

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE UnB PLANALTINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS -PPGCA**

**ADRIANA DE SOUZA CARNEIRO**

**IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL E**  
**AVALIAÇÃO DA DIVERSIDADE GENÉTICA DO PINHÃO-MANSO PARA USO**  
**NO BIODIESEL**

PLANALTINA, DF

Julho/2021

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE UnB PLANALTINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**ADRIANA DE SOUZA CARNEIRO**

**IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS E  
AVALIAÇÃO DA DIVERSIDADE GENÉTICA DO PINHÃO-MANSO PARA USO  
NO BIODIESEL**

Dissertação apresentada como requisito de obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais pelo programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Brasília (UnB).

Orientadora: Prof. Dra. Erina Vitório Rodrigues

PLANALTINA, DF

Julho/2021

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

dC289i de Souza Carneiro, Adriana  
IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS E  
AVALIAÇÃO DA DIVERSIDADE GENÉTICA DO PINHÃO-MANSO PARA USO  
NO BIODIESEL / Adriana de Souza Carneiro; orientador Erina  
Rodrigues. -- Brasília, 2021.  
100 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Ciências Ambientais)  
- Universidade de Brasília, 2021.

1. Jatropha curcas L.. 2. Energia renovável. 3.  
Diversidade genética. I. Rodrigues, Erina, orient. II.  
Título.

## AGRADECIMENTOS

Às instituições - Universidade de Brasília-UnB / Faculdade UnB Planaltina - FUP - UnB e Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA) pela parceria e oportunidade de realizar esta pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (PPGCA-UnB) e ao corpo docente do mesmo pelos conhecimentos oferecidos durante o curso, oportunidades de sanar dúvidas e a possibilidade de viver novas experiências as quais foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos integrantes do Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais e Limnológicas (NEPAL) que me acolheram de forma humana e me apresentaram o comprometimento com a pesquisa e companheirismo dentro e fora do laboratório. Em especial à Ana Carolina de Alcântara, Gleicon Queiroz, Johnny Murta, Leonardo Beserra, Leonardo Fernandes e Thallia Santana.

Aos colegas de turma do PPGCA do 1º/2019 pelas aflições e risadas compartilhados nesta caminhada da Pós-graduação, foi um imenso prazer dividir essa jornada com vocês, em especial Alex Nunes, Ana Clara Mendes, Fabiula Amorim, Fernanda Helena Leite, Iara Fernandes, Renata Rossato e Rodrigo Mayrink.

Aos meus companheiros de projeto Alex Gabriel Cajado, João Victor, Marina Brasileiro, Tayne Valadares, Wanessa Colli, e em especial às minhas queridas Ana Clara Comby e Eloísa Gomes que me acompanharam desde o início e tive a imensa alegria de compartilhar momentos incríveis no campo, na escrita e além de nos desesperamos juntas com os prazos para entrega dos trabalhos, vocês são pessoas admiráveis.

Agradeço ao Adriano Santos, que se disponibilizou a me ajudar com as análises dos dados, se dispôs pacientemente a me explicar o que significava cada uma e sanar minhas dúvidas. Agradeço também a Cíntia Guimarães que me auxiliou com a produção da dissertação.

À minha orientadora Erina Vitorio Rodrigues, deixo aqui minha imensurável admiração pelo exemplo de ser humano e profissional. São incontáveis as vezes que saímos do campo profissional e nos tornamos amigas, desabafamos e nos apoiamos em diversas áreas. Jamais esquecerei a sua disposição para me atender em horários totalmente atípicos como feriados e finais de semana, eu não conheço um profissional tão dedicado quanto você. Não há palavras que descrevam minha gratidão pelo apoio que me ofereceu antes mesmo de entrar na Pós-graduação, por me incentivar a não parar minha jornada acadêmica e ser esse exemplo de força, superação e resiliência.

## **Resumo**

O uso de energia aumentou após a revolução industrial, intensificando as questões ambientais inerentes à produção energética oriunda de combustíveis fósseis. O uso de bioenergia vem sendo considerada uma alternativa que pode mitigar os efeitos ambientais gerados nessa produção. No entanto, produzir biocombustíveis também geram impactos, e a depender do sistema de produção adotado, os mesmos podem neutralizar os efeitos positivos e até serem negativos, sendo necessário estudos de investigação dos impactos ambientais que podem ser gerados com o uso de culturas bioenergéticas. Isso posto, esta dissertação está estruturada em três partes: i) referencial bibliográfico, ii) capítulo 1 e iii) capítulo 2. O referencial bibliográfico consiste no panorama do uso de bioenergia, com foco nos biocombustíveis e, principalmente, o biodiesel, isso norteou a elaboração de dois capítulos. O capítulo 1 foi intitulado “Impacto ambiental da produção de biocombustíveis: uma revisão sistemática” e teve como objetivo investigar os impactos ambientais causados pela produção de biocombustíveis e identificar as principais categorias de impacto por meio da revisão sistemática. Foi utilizada a plataforma *Web of Science* para realizar a busca. Após a triagem de artigos, 191 corresponderam aos critérios de inclusão. A produção de bioenergia pode gerar impactos positivos e negativos no ambiente. O que irá determinar estes fatores são os processos adotados para realizar esta produção, e as políticas que influenciam diretamente nas tomadas de decisões. Os principais impactos ambientais encontrados nesta revisão sistemática são na água, solo, biodiversidade e emissões de GEE. A mudança no uso direto e indireto do solo é um dos mais significantes e interfere diretamente nas emissões de GEE e também nos estoques de carbono. O capítulo 2 traz um estudo pontual acerca do uso de pinhão-mansão para produção de biodiesel, objetivo foi avaliar a diversidade genética de 573 genótipos brasileiros de cinco famílias de pinhão-mansão. baseado nas características de produção, resistência à oídio e toxicidade, usando marcadores moleculares SNP's (Single-nucleotide polymorphism). Os resultados mostraram variabilidade genética moderada nos genótipos analisados. Recomenda-se que utilizem maior número de indivíduos por família nos programas de molhamento genético, afim de obter maiores ganhos na seleção.

**Palavras-chave:** *Jatropha curcas*; energia renovável; diversidade genética.

## **Abstract**

The use of energy increased after the industrial revolution, intensifying the environmental issues inherent to energy production from fossil fuels. The use of bioenergy has been considered an alternative that can mitigate the environmental effects generated in this production.

However, producing biofuels also generate impacts, and depending on the production system adopted, they can neutralize the positive effects and even be negative, requiring investigation studies of the environmental impacts that can be generated with the use of bioenergetics crops. That said, this dissertation is structured in three parts: i) bibliographic reference, ii) chapter 1 and iii) chapter 2. The bibliographic reference consists of the panorama of the use of bioenergy, focusing on biofuels and, mainly, biodiesel, this guided the elaboration of two chapters. Chapter 1 was entitled “Environmental impact of biofuel production: a systematic review” and aimed to investigate the environmental impacts caused by biofuel production and identify the main impact categories through the systematic review. The Web of Science platform was used to perform the search. After screening the articles, 191 matched the inclusion criteria. Bioenergy production can generate positive and negative impacts on the environment. What will determine these factors are the processes adopted to carry out this production, and the policies that directly influence decision-making. The main environmental impacts found in this systematic review are in the water, soil, biodiversity and GHG emissions. The change in direct and indirect land use is one of the most significant and directly interferes with GHG emissions and also with carbon stocks. Chapter 2 provides a specific study of the use of *Jatropha* for biodiesel production, whose objective was to evaluate the genetic diversity of 573 Brazilian genotypes of five families of *Jatropha* based on production characteristics, powdery mildew resistance and toxicity, using SNP's (Single-nucleotide polymorphism) molecular markers. The results showed a moderate genetic variability in the analyzed genotypes. It is recommended that a greater number of individuals per family be used in genetic wetting programs, in order to obtain greater gains in selection.

**Key-words:** *Jatropha curcas*; renewable energy; genetic diversity

## SUMÁRIO

### Sumário

LISTA DE FIGURAS .....	1
1. APRESENTAÇÃO GERAL .....	2
2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....	4
2.1 Bioenergia.....	4
2.2 Biocombustíveis.....	5
2.4 Pinhão-manso.....	13
2.5 Diversidade genética.....	17
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	19
Capítulo 1 .....	27
Impacto ambiental da produção de biocombustíveis: uma revisão sistemática .....	27
Resumo .....	28
Abstract.....	28
1. Introdução .....	29
2. Material e Métodos .....	30
3. Resultados.....	31
4. Discussão .....	40
5. Conclusão .....	46
Referências .....	47
Capítulo 2 .....	69
Genetic diversity and population structure in <i>Jatropha</i> based on molecular markers .....	69
Abstract.....	70
1. Introduction .....	70
2. Materials and methods.....	73
3. Results .....	76
4. Discussion.....	82
5. Conclusion.....	87
References .....	88

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Políticas do biodiesel no Brasil desde a implementação até as misturas utilizadas atualmente.....	10
Figura 2 Instalações de produção de biodiesel cadastrados na ANP. Os pontos azuis representam a instalação. São 50 instalações, concentradas principal no Mato Grosso e Rio Grande do Sul. Fonte: ANP, dados coletados em 05/06/2021.....	10
Figura 3. Produção de biodiesel por região no ano de 2020. Fonte: ANP, dados coletados em 06/06/2021.....	11
Figura 4. Produção de biodiesel no ano de 2020. Em azul está representado a capacidade autorizada para produção e em vermelho o que foi produzido. Fonte: ANP, dados coletados em 20/05/2020. Fonte: ANP, conforme Resolução ANP nº 729/2018 e Resolução ANP nº 734/2018.....	12
Figura 5. Fontes de matérias primas de biodiesel no ano de 2020 no Brasil. Fonte: ANP, conforme Resolução ANP nº 729/2018 e Resolução ANP nº 734/2018.....	13
Figura 6. Pinhão-manso em estações distintas do ano. A) Pinhão-manso em estações chuvosas com crescimento das folhas potencializado. B) Pinhão-manso em estações secas, evidenciando a propriedade caducifólia.....	14
Figura 7. Inflorescência de Pinhão-manso com flores femininas no centro e flores masculinas ao redor.....	15.
Figura 8. Fases de maturação do fruto de Pinhão-manso. A) Fruto de pinhão-manso verde. B) Fruto de pinhão-manso em fase de maturação, o mesmo apresenta uma cor amarelada. C) Exocarpo seco que se torna a casca do fruto adquirindo uma cor marrom. D) Semente pinhão-manso na coloração preta.....	16



## 1. APRESENTAÇÃO GERAL

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas estabelecem as orientações para a sociedade, dentre eles está a sustentabilidade que se perpetua pelo campo social, espacial, ambiental, político-institucional, econômico e cultural (BEZERRA; BURSZTYN, 2000), em que a responsabilidade das gerações atuais é garantir a sustentabilidade para as gerações futuras. A segurança energética é uma das metas da ODS fundamentais e faz parte dos direitos humanos. No entanto, está entre as mais desafiadoras, principalmente, devido à fonte energética mais utilizada, desde os anos 1800, é proveniente de recursos fósseis.

Após a revolução industrial no século XVIII, o uso de energia aumentou continuamente, sendo os combustíveis fósseis a fonte de energia exclusiva. Sendo esta o que levou ao aumento dos preços da mesma e impactou na exploração dos estoques de recursos fósseis. Estes emitem uma enorme quantidade de gases poluentes contribuindo para aumento do efeito estufa, desencadeando várias discussões quanto à poluição ambiental (ACHEAMPONG et al., 2017). Assim sendo, a mudança para um mix de energia renovável é inevitável e deve ser realizada de forma sustentável. Uma vez que essa transição constitui um desafio para a humanidade, pois é agravado pelo crescimento simultâneo da população mundial, o esgotamento das reservas fósseis e mudanças climáticas, além da urgência de implementar práticas sustentáveis que reduzam os impactos ambientais e que sejam economicamente viáveis (VERDADE; PIÑA; ROSALINO, 2015).

A produção de bioenergia foi apontada como uma possível alternativa, entretanto, é necessário cautela, pois esta também pode causar impactos ambientais, principalmente quando almeja expansão de cultivos (MARTINELLI; FILOSO, 2008). Desta forma, é necessário estudos detalhados de modelos de produção sustentáveis e economicamente viáveis. Há grande incentivo em uso de bioenergia, porém os estudos quanto aos impactos ambientais deste setor são escassos. Isso posto, ressalta-se a importância de investigação dos impactos ambientais que podem ser gerados com o uso de culturas bioenergéticas. Estas devem apresentar alta produtividade, cultivo mínimo do solo e não competir com o mercado alimentício (ACHEAMPONG et al., 2017; AHMED et al., 2021).

Isso posto, esta dissertação está estruturada em três partes: i) referencial bibliográfico, ii) capítulo 1 e iii) capítulo 2. O referencial bibliográfico consiste no panorama do uso de bioenergia, com foco nos biocombustíveis e, principalmente, o biodiesel, isso norteou a elaboração de dois capítulos. O capítulo 1 foi intitulado “Impacto ambiental da produção de

biocombustíveis: uma revisão sistemática” e teve como objetivo investigar os impactos ambientais causados pela produção matéria-prima vegetal para biocombustíveis e identificar as principais categorias de impacto por meio da revisão sistemática. O capítulo 2 traz um exemplo pontual acerca do uso de um matéria-prima potencial para produção de biodiesel, o pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.), com objetivo de avaliar a diversidade genética de 573 genótipos de tal espécie por meio do uso de marcadores moleculares.

## 2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

### 2.1 Bioenergia

A matriz energética mundial é predominantemente composta por fontes de energia não renováveis. No Brasil, a composição da oferta interna de energia, no último relatório do balanço energético nacional, foi de 46,1% proveniente de fontes de energia renovável (MME, 2020). Esse percentual vem aumentando nos últimos anos, sendo representado mundialmente por apenas de 14,2%. Isso reflete o quanto o Brasil avançou nesse setor e é considerado exemplo em utilização de energia renovável no mundo.

Diante do aumento do consumo de energia, da problemática ambiental devido ao uso de combustíveis fósseis, além do fator econômico, iniciou-se o incentivo para produção de bioenergia por apresentar vantagens na redução de emissão de poluentes e gases de efeito estufa (GEE), quando comparado às fontes não renováveis (MAFAKHERI; NASIRI, 2014) e mitigação dos efeitos nas mudanças climáticas (MCCOLLUM et al., 2018; RIAHI et al., 2015). Segundo o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) de 2011, o uso de sistemas de bioenergia eficientes que inclui cultivo de plantas perenes e uso de resíduos de biomassa são capazes de reduzir as emissões de GEE de 80 a 90%, bem como a poluição do ar e da água, uso da terra, além de garantir a conservação da biodiversidade e gerar emprego (EWING; MSANGI, 2009; MCCOLLUM et al., 2018; STOY et al., 2018).

Além disso, a produção de energia, de alimentos e de água estão correlacionados. Com isso passou a estudar o nexo *Food, Energy, Water* (FEW) que é a relação entre os três principais recursos utilizados pela humanidade: alimento, energia e água. Nessa relação, a produção ou utilização de um dos três recursos implica no consumo dos outros dois (ZHANG et al., 2019). O aumento populacional, urbanização e a expansão das grandes cidades contribuem para a intensificação dessa interdependência FEW que são sentidos em áreas distantes desses grandes centros. Dessa forma, a segurança energética interfere diretamente na disponibilidade hídrica, alimentar e também nas atividades econômicas repercutindo no desenvolvimento em todas as escalas: local, regional e global (ZHANG et al., 2016).

A bioenergia é uma forma essencial de energia renovável e é definida como energia derivada de qualquer forma de biomassa, que constitui em material de origem biológica que é fonte primária de alimentos, forragens, fibras e também de energia renovável (IPCC, 2011). É responsável por cerca de 60% da energia renovável da União Europeia (REUMERMAN et al.,

2020) e em países mais pobres o uso de madeira, palha, carvão vegetal e esterco são fontes de energia para desenvolver atividades cotidianas como iluminação, cozinhar e aquecer ambientes.

Mais de 80% das matérias-primas de bioenergias são provenientes da madeira como árvores, galhos, resíduos florestais e arbustos. Os outros 20% provém do setor agrícola como culturas energéticas, resíduos e coprodutos (reciclagem dos produtos da biomassa ou resíduos que podem ser orgânicos biogênico ou sólidos urbanos) que são usadas para fornecer energia elétrica, biocombustíveis e produzir carvão vegetal e biogás fornecendo aquecimento (IPCC, 2011).

Existem diversas fontes de biomassa sólidas que incluem resíduo de culturas agrícolas de cana-de-açúcar, palhas, pellets da indústria madeireira, resíduos de processamento de alimento, plantas aquáticas e algas (GUEDES et al., 2010). Já as biomassas líquidas compõem o grupo dos biocombustíveis, uma parte é utilizada para gerar eletricidade, mas a principal finalidade é no setor do transporte. Na categoria de biocombustíveis, vale mencionar o biodiesel que é gerado, principalmente, a partir de óleos vegetais e sebo bovino, além do etanol que pode ser gerado a partir de cana-de-açúcar, beterraba, milho e outros.

## **2.2 Biocombustíveis**

A produção de energia a partir de biocombustíveis apresenta várias vantagens, tais como, redução da dependência de importação de petróleo, o que possibilita equilíbrio da balança comercial, economia sustentável com desenvolvimento de baixo CO<sub>2</sub>, promove a segurança energética e desenvolvimento rural, possibilita o crescimento dos países em desenvolvimento, estabelecimento de novas indústrias e novas tecnologias e ampliação dos produtos oferecidos com a possibilidade de aproveitar os resíduos gerados agregando valor ao produto, além de geração de emprego e renda (DEMIRBAS, 2008; MÄKI et al., 2021). Ainda nesse contexto, os biocombustíveis possuem fontes de biomassa comuns que facilita sua obtenção, são biodegradáveis, e se a matéria-prima for culturas perenes, há ganho na biodiversidade do solo, apresentam maior densidade vegetal que aumenta a qualidade do solo, há aumento dos alimentos disponíveis para os animais, inclusive aqueles que são migratórios, reduz a mudança no uso da terra (HUMPENÖDER et al., 2018).

O relatório de mudanças do clima das Nações Unidas de 2014 considerou eliminar o uso de combustíveis fósseis até o ano de 2100, porém o Acordo de Paris em 2015 considerou essa medida radical e colocou como meta o saldo zero entre emissão e captura de CO<sub>2</sub> (ACHEAMPONG et al., 2017). Os estudos sobre mudanças climáticas realizado pelo IPCC

(2011) estima aumento de 2 °C na temperatura média global, considerando este cenário, a Agência Internacional de Energia (IEA) estima que a bioenergia será responsável pela redução de 20% das emissões de CO<sub>2</sub> até 2060 (IEA, 2017; REUMERMAN et al., 2020).

Diversas ações têm sido propostas visando mitigar os efeitos maléficos da produção de energia não renovável. A *European Green Deal* estabeleceu redução de 90% das emissões no setor do transporte até 2050. A Diretiva de Energia Renovável (RED) da União Europeia (UE) de 2018 estabeleceu o uso de biocombustíveis de 14% até 2030 e taxa de 5,75% de inserção do biocombustível no diesel até o ano de 2010, no ano de 2016 a porcentagem atingida foi de 5,1%. Para biocombustíveis provenientes de matéria-prima que apresentam risco elevado de *Indirect Land Use Change* (ILUC), deverão reduzir gradativamente visando chegar a zero até 2030, e priorizar as matérias-primas de baixo risco ILUC, como culturas perenes. Além de estabelecer programas para garantir a produção de biocombustível de forma sustentável como BioVerno da UPM, Certificação Internacional de Sustentabilidade e Carbono (ISCC EU), Certificação EU RED da Mesa Redonda sobre Biomateriais Sustentáveis (RSB) e Certificação Europeia Biochar (EBC) (DIRECTIVE EU, 2018; HELLMANN; VERBURG, 2010; IPCC, 2014; MÄKI et al., 2021; SCHMIDT, 2010; STREIMIKIENE; SIMIONESCU; BILAN, 2019).

Os Planos Nacionais de Energia e Clima (NECP) determinaram a utilização de biocombustíveis. Para atender ao NECP, a Finlândia estabeleceu como meta, até o ano de 2030, o uso de 51% de energia renovável, sendo 30% para biocombustíveis. Já na Suécia a meta era de 65% de energia renovável e para o setor dos transportes livre de carbono com o uso de biocombustível líquido (MÄKI et al., 2021). A Alemanha em 2000 publicou a Lei de Fonte de Energia Renovável e em 2011 a Ementa da Lei de Energias Renováveis com o objetivo de assegurar o uso de energia renovável (MUR, 2019). O Estados Unidos da América (EUA) publicou a Lei Americana de Energia Limpa e Segurança determinando a utilização de biocombustíveis misturados ao combustível não renovável (BLENGINI et al., 2011; CHERUBINI et al., 2015).

