados Unidos: NASA, 2021. Disponível em: <<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>>. Acesso em 27 fev. 2021.
- 6 BENTON, T. G.; BIEG, C.; HARWATT, H.; PUDASAINI, R.; WELLESLEY, L. **Food system impacts on biodiversity loss**. [online]: Chatham House, fev, 2021. Disponível em: <[2021-02-03-food-system-biodiversity-loss-benton-et-al.pdf](https://www.chathamhouse.org/sites/www.chathamhouse.org/files/documents/2021-02/03-food-system-biodiversity-loss-benton-et-al.pdf) (chathamhouse.org)>. Acesso em: 23 mar. 2021
- 7 ARTIGIANI, H. L. **Crédito de carbono como meio de funding para empreendimentos de infraestrutura no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- 8 BARROS, E. V. A matriz energética mundial e a competitividade das nações: bases de uma nova geopolítica. **Engevista**, v.9, n.1, p. 47-6, jun, 2007.
- 9 CLIMATE WATCH. **Global historical emissions**. [online]: 2017. Disponível em: <[World | Total including LUCF | Greenhouse Gas \(GHG\) Emissions | Climate Watch \(climatewatchdata.org\)](https://climatewatchdata.org/)>. Acesso em: 7 fev. 2021.
- 10 PIVETTA, M. Amazônia, agora, é fonte de CO₂. **Revista Fapesp**, edição 287, p. 48-51, jan, 2020. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/amazonia-agora-e-fonte-de-co2/>>. Acesso em: 13 abr. 2021.
- 11 SER tão velho Cerrado. Direção: André D'Elia. Produção: Cinedelia. Roteiro: André D'Elia e Júlia Saleh. Intérpretes: Juliano Cazarré e Valéria Pontes. Produtora: Cinedelia. Brasil, 2018, 96 min.
- 12 MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA, Brasil). **Redução do desmatamento**. [online]: MMA, Brasil, 2016. Disponível em: <<http://redd.mma.gov.br/pt/component/k2/item/206-reducao-do-desmatamento>>. Acesso em: 10 mai. 2021.

- 13 MOLINA, M. G. *Strategies for scaling up agroecological experiences in the European Union*. ***International journal of agriculture and natural resources***, v. 47, n. 3, p. 188-203, set/dez, 2020. DOI: 10.7764/ijanr.v47i3.2257.
- 14 PORTAL REVISTA SAFRA. Brasil deve produzir 40% a mais de alimentos de origem animal até 2050. **Revista Safra**, [online]: out. 2018. Disponível em: <<http://revistasafra.com.br/31224-2/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- 15 MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA, Brasil); EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **VISÃO 2030**: O futuro da agricultura brasileira. Brasília, DF: MAPA/EMBRAPA, 2018. 213 p. Disponível em: <https://www.EMBRAPA.br/documents/10180/9543845/Vis%C3%A3o+2030+-+o+futuro+da+agricultura+brasileira/2a9a0f27-0ead-991a-8cbf-af8e89d62829>. Acesso em 04 jun. 2020.
- 16 WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). ***Our common future***. Noruega, Brundtland, 1987. 300 p.
- 17 MOLINA, M. G. *Algumas notas sobre agroecología y política*. **Agroecología**, v. 6, p. 9-21, 2012.
- 18 ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Declaração de Estocolmo sobre o meio ambiente humano – 1972**. Estocolmo, 1972. Disponível em: <<http://www.direitoshumanos.usp.br/index.php/Meio-Ambiente/declaracao-de-estocolmo-sobre-o-ambiente-humano.html>>. Acesso em: 8 mai. 2021.
- 19 MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA, Brasil). Secretaria de Biodiversidade e Florestas. **Convenção sobre a Diversidade Biológica**. Brasil, DF, 2000.
- 20 ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Protocolo de Quioto à Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Japão, 1997. Disponível em: <<http://www.direitoshumanos.usp.br/index.php/Meio-Ambiente/protocolo-de-quioto-a-convencao-quadro-das-nacoes-unidas-sobre-mudanca-do-clima.html>>. Acesso em: 23 fev. 2021.
- 21 ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Protocolo de Cartagena**, 2000. Disponível em: <<http://www.direitoshumanos.usp.br/index.php/Meio-Ambiente/protocolo-de-cartagena-sobre-biosseguranca.html>>. Acesso 23 fev. 2021.
- 22 SECRETARIADO DA CONVENÇÃO SOBRE DIVERSIDADE BIOLÓGICA; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA, Brasil). **Protocolo de Nagoia sobre acesso a recursos genéticos e repartição justa e equitativa dos benefícios derivados de sua utilização à Convenção sobre Diversidade Biológica**. Brasília, MMA, 2014. 42 p. ISBN 978-85-7738-190-6.
- 23 NACIONES UNIDAS. **Convención Marco sobre el Cambio Climático**. Paris, nov/dez, 2015. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/I09s.pdf>>. Acesso em: 8 mai. 2021.
- 24 PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO; INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Plataforma agenda 2030**. Disponível em: <<http://www.agenda2030.com.br>>. Acesso em: 8 mai. 2021.

- 25 MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA, Brasil). **Agenda 21**. Brasil: MMA, 1992. 391p.
- 26 MAZOYER, M; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo**. Do neolítico à crise contemporânea. São Paulo: Editora UNESP. Brasília, DF: NEAD, 2010, 568 p.
- 27 INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Biomas e sistemas costeiro-marinho do Brasil**. IBGE, Rio de Janeiro, 2019, 161 p. ISBN: 978-85-240-4510-3. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101676.pdf>> Acesso em: 16 mar. 2021.
- 28 ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS; FUNDAÇÃO DE AMPARO A PESQUISA MINAS GERAIS (FAPEMIG). **Biomas e agricultura: oportunidades e desafios**. Rio de Janeiro: Vertente edições, 2019. 304 p. SBN 978-85-63100-15-3.
- 29 INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Contas econômicas ambientais**: Espécies ameaçadas de extinção no Brasil. [online]: IBGE, 2014. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101754_folder.pdf> Acesso em: 20 mar. 2021.
- 30 INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Mapa: **Distribuição da soja nos compartimentos de relevo**. Brasil, 2017, escala: 1:15.000.000. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/atlasrural/#/mapa/>>. Acesso em: 15 mai. 2021.
- 31 MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA, Brasil); EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Bioma Cerrado, solo**. [online]: Agência de Informação EMBRAPA. https://www.agencia.cnptia.EMBRAPA.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_14_911200_585231.html
- 32 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Tolerância ao alumínio em plantas**. EMBRAPA, [online], 2009. 30 p. ISSN: 1982-5390.
- 33 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Avaliação de espécies do Cerrado quanto a tolerância ao alumínio**. EMBRAPA recursos genéticos e biotecnologia, Brasília, DF, 2019. 24 p. ISSN: 0102-0110.
- 34 SILVA, M. R. S. S. **Diversidade de comunidades bacterianas de solo de Cerrado em resposta a diferentes alterações dos ecossistemas**. 2012. 140 p. Dissertação. (Doutorado em Ecologia) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.
- 35 CARVALHO, V. G. **Comunidade de fungos em solos do Cerrado sob vegetação nativa e sob cultivo de soja e algodão**. 2008. 70 p. Dissertação. (Mestrado em Microbiologia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.
- 36 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **História da soja**. EMBRAPA Soja, [online]. Disponível em: <[História - Portal Embrapa](#)>. Acesso em: 2 jul. 2021.

biomas brasileiros, 2000-2018. [online]: set., 2020. Disponível em:<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/f6d20139b026221d56adf14877761442.pdf>. Acesso em: 22 mar 2021.

49 SILVA, J. S. A biotecnologia e a economia política de sua definição. **Cadernos de difusão de tecnologia**. 7(1/3):99-112, jan./dez., 1990.

50 ODUM, E. P. **Fundamentos de ecologia**. 6^aed. Fundação Calouste Gulbenkian: Lisboa, [2001], 825 p.

51 ALBRECHT, L. P.; MISSIO, R. F. **Manejo de cultivos transgênicos**. Palotina, Universidade Federal do Paraná, 2013. 139 p. Disponível em: <<http://www.pag.uem.br/2018/Livro%20Paiola.pdf>>. Acesso em: 19 fev. 2021.

52 BENTHIEN, P. F. As sementes transgênicas no Brasil: da proibição à liberação. **Revista Vernáculo**. n. 8-9-10, p. 61-76, 2003. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/vernaculo/article/download/18472/12019>>. Acesso em: 03 jun. 2020.