O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) estabelece o uso de biocombustíveis misturados ao combustível não renovável. Em 1975 o decreto Federal nº 76593 instituiu o Programa Nacional do Álcool – Proálcool (Brasil, 1975) cujo objetivo era implementar o etanol como aditivo de até 25% à gasolina e em 1979, passou a utilizar etanol puro. A matéria-prima utilizada foi a cana-de-açúcar e o incentivo desta produção ocorreu devido à primeira instabilidade na extração do petróleo em 1973 (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008). Em 1997 a Lei 9478 estabeleceu diretrizes para incorporar o

biocombustível na matriz energética brasileira. As principais matérias-primas utilizadas para produção de biocombustíveis são a cana-de-açúcar, para produção de etanol, e a soja para produção de biodiesel. Para atender essas metas, surgem programas de incentivo à produção de matéria-prima para biocombustível e uma vasta demanda de áreas para plantio. Associados a estes dois fatores, estão atrelados o uso dos recursos naturais para manter essa produção, por exemplo, o uso do solo e da água (VERDADE; PIÑA; ROSALINO, 2015).

Os estudos reportam as vantagens do uso da bioenergia, no entanto, em alguns casos, são desconsiderados outros fatores inerentes ao impacto ambiental gerado, constituindo uma lacuna na literatura. As expansões das terras agrícolas para produção de biocombustíveis refletem em aumento do desmatamento que causa emissões de dióxido de carbono, ameaça a biodiversidade, perda de estoques de carbono direto, aumento de temperatura e mudanças no padrão de precipitação (HUMPENÖDER et al., 2018; IPCC, 2011). Além disso, o uso do solo de forma direta e indireta (dLUC e iLUC) tem sido apontado como um dos principais impactos encontrados durante a prática de produção de bioenergia (VERDADE; PIÑA; ROSALINO, 2015). A depender do sistema de produção, pode reduzir ou até mesmo neutralizar os impactos positivos da mitigação de GEE (IPCC, 2011).

Outro fator que deve ser considerado é que, para atender a demanda de produção de bioenergia, será necessário o aumento da produção de matéria-prima, que será alcançado com a introdução de novas culturas e com o aumento da área de cultivo. Entretanto, com a projeção do crescimento populacional estimado em 9 bilhões para 2050 FAO (2014) acarretará na necessidade de aumento na produção de cereais para acompanhar a crescente demanda por alimentos, gerando um conflito pelo uso da terra entre a produção de bioenergia e o mercado alimentício, o que acarreta em conflitos de interesse entre as diferentes indústrias e o alto preço do produto final (GASPARATOS et al., 2018; GERBENS-LEENES; HOEKSTRA; VAN DER MEER, 2009; HELLMANN; VERBURG, 2010; HUMPENÖDER et al., 2018).

É necessário avaliar diversos parâmetros da segurança alimentar, pois varia com a escala espaço temporal. A produção de bioenergia pode ter efeitos positivos e negativos na produção alimentar. O preço alto é um dos parâmetros apresentados com maior vulnerabilidade para a segurança alimentar, devido à competição das matérias-primas de bioenergia e culturas de alimentos e ração, e os efeitos serão percebidos a longo prazo. Já ao considerar agricultura familiar, torna-se menos vulnerável, pois a produção de matérias-primas nesse contexto pode proporcionar a diversificação de renda dos agricultores familiares, tornando-se um efeito positivo. Além disso, a produção de biocombustíveis difere entre os países, e os efeitos serão

relacionados com as políticas, tecnologia, estrutura, fatores sociodemográficos e desenvolvimento de cada país com efeitos local, nacional e global (AHMED et al., 2021).

O grande desafio na produção de bioenergia, e em específico, biocombustível, é utilizar matéria-prima, culturas que não competem com o mercado alimentício. Como estratégia, vem se expandindo os biocombustíveis de segunda, terceira e quarta geração que não são utilizados na alimentação humana e amenizam esta competição (CORREA et al., 2019; GERBENS-LEENES; HOEKSTRA; VAN DER MEER, 2009; HELLMANN; VERBURG, 2010; HUMPENÖDER et al., 2018). Além disso, o ciclo da cultura é considerado, por exemplo, culturas perenes contribuem para a preservação da biodiversidade, favorecendo a sobrevivência de artrópodes e animais silvestres, permite uma previsão contínua dos serviços ecossistêmicos, além de reduzir os impactos causados pelo preparo do solo para o plantio, mitigação das mudanças climáticas (AHMED et al., 2021; VERDADE; PIÑA; ROSALINO, 2015).

Nesse contexto, considerando o alto potencial dos biocombustíveis na mitigação de emissão de gases poluentes, ainda há gargalos a serem investigados, principalmente, inerentes à sustentabilidade de cultivos agrícolas, tipo de matéria-prima empregado, demanda de recursos naturais. Todo e qualquer processo de geração de energia traz alguma categoria de impacto, o que deve ser investigado é o qual a intensidade do mesmo e como adotar estratégias de mitigar tais efeitos de modo a compensar a sua utilização. Para isso, é fundamental compreender a matriz energética de cada país e quais os modelos serão mais promissores a depender da disponibilidade de recursos.

### **2.3 Biodiesel**

O biodiesel é um combustível renovável produzido a partir de óleos vegetais de sementes oleaginosas e gorduras animais, que passam por um processo químico denominado transesterificação. Por meio desse processo, os triglicerídeos presentes nos óleos e gordura animal reagem com um álcool primário, metanol ou etanol, gerando dois produtos: biodiesel e a glicerina. Este biodiesel passa por processos de purificação para adequação à especificação da qualidade, sendo destinado principalmente à aplicação em motores de ignição por compressão conhecido como ciclo Diesel (ANP, 2020).

O consumo mundial anual de petróleo e a produção de óleo vegetal para biocombustível é de cerca de 4,018 e 0,107 bilhões de toneladas, respectivamente (DEMIRBAS, 2008). Os principais produtores de biodiesel são a EUA, Brasil e Alemanha. Outros países como a França, Espanha, Itália e Argentina, se destacam na produção mundial,

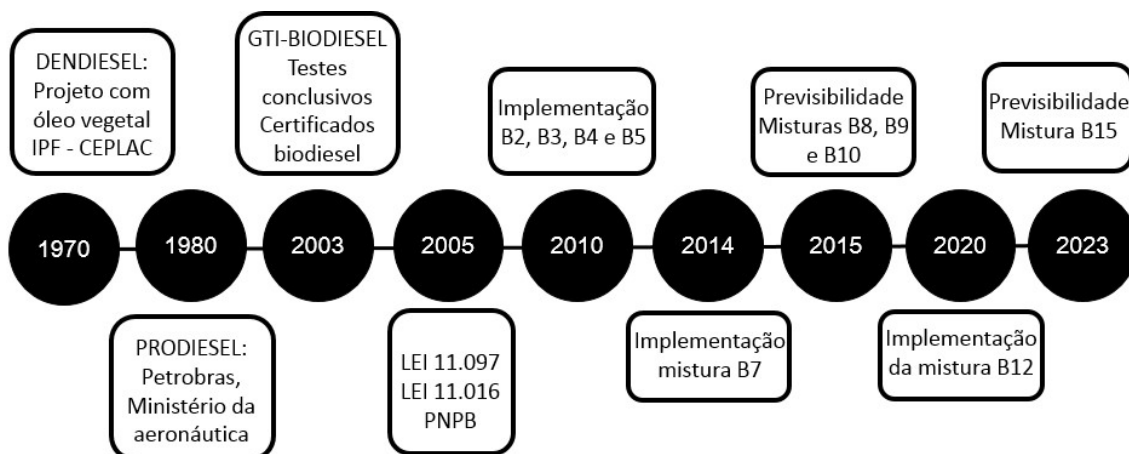
porém com menores taxas (MME, 2020; MUR, 2019). O custo de produção mais barato é na América latina com o óleo de palma, seguido pela Ásia com produção de canola, América do Norte com soja e União Europeia com canola. As principais produções de biodiesel são a partir do óleo de palma produzidos principalmente na Indonésia, Malásia e países da Ásia, canola produzidos na Alemanha, França e Reino Unido, seguido do óleo de pinhão-mansão na Índia e Sul da Ásia e os óleos vegetais em geral que são produzidos por 109 países.

Para atender as metas do Acordo de Paris de 2015, o Brasil estabeleceu leis e programas para incentivar a produção de biodiesel. O intuito desses programas possui também o enfoque social, por meio de isenções fiscais com o objetivo de incluir pequenos agricultores e promover o desenvolvimento rural. Atualmente a inserção do biodiesel na matriz energética é obrigatória por meio de leis.

Em 1970 foi lançado o Programa Dendiesel, porém o programa não progrediu. Em 1980 o Governo Federal lança o Programa Nacional de Produção de Óleo e Vegetais para Fins Energéticos (Proóleo) com debates sobre a viabilidade do uso de biodiesel, e em 2002 lançou o Programa Brasileiro de Biocombustível (Probiobiodiesel) (SILVA, 2013). Em 2003 foi criado o Grupo de Trabalho Interministerial (GTI) responsáveis por realizar estudos sobre a viabilidade do biodiesel e no ano seguinte (2004) foi criado o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) e em 2005 foi criada a lei 11.097, que insere o biodiesel na matriz energética brasileira, além disso criou ainda o Selo de Combustível Social, que incentiva os agricultores familiares a produzirem matérias primas para biodiesel, reduzindo a contribuição fiscal por meio do PIS/PASEP (SU; ZHANG; SU, 2015). O percentual da mistura de biodiesel no diesel iniciou com 2% da inserção de biodiesel (B2) no diesel até 2008, em 2010 tornou-se obrigatório a mistura de 5% (B5), em 2020 a mistura foi para 12% (B12), e pretende-se chegar à 15% no ano 2023 (Figura 1) (ANP, 2021; BRASIL, 2018).

Em 2017 foi criada a Lei 13.576 que institui o Programa RenovaBio, em 2019 foi criado a Associação de Produtores de Biocombustíveis do Brasil (APROBIO). Ambos têm o objetivo de atender às metas estabelecidas pelo Acordo de Paris, promover a expansão do uso de biocombustíveis na matriz energética brasileira e manter uma previsibilidade no mercado de combustível (MME, 2020).





Fonte: Adpatado de Mur, 2019

**Figura 1.** Políticas do biodiesel no Brasil desde a implementação até as misturas utilizadas atualmente.

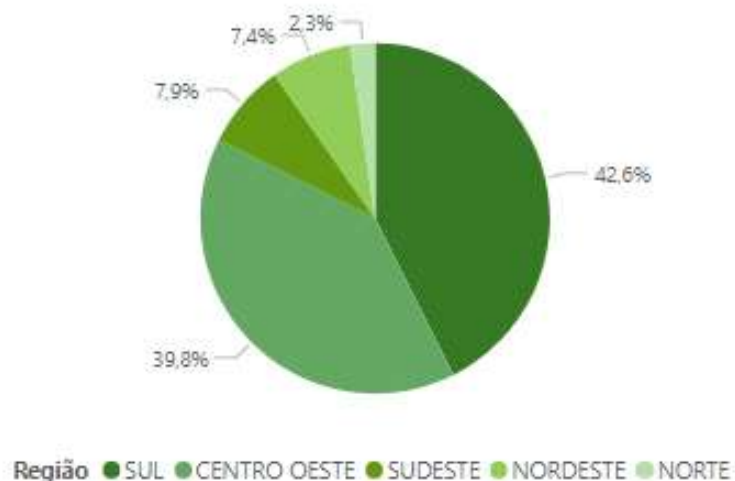
Na ANP há 50 instalações cadastradas como produtoras de biodiesel, concentrando a maior quantidade nos estados do Mato Grosso e Rio Grande do Sul, senda as instalações do RS com maior capacidade de produção (Figura 2). A produção de biodiesel nacional no ano de 2020 foi de 6 milhões de kg/m<sup>3</sup> (ANP, 2021). Os principais produtores é o Rio Grande Sul, Mato Grosso, Paraná e Goiás.



**Figura 2.** Instalações de produção de biodiesel cadastrados na ANP. Os pontos azuis representam a instalação. São 50 instalações, concentradas principal no Mato Grosso e Rio Grande do Sul. Fonte: ANP, dados coletados em 05/06/2021.

A produção nacional de biodiesel vem aumentando significativamente, uma vez que a meta é acrescentar um ponto percentual anualmente nas misturas de biodiesel no diesel. No ano de 2017 a produção ultrapassou os 4 milhões de kg/m<sup>3</sup> e em 2020 foram aproximadamente 6,5 milhões kg/m<sup>3</sup>. Todas as regiões do Brasil iniciaram a participação no mercado do biodiesel através do Selo de Combustível Social, que permitiam a linha de créditos nos bancos e acesso a tecnologias, em troca eles deveriam cultivar uma cota mínima de espécies para bioenergia, porém com a crise hídrica de 2011 a 2013, os agricultores familiares não conseguiram manter a produção, reduzindo significativamente a participação das regiões norte, nordeste e sudeste.

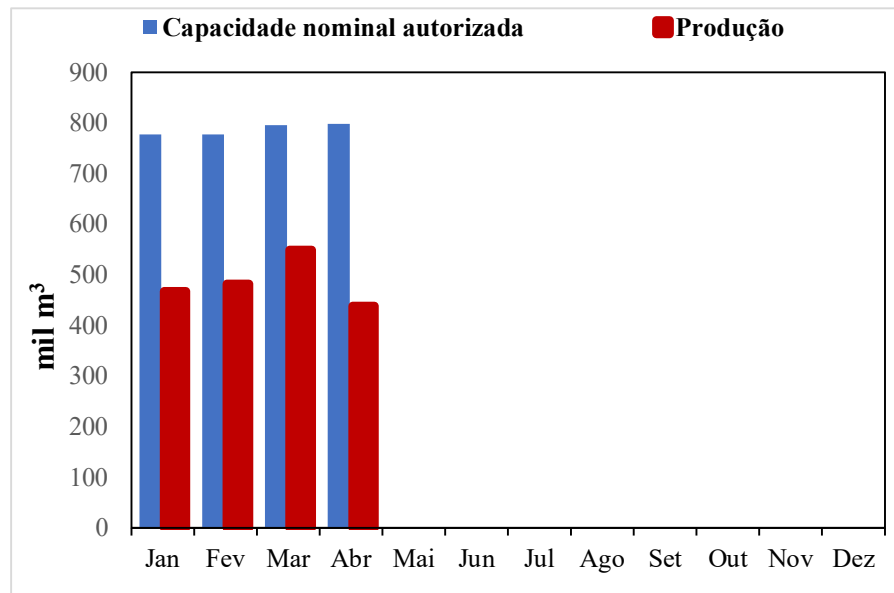
Atualmente, as regiões Sul e o Centro-Oeste apresentam a maior produção, juntos totalizam mais de 80% da produção nacional (Figura 3). Essas regiões possuem maior quantidade de instalações e adoção de tecnologias agroindustriais, o Sul, por exemplo, desenvolve tecnologias desde a década de 50, e são voltadas principalmente para produção de soja que atende mercados diversos (MUR, 2019).



**Figura 3.** Produção de biodiesel por região no ano de 2020. Fonte: ANP, dados coletados em 06/06/2021.

Em 2004, a mistura do biodiesel no diesel era de 2% (B2), atualmente está em 12% (B12) e a meta é chegar ao B23. Mesmo com o aumento da produção de biodiesel anualmente no Brasil, ela ainda está abaixo da sua capacidade, como exemplo, no mês de março, a capacidade de produção de biodiesel foi de aproximadamente 800 mil kg/m<sup>3</sup>, entretanto foi produzido aproximadamente 550 mil kg/m<sup>3</sup>, sendo este o mês de maior produção (Figura 4). Mesmo com produção nacional, o Brasil consome mais do que produz e tem que importar diesel

de fora. O que evidencia a necessidade de produção de matérias primas para alcançar os objetivos colocados para a bioenergia.

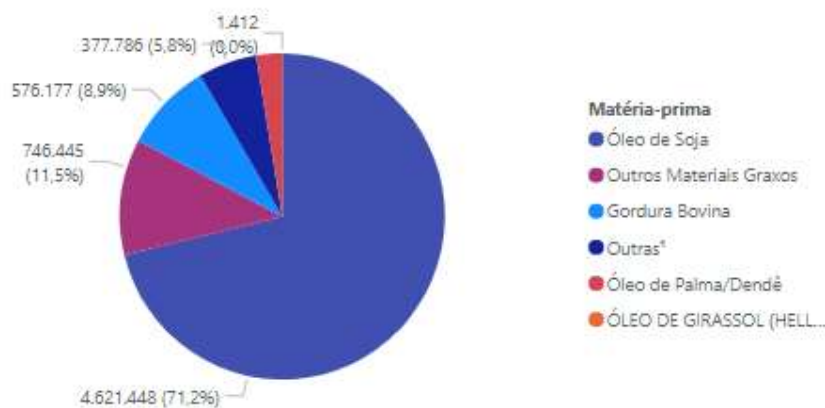


**Figura 4.** Produção de biodiesel no ano de 2020. Em azul está representado a capacidade autorizada para produção e em vermelho o que foi produzido. Fonte: ANP, dados coletados em 20/05/2020. Fonte: ANP, conforme Resolução ANP nº 729/2018 e Resolução ANP nº 734/2018.

A escolha da matéria-prima interfere diretamente no fator econômico, o sucesso da produção dependerá das formas de acesso às culturas energéticas, não competir com o mercado alimentício, mitigar as mudanças climáticas e de políticas e tecnologias. No panorama mundial as matérias-primas mais utilizadas são soja, canola, dendê e em seguida outras culturas como mostarda, amendoim, algodão, girassol, entre outras (IPCC, 2011; KOÇAR; CIVAŞ, 2013; RINCÓN et al., 2015).

Conforme a ANP (2021), há 51 plantas produtoras de biodiesel autorizadas para serem usadas como fonte de biodiesel no país, correspondendo a capacidade total autorizada de 26602,26 m³/dia. No entanto, a soja representa supremacia na cadeia produtiva do biodiesel (71,2%), seguido de materiais graxos, gordura bovina, óleo de Palma e outros sendo esta última composta por gordura de frango e porco, óleo de algodão, canola milho, palmiste e óleo de fritura usado (Figura 5) que implica na alta dependência desta espécie. A restrição de um determinado mercado dependente de poucas culturas torna-se suscetível à instabilidade do mercado nacional e internacional sobre as *commodities*, vulnerável para o estabelecimento de

pragas e desenvolvimento de doenças, além de estar suscetível a desastres naturais (STENBERG, 2017).



**Figura 5.** Fontes de matérias primas de biodiesel no ano de 2020 no Brasil. Fonte: ANP, conforme Resolução ANP nº 729/2018 e Resolução ANP nº 734/2018.

Isso posto, percebe-se a necessidade da diversificação de matéria-prima para produção de biocombustível que não compete com a indústria alimentícia, apresente baixos impactos no ambiente e que sejam economicamente viáveis. Algumas espécies de plantas vêm mostrando potencial para ser utilizada como matéria-prima para produção de biocombustíveis, dentre elas o pinhão-manso (*Jatropha curcas L.*) (LAVIOLA et al., 2017).

## 2.4 Pinhão-mansó

De acordo com o IPCC (2011) a maior contribuição para bioenergia pode vir de culturas energéticas que podem ser cultivadas em terras aráveis, com solos que já sofreram erosão e estão degradados, retendo água, promovendo o reflorestamento da região, eficiência na agricultura e mitigando a competição por terras com culturas alimentares. Um exemplo de cultura que se enquadra nesse perfil de desenvolvimento de terras marginais é o pinhão-mansó que produz sementes oleaginosas e é uma planta promissora para produção de biocombustíveis.

O pinhão-mansó é uma cultura que apresenta os requisitos econômicos e ambientais e com possui alto potencial produtivo para biocombustível. É uma planta não domesticada, apresenta alto rendimento na produção de óleo (LAVIOLA et al., 2014). No entanto, o cultivo dessa planta sem planejamento apresenta riscos econômicos e ambientais, ocasionando o empobrecimento dos produtores a nível local. Como exemplo, a Índia e China lançaram projetos para cultivo de pinhão-mansó visando a produção de biodiesel, cultivando em terrenos

marginais que ocasionou resultados contrários ao esperado (CONTRAN et al., 2013). Portanto, ao se realizar estudos sobre esta cultura e produzir com planejamento adequado, pode contribuir positivamente nos avanços energéticos e promover o desenvolvimento das regiões possuem economia rural.

O pinhão-manso é uma planta perene da família Euphorbiaceae. Estudos indicam que o centro de origem desta cultura é a América, em específico o México e América Central, distribuída nos países Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicarágua e Panamá e de lá foi levado para a África e Ásia por meio de navegações portuguesas, atualmente, esta cultura está presente em regiões de clima tropical (ACHTEN et al., 2010). Seu crescimento varia entre três a cinco metros de altura (Figura 6). Sua raiz apresenta um eixo principal profundo ramificações secundárias. As folhas são verdes com filotaxia espiral que medem de 6 a 15 cm, pecíolo de 5 a 20 cm e estômatos paracíticos (CONTRAN et al., 2013). Esta espécie apresenta a propriedade caducifólia, que é a perda de folhas na estação seca, reduzindo a evapotranspiração e economizando água o que caracteriza essa tolerância à seca em algumas espécies, já em estações chuvosas seu crescimento é potencializado (KESAVA RAO et al., 2012).