53 CONSELHO DE INFORMAÇÕES SOBRE BIOTECNOLOGIA; AGROCONSULT. **Vinte anos de transgênicos**: benefícios ambientais, econômicos e sociais no Brasil. [S.I.]: CIB; [S.I.]: Agroconsult, 2018. Disponível em: <<https://apps.agr.br/wp-content/uploads/2018/11/2018-09-03-Vinte-anos-resumo-executivo-web.pdf>>. Acesso em: 03 jun. 2020.

54 FALEIRO, F. G.; ANDRADE, S. R. M. (ed.). **Biotecnologia, Transgênicos e Biossegurança**. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrados, 2009. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.EMBRAPA.br/bitstream/doc/571813/1/faleiro02.pdf>>. Acesso em: 03 jun. 2020.

55 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **NASA confirma dados da EMBRAPA sobre área plantada no Brasil**. Notícias EMBRAPA, [online]: dez., 2017.

56 PRESSINOTT, F. Cultiv52o de transgênicos no Brasil deve crescer 2,6 na safra 2019/20. **Valor Econômico**. São Paulo, 19 set. 2019. Disponível em: <<https://valor.globo.com/agronegocios/noticia/2019/11/19/cultivo-de-transgenicos-no-brasil-deve-crescer-26percent-na-safra-201920.ghtml>>. Acesso em: 03 jun. 2020.

57 COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB, Brasil). **Acompanhamento da safra brasileira**: Grãos. Brasília: Conab, 2019. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 03 jun. 2020.

58 ABRAHÃO, O. S.; **Rastreabilidade de soja Roundup Ready em produtos agrícolas e derivados**: produção de materiais de referência e uso de marcadores AFLP. 2008. Dissertação (Doutorado em Ciências) – Centro de Engenharia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008. DOI: 10.11606/T.64.2008.tde-12092008-094829. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64133/tde-12092008-094829/pt-br.php>>. Acesso em: 03 jun. 2020.

- 59 MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA, Brasil); EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Milho Bt**: Teoria e prática da produção de plantas transgênicas resistentes a insetos-pragas. Sete Lagoas, Minas Gerais: MAPA/EMBRAPA, 2009. ISSN: 0100-9915. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.EMBRAPA.br/digital/bitstream/CNPMS-2010/22708/1/Circ-135.pdf> Acesso em: 15 jun. 2020.
- 60 PETRUCCI, F. **Algodão transgênico na agricultura**: Benefícios e controvérsias. Trabalho de conclusão de curso – Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas, 2011. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?down=000852580>. Acesso em: 15 jun. 2020.
- 61 MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÃO (MCTI, Brasil). Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio). **Resumo geral de plantas geneticamente modificadas aprovadas para comercialização**. Brasília, DF: CTNBio, [2020]. 17 p. Disponível em: <<http://ctnbio.mctic.gov.br/documents/566529/1684467/Tabela+de+Plantas+Aprovadas+para+Comercializa%C3%A7%C3%A3o/e3087f9c-c719-476e-a9bd-bfe75def842f>> Acesso em: 19 fev. 2021.
- 62 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Melhoramento genético de cafeeiros voltado para a mitigação dos impactos causados pelas mudanças climáticas - Portal EMBRAPA. EMBRAPA Rondônia, [online]: 2021.
- 63 CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL (CNA). **Seminário produção on farm de Bioinsumos: eficiência, segurança e regulamentação**. CNA, [online]: 17 nov. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=qPiKQ_UgVWI> Acesso em: 25 mar. 2021.
- 64 DALL'AGNOL, A.; NOGUEIRA, M. A. **Bioinsumos: a terceira onda da agricultura brasileira**. Canal rural, [online]: jul. 2020. Disponível em: <[Bioinsumos: a terceira onda da agricultura brasileira \(canalrural.com.br\)](http://www.canalrural.com.br/Bioinsumos-a-terceira-onda-da-agricultura-brasileira)> Acesso em: 16 abr. 2021.
- 65 LIMA, R. C. A.; HARFUCH, L.; PALAURO, G. R. **Plano ABC**: Evidências do período 2010-2020 e propostas para uma nova fase 2021-2030. Agroicone e INPUT, [online]: out. 2020. Disponível em: [Agroicone-Estudo-Plano-ABC-2020.pdf \(inputbrasil.org\)](http://www.inputbrasil.org/Agroicone-Estudo-Plano-ABC-2020.pdf).
- 66 WEZEL, A.; BELLON, B.; DORÉ, T. FRANCIS, C.; VALLOD, D.; DAVID, C. *Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. Agronomy for sustainable development*. [S. l.]: jan., 2009. DOI: 10.1051/agro/2009004.
- 67 PESEK, J. et al. **Alternative Agriculture**. National Academy of Sciences: Washington, D.C., 1989. 464 p. ISBN 978-0-309-03985-7 | DOI 10.17226/1208
- 68 SILICI, L. *Agroecology What it is and what it has to offer. International Institute for Environment and Development, IIED Issue Paper*. IIED, London, jun., 2014. 28p. ISBN: 978-1-78431-065-3.
- 69 REINIGER, L. R. S.; WIZNIEWSKY, J. G., KAUFFMANN, M. P. **Princípios de agroecologia**. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). 1ª edição, UAB, NTE,

UFSM. Santa Maria, RS, 2017. 90 p. ISBN: 978-85-8341-192-5. Disponível em: <https://nte.ufsm.br/images/identidade_visual/PrincipiosAgroecologia.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2021.

70 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Marco referencial em agroecologia. EMBRAPA informação tecnológica, Brasília, 2006. 70 p. ISBN 85-7383-364-5. Disponível em: <[> Acesso em: 2 jul. 2021.](http://MARCO_referencial_em_agroecologia.(embrapa.br))

71 CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia e extensão rural:** Contribuições para a promoção do desenvolvimento rural sustentável. Porto Alegre, RS, 2004. 166 p. Disponível em: http://www.emater.tche.br/site/arquivos_pdf/teses/agroecologia%20e%20extensao%20rural%20contribuicoes%20para%20a%20promocao%20de%20desenvolvimento%20rural%20sustentavel.pdf

72 FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OR THE UNITED NATIONS. **Sustainable Food and Agriculture.** Elsevier, 2019. 585 p. ISBN: 978-0-12-812134-4. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/book/9780128121344/sustainable-food-and-agriculture>> Acesso em: 18 fev. 2021.

73 GLIESSMAN, S. R. **Agroecología:** Processos ecológicos em agricultura sostenible. LITOCAT: Costa Rica, 2002, 359 p. ISBN 9977-57-385-9.

74 MISTSCH, W. J. *Ecological engineering. A cooperative role with the planetary life-support system.* **Environment, Science and Technology**, v. 27, n. 3, p.438-446, 1993.

75 BACIC, M. J.; ORTEGA, E. FERRAZ-GUSMAN, J. M.; SANTOS, A. B. G. F. *Contabilidad ambiental incorporando análisis emergético y externalidades: aplicación en la producción de soja.* **Revista do instituto internacional de custos.** [online]: p. 8-45, dez, 2020. Disponível em: <<https://intercostos.org/ojs/index.php/riic/article/view/11>>. Acesso em : 10 mai. 2021.

76 ODUM, H. T. *Self-organization, transformity, and information.* **Science**, v. 242, p. 32-39, nov. 1988. DOI: 10.1126/science.242.4882.1132.

77 ODUM, H. T.; PINKERTON, R. C. *Time's speed regulator: The optimum efficiency for maximum power output in physical and biological systems.* **American Scientist**, v. 43, n. 2, p. 331-343, abr. 1955.

78 MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA, Brasil). **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura:** Plano ABC (Agricultura de baixa emissão de carbono). MAPA, Brasília, DF: 2012. 173p. ISBN 978-85-7991-062-0.

79 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Interações biofísicas em sistemas integrados de produção ILPF e ILP em Rondônia.** EMBRAPA Rondônia, [online]: 2017. Disponível em: <Interacoes_biofisicas_em_sistemas_integrados_de_producao_ILPF_e_ILP_em_Rondonia - Portal EMBRAPA>. Acesso em: 25 mar. 2021.

80 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). [Componentes bióticos e abióticos e suas interações em Sistemas Integrados \(ILP e ILPF\) na região do Cerrado - Portal EMBRAPA](#). EMBRAPA Agropecuária Oeste, [online]: 2018. Acesso em: 25 mar. 2021.