**Figura 6.** Pinhão-manso em estações distintas do ano. A) Pinhão-manso em estação chuvosa com crescimento das folhas potencializado. B) Pinhão-manso em estação seca, evidenciando a propriedade caducifólia.



O Pinhão-manso é uma planta monoica, com flores unissexuais, a flor feminina fica no centro, rodeada por flores masculinas na proporção de um a cinco flores femininas para 25 a 93 masculinas a cada inflorescência, ocasionalmente, há flores hermafroditas. Flores masculinas possuem 10 estames e dois verticilos distintos próximos ao androceu, que abrem no primeiro dia e permanecem abertos de 8 a 10 dias. As flores femininas possuem ovário trilobular e estigmas bifurcados e abrem do terceiro ao quinto dia com vida útil de quatro dias, característica essa conhecida como protândrica (LOU, et al., 2007). Normalmente, a floração ocorre duas vezes ao ano, no período chuvoso, em regiões húmidas, floresce o ano todo (ACHTEN et al., 2008). A polinização é feita por abelhas e outros insetos, cada inflorescência geralmente origina dez ou mais frutos em forma de cachos. A colheita ocorre desde o primeiro ano, aumentando a produção anualmente, se estabilizando em torno de cinco ou seis anos (LOU, et al., 2007).



**Figura 7.** Inflorescência de pinhão-manso com flores femininas no centro e flores masculinas ao redor.

Os frutos são ovoides, marrom-esverdeadas, pesa de 2 a 3,5 g, com diâmetro de 3 cm, o amadurecimento ocorre de 2 a 3 meses. Este fruto é dividido em três partes: exocarpo, pericarpo e semente. O exocarpo resseca durante o processo de amadurecimento e torna-se a casca (CONTRAN et al., 2013). São de 2 a 3 sementes por fruto, de coloração preta, cada uma

possui de 35 a 38% de óleo, gerando produtividades em torno de 930 e 1.250 kg de óleo por hectare (BHERING et al., 2013). Essas sementes possuem constituintes tóxicos como os ésteres de forbol que responsável pela toxicidade, tornando-a não comestível (MAKKAR, 2016). Existem genótipos não-tóxicos, pois não possuem os ésteres de forbol, permitindo que a torta gerada no processamento desta cultura seja utilizada para a alimentação de animais, que possuem uma quantidade de resíduos e melhor aproveitamento do valor agregado aos insumos (BASHA; SUJATHA, 2007).



**Figura 8.** Fases de maturação do fruto de Pinhão-mansô. A) Fruto de pinhão-mansô verde. B) Fruto de pinhão-mansô em fase de maturação, o mesmo apresenta uma cor amarelada. C) Exocarpo seco que se torna a casca do fruto adquirindo uma cor marrom. D) Semente pinhão-mansô na coloração preta.

O pinhão-mansô é uma planta arbórea que se adapta em diversos ambientes, além disso é de fácil manuseio e plantio, possui baixo custo de produção e benefício ecológico (TEODORO et al., 2017). Essa espécie possui tolerância a seca, consegue se desenvolver em solos degradados promovendo a prevenção e recuperação da erosão e reflorestamento, contribuindo com a captura de dióxido de carbono. Este fato permite que seja cultivado em terras marginais, reduzindo a competição por terra com espécies alimentares. Por ser perene, o pinhão-mansô exige manuseio mínimo na área plantada, reduzindo os impactos direto e

indiretos no solo (dLUC e iLUC), favorecendo o desenvolvimento do ecossistema local, além disso, convive bem com outras espécies de plantas.

Essa espécie não é comestível, o que evita a competição com o setor alimentício. Ela possui usos amplos, dentre eles, utilização como planta medicinal, cerca viva para proteção de plantações e de pastos bovinos e caprinos, recuperação de solos, cobertura de solo evitando erosão, utilização do óleo como combustível para cozinhar e iluminar, produção de fertilizantes naturais, fabricação de sabão, além do potencial para produção de biocombustível devido ao alto teor de óleo nas sementes (CONTRAN et al., 2013; DIVAKARA et al., 2010). As características desse óleo permitem que seja utilizada como biocombustível, portanto, o principal uso do pinhão-mansão é na produção de biodiesel. A produtividade do biodiesel atinge cerca de 1.200 a 1.500 kg ha<sup>-1</sup> (LAVIOLA et al., 2014) a partir do quarto ano de produção. Devido as propriedades químicas do óleo, o mesmo é considerado de boa qualidade.

Uma das características das espécies que devem ser avaliadas para indicá-las como oleaginosa a ser utilizada na produção de biodiesel é a diversidade genética, a fim de evitar endogamia, e possuir alto rendimento para as características de interesse para a produção de biocombustível (OLIVEIRA et al., 2004). Visto que a diversidade genética é componente essencial para manter o equilíbrio de populações no ambiente, bem como manejar os recursos genéticos. Contudo, acredita-se que os genótipos de pinhão-mansão encontrados do Brasil apresentam baixa diversidade (ROSADO et al., 2010). Desta forma, é necessário quantificar a diversidade genética desta cultura a fim de caracterização, manejo e conservação da espécie e adotar estratégias de melhoramento genético com a finalidade de formar populações com ampla variabilidade genética e com potencial para produção de biocombustível (ANGGRAENI et al., 2018; DIVAKARA et al., 2010; TEODORO et al., 2017).

## **2.5 Diversidade genética**

As estratégias de melhoramento em plantas perenes, em geral, compreendem três etapas: i) pré-melhoramento – onde é feita avaliação dos bancos de germoplasma e estabelecimento de populações com ampla variabilidade genética; ii) obtenção de progênie - compreende a recombinação dos indivíduos com desempenho superior, iii) avaliação e seleção – que resulta na obtenção de indivíduos superiores. Uma das principais etapas de um programa de melhoramento está na formação da população base que deve ser constituída por genitores selecionados que compõem ou não os bancos de germoplasma com representação da



diversidade genética da espécie (BHERING; CRUZ; LAVIOLA, 2011; LAVIOLA et al., 2017).

Isso posto, estudos de diversidade genética baseia-se distância entre as populações que estão sendo comparadas, podendo ser diferenças morfológicas, fisiológicas ou moleculares e constitui-se na ferramenta básica para as associações evolutivas, manejo de recursos genéticos e conservação de uma espécie, bem como o estabelecimento de estratégias de melhoramento genético (CRUZ; FERREIRA; PESSONI, 2011). As avaliações podem ser realizadas com base em dados fenotípicos e/ou genotípicos. As avaliações fenotípicas são importantes, pois refletem o potencial genético da planta acrescentado da influência ambiental. No entanto, na avaliação genotípica, que é a avaliação do genótipo com base em marcadores moleculares, a determinação de diversidade genética é mais precisa (DIVAKARA et al., 2010; LAVIOLA et al., 2010).

Os marcadores moleculares são importantes ferramentas no estudo da diversidade genética objetivando a diferenciação ou identificação de genótipos (RAMALHO et al., 2012). Dentre os diversos tipos, citam-se os marcadores SNP (*Single Nucleotide Polimorphism*) identificam o polimorfismo baseado na posição de um único nucleotídeo, de forma que essa detecção é mais efetiva e precisa quando comparada com outros marcadores (FALEIRO, 2007). A grande vantagem do SNP é a possibilidade de aplicação em bancos de coleções com grandes quantidades de genes, além da precisão na identificação dos polimorfismos o que contribui significativamente para determinar a estrutura populacional da espécie estudada (YA et al., 2018).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHEAMPONG, M. et al. In pursuit of Sustainable Development Goal (SDG) number 7: Will biofuels be reliable? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, n. 7, p. 927–937, 2017.

ACHTEN, W. M. J. et al. Jatropha bio-diesel production and use. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 12, p. 1063–1084, dez. 2008.

ACHTEN, W. M. J. et al. Jatropha: From global hype to local opportunity. **Journal of Arid Environments**, v. 74, n. 1, p. 164–165, 2010.

AHMED, S. et al. Systematic review on effects of bioenergy from edible versus inedible feedstocks on food security. **npj Science of Food**, v. 5, n. 1, 2021.

ANGGRAENI, T. D. A. et al. Genetic diversity of Jatropha curcas collections from different islands in Indonesia. **Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization**, v. 16, n. 4, p. 334–342, 5 ago. 2018.

ANP. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2019**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2019/2019-anuario-versao-impressao.pdf>>. Acesso em: 1 maio. 2020.

ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis**. Disponível em < <http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2020/anuario-2020.pdf>>. Acesso em: 5 maio. 2021.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 1 nov. 2017.

BAATH, G. S. et al. Transcriptome and proteome analyses of the molecular mechanisms underlying changes in oil storage under drought stress in Brassica napus L. **Biomass and Bioenergy**, v. 114, n. December 2020, p. 8770–8794, 2021.

BASHA, S.D.; SUJATHA M. Inter and intra-population variability of Jatropha curcas (L.) characterized by RAPD and ISSR markers and development of population-specific SCAR markers. **Euphytica**. 156:375–386. <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9387-5>, 2007.

BEZERRA, M. DO C. DE L.; BURSZTYN, M. (COORD. . **Ciência & tecnologia para o desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF: PNUD Projeto BRA/94/016, 2000.

BHERING, L. .; CRUZ, C. D.; LAVIOLA, B. . Biometria aplicada ao melhoramento de espécies alternativas para a produção de biodiesel. In: **Estratégias em melhoramento de plantas**. Viçosa: [s.n.]. p. 90–129.

BHERING, L. L. et al. Differential response of *Jatropha* genotypes to different selection methods indicates that combined selection is more suited than other methods for rapid improvement of the species. **Industrial Crops and Products**, v. 41, p. 260–265, jan. 2013.

BLENGINI, G. A. et al. LCA of bioenergy chains in Piedmont (Italy): A case study to support public decision makers towards sustainability. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 57, p. 36–47, 1 dez. 2011.

BRITISH PETROLEUM. **Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy The Statistical Review world of World Energy and data on world energy markets from is The Review has been providing**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>>.

BROCH, A.; HOEKMAN, S. K.; UNNASCH, S. A review of variability in indirect land use change assessment and modeling in biofuel policy. **Environmental Science and Policy**, v. 29, p. 147–157, 2013.

CHERUBINI, F. GHG balances of bioenergy systems - Overview of key steps in the production chain and methodological concerns. **Renewable Energy**, v. 35, n. 7, p. 1565–1573, 2010.

CHERUBINI, F. et al. LCA of bioenergy chains in Piedmont (Italy): A case study to support public decision makers towards sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, n. 2, p. 900–916, 2015.

CONTRAN, N. et al. State-of-the-art of the *Jatropha curcas* productive chain: From sowing to biodiesel and by-products. **Industrial Crops and Products**, v. 42, n. 1, p. 202–215, 2013.

CORREA, D. F. et al. Towards the implementation of sustainable biofuel production systems.

**Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, n. May 2018, p. 250–263, 2019.

CRUZ, C. D.; FERREIRA, F. M.; PESSONI, L. A. **Biometria Aplicada ao Estudo da Diversidade Genética**. Viçosa: Suprema, 2011.

DEMIRBAS, A. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 8, p. 2106–2116, 2008.

DIRECTIVE EU. 2001 of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources. **Official Journal of the European Union**, v. 2018, n. L 328, p. 82–209, 2018.

DIVAKARA, B. N. et al. Biology and genetic improvement of *Jatropha curcas* L.: A review. **Applied Energy**, v. 87, n. 3, p. 732–742, 2010.

EL AKKARI, M. et al. A meta-analysis of the greenhouse gas abatement of bioenergy factoring in land use changes. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1–7, 2018.

EWING, M.; MSANGI, S. Biofuels production in developing countries: assessing tradeoffs in welfare and food security. **Environmental Science and Policy**, v. 12, n. 4, p. 520–528, 2009.

FALEIRO, G. **Marcadores genético-moleculares**. Planaltina, DF: [s.n.].

FAO. **World hunger falls, but 805 million still chronically undernourished**. Disponível em: <<http://www.fao.org/news/story/en/item/243839/icode/>>. Acesso em: 11 maio. 2019.

FAO. **The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050**.

FELFILI, J. M.; SILVA-JUNIOR, M. C. DA; NOGUEIRA, P. E. **Levantamento da vegetação arbórea na região de Nova Xavantina, MT. Boletim do Herbario Ezechias Paulo Heringer**, 1998.

GASPARATOS, A. et al. Using an ecosystem services perspective to assess biofuel sustainability. **Biomass and Bioenergy**, v. 114, p. 1–7, jul. 2018.

GERBENS-LEENES, W.; HOEKSTRA, A. Y.; VAN DER MEER, T. H. The water footprint of bioenergy. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 25, p. 10219–10223, 2009.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v. 36, n. 6, p. 2086–2097, 2008.

GUEDES, C. L. B. et al. Evaluation of Biofuel Derived from Lignocellulosic Biomass Fast Pyrolysis Bio-Oil for Use as Gasoline Additive. **Quimica Nova**, v. 33, n. 4, p. 781–786, 2010.

HELLMANN, F.; VERBURG, P. H. Impact assessment of the European biofuel directive on land use and biodiversity. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 6, p. 1389–1396, 2010.

HILL, J. et al. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 103, n. 30, p. 11206–11210, 2006.

HUMPENÖDER, F. et al. Large-scale bioenergy production: How to resolve sustainability trade-offs? **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 2, 2018.

IEA. **Renewables 2017 Analysis and Forecasts to 2022 International Energy Agency**. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/download/direct/2322>>.

IPCC. **Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change IPCC, 2011: Summary for Policymakers**. Cambridge University Press; 2011 Nov 21.

IPCC. **Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change**. Change IC. Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. **Global Warming of 1.5°C IPCC, 2018: Summary for Policymakers**. Global Warming of, 1

KESAVA RAO, A. V. R. et al. Water requirement and use by *Jatropha curcas* in a semi-arid tropical location. **Biomass and Bioenergy**, v. 39, p. 175–181, 2012.

KOÇAR, G.; CIVAŞ, N. An overview of biofuels from energy crops: Current status and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 900–916, 2013.

LAVIOLA, B. G. et al. CARACTERIZAÇÃO MORFO-AGRONÔMICA DO BANCO DE GERMOPLASMA DE PINHAO MANSO NA FASE JOVEM MORPHO-AGRONOMIC CHARACTERIZATION OF THE GERMPLASM BANK OF. **Pesquisa agropecuária brasileira**, p. 371–379, 2010.

LAVIOLA, B. G. et al. Desempenho agrônômico e ganho genético pela seleção de pinhão - manso em três regiões do Brasil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, n. 1, p. 356–363, 2014.

LAVIOLA, B. G. et al. Biometric and biotechnology strategies in *Jatropha* genetic breeding for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, n. January, p. 894–904, set. 2017.

MAFAKHERI, F.; NASIRI, F. Modeling of biomass-to-energy supply chain operations: Applications, challenges and research directions. **Energy Policy**, v. 67, p. 116–126, 1 abr. 2014.

MÄKI, E. et al. Drivers and barriers in retrofitting pulp and paper industry with bioenergy for more efficient production of liquid, solid and gaseous biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 148, n. April, 2021.

MAKKAR, H. P. S. State-of-the-art on detoxification of *Jatropha curcas* products aimed for use as animal and fish feed: A review. **Animal Feed Science and Technology**, v. 222, n. 1, p. 87–99, 1 dez. 2016.

MARTINELLI, L. A.; FILOSO, S. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. **Ecological applications**, v. 18, n. 4, p. 885-898, 2008.

MCCOLLUM, D. L. et al. Connecting the sustainable development goals by their energy inter-linkages. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 3, 2018.

MEYER, M. A.; LECKERT, F. S. A systematic review of the conceptual differences of environmental assessment and ecosystem service studies of biofuel and bioenergy production. **Biomass and Bioenergy**, v. 114, p. 8–17, 2018.

MME. **Resenha Energética Brasileira Ano Base 2019** Resenha energética brasileira ano base 2019. Disponível em: <file:///F:/Renata/Doutorado/GP2/Sdewes 2020/JSDEWES/Resenha Energética Brasileira - edição 2020.pdf>.

MUENCH, S.; GUENTHER, E. A systematic review of bioenergy life cycle assessments. **Applied Energy**, v. 112, p. 257–273, 2013.

MUR, D. C. C. **Evolução e sustentabilidade do Programa de Biodiesel: um estudo comparativo entre o Brasil e a Colômbia**. 191f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável). Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2019

OLIVEIRA, G. C. A.; BIZARI, D. R.; GAZAFFI, R. POTENCIAL DE CRESCIMENTO DE MUDAS DE DENDÊ PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL NO ESTADO DE SÃO PAULO. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 35, n. 1, p. 107–114, 20 mar. 2020.

PAGE, M. J. et al. **The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews**The BMJBMJ Publishing Group, , 29 mar. 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1136/bmj.n71>>. Acesso em: 15 jun. 2021

R CORE TEAM, D. **R: a language and environment for statistical computing**. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>.

RADICS, R.; DASMOHAPATRA, S.; KELLEY, S. S. Systematic review of bioenergy perception studies. **BioResources**, v. 10, n. 4, p. 8770–8794, 2015.

RAMALHO, M. et al. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. Lavras: UFLA, 2012.

REN. **Renewables 2021 global status report**. [s.l: s.n.].

REUMERMAN, P. et al. **BIOENERGY RETROFITS FOR EUROPE ' S INDUSTRY -THE BIOFIT PROJECT**. n. June 2019, 2020.

RIahi, K. et al. Locked into Copenhagen pledges - Implications of short-term emission targets for the cost and feasibility of long-term climate goals. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 90, n. PA, p. 8–23, 1 jan. 2015.

RINCÓN, L. E. et al. Optimization of the Colombian biodiesel supply chain from oil palm crop based on techno-economical and environmental criteria. **Energy Economics**, v. 47, n. 2015, p. 154–167, 2015.

RIOS, E. M. et al. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS, PRIMEIRA GERAÇÃO ( 1G ) E SEGUNDA GERAÇÃO ( 2G ). **Revista Tecnologia & Cultura**, n. 36, p. 149–157, 2020.

ROMEU-DALMAU, C. et al. Impacts of land use change due to biofuel crops on climate regulation services: Five case studies in Malawi, Mozambique and Swaziland. **Biomass and Bioenergy**, v. 114, p. 30–40, 2018.

ROSADO, T. B. et al. Molecular Markers Reveal Limited Genetic Diversity in a Large Germplasm Collection of the Biofuel Crop *Jatropha curcas* L. in Brazil. **Crop Science**, v. 50, n. 6, p. 2372–2382, nov. 2010.

SCHMIDT, J. H. Comparative life cycle assessment of rapeseed oil and palm oil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 2, p. 183–197, 2010.

SHEEHAN, J. J. Biofuels and the conundrum of sustainability. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 20, n. 3, p. 318–324, 2009.

STENBERG, J. A. A Conceptual Framework for Integrated Pest Management. **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 9, p. 759–769, set. 2017.

STOY, P. C. et al. Opportunities and Trade-offs among BECCS and the Food, Water, Energy, Biodiversity, and Social Systems Nexus at Regional Scales. **BioScience**, v. 68, n. 2, p. 100–111, 2018.

STREIMIKIENE, D.; SIMIONESCU, M.; BILAN, Y. The impact of biodiesel consumption by transport on economic growth in the European Union. **Engineering Economics**, v. 30, n. 1, p. 50–58, 2019.

SU, Y.; ZHANG, P.; SU, Y. An overview of biofuels policies and industrialization in the major biofuel producing countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 991–1003, 2015.

TAKASE, M. et al. An expatiate review of neem, jatropha, rubber and karanja as multipurpose non-edible biodiesel resources and comparison of their fuel, engine and emission properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 495–520, mar. 2015.



TEODORO, P. E. et al. Multivariate diallel analysis allows multiple gains in segregating populations for agronomic traits in *Jatropha*. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 1, 2017.

VALDEMARAS, M. et al. The impact of biofuels production development in the European Union. **Agricultural Economics (Zemědělská ekonomika)**, n. 4, p. 170–185, 2018.

VERDADE, L. M.; PIÑA, C. I.; ROSALINO, L. M. Biofuels and biodiversity: Challenges and opportunities. **Environmental Development**, v. 15, p. 64–78, 2015.

ZHANG, J. et al. Genome-wide association study, genomic prediction and marker-assisted selection for seed weight in soybean (*Glycine max*). **Theor Appl Genet**, v. 129, p. 117–130, 2016.

ZHANG, P. et al. Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: A comprehensive review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 142, n. December 2018, p. 215–224, 2019.

## **Capítulo 1**

### **Impacto ambiental da produção de biocombustíveis: uma revisão sistemática**

## **Impacto ambiental da produção de biocombustíveis: uma revisão sistemática**

### **Resumo**

Frente aos problemas ambientais inerentes à produção de energia oriunda de combustíveis fósseis, o uso de bioenergia vem sendo considerada como fonte promissora. No entanto, é preciso cautela, pois a depender do sistema de produção adotado, os impactos negativos podem até neutralizar os positivos. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é investigar os impactos ambientais causados pela produção de biocombustíveis e identificar as principais categorias de impacto por meio da revisão sistemática. Esperamos que haja impactos na água, solo, biodiversidade, pois estes são recursos naturais utilizados para produzir biocombustíveis. Foi utilizada a plataforma *Web of Science* para realizar a busca. Após a triagem de artigos, 191 corresponderam aos critérios de inclusão. A produção de bioenergia pode gerar impactos positivos e negativos no ambiente. O que irá determinar estes fatores são os processos adotados para realizar esta produção, e as políticas que influenciam diretamente nas tomadas de decisões. Os principais impactos ambientais encontrados nesta revisão sistemática são nas seguintes categorias água, solo, biodiversidade e emissões de GEE. A mudança no uso direto e indireto do solo é um dos mais significantes e interfere diretamente nas emissões de GEE e também nos estoques de carbono.

**Palavras-chave:** bioenergia; sustentabilidade; mudança no uso da terra.

### **Abstract**

Faced with the environmental problems inherent in the production of energy from fossil fuels, the use of bioenergy has been considered as a promising source. However, caution is needed, as depending on the production system adopted, the negative impacts can even neutralize the positives. Given the above, the objective of this work is to investigate the environmental impacts caused by the production of biofuels and identify the main impact categories through systematic review. We hope that there will be impacts on water, soil, biodiversity, as these are natural resources used to produce biofuels. We use the Web of Science platform to perform the search. After screening the articles, 191 met the inclusion criteria. Bioenergy production can generate positive and negative impacts on the environment. What will determine these factors are the processes adopted to carry out this production, and the policies that directly influence decision-making. The main environmental impacts found in this systematic review are on water, soil, biodiversity and GHG emissions. The change in direct and indirect land use is one of the most significant, directly interfering with GHG emissions and also with carbon stocks.

**Key-words:** bioenergy; sustainability; change in land use.

## 1. Introdução

A população mundial tem apresentado crescimento significativo ao longo dos anos. Estima-se que em 2050 seja de 9,7 bilhões de pessoas (FAO, 2018). Conseqüentemente, a demanda por alimento e energia tendem a aumentar de forma que, para garantir esses direitos básicos à população e ao mesmo tempo considerar a mitigação das mudanças climáticas limitadas a 2 °C, conforme considera o IPCC (2011), é imprescindível implementar alternativas que concilie a produção de alimentos de forma sustentável.

Assim, o uso de bioenergia, dentre elas o uso de biocombustíveis, tem despertado interesse de diversas pesquisas, por apresentar viabilidade econômica e possuir algumas vantagens em relação a combustíveis fósseis, como exemplo a redução das emissões de gases poluentes como o dióxido de carbono devido ao fato de serem provenientes da biomassa (TAKASE et al., 2015). Mundialmente, iniciou-se a regulamentação de políticas energéticas a fim de reduzir a dependência dos recursos fósseis e contribuir com a mitigação dos efeitos ambientais que contribuem com a mudança climática (MÄKI et al., 2021). Essas políticas têm se intensificado após o relatório do clima das Nações Unidas de 2014 e o Acordo de Paris de 2015, que estabeleceram metas para reduzir a emissão de GEE (DIRECTIVE EU, 2018).

A União Europeia estabeleceu diretrizes, como a *European Green Deal*, que prevê a redução de 90% das emissões de gases poluentes no setor de transporte até 2050 e a Diretiva de Energia Renovável da União Europeia de 2018 (RED-EU) estabeleceu 14% de biocombustíveis no diesel (ACHEAMPONG et al., 2017; DIRECTIVE EU, 2018; MÄKI et al., 2021). Já nos Estados Unidos da América (EUA) foi implementado a Lei de Independência e Segurança Energética (EISA) de 2007 e Lei Americana de Energia Limpa (BLENGINI et al., 2011; MEYER; LECKERT, 2018) visando atender as metas do Acordo de Paris. No Brasil, vale mencionar duas importantes políticas públicas na área de biocombustíveis, a primeira de larga escala foi o Programa Nacional do Alcool (PROALCOOL), e a segunda o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), (SU; ZHANG; SU, 2015) que propõem a utilização de fontes de energia biorenovável.

Com isso, iniciou-se a produção de diversas matérias-primas bioenergéticas com objetivo de mitigar os impactos negativos da produção de energia não renovável ao meio ambiente (AKKARI et al., 2018). Entretanto, mesmo sendo fontes de energia renovável, a cadeia de produção bioenergética possui fluxo de entrada e saída de emissões de GEE

(HUMPENÖDER et al., 2018). A produção de bioenergia requer recursos naturais no processo de produção, dentre eles estão o uso da água, uso da terra de forma direta (dLUC) e indireta (iLUC) e estes podem causar desmatamento, competir por terras para produção de alimentos e competir também com matérias-primas, quando estas atendem aos dois mercados: alimentício e energético (VALDEMARAS et al., 2018).

A mudança no uso direto e indireto do solo pode ser um dos fatores ambientais mais impactantes decorrentes da produção de bioenergia por gerar alterações no ecossistema local e conseqüentemente, em alguns casos, redução da biodiversidade de espécies (MEYER; LECKERT, 2018). Além disso, interfere diretamente nas emissões de GEE e nos estoques de carbono orgânico do solo (MEYER; LECKERT, 2018; VERDADE; PIÑA; ROSALINO, 2015). A depender do sistema de produção adotado, os impactos ambientais podem até neutralizar os efeitos positivos da produção de bioenergia o que evidencia uma lacuna na literatura abordando o uso dos recursos naturais neste processo. Desta forma, é necessário abordar a viabilidade e o custo benefício ambiental da produção de matéria-prima bioenergéticas e analisar se essas produções geram impactos ambientais (BROCH; HOEKMAN; UNNASCH, 2013; EL AKKARI et al., 2018; FELFILI; SILVA-JUNIOR; NOGUEIRA, 1998).

Dessa forma, há a necessidade de investigar os impactos ambientais gerados a partir da produção de biocombustíveis. O objetivo deste trabalho é investigar os impactos ambientais causados pela produção matéria-prima vegetal para biocombustíveis, identificar as principais categorias de impacto por meio da revisão sistemática e quais são as matérias primas mais utilizadas na produção de bioenergia. Esperamos que haja impactos na água, solo, biodiversidade, pois estes são recursos naturais utilizados para produzir biocombustíveis.

## **2. Material e Métodos**

### **Mecanismo de identificação e critérios de avaliação e seleção**

Realizamos essa revisão sistemática seguindo os critérios do protocolo da plataforma *PRISMA Statment*, que fornece um conjunto mínimo de itens para realizar revisões sistemáticas e meta-análises (PAGE et al., 2021).

Encontramos publicações que trataram dos impactos ambientais dos biocombustíveis, realizamos uma busca avançada na base de dados principal do *Web of Science* com os seguintes descritores: TS= (*biofuel\* OR bioenergy OR oilseed\* OR "oil plant\*"*) AND TS= (*"environment\* impact\*"*). As publicações também foram restritas a artigos na língua inglesa.

Esta revisão não possui limite temporal, logo, a busca foi feita para todos os artigos publicados até a data da busca que ocorreu em 27 de dezembro de 2019.

Posteriormente, selecionamos os artigos a partir da leitura de títulos e resumos. Os critérios de elegibilidade foram: (1) abordar o tema bioenergia e/ou biocombustível, (2) a matéria-prima ser de fonte vegetal e/ou oleaginosa e (3) abordar os impactos ambientais causados em decorrência da produção de biocombustíveis. Desta forma, todos os artigos que não contemplaram esses critérios foram excluídos. Além disso, excluimos os artigos de revisão sistemática, meta-análises, modelagem e artigos de revisão para evitar duplicidade de resultados.

Na etapa de revisão por pares, dois revisores selecionaram os artigos por meio da leitura de forma independente. Os artigos que ambos os revisores identificaram atender os critérios de elegibilidade, foram incluídos. O mesmo procedimento foi feito para os artigos excluídos, pois ambos os revisores identificaram que os artigos não contemplavam os critérios de seleção. Para os artigos que não houve consenso na revisão por pares, houve avaliação do terceiro revisor. Este, por sua vez, definiu se estes seriam incluídos. Em seguida, iniciou a leitura completa dos artigos para eliminação daqueles que ainda não se enquadravam nos critérios de seleção. Posteriormente, foi realizada a extração das informações dos artigos selecionados.

### **Análise de dados**

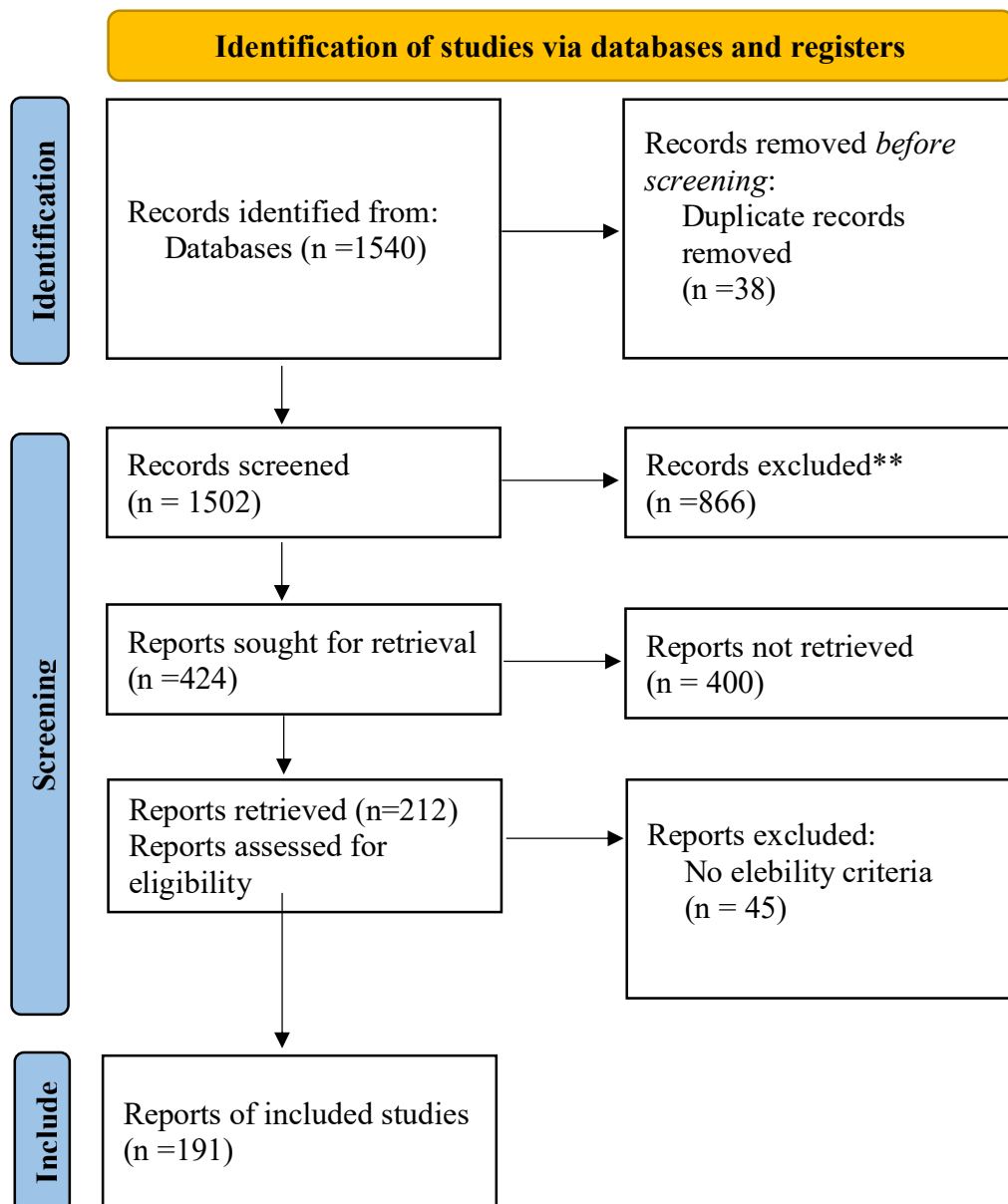
Após a triagem dos artigos, com base nos critérios de inclusão e exclusão, extraímos os dados para uma planilha que contemplava: i) título; ii) resumo; iii) ano; iv) periódico; v) local do estudo; vi) matéria-prima; vii) produto final e viii) impacto ambiental. Este último foi agrupado por tipo de recurso natural impactado e o tema abordado.

Além disso, os artigos selecionados foram exportados da plataforma Web of Science no formato *BibText*. Posteriormente, esse arquivo foi carregado via função “readFiles” e convertida em um quadro de dados. As análises estatísticas foram realizadas no *software* R (R CORE TEAM, 2020), utilizando o pacote Bibliometrix (ARIA; CUCCURULLO, 2017).

## **3. Resultados**

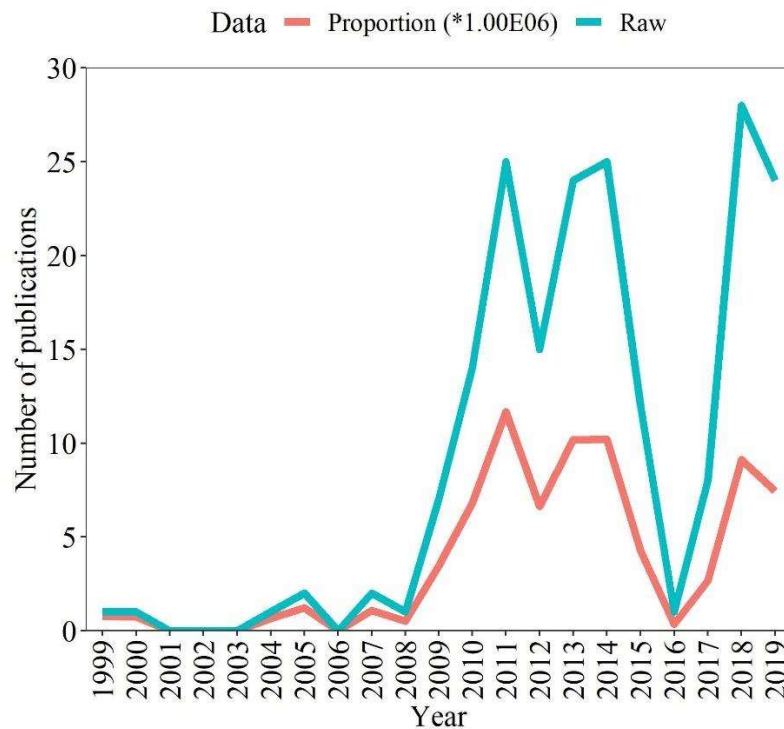
A busca por descritores na base de dados *Web of Science* recuperou 1540 artigos. Foram identificados 38 artigos duplicados que foram excluídos da seleção. Com isso, restaram 1502 artigos. Na seleção por pares, excluimos 866 artigos, incluímos 212 e 424 necessitaram de revisão do terceiro avaliador. Desses últimos, incluímos apenas 24. Logo, realizamos a leitura completa de 236 artigos e, nesta etapa, excluimos 45 por não atenderem os critérios de seleção.

Por fim, selecionamos 191 artigos para compor a revisão sistemática e extraímos as informações sobre os impactos ambientais (Figura 1).



**Figura 1.** Diagrama de fluxo PRISMA 2020 como estratégia de busca e seleção dos artigos para compor a revisão sistemática.

O número de artigos científicos publicados com o tema bioenergia aumentou a partir do ano de 2008, apresentando redução em 2016 e retomou o crescimento em 2017 (Figura 2).

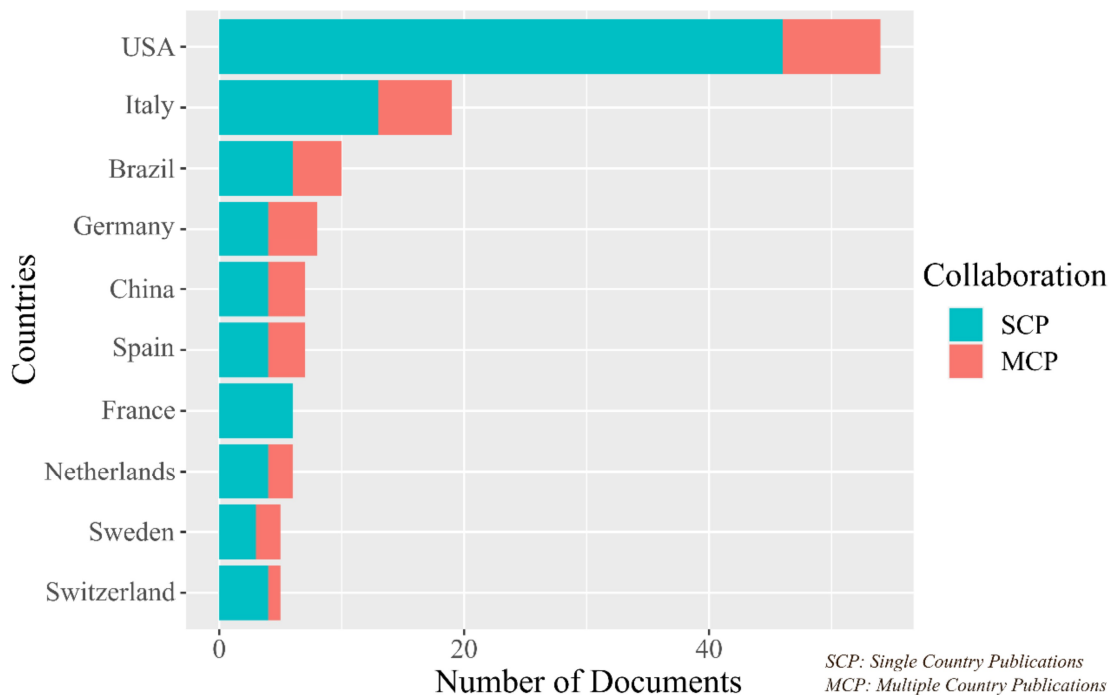


**Figura 2.** Número de publicações por ano de estudos abordando impactos ambientais da produção de bioenergia.

O EUA se destacou com a maior produção científica voltada para a bioenergia tanto de forma individual (Figura 3) como em colaboração com outros países (Figura 4), seguido da Itália, Brasil, Alemanha, China e Espanha.

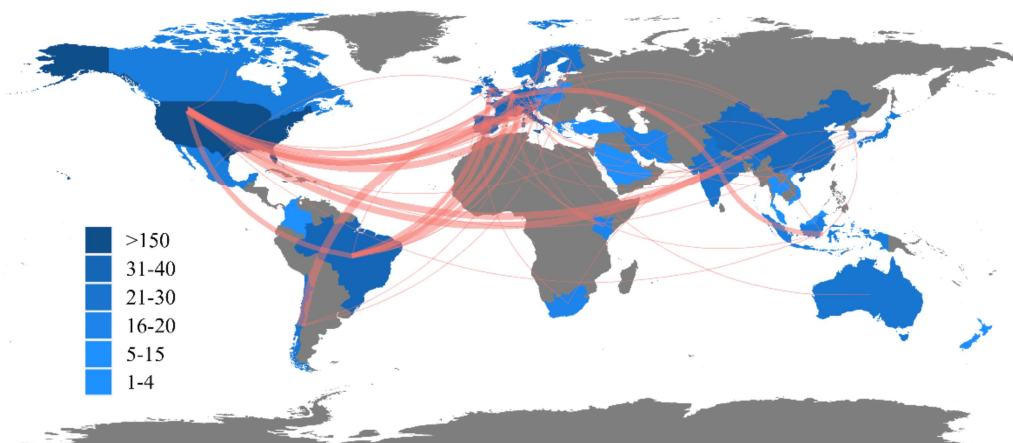
A França também se destacou com publicações nessa temática, porém apenas de forma individual, não sendo encontradas publicações de forma colaborativa com outras potências. Em todos os países, há a grande predominância de produção científica sem cooperação com outros países (Figura 3).