81 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). [O sistema ILPF como uma estratégia de desenvolvimento local no estado de Mato Grosso - Portal EMBRAPA](#). EMBRAPA Agrossilvipastoril, [online]: 2015. Acesso em: 25 mar. 2021.

82 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). [Ferramentas para implementação de sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta \(ILPF\) - Portal EMBRAPA](#). EMBRAPA Gado de Corte, [online]: 2012. Acesso em: 25 mar. 2021.

83 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). [Capacitação continuada de técnicos multiplicadores de tecnologias de integração lavoura-pecuária-floresta \(ILPF\) - Portal EMBRAPA](#). EMBRAPA Pesca e Aquicultura, [online]: 2016. Acesso em: 25 mar. 2021.

84 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Integração lavoura-pecuária-floresta.** EMBRAPA, [online]: [201-]. Disponível em:<[Sobre o tema - Portal EMBRAPA](#)>. Acesso em: 10 mar. 2021.

85 BRASIL. Instrução normativa N° 38, de 2 de agosto de 2011. Estabelece o regulamento técnico para a produção de sementes e mudas em sistemas orgânicos de produção. **Gabinete do Ministro.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, [online]: 2011. Disponível em: <[Instrução Normativa N° 38 de 02 de Agosto de 2011 \(Sementes e Mudas Orgânicas\).pdf — Português \(Brasil\) \(www.gov.br\)](#)>. Acesso em: 2 jun. 2021.

86 BRASIL. Instrução normativa N° 46, de 6 de outubro de 2011. Estabelece o regulamento técnico para os sistemas orgânicos de produção, bem como as listas de substâncias e práticas permitidas para uso nos sistemas orgânicos de produção. **Gabinete do Ministro.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, [online]: 2011. Disponível em: <[Instrução Normativa N° 46 de 06 de Outubro de 2011 \(Produção vegetal e animal\) - Regulada pela IN 17-2014\).pdf — Português \(Brasil\) \(www.gov.br\)](#)>. Acesso em: 2 jun. 2021.

87 BRASIL. Instrução normativa N° 18, de 20 de junho de 2014. Institui o selo único oficial do Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade Orgânica, e estabelece os requisitos para a sua utilização. **Gabinete do Ministro.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, [online]: 2011. Disponível em: <[Instrução Normativa N° 18 de 20 de Junho de 2014 \(Selos Federais do SisOrg\).pdf — Português \(Brasil\) \(www.gov.br\)](#)>. Acesso em: 2 jun. 2021.

88 BRITO, D. Em 7 anos, triplica o número de orgânicos cadastrados no Ministério da Agricultura e Pecuária. **Brasil agroecologia**, [online]: [2019]. Disponível em: <<http://www.agroecologia.gov.br/noticia/em-7-anos-triplica-o-n%C3%A3mero-de-produtores-org%C3%A2nicos-cadastrados-no-minist%C3%A3rio-da-agricultura>>. Acesso em: 2 jun. 2021.

89 TOOG, R. Gente do campo: o agricultor que consegue produzir soja orgânica em grandes quantidades. **G1**, [online]: set. 2020. <[Gente do campo: o agricultor que consegue produzir soja orgânica em grandes quantidades | Agro a indústria-riqueza do Brasil | G1 \(globo.com\)](https://agro.g1.globo.com/agro/a-industria-riqueza-do-brasil/gente-do-campo-o-agricultor-que-consegue-produzir-soja-orgânica-em-grandes-quantidades/)>. Acesso em: 3 mai. 2021.

90 BAY, S. K.; DONG, X.; BRADLEY, J. A.; LEUNG, P. M.; et al. *Trace gas oxidizers are widespread and active members of soil microbial communities*. **Nature microbiology**, v. 6, p.246-256, fev. 2021.

91 SALAS-GONZÁLEZ, I.; REYT, G.; FLIS, P.; CUSTÓDIO, V.; GOPAULCHAN, D.; et al. *Coordination between microbiota and root endodermis supports plant mineral nutrient homeostasis*. **Science**, v. 371, jan. 2021.

92 MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA, Brasil); EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Processos e mecanismos envolvidos na influência de microrganismos sobre o crescimento vegetal**. EMBRAPA Agrobiologia, Seropédica, 2003. 40p.

93 GRUPO ASSOCIADO DE AGRICULTURA SUSTENTÁVEL (GAAS); ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE SOJA (APROSOJA BRASIL); ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE ALGODÃO (ABRAPA); CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL (CNA). **Comunicado à sociedade e ao mercado**. [online]: dez, 2020. Disponível em: [Comunicado - Bioinsumos - assinatura - V2 \(1\).pdf \(abrapa.com.br\)](https://www.abrapa.com.br/comunicado-bioinsumos-assinatura-v2.pdf). Acesso em: 20 abr. 2021.

94 ALTIERI, M. A. *The ecological impacts of transgenic crops on agroecosystem health*. **Ecosystem health**, v. 6, n. 1, p.13-24, mar. 2000.

95 99 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Soja - BRS 284 - Portal EMBRAPA**. EMBRAPA Soja, [online]: 2009.

96 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Novas tecnologias para melhorar o desempenho no campo com redução do impacto ambiental**. Governo do Brasil Notícias, abr. 2021. Disponível em: <[Novas tecnologias para melhorar o desempenho no campo com redução do impacto ambiental — Português \(Brasil\) \(www.gov.br\)](https://www.gov.br/noticias/2021/04/novas-tecnologias-para-melhorar-o-desempenho-no-campo-com-reducao-do-impacto-ambiental---portugues-brasil)>. Acesso em: 25 mai. 2021.

97 ROSA, L.; RULLI, M. C.; ALI, S.; CHIARELLI, D. D.; et al. *Energy implications of the 21st century agrarian transition*. **Nature communications**, v. 12, n. 2319, 9 p., abr. 2021.

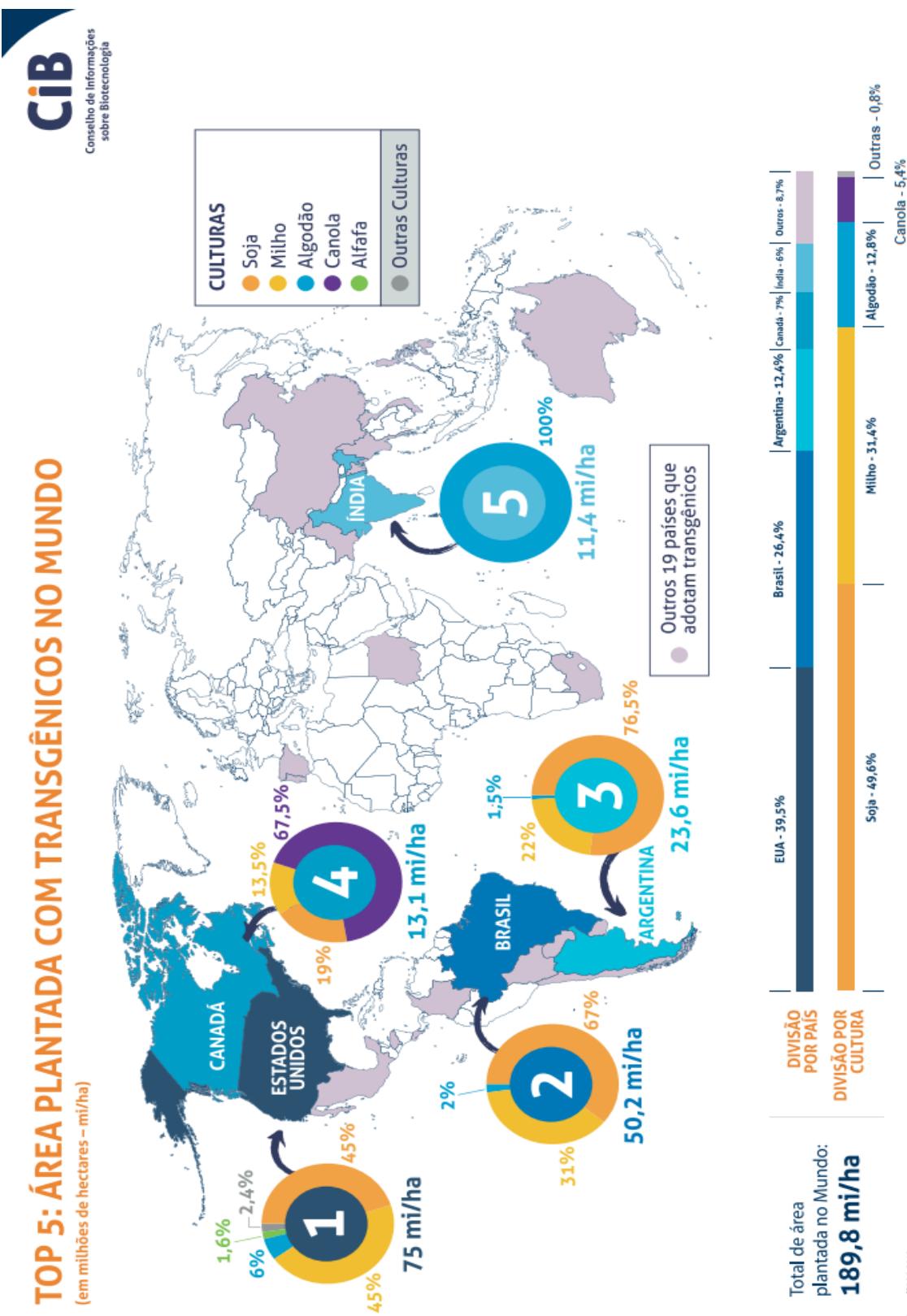
98 MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA, Brasil). **Programa Nacional de Bioinsumos é lançado e vai impulsionar o uso de recursos biológicos na agropecuária**. MAPA, [online]: 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/programa-nacional-de-bioinsumos-e-lancado-e-vai-impulsionar-uso-de-recursos-biologicos-na-agropecuaria-brasileira>>. Acesso em: 18 abr. 2021.