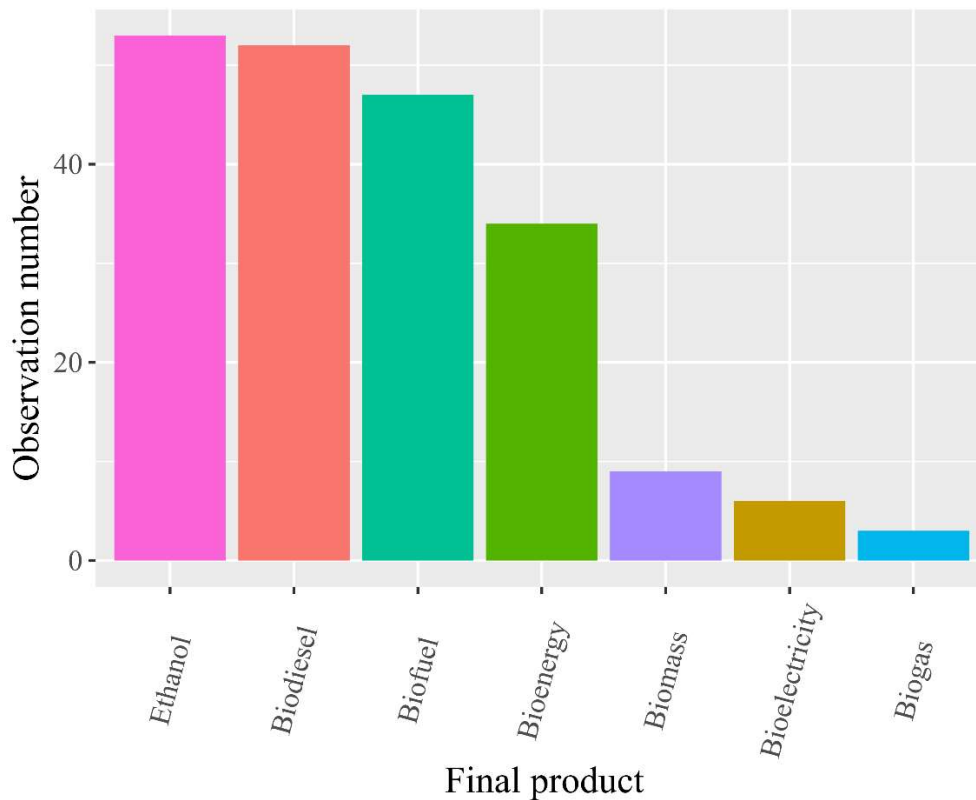
**Figura 3.** Número de publicações por países de forma individual (azul) e conjunta (vermelho) em estudos abordando impactos ambientais da produção de biocombustíveis.

As principais colaborações mundiais ocorrem entre os EUA com países da União Europeia, países da Ásia e Brasil. Os países da América do Sul, apresentaram as principais colaborações com os países da UE. Já os países da UE, além das mencionadas anteriormente, possui redes de colaboração com os países da Ásia e Austrália (Figura 4).



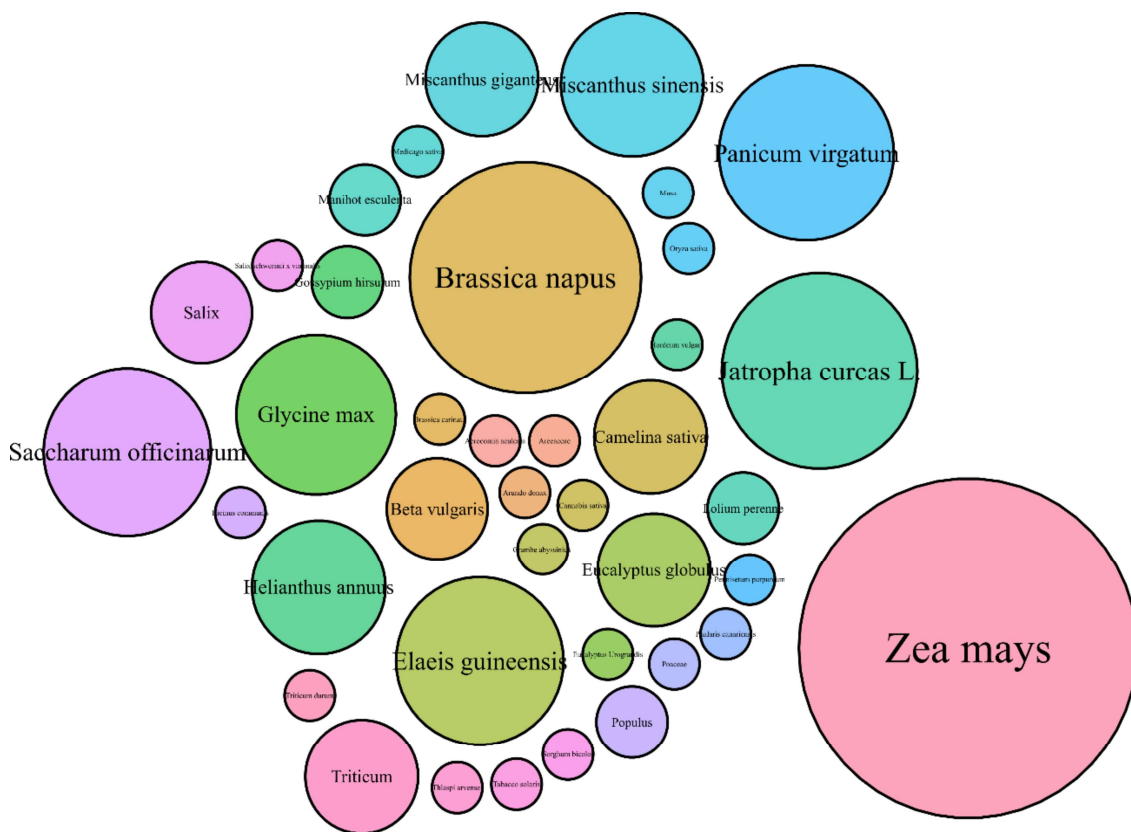
**Figura 4.** Rede de colaboração mundial em pesquisas sobre impactos ambientais da produção de bioenergia. As cores mais escuras representam os países com maior número de publicações.

Dentre os produtos finais de bioenergia estudados nas publicações que compõem esta revisão sistemática está o etanol, biodiesel, biocombustíveis em geral, bioenergia, biomassa, bioeletricidade e biogás, em ordem crescente de publicações respectivamente (Figura 5).



**Figura 5.** Produto final gerado nas publicações que compõem o escopo desta revisão sistemática.

Dentre as matérias-primas mais utilizadas nos estudos, estão o milho (*Zea mays*), canola (*Brassica napus*), pinhão-mansão (*Jatropha curcas*), dendê (*Elaeis guineenses*), capim (*Panicum virgatum*), cana-de-açúcar (*Sacharum offinarum*) e soja (*Glycine max*) (Figura 6).



**Figura 6.** Espécies mais estudadas como matéria-prima para produção de biocombustíveis. Dentre as que mais aparecem estão *Zea mays*, *Brassica napus*, *Jatropha curcas L.*, *Saccharum officinarum*, *Glycine max*, *Panicum virgatum*, *Elaeis guineensis*, *Miscanthus sinensis*, *Miscanthus giganteus*, *Helianthus annuus*, *Triticum*, *Camelina sativa*, *eucalyptus globulus*, *Beta vulgaris* e *Salix*.

As principais categorias de impactos ambientais associadas à produção de bioenergia, identificadas nesta revisão sistemática, incluem: água, solo, emissão de gases de efeito estufa (GEE), biodiversidade e qualidade do ar (Tabela 1). Os estudos consideram efeitos individuais e/ou conjuntos, os recursos solo/água foram os que mais apareceram. Além das categorias de impactos, incluímos também os temas relacionados, ou seja, a especificidade do impacto.

**Tabela 1.** Categorias de impacto ambientais e principais temas reportados na revisão sistemática sobre a produção de biocombustíveis.

<b>Categoria</b>	<b>Tema</b>	<b>Nº de artigos</b>
Água	Os impactos mais críticos foram eutrofização; lixiviação; demanda de água para irrigação da produção de matéria-prima podendo levar a escassez do recurso natural, prejudicando recargas de água subterrânea e os processos hidrológicos; poluição da água (toxicidade).	14
Água; biodiversidade; qualidade do ar	Desmatamento, perda de biodiversidade, escassez de água, impactos climáticos negativos.	1
Água; Emissão de GEE;	Aquecimento global e eutrofização.	1
Água; qualidade do ar	Melhor eficiência no uso da água, melhor assimilação de CO <sub>2</sub> , aumento das emissões de compostos orgânicos voláteis, causando redução da qualidade do ar; impactos negativos no uso de água doce, aquecimento global, toxicidade e ecotoxicidade aquática; menor potencial de acidificação e dos inorgânicos respiratórios em relação à gasolina.	3
Água; solo	Depleção abiótica, aquecimento global, toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce, marinha, terrestre, oxidação fotoquímica, lixiviação de nitrato contribuíram para acidificação e eutrofização; concorrência no uso da terra; erosão do solo; compactação do solo com o uso de maquinário; mudança climática; poluição aquática; aplicação de fertilizantes nitrogenados causam impacto ambiental; uso menos eficiente da água; mudança no uso da terra; a substituição do diesel mineral pelo biodiesel pode ser uma forma de melhorar o desempenho ambiental do sistema diminuindo os impactos sobre mudanças climáticas, eutrofização, toxicidade humana, esgotamento de água doce e esgotamento de combustíveis fósseis; Mudanças climáticas, poluição da água, ar e solo afeta a biodiversidade; erosão;	34
Água; solo; biodiversidade	Impactos negativos na biodiversidade, solo e qualidade da água através do aumento da intensificação do uso de terras marginais.	3

<p>Água; solo; biodiversidade; qualidade do ar</p>	<p>Conversão de terras naturais e agrícolas, intensificação agrícola lixiviação e degradação do solo, acidificação por uso de fertilizantes; biodiversidade: aumento das monoculturas e perda, modificação e fragmentação de habitats, redução da abundância das espécies; quantidade e qualidade da água: poluição devido ao uso ineficiente de fertilizantes e pesticidas, aumento do uso da água subterrânea e aumento do risco de secamento da mesma; qualidade do ar: acidificação pelo uso de pesticidas, aumento do uso de fertilizantes; aumento na temperatura do ar; queda da precipitação; redução do potencial global</p>	<p>2</p>
<p>Água; solo; Emissão de GEE;</p>	<p>O uso de biocombustível ,em menor escala de produção, reduziriam a quantidade de poluentes, acidificação, evitaria desmatamento; emissões de GEE, energia renovável, acidificação, porém não reduziriam eutrofização; emissões de CO<sub>2</sub> da conversão de terras, perda de floresta, fragmentação de habitat, exacerbação local de estresse hídrico, aumento das emissões de CO<sub>2</sub> e poluição dos recursos de água doce; eutrofização, uso do solo, aquecimento global, acidificação e toxicidade; emissões de CO<sub>2</sub> e uso de fertilizantes químicos na fase de cultivo; emissão de gases de efeito estufa; consumo de água; mudanças no uso da terra; aquecimento global; o uso de fertilizantes; toxicidade e ecotoxicidade; alteração no ciclo da água; erosão do solo; lixiviação.</p>	<p>31</p>
<p>Água; solo; Emissão de GEE; Biodiversidade</p>	<p>Emissão de GEE; aquecimento global; acidificação, eutrofização; poluição da água, ar, solo afeta a biodiversidade.</p>	<p>4</p>
<p>Água; solo; Emissão de GEE; Qualidade do ar</p>	<p>Mudança climática, aquecimento global, mudança da cobertura da terra, desmatamento, assoreamento; erosão do solo; sedimentação dos rios; poluição da água e do ar devido quantidades significativas de pesticidas e herbicidas, poeira e fumaça provenientes da plantação, acidificação; toxicidade para os humanos, ecotoxicidade em água doce, eutrofização; demanda de água; contaminação do solo e recursos hídricos, acidificação através da liberação de vários compostos na água.</p>	<p>10</p>

Emissão de GEE	Redução das emissões de gases de efeito estufa; O biodiesel de <i>Jatropha</i> é preferível para mitigação do aquecimento global em relação ao combustível diesel; o biodiesel derivado do óleo de palma é uma alternativa promissora e um candidato a combustível renovável para substituir o óleo diesel; mudanças climáticas; emissões de gases poluentes; mudança no uso da terra; redução de impactos ambientais; danos à qualidade do ecossistema e saúde humana.	28
Qualidade do ar	Poluição do ar associado às emissões da queima de biomassa de canaviais que impacta também na saúde humana; aumento na concentração de CO <sub>2</sub> atmosférico; produção de metano.	8
Solo	Contaminação do solo; mudança no uso da terra; maiores emissões de CO <sub>2</sub> , aumento do pH e acidez, com maior risco de acidificação; uso de fertilizantes a partir da ureia impactou a saúde humana; integração de culturas energéticas proporcionou redução das perdas de carbono no solo; escoamento dos nutrientes do solo; a integração de sistemas de bioenergia na paisagem agrícola pode contribuir positivamente para o aumento da recirculação de N e para a mitigação dos impactos ambientais associados às perdas de N, ao mesmo tempo em que fornece energia renovável para a sociedade	21
Solo; biodiversidade	A mudança no uso da terra tem impactos nas propriedades do solo como conteúdo de carbono, compactação, lixiviação de nutrientes, emissões de N <sub>2</sub> O, entre outros, na biodiversidade, no entanto, a depender da matéria-prima utilizada os impactos ambientais podem ser reduzidos evitando mudanças no uso do solo. Bioenergia representa vantagens sobre os combustíveis fósseis, no entanto a longo prazo provoca mudanças no uso da terra que é afetado pelo ciclo biológico (anual vs perene) e ainda pode causar acidificação no solo. Mudança no uso da terra impactam sobre diversos aspectos: fluxos biogênicos de CO <sub>2</sub> , aquecimento global e impacto na biodiversidade	7
Solo; Biodiversidade; Qualidade do ar	Desmatamento, mudança no uso de terras; alterações climáticas; expansão de biocombustível é responsável por perda na biodiversidade; aumento do desmatamento. Sugere-se combinação de políticas públicas para mudança no uso da terra, não apenas do setor de	6

	biocombustíveis, mas também do desmatamento de florestas.	
Solo; Emissão de GEE	Emissão de GEE; mudança no uso da terra; esgotamento abiótico; aquecimento global; uso de fertilizantes; mudanças globais; perda de estoques de carbono orgânico do solo; redução de emissões de GEE e redução do escoamento de nitrato de acordo com a cultura estudada	13
Outros	Prejuízo na variedade de serviços ecossistêmicos, redução dos alimentos para os animais silvestres, controle de enchentes, utilização de terras marginais, ou seja, degradadas. A eficiência energética com base em <i>Jatropha</i> apresentam vantagens em relação aos combustíveis fósseis. A menor emissão de gases de efeito estufa depende da escala de produção	5

#### 4. Discussão

Houve aumento no número de publicações com o tema bioenergia ao longo do tempo. Estados Unidos e União Europeia foram os países com maior número de publicações. Dentre os principais biocombustíveis encontrados na pesquisa estão o etanol, que é o mais utilizado mundialmente (HILL et al., 2006), e em seguida o biodiesel que está em fase expansão em relação a sua utilização no mercado bioenergético (MUR, 2019). Corroborando com estes resultados, as matérias-primas mais utilizadas foram milho, canola, dendê e soja, a primeira atende à produção de etanol e as demais biodiesel. O uso da água e do solo, emissão de GEE e biodiversidade foram as categorias de impactos mais reportadas.

Já os principais impactos encontrados estão relacionados com a eutrofização, lixiviação, toxicidade, escassez hídrica, mudanças diretas e indiretas no uso do solo, desmatamento, erosão, acidificação do solo, redução do carbono no solo, perda da biodiversidade, ecotoxicidade, alteração da paisagem, poluição do ar, emissões de GEE, mudanças climáticas, conversão de terras naturais e agrícolas, prejuízos na variedade dos serviços ecossistêmicos.

#### Publicações científicas

Após a publicação das diretrizes para uso de bioenergia em 2009 pela União Europeia e políticas ambientais, os países foram pressionados a reduzir as emissões de GEE (BLENGINI et al., 2011; CHERUBINI, 2010; MÄKI et al., 2021), o que levou a realizarem estudos voltados

para biocombustíveis, isso corrobora com a grande quantidade de publicações científicas no ano 2009 e retomando em 2017. Dentre as diretrizes estão a Lei Americana de Energia Limpa e Segurança nos EUA, que determina a utilização de biocombustíveis misturados ao combustível não renovável, e a *European Green Deal* na EU que tem como meta a redução de 90% das emissões de GEE no setor do transporte até 2050, sendo estes os países com maiores quantidades de publicações com a temática, corroborando com os resultados encontrados por Broch et al. (2013), Cherubini and Stromman (2010) e Muench e Guenther (2013).

Segundo o relatório da *Statistical Review of World Energy* (BRITISH PETROLEUM, 2020) e o relatório do *Renewables 2021 Global Status Report* (REN, 2021) foram produzidas 107.572.800 toneladas de biocombustíveis mundialmente no ano de 2019. Isso representa acréscimo de 3% em relação ao ano de 2018. O consumo de petróleo aumentou, porém, no ano de 2019, esse crescimento foi abaixo da média anual, registrou-se 1,3%, já no ano de 2020 foi de 0,9%. A demanda por todos os combustíveis líquidos, incluindo biocombustíveis, aumentou em 1,1 milhões de barris por dia (b/d) e atingiu 100 milhões de b/d pela primeira vez, representando o maior incremento dentre as fontes de energia. Esse aumento da produção pode estar relacionado com o aumento de pesquisas com biocombustíveis.

No período de 2014 a 2019, houve diminuição do número de publicações com esta temática. Esse período de redução nas publicações pode ser reflexo do resultado do sistema de produções iniciais de matéria-prima, pois foram realizadas sem planejamento e não obtiveram sucesso, causando impactos negativos na economia (CONTRAN et al., 2013). Após as publicações de novas políticas públicas voltadas para o incentivo do uso de bioenergia, de forma ordenada, com planejamento e metas, essas produções foram retomadas (CONTRAN et al., 2013).

Além disso, parte dos estudos publicados com o tema bioenergia questionam a viabilidade ambiental (CHERUBINI, 2010; SHEEHAN, 2009). Este processo parte de tomadas de decisões, logo, os objetivos destas publicações incluem também identificar e explorar o potencial das matérias-primas promissoras para tal finalidade, identificar os mecanismos necessários para iniciar essa produção, avaliar o custo benefício e planejar estratégias de implementação da produção de biomassa de forma eficiente, alinhando objetivos ambientais e econômicos (MUENCH; GUENTHER, 2013).



### **Colaboração entre os países**

Os resultados encontrados atendem aos dois principais mercados da bioenergia: EUA e União Europeia, ambos implementaram legislações que regulamentam o uso de bioenergia e metas específicas para biocombustíveis no setor do transporte, como a Diretiva de Energia Renovável da União Europeia (RED-EU) e Lei de Independência e Segurança Energética dos EUA (USA EISA). Estes resultados corroboraram com aqueles encontrados por Meyer; Leckert (2018) e Rios et al. (2020).

Os EUA possuem a maior quantidade de estudos publicados com o tema bioenergia. Além disso, ele é uma das grandes potências como produtor e consumidor de energia para diversos fins e é pressionado para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> como determinado pelas leis ambientais de energia limpa (CHERUBINI, 2010). O país também exhibe preocupação com relação à segurança nacional de energia, o que é refletido em seus estudos voltados para bioenergia (RADICS; DASMOHAPATRA; KELLEY, 2015). Dentre as redes de colaboração mundial com o tema bioenergia, as que se originam nos EUA se destacam com uma rede ampla e diversa. Essa colaboração ocorre principalmente com a Itália, Brasil e outros países da União Europeia.

Além disso, a exploração do tema bioenergia nos países sul-americanos também se relacionam com as políticas de incentivo à produção de energias limpas como o Programa Nacional de Álcool (Proálcool). Este foi o primeiro programa a incentivar a produção de etanol e Programa Nacional de Produção de Óleo e Vegetais para Fins Energéticos (Proóleo) além de outros, que por meio de isenções fiscais, como o Selo de Combustível Social no Brasil, possibilita linhas de crédito para agricultores familiares que produzem matéria-prima para biodiesel. O mesmo ocorre na Colômbia que, a partir de 2001, regulamentou a produção de biodiesel por meio de leis e isenções fiscais para os produtores rurais (ROMEU-DALMAU et al., 2018).

### **Produto final**

A bioenergia é derivada da biomassa que, como o nome indica, possui origem biológica. A madeira proveniente de árvores, galhos resíduos florestais e arbustos compreende 80% das bioenergias (GUEDES et al., 2010). Já os outros 20% compreendem o setor agrícola originados de culturas energéticas, resíduos e subprodutos que geram energia elétrica, biocombustíveis e biogás fornecendo aquecimento.

As fontes energéticas são classificadas em sólidas, líquidas ou gasosas. Esta última é originada principalmente do metano proveniente de resíduos agrícolas e urbanos e digestão anaeróbica que geram eletricidade e calor. A biomassa sólida é utilizada principalmente por populações de baixa renda para realizar atividades cotidianas como cozinhar e aquecer ambientes, como exemplo tem a queima de esterco, palha, resíduos agrícolas/florestais e madeira, esta categoria possui baixa eficiência energética. Já a biomassa energética líquida compõe o grupo dos biocombustíveis que geram eletricidade e é usado principalmente no setor do transporte, como exemplo tem o etanol e o biodiesel (AHMED et al., 2021).

As fontes energéticas são classificadas em sólidas, líquidas ou gasosas. Esta é originada, principalmente, do metano proveniente de resíduos agrícolas e urbanos e digestão anaeróbica que geram eletricidade e calor. A biomassa sólida é utilizada, principalmente, por populações de baixa renda para realizar atividades cotidianas como cozinhar e aquecer ambientes, como exemplo tem a queima de esterco, palha, resíduos agrícolas/florestais e madeira, esta categoria possui baixa eficiência energética. Já a biomassa energética líquida compõe o grupo dos biocombustíveis que geram eletricidade e é usado principalmente no setor do transporte, como exemplo tem o etanol e o biodiesel (AHMED et al., 2021).

Mesmo o etanol sendo o biocombustível mais utilizado mundialmente, o biodiesel obteve o maior crescimento na produção no ano de 2019. Em 2009 o biodiesel representava 23% do total de biocombustíveis e em 2019 atingiu 37%, esse crescimento nesse período ocorreu principalmente no Brasil e Indonésia, mas a produção ainda é liderada pelo EUA (BRITISH PETROLEUM, 2020; MUR, 2019). Os países da Europa e da Ásia são os maiores consumidores de biodiesel, com 81% e 74%, respectivamente. As taxas de produção e consumo mundiais podem explicar as principais vias de colaboração e comercialização global de bioenergia com o etanol e biodiesel liderando os produtos finais gerados na produção de biocombustíveis.

### **Matéria-prima**

Dentre as matérias primas utilizadas nos estudos que compõe esta revisão, com exceção do milho (*Zea mays*), que é utilizado para produção de etanol, as oleaginosas aparecem como matéria-prima predominante para atender a demanda bioenergética gerando como produto final o biodiesel. Isso ocorre devido o objetivo estabelecido no *scopus* da busca desta revisão. A soja, canola e óleo de palma são as matérias-primas mais utilizadas para produção de biodiesel são

(IPCC, 2011; MUR, 2019). Essas culturas já compõem o mercado alimentício e também são utilizadas no setor agropecuário.

O milho é a matéria-prima estudada amplamente, sendo a que mais aparece nas publicações. Esta cultura além de ser utilizada para produzir etanol, que é um biocombustível utilizado mundialmente, também compõem a alimentação humana e o setor agropecuário, assim como a cana-de-açúcar (*Sacharum officinarum*) que também está entre as culturas mais utilizadas. O fato de já haver domínio tecnológico sobre essas duas culturas e produções em grande escala a nível mundial facilita a exploração desta cultura para bioenergia e, conseqüentemente, predomínio de extensos monocultivos. Os países que mais produzem o milho e também etanol são os EUA e o Brasil, ambos estão liderando as pesquisas voltadas para bioenergia, o que justifica a grande quantidade de trabalhos com essa cultura (HILL et al., 2006). A canola (*Brassica napus*) é a terceira oleaginosa mais produzida no mundo e está se expandido para atender a fins energéticos, sendo cotada como uma cultura promissora pela quantidade de óleo produzido em suas sementes (MUR, 2019). Na União Europeia, esta é a principal cultura de fonte bioenergética e também é utilizada para alimentação humana (BAATH et al., 2021). A palma de óleo (*Elaeis guineenses*) é uma oleaginosa com potencial para produção de biodiesel. A América do Sul, países da Ásia e da África, se destacam pela produção desta cultura que apresenta grandes quantidades de óleo. Este também é utilizado no setor alimentício e a sua produção de óleo é tão abundante que MUR (2019) descartou a possibilidade de haver um conflito entre os mercados de energia e alimentos. Entretanto, esta cultura é exige alta demanda hídrica no seu cultivo (OLIVEIRA; BIZARI; GAZAFFI, 2020).

A soja (*Glycine max*) é utilizada amplamente na América do Norte e no Brasil. Esta cultura possui domínio tecnológico e possui alta escala de produção, porém sua principal finalidade é para atender às demandas agropecuárias como alimentação animal, entrando na bioenergia mundial como produto secundário (BAATH et al., 2021). No entanto, no Brasil, esta cultura é a principal fonte de biodiesel compondo 71,2% da matriz bioenergética do país (ANP, 2020).

### **Impactos ambientais**

De modo geral, observamos que a maioria dos trabalhos selecionados nesta revisão sistemática reportam que as categorias de impacto ambiental mais afetadas são: água, solo, emissão de GEE e biodiversidade, corroborando com as categorias encontradas por (MEYER; LECKERT, 2018). Observamos que essas categorias são abordadas de forma individual e/ou

conjunta. O maior número de trabalhos foi observado de forma conjunta, o que podemos inferir que a produção de biocombustíveis impacta o ecossistema como todo (BROCH; HOEKMAN; UNNASCH, 2013; MÄKI et al., 2021).

As emissões de GEE aumentaram significativamente devido ao uso de energias de fontes não renováveis como a queima de combustíveis fósseis e mudança no uso do solo o que resulta no potencial de aquecimento global, interferindo em todos os ecossistemas (IPCC, 2018). Em 2019 foi emitido 34.169 milhões de toneladas de dióxido de carbono, com aumento de 1,1% em relação ao ano anterior (BRITISH PETROLEUM, 2020). Isso posto, os estudos sobre bioenergia reportaram esta preocupação. Dentre as justificativas para utilizar bioenergia está a redução dos GEE, principalmente o CO<sub>2</sub> que é um dos mais emitidos na queima de combustíveis fósseis. Logo, os termos “emissões” e “carbono” aparecem com frequência nos estudos com essa temática.

Outro aspecto que vale ressaltar que há convergência quanto aos benefícios do uso de bioenergia comparado aos combustíveis fósseis, como os resultados encontrados por EL AKKARI et al. (2018), CHERUBINI, 2010;. 2015) e MÄKI et al. (2021). Esses autores defenderam a redução dos GEE devido ao uso de matérias-primas para biocombustíveis e também o uso dos resíduos florestais para esta mesma finalidade. No entanto, há divergências entre os autores quanto aos impactos positivos ou negativos da produção de biocombustíveis. Observamos que essa divergência é gerada principalmente no sistema de produção das culturas energéticas, ou seja, melhoria no processo de cultivo pode mitigar o impacto negativo, corroborando esta afirmação de MUENCH; GUENTHER (2013) que argumentaram que deve haver avaliação destes impactos.

Maki et al. (2021) também enfatizaram essa preocupação em relação aos “sumidouros de carbono” exercido pelas plantas. Eles defendem que o uso dos recursos florestais deve ser cauteloso e planejado e se possível não utilizar as plantas inteiras e sim algumas partes, para que a mesma continue a captação de CO<sub>2</sub> e reduza os impactos na biodiversidade local. Cherubini (2010) e EL Akkari et al. (2018) ressaltaram ainda que este cuidado deve ser evidenciado em culturas perenes e anuais, por possuírem maior potencial como sumidouros de CO<sub>2</sub>, em relação às culturas de ciclos curtos. Outro fator apontado por esses autores é o acesso limitado às fontes de biomassa energética que pode interferir diretamente na produção de bioenergia. Cherubini et al. (2015) apontaram que poucos estudos abordam o uso da água na produção de bioenergia e que este fator é essencial na avaliação do sistema de cultivo. O estudo realizado por Ahmed et al. (2021) encontrou resultados com efeitos ambientais nas seguintes proporções: positivos

(13%), negativos (56%) e mistos (8%) e também não especificados (23%), dentre os impactos identificados o risco à segurança alimentar e o uso de terras foram destacados com maior relevância.

Dessa forma, podemos afirmar que o modo de cultivo é primordial no resultado do produto final. Fica evidenciado que o cultivo precisa adotar técnicas sustentáveis, pois trará benefícios para a manutenção da cadeia produtiva de biocombustíveis. Muench; Guenther (2013) focando nas reduções de dLUC e iLUC, apontam estes como um dos impactos negativos de maior relevância durante a produção de bioenergia através de culturas vegetais, uma vez que estes também possuem reservatórios de carbono orgânico no solo, e evidenciam que o uso de terras marginais e degradadas podem colaborar com a mitigação destes efeitos, assim como o uso de biocombustíveis de segunda geração (BROCH; HOEKMAN; UNNASCH, 2013; CHERUBINI et al., 2015; EL AKKARI et al., 2018). De acordo com estes autores, o uso e manejo do solo interfere diretamente nas emissões de GEE. Meyer e Leckert (2018) sugere ainda que a avaliação sobre a produção de bioenergia não fique apenas no campo dos impactos ambientais, mas que amplie a nível de serviços ecossistêmicos, pois esta abrange todas as esferas que influenciam as tomadas de decisões como fatores sociais, ambientais, econômicos, sustentabilidade e legislação.

## **5. Conclusão**

A produção de bioenergia pode gerar impactos positivos e negativos no ambiente. O que irá determinar estes fatores são os processos adotados para realizar esta produção, e as políticas que influenciam diretamente nas tomadas de decisões.

Os componentes ambientais como a água, no solo, na biodiversidade e emissões de GEE são as principais categorias onde ocorrem os impactos ambientais encontrados nesta revisão sistemática. A mudança no uso direto e indireto do solo é um dos mais significantes, interfere diretamente nas emissões de GEE e também nos estoques de carbono.

Este estudo considera apenas os impactos ambientais. É necessário que mais estudos sejam realizados com esta temática e que considere também os serviços ecossistemas que abrange a dimensão do bem-estar humano, sustentabilidade, social, política e financeira, de forma que todas as variáveis que são consideradas para realizar as tomadas de decisões sejam avaliadas.

## Referências

- ACHEAMPONG, M. et al. In pursuit of Sustainable Development Goal (SDG) number 7: Will biofuels be reliable? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, n. 7, p. 927–937, 2017.
- ACHTEN, W. M. J. et al. Jatropha bio-diesel production and use. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 12, p. 1063–1084, dez. 2008.
- ACHTEN, W. M. J. et al. Jatropha: From global hype to local opportunity. **Journal of Arid Environments**, v. 74, n. 1, p. 164–165, 2010.
- AHMED, S. et al. Systematic review on effects of bioenergy from edible versus inedible feedstocks on food security. **npj Science of Food**, v. 5, n. 1, 2021.
- ANGGRAENI, T. D. A. et al. Genetic diversity of Jatropha curcas collections from different islands in Indonesia. **Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization**, v. 16, n. 4, p. 334–342, 5 ago. 2018.
- ANP. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2019**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2019/2019-anuario-versao-impressao.pdf>>. Acesso em: 1 maio. 2020.
- ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis 2020**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2020/anuario-2020.pdf>> Acesso em 05 de maio de 2021.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 1 nov. 2017.
- BAATH, G. S. et al. Transcriptome and proteome analyses of the molecular mechanisms underlying changes in oil storage under drought stress in Brassica napus L. **Biomass and Bioenergy**, v. 114, n. December 2020, p. 8770–8794, 2021.
- BEZERRA, M. DO C. DE L.; BURSZTYN, M. (COORD. . **Ciência & tecnologia para o desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF: PNUD Projeto BRA/94/016, 2000.
- BHERING, L. .; CRUZ, C. D.; LAVIOLA, B. . Biometria aplicada ao melhoramento de

espécies alternativas para a produção de biodiesel. In: **Estratégias em melhoramento de plantas**. Viçosa: [s.n.]. p. 90–129.

BHERING, L. L. et al. Differential response of *Jatropha* genotypes to different selection methods indicates that combined selection is more suited than other methods for rapid improvement of the species. **Industrial Crops and Products**, v. 41, p. 260–265, jan. 2013.

BLENGINI, G. A. et al. LCA of bioenergy chains in Piedmont (Italy): A case study to support public decision makers towards sustainability. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 57, p. 36–47, 1 dez. 2011.

BRITISH PETROLEUM. **Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy The Statistical Review world of World Energy and data on world energy markets from is The Review has been providing**. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>>.

BROCH, A.; HOEKMAN, S. K.; UNNASCH, S. A review of variability in indirect land use change assessment and modeling in biofuel policy. **Environmental Science and Policy**, v. 29, p. 147–157, 2013.

CHERUBINI, F. GHG balances of bioenergy systems - Overview of key steps in the production chain and methodological concerns. **Renewable Energy**, v. 35, n. 7, p. 1565–1573, 2010.

CHERUBINI, F. et al. LCA of bioenergy chains in Piedmont (Italy): A case study to support public decision makers towards sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, n. 2, p. 900–916, 2015.

CONTRAN, N. et al. State-of-the-art of the *Jatropha curcas* productive chain: From sowing to biodiesel and by-products. **Industrial Crops and Products**, v. 42, n. 1, p. 202–215, 2013.

CORREA, D. F. et al. Towards the implementation of sustainable biofuel production systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, n. May 2018, p. 250–263, 2019.

CRUZ, C. D.; FERREIRA, F. M.; PESSONI, L. A. **Biometria Aplicada ao Estudo da Diversidade Genética**. Viçosa: Suprema, 2011.

DEMIRBAS, A. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 8, p. 2106–2116, 2008.

DIRECTIVE EU. 2001 of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources. **Official Journal of the European Union**, v. 2018, n. L 328, p. 82–209, 2018.

DIVAKARA, B. N. et al. Biology and genetic improvement of *Jatropha curcas* L.: A review. **Applied Energy**, v. 87, n. 3, p. 732–742, 2010.

EL AKKARI, M. et al. A meta-analysis of the greenhouse gas abatement of bioenergy factoring in land use changes. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1–7, 2018.

EWING, M.; MSANGI, S. Biofuels production in developing countries: assessing tradeoffs in welfare and food security. **Environmental Science and Policy**, v. 12, n. 4, p. 520–528, 2009.

FALEIRO, G. **Marcadores genético-moleculares**. Planaltina, DF: [s.n.].

FAO. **World hunger falls, but 805 million still chronically undernourished**. Disponível em: <<http://www.fao.org/news/story/en/item/243839/icode/>>. Acesso em: 11 maio. 2019.

FAO. **The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050**.

FELFILI, J. M.; SILVA-JUNIOR, M. C. DA; NOGUEIRA, P. E. **Levantamento da vegetação arbórea na região de Nova Xavantina, MT. Boletim do Herbario Ezechias Paulo Heringer**, 1998.

GASPARATOS, A. et al. Using an ecosystem services perspective to assess biofuel sustainability. **Biomass and Bioenergy**, v. 114, p. 1–7, jul. 2018.

GERBENS-LEENES, W.; HOEKSTRA, A. Y.; VAN DER MEER, T. H. The water footprint of bioenergy. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 25, p. 10219–10223, 2009.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v. 36, n. 6, p. 2086–2097, 2008.

GUEDES, C. L. B. et al. Evaluation of Biofuel Derived from Lignocellulosic Biomass Fast



Pyrolysis Bio-Oil for Use as Gasoline Additive. **Quimica Nova**, v. 33, n. 4, p. 781–786, 2010.

HELLMANN, F.; VERBURG, P. H. Impact assessment of the European biofuel directive on land use and biodiversity. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 6, p. 1389–1396, 2010.

HILL, J. et al. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 103, n. 30, p. 11206–11210, 2006.

HUMPENÖDER, F. et al. Large-scale bioenergy production: How to resolve sustainability trade-offs? **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 2, 2018.

IEA. **Renewables 2017 Analysis and Forecasts to 2022** International Energy Agency. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/download/direct/2322>>.

IPCC. **Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change** IPCC, 2011: **Summary for Policymakers**. Cambridge University Press; 2011 Nov 21.

IPCC. **Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change**. Change IC. Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. **Global Warming of 1.5°C** IPCC, 2018: **Summary for Policymakers**. Global Warming of, 1

KESAVA RAO, A. V. R. et al. Water requirement and use by *Jatropha curcas* in a semi-arid tropical location. **Biomass and Bioenergy**, v. 39, p. 175–181, 2012.

KOÇAR, G.; CIVAŞ, N. An overview of biofuels from energy crops: Current status and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 900–916, 2013.

LAVIOLA, B. G. et al. Caracterização morfo-agronômica do banco de germoplasma de pinhão manso na fase jovem **Pesquisa agropecuária brasileira**, p. 371–379, 2010.

LAVIOLA, B. G. et al. Desempenho agrônômico e ganho genético pela seleção de pinhão - manso em três regiões do Brasil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, n. 1, p. 356–363, 2014.

LAVIOLA, B. G. et al. Biometric and biotechnology strategies in *Jatropha* genetic breeding for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, n. January, p. 894–904, set. 2017.

MAFAKHERI, F.; NASIRI, F. Modeling of biomass-to-energy supply chain operations: Applications, challenges and research directions. **Energy Policy**, v. 67, p. 116–126, 1 abr. 2014.

MÄKI, E. et al. Drivers and barriers in retrofitting pulp and paper industry with bioenergy for more efficient production of liquid, solid and gaseous biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 148, n. April, 2021.

MAKKAR, H. P. S. State-of-the-art on detoxification of *Jatropha curcas* products aimed for use as animal and fish feed: A review. **Animal Feed Science and Technology**, v. 222, n. 1, p. 87–99, 1 dez. 2016.

MCCOLLUM, D. L. et al. Connecting the sustainable development goals by their energy inter-linkages. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 3, 2018.

MEYER, M. A.; LECKERT, F. S. A systematic review of the conceptual differences of environmental assessment and ecosystem service studies of biofuel and bioenergy production. **Biomass and Bioenergy**, v. 114, p. 8–17, 2018.

MME. **Resenha Energética Brasileira Ano Base 2019** Resenha energética brasileira ano base 2019. Disponível em: <file:///F:/Renata/Doutorado/GP2/Sdewes 2020/JSDEWES/Resenha Energética Brasileira - edição 2020.pdf>.

MUENCH, S.; GUENTHER, E. A systematic review of bioenergy life cycle assessments. **Applied Energy**, v. 112, p. 257–273, 2013.

MUR, D. C. C. **Evolução e sustentabilidade do Programa de Biodiesel: um estudo comparativo entre o Brasil e a Colômbia**. 109f Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável), Centro de Desenvolvimento Sustentável. Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

OLIVEIRA, G. C. A.; BIZARI, D. R.; GAZAFFI, R. Potencial de crescimento de mudas de dendê para produção de biodiesel no estado de são paulo. **Energia na agricultura**, v. 35, n. 1, p. 107–114, 20 mar. 2020.

PAGE, M. J. et al. **The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews**The BMJBMJ Publishing Group, , 29 mar. 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1136/bmj.n71>>. Acesso em: 15 jun. 2021

R CORE TEAM, D. **R: a language and environment for statistical computing**. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>.

RADICS, R.; DASMOHAPATRA, S.; KELLEY, S. S. Systematic review of bioenergy perception studies. **BioResources**, v. 10, n. 4, p. 8770–8794, 2015.

RAMALHO, M. et al. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. Lavras: UFLA, 2012.

REUMERMAN, P. et al. Bioenergy retrofits for europe ' s industry -the biofit project. n. June 2019, 2020.

RIAHI, K. et al. Locked into Copenhagen pledges - Implications of short-term emission targets for the cost and feasibility of long-term climate goals. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 90, n. PA, p. 8–23, 1 jan. 2015.

RINCÓN, L. E. et al. Optimization of the Colombian biodiesel supply chain from oil palm crop based on techno-economical and environmental criteria. **Energy Economics**, v. 47, n. 2015, p. 154–167, 2015.

RIOS, E. M. et al. Revisão bibliométrica da produção de biocombustíveis , primeira geração ( 1g ) e segunda geração ( 2g ). **Revista Tecnologia & Cultura**, n. 36, p. 149–157, 2020.

ROMEU-DALMAU, C. et al. Impacts of land use change due to biofuel crops on climate regulation services: Five case studies in Malawi, Mozambique and Swaziland. **Biomass and Bioenergy**, v. 114, p. 30–40, 2018.

ROSADO, T. B. et al. Molecular Markers Reveal Limited Genetic Diversity in a Large Germplasm Collection of the Biofuel Crop *Jatropha curcas* L. in Brazil. **Crop Science**, v. 50, n. 6, p. 2372–2382, nov. 2010.

SCHMIDT, J. H. Comparative life cycle assessment of rapeseed oil and palm oil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 2, p. 183–197, 2010.

SHEEHAN, J. J. Biofuels and the conundrum of sustainability. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 20, n. 3, p. 318–324, 2009.

STENBERG, J. A. A Conceptual Framework for Integrated Pest Management. **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 9, p. 759–769, set. 2017.

STOY, P. C. et al. Opportunities and Trade-offs among BECCS and the Food, Water, Energy, Biodiversity, and Social Systems Nexus at Regional Scales. **BioScience**, v. 68, n. 2, p. 100–111, 2018.

STREIMIKIENE, D.; SIMIONESCU, M.; BILAN, Y. The impact of biodiesel consumption by transport on economic growth in the European Union. **Engineering Economics**, v. 30, n. 1, p. 50–58, 2019.