99 PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. **Organização das nações unidas meio ambiente no Brasil 2017–2018**. ONU Meio Ambiente, jan., 2019. 84 p.

100 LUTZENBERGER, J. A. **Manifesto ecológico brasileiro.** Fim do futuro? Editora Movimento, Porto Alegre, 1980. 98 p.

101 ODUM, H. T. Environmental accounting. Emergy and environmental decision making. John Wiley & Sons, INC, New York, 1996. 370 p.

ANEXO A



ANEXO B

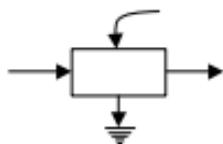
Símbolos utilizados na confecção dos diagramas de emergia.



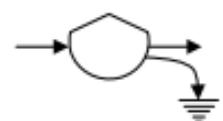
Fluxo de energia: um fluxo cuja vazão é proporcional ao volume do estoque ou à intensidade da fonte que o produz.



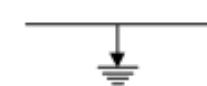
Fonte: um recurso externo que fornece energia de acordo com um programa controlado externamente (função força).



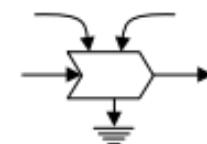
Caixa: símbolo de uso múltiplo que pode ser usado para representar uma unidade de consumo e produção dentro de um sistema maior, representando assim, um subsistema.



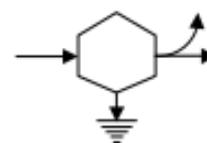
Depósito: uma reserva energética dentro do sistema, que guarda uma quantidade de energia de acordo com o balanço de entrada e saída (variáveis de estado).



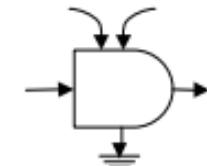
Sumidouro de energia: dispersão de energia potencial empregada no sistema. A energia potencial é utilizada para produzir trabalho e o custo dessa transformação é a degradação da energia, a qual abandona o sistema como energia de baixa intensidade. Todos os processos de interação e os armazenamentos dispensam energia.



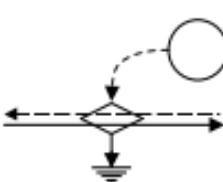
Interação: intersecção interativa de dois fluxos para produzir uma saída em proporção a uma função de ambos ou controle de ação de um fluxo sobre outro.



Consumidor: unidade que transforma a qualidade da energia, armazena e retroalimenta energia à etapa anterior (sistema autocatalítico) para melhorar o fluxo de energia que recebe.



Produtor: unidade que coleta e transforma energia de baixa qualidade (baixa intensidade) sob a ação de um fluxo de energia de alta qualidade.



Transação: uma unidade que indica a venda de bens ou serviços (linha contínua) em troca de um pagamento em dinheiro (linha tracejada). O preço é mostrado na figura como fonte de energia externa.

Fonte: Odum, 1996.¹⁰¹