SU, Y.; ZHANG, P.; SU, Y. An overview of biofuels policies and industrialization in the major biofuel producing countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 991–1003, 2015.

TAKASE, M. et al. An expatiate review of neem, jatropha, rubber and karanja as multipurpose non-edible biodiesel resources and comparison of their fuel, engine and emission properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 495–520, mar. 2015.

TEODORO, P. E. et al. Multivariate diallel analysis allows multiple gains in segregating populations for agronomic traits in *Jatropha*. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 1, 2017.

VALDEMARAS, M. et al. The impact of biofuels production development in the European Union. **Agricultural Economics (Zemědělská ekonomika)**, n. 4, p. 170–185, 2018.

VERDADE, L. M.; PIÑA, C. I.; ROSALINO, L. M. Biofuels and biodiversity: Challenges and opportunities. **Environmental Development**, v. 15, p. 64–78, 2015.

ZHANG, J. et al. Genome-wide association study, genomic prediction and marker-assisted selection for seed weight in soybean (*Glycine max*). **Theor Appl Genet**, v. 129, p. 117–130, 2016.

ZHANG, P. et al. Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: A comprehensive

review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 142, n. December 2018, p. 215–224, 2019.

## Material suplementar

**Tabela 1.** Lista de artigos selecionados para compor a revisão sistemática sobre os impactos ambientais da produção de biocombustíveis

<b>Título</b>	<b>Ano</b>	<b>DOI</b>
2nd Generation biofuels a sure bet? A life cycle assessment of how things could go wrong	2011	10.1016/j.jclepro.2010.08.021
A county-level estimation of renewable surface water and groundwater availability associated with potential large-scale bioenergy feedstock production scenarios in the United States	2019	10.1111/gcbb.12576
A land-based approach for the environmental assessment of Mediterranean annual and perennial energy crops	2019	10.1016/j.eja.2018.11.007
A life cycle assessment of biodiesel production from winter rape grown in Southern Europe	2012	10.1016/j.biombioe.2012.02.003
A life cycle assessment of pennycress ( <i>Thlaspi aruense</i> L.) -derived jet fuel and diesel		
A mixed-integer optimization model for the economic and environmental analysis of biomass production	2014	10.1016/j.biombioe.2014.03.025
A proposed framework for determining the environmental impact of replacing agricultural grassland with <i>Miscanthus</i> in Ireland	2011	10.1111/j.1757-1707.2010.01086.x
A regional life cycle assessment and economic analysis of camelina biodiesel production in the Pacific Northwestern US	2018	10.1016/j.jclepro.2017.11.172
Accounting for the constrained availability of land: a comparison of bio-based ethanol, polyethylene, and PLA with regard to non-renewable energy use and land use	2012	10.1002/bbb.1320
Air Quality and Health Impacts of an Aviation Biofuel Supply Chain Using Forest Residue in the Northwestern United States	2018	10.1021/acs.est.7b04860
An economic and environmental comparison of a biochemical and a thermochemical lignocellulosic ethanol conversion processes	2009	10.1007/s11367-008-0050-8

An integrative modeling framework to evaluate the productivity and sustainability of biofuel crop production systems	2010	10.1017/S0021859610000316
Analysis of bioenergy production at different levels of integration in energy-driven biorefineries	2018	10.1007/s10098-018-1565-8
Applying consequential LCA to support energy policy: Land use change effects of bioenergy production	2014	10.1016/j.scitotenv.2013.10.097
Assessing multiple biomass-feedstock in the optimization of power and fuel supply chains for sustainable mobility	2018	10.1016/j.cherd.2017.12.023
Assessing nitrate leaching during the three-first years of <i>Miscanthus X giganteus</i> from on-farm measurements and modeling	2014	10.1111/gcbb.12066
Assessing the Environmental Impact of Water Consumption by Energy Crops Grown in Spain	2013	10.1111/j.1530-9290.2011.00449.x
ASSESSMENT OF CLIMATIC PARAMETERS DURING THE VEGETATION PERIOD IN TERMS OF EFFICIENCY OF GROWING OF ENERGY PLANTS IN SLOVAKIA REGIONS	2018	
Assessment of <i>Miscanthus</i> Yield Potential from Strip-Mined Lands (SML) and Its Impacts on Stream Water Quality	2019	10.3390/w11030546
Assessment of the Potential for Producing Liquid Biofuels from Alternative Feedstocks Grown on Degraded Land and Saline Soils	2010	10.2134/agronj2010.0106
Attributional life cycle assessment of biofuels for shipping: Addressing alternative geographical locations and cultivation systems	2019	10.1016/j.jenvman.2019.01.036
Bioenergy crop induced changes in soil properties: A case study on <i>Miscanthus</i> fields in the Upper Rhine Region	2018	10.1371/journal.pone.0200901
Bioenergy from forestry and changes in atmospheric CO <sub>2</sub> : Reconciling single stand and landscape level approaches	2013	10.1016/j.jenvman.2013.07.021
Bioenergy in the United States: progress and possibilities	2000	10.1016/j.renene.2003.10.004

Bioenergy Production from Perennial Energy Crops: A Consequential LCA of 12 Bioenergy Scenarios including Land Use Changes	2012	10.1021/es3024435
Biofuel policies and the environment: Do climate benefits warrant increased production from biofuel feedstocks?	2011	10.1016/j.ecolecon.2010.11.002
Biofuel production and soil GHG emissions after land-use change to switchgrass and giant reed in the U.S. Southeast	2018	10.1002/fes3.125
Biogenic CO <sub>2</sub> fluxes, changes in surface albedo and biodiversity impacts from establishment of a miscanthus plantation	2014	10.1016/j.jenvman.2014.06.033
Biogeochemical consequences of regional land use change to a biofuel crop in the southeastern United States	2015	10.1890/ES15-00546.1
Biomass production and nitrogen accumulation and remobilisation by <i>Miscanthus x giganteus</i> as influenced by nitrogen stocks in belowground organs	2011	10.1016/j.fcr.2011.01.005
Bio-production from Australian sugarcane: an environmental investigation of product diversification in an agro-industry	2013	10.1016/j.jclepro.2012.08.036
Capturing the implications of land use change in Brazil through environmental assessment: Time for a strategic approach?	2011	10.1016/j.eiar.2010.06.002
Cellulosic feedstock production on Conservation Reserve Program land: potential yields and environmental effects	2017	10.1111/gcbb.12352
Co-design and ex ante assessment of cropping system prototypes including energy crops in Eastern France	2018	10.1016/j.biombioe.2018.06.013
Comparative analysis of key socio-economic and environmental impacts of smallholder and plantation based <i>jatropha</i> biofuel production systems in Tanzania	2014	10.1016/j.biombioe.2013.10.005
Comparative life cycle assessment of first- and second-generation ethanol from sugarcane in Brazil	2019	10.1007/s11367-018-1505-1
Comparative life cycle assessment of the integrated generation of solid fuel and biogas from biomass (IFBB) and whole crop digestion (WCD) in Germany	2011	10.1016/j.biombioe.2010.08.056



Comparing energy crops for biogas production Yields, energy input and costs in cultivation using digestate and mineral fertilisation	2014	10.1016/j.biombioe.2014.03.061
Comparison of different treatment options for palm oil production waste on a life cycle basis		
Corn Ethanol Production, Food Exports, and Indirect Land Use Change		
Cradle-to-gate life cycle assessment of Eucalyptus globulus short rotation plantations in Chile	2015	10.1016/j.jclepro.2015.02.085
Cultivation of Crambe abyssinica non-food crop in Portugal for bioenergy purposes: agronomic and environmental assessment	2019	10.1016/j.indcrop.2019.111501
Cultivation of oleaginous yeast using aqueous fractions derived from hydrothermal pretreatments of biomass	2014	10.1016/j.biortech.2014.08.006
Current state and environmental impact assessment for utilizing oil palm empty fruit bunches for fuel, fiber and fertilizer - A case study of Malaysia	2013	10.1016/j.biombioe.2013.01.012
Do biofuels require more water than do fossil fuels? Life cycle-based assessment of jatropha oil production in rural Mozambique	2013	10.1016/j.jclepro.2013.03.039
Economic and environmental impact marginal analysis of biorefinery products for policy targets	2014	10.1016/j.jclepro.2014.03.051
Effect of farming system and yield in the life cycle assessment of Jatropha-based bioenergy in Mali	2014	10.1016/j.esd.2014.10.001
Effects of biosolids on biodiesel crop yield and belowground communities	2014	10.1016/j.ecoleng.2014.03.083
Effects on aquatic and human health due to large scale bioenergy crop expansion	2011	10.1016/j.scitotenv.2011.05.007
Efficiency analysis of bioenergy potential on winter fallow fields: A case study of rape	2018	10.1016/j.scitotenv.2018.02.016
Energy and Environmental Aspects of Using Eucalyptus from Brazil for Energy and Transportation Services in Europe	2018	10.3390/su10114068
Energy balance and greenhouse gas emissions of dryland camelina as influenced by tillage and nitrogen	2015	10.1016/j.energy.2015.07.136

Energy production from biomass and its relevance to urban planning and compatibility assessment: two applicative cases in Italy	2015	10.1007/s10098-014-0867-8
Energy requirements and environmental impacts associated with the production of short rotation willow ( <i>Salix</i> sp.) chip in Ireland	2014	10.1111/gcbb.12111
Environmental analysis of sunflower production with different forms of mineral nitrogen fertilizers	2013	10.1016/j.jenvman.2013.07.029
Environmental and life cycle analysis of a biodiesel production line from sunflower in the Province of Siena (Italy)	2013	10.1016/j.enpol.2013.04.009
Environmental and Social Impacts of Oil Palm Plantations and their Implications for Biofuel Production in Indonesia		
Environmental assessment of dehydrated alfalfa production in Spain	2011	10.1016/j.resconrec.2011.05.010
Environmental consequences of the conversion from traditional to energy cropping systems in a Mediterranean area	2015	10.1016/j.eja.2015.07.008
Environmental Impact Associated with the Supply Chain and Production of Biodiesel from <i>Jatropha curcas</i> L. through Life Cycle Analysis	2018	10.3390/su10051451
Environmental Impacts of <i>Jatropha curcas</i> Biodiesel in India	2012	10.1155/2012/623070
Environmental Impacts of Water Use in Global Crop Production: Hotspots and Trade-Offs with Land Use	2011	10.1021/es1041755
Environmental Implications of <i>Jatropha</i> Biofuel from a Silvi-Pastoral Production System in Central-West Brazil		
Environmental life cycle assessment of rapeseed straight vegetable oil as self-supply agricultural biofuel	2013	10.1016/j.renene.2012.06.031
Environmental life-cycle assessment of rapeseed-based biodiesel: Alternative cultivation systems and locations	2014	10.1016/j.apenergy.2013.06.048
Environmental sustainability and improvement options for agribiomass chains: Straw and turnip rape	2015	10.1016/j.biombioe.2015.08.014

Environmental sustainability of biodiesel in Brazil	2014	10.1016/j.enpol.2013.09.062
Estimating maximum land use change potential from a regional biofuel industry	2014	10.1016/j.enpol.2013.10.062
EVALUATION OF FOSSIL FUEL CONSUMPTION AND ENVIRONMENTAL IMPACTS IN SUGAR BEET PRODUCTION AS A BIOFUEL RAW MATERIAL	2019	
Expansion assessment of the sugarcane and ethanol production in the Llanos Orientales region in Colombia	2018	10.1002/bbb.1898
Expansion of sugarcane production in Sao Paulo, Brazil: Implications for fire occurrence and respiratory health		
Geospatial assessment of bioenergy land use and its impacts on soil erosion in the US Midwest	2017	10.1016/j.jenvman.2016.12.057
GHG emissions and other environmental impacts of indirect land use change mitigation	2017	10.1111/gcbb.12394
Global environmental consequences of increased biodiesel consumption in Switzerland: consequential life cycle assessment	2009	10.1016/j.apenergy.2010.07.003
Global perspectives on first generation liquid biofuel production	2011	10.3906/tar-1005-905
Green, Blue and Grey Bioenergy Water Footprints, a Comparison of Feedstocks for Bioenergy Supply in 2040	2018	10.1007/s40710-018-0311-x
Greenhouse gas assessment of soybean production: implications of land use change and different cultivation systems	2013	10.1016/j.jclepro.2013.05.026
Greenhouse gas emissions and energy balance of sunflower biodiesel: Identification of its key factors in the supply chain	2013	10.1016/j.resconrec.2013.01.014
Greenhouse gas mitigation effects of integrating biomass production into European agriculture	2014	10.1002/bbb.1470
Greenhouse gases emissions and energy use of wheat grain-based bioethanol fuel blends	2010	10.1166/jbmb.2010.1087
Harvesting straw in Poland and Finland: How does it affect greenhouse gas	2018	10.1108/IJESM-01-2017-0007

emissions, biodiversity and soil physical quality?		
How effective are the sustainability criteria accompanying the European Union 2020 biofuel targets?	2013	10.1111/j.1757-1707.2012.01188.x
Hydrologic and water quality impacts and biomass production potential on marginal land	2015	10.1016/j.envsoft.2015.07.004
Identifying trade-offs between socio-economic and environmental factors for bioenergy crop production: A case study from northern Kentucky	2019	10.1016/j.renene.2019.04.110
Influence of high gravity process conditions on the environmental impact of ethanol production from wheat straw	2014	10.1016/j.biortech.2014.09.044
Integrated assessment of biodiesel policies aimed at family farms in Brazil	2014	10.1016/j.agsy.2014.08.004
Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in Brazil	2010	10.1016/j.jclepro.2009.09.007
Integrated Environmental Assessment of sunflower oil production	2012	10.1016/j.procbio.2011.08.007
Integrated sustainability assessment for a bioenergy system: A system dynamics model of switchgrass for cellulosic ethanol production in the US midwest	2019	10.1016/j.jclepro.2019.06.205
Integration of a small biofuel refinery in a rural context	2009	10.1007/s10570-009-9317-x
Integration of agricultural and energy system models for biofuel assessment	2013	10.1016/j.envsoft.2013.05.007
Integration of bioenergy systems into UK agriculture-New options for management of nitrogen flows	2013	10.1016/j.biombioe.2013.04.002
Interactions among bioenergy feedstock choices, landscape dynamics, and land use	2011	10.1890/09-0501.1
Interdependencies and telecoupling of oil palm expansion at the expense of Indonesian rainforest	2019	10.1016/j.rser.2018.12.050
Investigating the Efficacy of Integrating Energy Crops into Non-Profitable Subfields in Iowa	2018	10.1007/s12155-018-9925-0
Jatropha biodiesel fueling sustainability?	2007	10.2134/jeq2007.0599

Jatropha cultivation in Malawi and Mozambique: impact on ecosystem services, local human well-being, and poverty alleviation	2016	10.5751/ES-08554-210303
Jatropha in Mexico: Environmental and Social Impacts of an Incipient Biofuel Program		
Land use change in a biofuels hotspot: The case of Iowa, USA	2011	10.1016/j.biombioe.2010.08.047
LCA Study of Oleaginous Bioenergy Chains in a Mediterranean Environment	2014	10.3390/en7106258
Life cycle analysis for bioethanol production from sugar beet crops in Greece		
Life cycle assessment (LCA) of crops for energy production	2011	
Life Cycle Assessment (LCA) of the biofuel production process from sunflower oil, rapeseed oil and soybean oil	2011	10.1016/j.fuproc.2010.03.004
Life Cycle Assessment for biodiesel production under Greek climate conditions	2010	10.1016/j.jclepro.2009.11.004
Life cycle assessment of biodiesel production from solaris seed tobacco	2019	10.1016/j.jclepro.2019.05.177
Life cycle assessment of Brassica carinata biomass conversion to bioenergy and platform chemicals	2014	10.1016/j.jclepro.2013.11.043
Life cycle assessment of camelina and crambe production for biorefinery and energy purposes	2019	10.1016/j.jclepro.2019.117755
Life cycle assessment of camelina oil derived biodiesel and jet fuel in the Canadian Prairies	2014	10.1016/j.scitotenv.2014.02.003
Life cycle assessment of castor-based biorefinery: a well to wheel LCA	2018	10.1007/s11367-017-1383-y
Life cycle assessment of different bioenergy production systems including perennial and annual crops	2011	10.1016/j.biombioe.2011.10.014
Life cycle assessment of ethanol production from miscanthus: A comparison of production pathways at two European sites	2019	10.1111/gcbb.12551
Life cycle assessment of eucalyptus short rotation coppices for bioenergy production in southern France	2013	10.1111/gcbb.12008

Life cycle assessment of fuel chip production from eucalypt forest residues	2014	10.1007/s11367-013-0671-4
Life cycle assessment of hydrotreated vegetable oil from rape, oil palm and Jatropha	2011	10.1016/j.jclepro.2010.02.008
Life cycle assessment of Jatropha biodiesel as transportation fuel in rural India	2010	10.1002/bbb.245
Life cycle assessment of second generation ethanol derived from banana agricultural waste: Environmental impacts and energy balance	2018	10.1016/j.jclepro.2017.10.298
Life cycle assessment of selected future energy crops for Europe	2010	10.1111/j.1757-1707.2010.01046.x
Life cycle assessment of small-scale combined heat and power plant: Environmental impacts of different forest biofuels and replacing district heat produced from natural gas	2018	10.1016/j.jclepro.2017.10.241
Life cycle assessment of soybean-based biodiesel in Argentina for export	2009	10.1111/j.1365-2486.2008.01706.x
Life cycle assessment of sugarcane ethanol production in India in comparison to Brazil	2014	10.1007/s11367-014-0714-5
Life cycle assessment of sunflower and rapeseed as energy crops under Chilean conditions	2010	10.1021/ef9006438
Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel	2005	10.1002/bbb.39
Life cycle environmental impacts of a prospective palm-based biorefinery in Para State-Brazil	2013	10.1016/j.biortech.2013.07.100
Life cycle water use of a biomass-based pyrolysis polygeneration system in China	2018	10.1016/j.apenergy.2018.05.009
Life-cycle assessment of bioethanol production from sweet sorghum stalks cultivated in the state of Yucatan, Mexico	2018	10.1007/s10098-017-1480-4
Macroeconomic modeling for assessing sustainability of bioethanol production in Thailand	2019	10.1016/j.enpol.2018.12.026
Marginal land for energy crops: Exploring definitions and embedded assumptions	2013	10.1016/j.enpol.2013.07.048

Measuring ecological impact of water consumption by bioethanol using life cycle impact assessment	2012	10.1007/s11367-011-0328-0
Mitigation potential and environmental impact of centralized versus distributed BECCS with domestic biomass production in Great Britain	2019	10.1111/gcbb.12630
Mix of First-and Second-Generation Biofuels to Meet Multiple Environmental Objectives: Implications for Policy at a Watershed Scale	2015	10.1142/S2382624X1550006X
Modeling water and soil quality environmental impacts associated with bioenergy crop production and biomass removal in the Midwest USA	2011	10.1016/j.ecolmodel.2011.02.024
Modeling Water Quality Impacts of Cellulosic Biofuel Production from Corn Silage	2014	10.1007/s12155-013-9391-7
Multi-attribute uncertainty analysis of the life cycle of lignocellulosic feedstock for biofuel production	2017	10.1002/bbb.1737
Municipal Biosolids as an Alternative Nutrient Source for Bioenergy Crops: I. Elephantgrass Biomass Production and Soil Responses	2010	10.1016/j.jclepro.2009.11.002
Net Energy, CO <sub>2</sub> Emission and Land-Based Cost-Benefit Analyses of Jatropha Biodiesel: A Case Study of the Panzhihua Region of Sichuan Province in China		
Oil crops for biodiesel production in Italy	1999	10.1016/S0961-9534(00)00011-8
Palm biodiesel prospect in the Indonesian power sector	2017	10.1016/j.eti.2017.01.001
Pan-European regional-scale modelling of water and N efficiencies of rapeseed cultivation for biodiesel production	2009	10.1016/j.jclepro.2009.05.003
Parallel production of biodiesel and bioethanol in palm-oil-based biorefineries: life cycle assessment on the energy and greenhouse gases emissions	2011	10.1002/bbb.271
Perennial Biomass Grasses and the Mason-Dixon Line: Comparative Productivity across Latitudes in the Southern Great Plains	2013	10.1007/s12155-012-9254-7

Pollutant gas and particulate material emissions in ethanol production in Brazil: social and environmental impacts		10.1007/s11356-019-06613-w
Potential and Environmental Impacts of Liquid Biofuel from Agricultural Residues in Thailand	2019	10.3390/su11051502
Potential Environmental Impacts of Increased Reliance on Corn-Based Bioenergy	2011	10.1007/s10640-010-9428-8
Potential for optimized production and use of rapeseed biodiesel. Based on a comprehensive real-time LCA case study in Denmark with multiple pathways	2013	10.1007/s11367-012-0486-8
Quantifying the global cropland footprint of the European Union's non-food bioeconomy	2019	10.1088/1748-9326/ab07f5
Rapeseed for energy production: Environmental impacts and cultivation methods	2014	10.1016/j.biombioe.2014.07.001
Recent grassland losses are concentrated around US ethanol refineries	2017	10.1088/1748-9326/aa6446
Reduction in greenhouse gas emissions due to the use of bio-ethanol from wheat grain and straw produced in the south-eastern USA	2010	10.1016/j.scitotenv.2010.07.046
Reduction of energy consumption in biodiesel fuel life cycle	2004	10.1016/j.biombioe.2005.06.003
Regional life cycle assessment of soybean derived biodiesel for transportation fleets	2012	10.1016/j.enpol.2012.05.025
Regional variations in greenhouse gas emissions of biobased products in the United States-corn-based ethanol and soybean oil		
Regulating the Oil Palm Boom: Assessing the Effectiveness of Environmental Governance Approaches to Agro-industrial Pollution in Indonesia	2010	
Relevance of environmental impact categories for perennial biomass production	2017	10.1111/gcbb.12372
Replacing Gasoline with Corn Ethanol Results in Significant Environmental Problem-Shifting	2012	10.1021/es203641p
Response of Soil Greenhouse Gas Fluxes and Soil Properties to Nitrogen Fertilizer Rates under Camelina and Carinata Nonfood Oilseed Crops	2019	10.1007/s12155-019-09987-4



Selecting the best environmental friendly oilseed crop by using Life Cycle Assessment, water footprint and analytic hierarchy process methods	2018	10.1016/j.jclepro.2018.07.115
Short-term harvesting of biomass from conservation grasslands maintains plant diversity	2015	10.1111/gcbb.12195
Simulated watershed scale impacts of corn stover removal for biofuel on hydrology and water quality	2012	10.1002/hyp.8280
Simulating the hydrologic response of a semiarid watershed to switchgrass cultivation	2014	10.2166/nh.2013.163
Simulation of macauba palm cultivation: an energy-balance and greenhouse gas emissions analysis	2018	10.1080/17583004.2018.1463783
Soil Carbon Change and Net Energy Associated with Biofuel Production on Marginal Lands: A Regional Modeling Perspective	2013	10.2134/jeq2013.05.0171
Soil organic carbon changes in the cultivation of energy crops: Implications for GHG balances and soil quality for use in LCA	2011	10.1016/j.biombioe.2009.10.019
Spatial and life cycle assessment of bioenergy-driven land-use changes in Ireland	2019	10.1016/j.scitotenv.2019.01.397
Spatio-Temporal Impacts of Biofuel Production and Climate Variability on Water Quantity and Quality in Upper Mississippi River Basin	2015	10.3390/w7073283
Statistical confirmation of indirect land use change in the Brazilian Amazon	2011	10.1088/1748-9326/6/2/024010
Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils-Effects of land use change on soil chemical attributes	2015	10.1016/j.agee.2015.06.006
Sustainability assessment of large-scale ethanol production from sugarcane	2010	
Sustainability assessment of soybean production in Southern Brazil: A life cycle approach	2018	10.1016/j.spc.2017.11.002
Sustainable intensification of high-diversity biomass production for optimal biofuel benefits	2018	10.1038/s41893-018-0166-1

Sustainable liquid biofuels and their environmental impact		
Switchgrass simulation by the ALMANAC model at diverse sites in the southern US	2005	10.1016/j.biombioe.2005.06.004
Switchgrass-Based Bioethanol Productivity and Potential Environmental Impact from Marginal Lands in China	2017	10.3390/en10020260
Technical applications of Jatropha oil-environmental effectiveness of renewable resources	2015	10.1007/s11367-015-0953-0
The eco-efficiency of rapeseed and sunflower cultivation in Italy. Joining environmental and economic assessment	2018	10.1016/j.jclepro.2017.11.094
The feasibility and implications for conventional liquid fossil fuel of the Indonesian biofuel target in 2025	2013	10.1016/j.enpol.2013.06.103
The Impact of Energy Source on the Life-Cycle Assessment of Power-to-Liquid Fuels	2019	10.12911/22998993/104659
The influence of organic and inorganic fertiliser application rates on UK biomass crop sustainability	2011	10.1016/j.biombioe.2010.12.002
The land-water nexus of biofuel production in Brazil: Analysis of synergies and trade-offs using a multiregional input-output model	2019	10.1016/j.jclepro.2018.12.264
The new gold rush: Fueling ethanol production while protecting water quality	2008	10.1016/j.cherd.2009.05.007
The potential of environmental impact as a result of the development of palm oil plantation	2019	10.1108/MEQ-11-2018-0190
The Water Demand of Energy: Implications for Sustainable Energy Policy Development	2013	10.3390/su5114674
Toward Sustainable Production of Second Generation Bioenergy Feedstocks	2010	10.1016/j.jclepro.2009.09.008
Transition towards a more environmentally sustainable biodiesel in South America: The case of Chile	2012	10.1016/j.apenergy.2011.09.024
Uncertainty analysis in the life cycle assessment of cassava ethanol in China	2019	10.1016/j.jclepro.2018.09.199
Unintended consequences of bioethanol feedstock choice in China	2012	10.1016/j.biortech.2012.08.097

Using a crop model to account for the effects of local factors on the LCA of sugar beet ethanol in Picardy region, France		
Using a Strategic Environmental Assessment framework to quantify the environmental impact of bioenergy plans	2012	10.1111/j.1757-1707.2011.01143.x
Using DAYCENT to quantify on-farm GHG emissions and N dynamics of land use conversion to N-managed switchgrass in the Southern U.S.	2011	10.1016/j.agee.2011.03.011
Using the ecosystem service approach to determine whether jatropha projects were located in marginal lands in Ghana: Implications for site selection	2018	10.1016/j.biombioe.2017.07.020
VOC emissions and carbon balance of two bioenergy plantations in response to nitrogen fertilization: A comparison of Miscanthus and Salix	2018	10.1016/j.envpol.2018.02.034
'Woods-to-Wake' Life Cycle Assessment of residual woody biomass based jet-fuel using mild bisulfite pretreatment	2018	10.1016/j.biombioe.2017.10.041

---

## **Capítulo 2**

### **Genetic diversity and population structure in *Jatropha* based on molecular markers**

Capítulo publicado e parcialmente formatado conforme o periódico Genetic Resources Crop Evolution

Souza Carneiro, Adriana, Dos Santos, Adriano ; Laviola, Bruno Galvêas ; Teodoro, Larissa Pereira Ribeiro ; Teodoro, Paulo Eduardo ; Rodrigues, Erina Vitório . Genetic diversity and population structure in *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.) based on molecular markers. **GENETIC RESOURCES AND CROP EVOLUTION**, v. 2, p. 1-10, 2021.

## **Abstract**

Jatropha is an oleaginous potential, however, some studies report that there is low genetic diversity in Brazilian genotypes. Estimating genetic diversity are the essential factors to ensure success in the management of genetic resources, planning and adoption of strategies for genetic breeding. The hypothesis of our study is: do Brazilian Jatropha breeding populations have sufficient genetic variability to select individuals within? The objective of this paper is to determine the genetic diversity of 573 genotypes of five populations of *Jatropha curcas* structured based on the characteristics of yield, resistance to powdery mildew and toxicity, using Single-nucleotide polymorphism molecular markers. The results shows moderate variability among the genotypes analyzed, confirming the initial hypothesis of this study. We recommended using a greater number of individuals per family rather than the number of families in breeding programs in order to exploit the greater variability within populations and hence obtain higher gains with selection.

**Key-words:** oleaginous; genetic variability; plant breeding; SNP's.

## **1. Introduction**

*Jatropha* (*Jatropha curcas* L.) is an undomesticated perennial plant belonging to the Euphorbiaceae family, it is diploid and its genome has 22 chromosomes (Divakara et al. 2010). It presents favorable agronomic traits, such as drought tolerance, grows in sandy and poorly fertile soils, which characterizes the adaptation of this species in tropical and subtropical regions and resistance to diseases that attack some perennial plants such as powdery mildew (Divakara et al. 2010) Furthermore, this species has a seed production from 1200 to 1500 kg ha<sup>-1</sup> with high oil content with chemical properties that meet the biofuel Market, which characterizes *Jatropha* as an oleaginous potential (Laviola et al. 2017). In addition, there are non-toxic genotypes, as they do not have phorbol esters, allowing a pie generated in the processing of this

culture to be used to feed animals, which have a quantity of waste and better use and added value to inputs (Basha and Sujatha 2007).

However, in Brazil, the studies are still at early stage, requiring further research (Rosado et al. 2010; Anggraeni et al. 2018), especially on genetic diversity, since this analysis among one of the main tools for genetic breeding. The scenario of the genetic diversity of *Jatropha* points out that its center of origin is Mexico and Central American, with toxic and non-toxic genotypes, and it was taken to other countries mainly by the Portuguese in their colonization travels (Heller 1996; Anggraeni et al. 2018). After this dissemination, this plant is present in tropical and intertropical regions, such as South America, Africa, Asia, Guatemala and India (Vásquez-Mayorga et al. 2017). Being in Chiapas, state of Mexico, the region with the greatest genetic diversity, where is considerate the center of biodiversity too (Li et al. 2017).

Other regions outside of Mesoamerica, on the Asian and African continents, on the other hand, show a reduction in this diversity (Siju et al. 2016). Some studies report that there is low genetic diversity in Brazilian genotypes (Rosado et al. 2010; Bhering et al. 2015). This low genetic diversity can be related to the strategy of disseminating the culture, showing a common ancestry between the genotypes indicating parental lines, and also undergoing selection to adapt to the environmental conditions of the regions where they were disseminated. In addition, the selection strategies that are adopted by humans in the genetic improvement of this culture may also have contributed to the reduction of this genetic diversity (Li et al. 2017). A strategy to increase this genetic variability would be to insert new genotypes, preferably those from the center of origin, for having greater variability (Divakara et al. 2010).

Studies aimed at estimating genetic diversity are necessary to characterize the species and contribute to its conservation, which are the essential factors to ensure success in the management of genetic resources, planning and adoption of strategies for genetic breeding (Divakara et al. 2010; Ya et al. 2018). Furthermore, the contributions of the information

generated by quantifying genetic diversity may lead to the proposition of improvements in the collections studied and in the traits aimed at resistance to pests, in addition to avoiding inbreeding. Analyzing genetic diversity and population structure also enables advances in the reproduction of the species, expansion of the genetic basis, and mapping of the collections studied, allowing a comparison between similar crops (Yang et al. 2018). For this purpose, obtaining information on the target species from the collection, conservation, maintenance and management of the species studied is necessary, thus contemplating all the steps of the genetic breeding program.

Among the tools used to determine genetic diversity, molecular markers stand out for presenting different methods to quantify genetic variability accurately, without environmental influence. The information obtained from these markers enriches the crop database, and when combined with other information, such as the collection site and morphophysiological traits, they contribute to the development of the genetic map of the studied collections (Ya et al. 2018). The SNP (*Single Nucleotide Polimorphism*) markers identify polymorphism based on the position of a single nucleotide, so that this detection is more effective and accurate when compared to other markers (Faleiro 2007). The great advantage of the SNP is the possibility of application in collection banks with large amounts of genes, in addition to the precision in identifying the polymorphisms, which contributes significantly to determine the population structure of the species studied (Ya et al. 2018).

Molecular markers are essential to obtain information about this crop and its exploitation in a sustainable manner. The hypothesis of our study is: do Brazilian *Jatropha* breeding populations have sufficient genetic variability to select individuals within? Thus, the objective of this paper is to determine the genetic diversity of 573 genotypes that were structured in five populations of *Jatropha curcas* using SNP's molecular markers. These

populations were formed based on agronomic traits such as grain yield, resistance to powdery mildew and toxicity, in order to exploit them.

## **2. Materials and methods**

### **Plant materials and DNA extraction**

A total of 573 genotypes of *Jatropha* were used, obtained by crossbreeding. The genitors used make up the Embrapa Agroenergia *jatropha* germplasm bank. The individuals were derived from 70 crossbreeds. The families were formed from five populations according to the traits of interest: yield, resistance to powdery mildew, toxicity, and genetic diversity, where population 1 (P1) is composed of individuals resulting from the cross-breeding of toxic and susceptible to powdery mildew, however, presenting a high yield of fruit and oil; population 2 (P2) are progeny resulting from the cross-breeding of non-toxic and susceptible to powdery mildew plants, but with high yield; population 3 (P3) is composed of individuals resulting from the cross-breeding between toxic susceptible powdery mildew and resistant toxic plants; population 4 (P4) contains individuals that are generated from between susceptible non-toxic plants and resistant toxic; and lastly, population 5 (P5) are individuals resulting from the cross-breeding between toxic and mildew resistant plants. The information is presented in Supplementary Table S1.

For DNA extraction, three young leaves were collected from each individual from the breeding population, at Embrapa Cerrados in Planaltina, DF. The samples were collected and placed in plastic bags, duly identified, packed in a polystyrene box containing ice, transported to the Embrapa Agroenergy Genetics and Biotechnology Laboratory and stored in a freezer at -20 °C.

DNA extraction from *Jatropha* leaves was performed according to the protocol of the NucleoSpin Plant II (Macherey-Nagel) manufacturer's manual, with some modifications. The



quantification and quality of the samples were performed using a NanoDrop Espectrophotometer to evaluate the ratio between the wavelengths A260/A280, which represents the number of nucleic acids by the protein content in the sample. Samples with A260/A280 between 1.80 and 2.10 were considered adequate, indicating that there are a low protein and RNA contents in the samples.

### **Genotyping using SNP markers**

The samples were genotyped using the *Axiom myDesign Genotyping Arrays* platform. Sequencing was performed based on SNP molecular markers. The SNP markers have as advantages the distribution and frequency in the genome and the data automation, hence they are recommended for genome-wide selection works and studies of related and narrow genetic basis plants.

### **Statistical analysis**

Initially, quality control of SNPs by Call Rate and Minor Allele Frequency (MAF) was performed, assuming  $MAF \geq 0.02$  and  $Call\ Rate \geq 0.95$ . To analyze the genetic diversity between and within the populations, the analysis of molecular variance (AMOVA) was performed according to the following model:  $Y_{ij} = \mu + P_i + D_{ij}$ , where:  $Y_{ij}$  is dissimilarity measure between pairs of  $j$  individuals in  $i$  subpopulation;  $\mu$ : overall mean;  $P_i$ : effect of the  $i$  subpopulation, where  $P_i \sim \text{IID}(0, \sigma_P^2)$ ;  $D_{ij}$ : effect of dissimilarity between pairs of  $j$  individuals in  $i$  subpopulation, where  $D_{ij} \sim \text{IID}(0, \sigma_D^2)$ . Variance components within populations ( $\hat{\sigma}_w^2$ ) and between populations ( $\hat{\sigma}_b^2$ ) were estimated by:  $\hat{\sigma}_w^2 = MSW$  and  $\hat{\sigma}_b^2 = \frac{MSB - MSW}{n}$ , where: MSW: mean square within populations; MSB: mean square between populations; and  $n$ : represents the average number of haplotypes sampled per population. As the samples are of unequal sizes,  $n$

is obtained by:  $n = N - \sum_i \frac{N_i^2}{N} / g - 1$ , wherein  $N_i$  is the preference number or haplotypes of the  $i$ -th subpopulation.

The Polymorphic Information Content ( PIC ) was obtained according to the following expression:  $PIC = 1 - \sum_{i=1}^k P_{li}^2 - \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k 2P_{li}^2 P_{lj}^2$ ; where  $P_{li}^2$  and  $P_{lj}^2$  are the frequency of the  $i$ -th and  $j$ -th alleles, respectively, in the  $l$ -th SNP. The expected heterozygosity ( $H_e$ ), observed heterozygosity ( $H_o$ ), and inbreeding coefficient ( $F_i$ ) were obtained by:  $H_e = \frac{N}{N-1} (1 - \sum_{j=1}^k P_j^2)$ ;  $H_o = \frac{1}{m} \sum^m H$ , and  $F_i = 1 - \frac{\sum H_e}{\sum H_o}$ ; respectively, where:  $H = \frac{nH_j}{N}$ ;  $nH_j$  is the number of heterozygous genotypes (type  $A_1A_2$  or  $A_2A_1$ ) on the  $i$ -th individual;  $N$ : number of individuals. The fixation index ( $F_{st}$ ), which measures the amount of genetic variation that can be explained by the population structure, was obtained based on Wright's F-statistic  $F_{st} = 1 - \frac{H_S}{H_T}$ , wherein:  $H_S$  is the expected average heterozygosity, estimated for each subpopulation and  $H_T$  is the expected heterozygosity in the total population. The Nei's genetic diversity ( $D$ ) was also estimated. All the analyzes mentioned above were performed using the software R.

The genomic kinship matrix ( $G$ ) was obtained using the function `A.mat` implemented in the `rBLUP` package, in software R, (Endelman 2011) according to the expression:  $G = \frac{WW'}{2\sum_{pq}}$  where  $p$  is the frequency of the favorable allele;  $q$  is the frequency of the unfavorable allele;  $W$  is the deviation matrix of the centralized markers in  $p$  (mean of the favorable allele for a given locus); and  $2\sum_{pq}$  is the sum of the loci variations.

The population structure analysis of *Jatropha* genotypes was carried out using the Structure 2.3.4 software (Pritchard et al. 2000). The software uses a Bayesian approach to allocate individuals to a predetermined number of populations ( $K$ ). The admixture model was used as a model, which predicts the possibility of gene flow or miscegenation between populations. Thus, the proportion of alleles that came from each population is estimated for the

genome of each individual. Furthermore, the Structure software also estimates the likelihood measurement of the different models tested, with the various number of populations ( $K$ ).

Structure analysis was performed assuming burn-in of 50,000 and 50,000 randomizations collected via Markov Chain (MCMC). The  $K$  value ranged from 1 to 10, with 10 independent replicates on each. The choice of the most probable value of  $K$  was performed through the analysis of the  $\Delta K$  values, according to the method proposed by (Evanno et al. 2005).

The Principal Coordinate Analysis (PCoA) was used in a complementary way to assess the structure and genetic diversity of the population. PCoA was performed using the *ade4* package (Jombart 2008) on the R software (R Core Team 2020). The *find.clusters* function was used to detect the number of groups in the population. The number of groups was defined using the *find.clusters* function. The number of groups is defined on the basis of k-means by selecting the most appropriate  $k$  based on the largest increase in the value of the Bayesian information criterion (BIC).

### **3. Results**

Regarding the number of alleles, 60.33% of the SNPs were characterized as biallelic. However, 39.67% of the SNPs were characterized as triallelic (Table 1). Therefore, considering these mutiallelic loci, 2,598 alleles were identified (average of 2.40 alleles per locus). The allelic frequencies were quite different in the biallelic loci, since 98.31% of the respective allelic frequencies were present in low frequency ( $\leq 0.15$ ), while in the triallelic SNPs the allelic frequencies were more uniform.

**Table 1** Number of alleles and allele frequency distribution of SNP markers obtained from 573 *Jatropha* genotypes.

Number of alleles	Number of SNPs	Mean of allele frequency (%)		
		0 - 0.15	0.15 - 0.2	0.2 - 0.3
2	654	98.32	0.61	1.07
3	430	37.67	24.65	37.67

### Genetic diversity

Analysis of molecular variance (AMOVA) was performed based on the populations identified by STRUCTURE. Total genetic variation was partitioned among populations and within populations. The variance within (40.0) was higher than the variance between populations (18.15), indicating that the intrapopulation variability was higher than the interpopulation variability (Table 2). There is moderate genetic differentiation among populations and high genetic difference within populations, since genetic variance within populations explained 68.79% of all existing variation. Furthermore, a moderate value for  $F_{st}$  (0.26) and  $Nm$  (0.70).

**Table 2** Analysis of molecular variance (AMOVA) and estimates of variance between and within populations de *Jatropha curcas*. 2015-2017, Brasília, DF.

Sources of variation	DF	Mean square	Variance	Percentage (%)
Between populations	1	4828.37	18.15	31.20
Whitin populations	571	40.00	40.00	68.79
Total	572	48.38	58.15	100.00
Fixation index ( $F_{st}$ )	0.26	-	-	-
$Nm$	0.70	-	-	-

DF: degrees of freedom; fixation index ( $F_{st}$ )

When calculating the genetic distances ( $D$ ), the values found were consistent with the results obtained for heterozygosity. Where  $D$  ranged from 0.03 to 0.23 for pop1 and pop2, respectively (Table 3). The average values in the general population for  $PIC$ ,  $H_o$ , and  $H_e$  were 0.11, 0.14 and 0.16, respectively. Pop1 ( $PIC = 0.03$ ,  $H_o = 0.03$ , and  $H_e = 0.03$ ) showed lower diversity than pop2 ( $PIC = 0.23$ ,  $H_o = 0.25$ , and  $H_e = 0.23$ ). The inbreeding coefficient ( $F_i$ ) was negative for both populations. Regarding the presence of private alleles per population, 18 private alleles were observed for pop1 and 515 for pop2. Clearly pop2 has over 28 times the number of private alleles ( $nPA$ ).

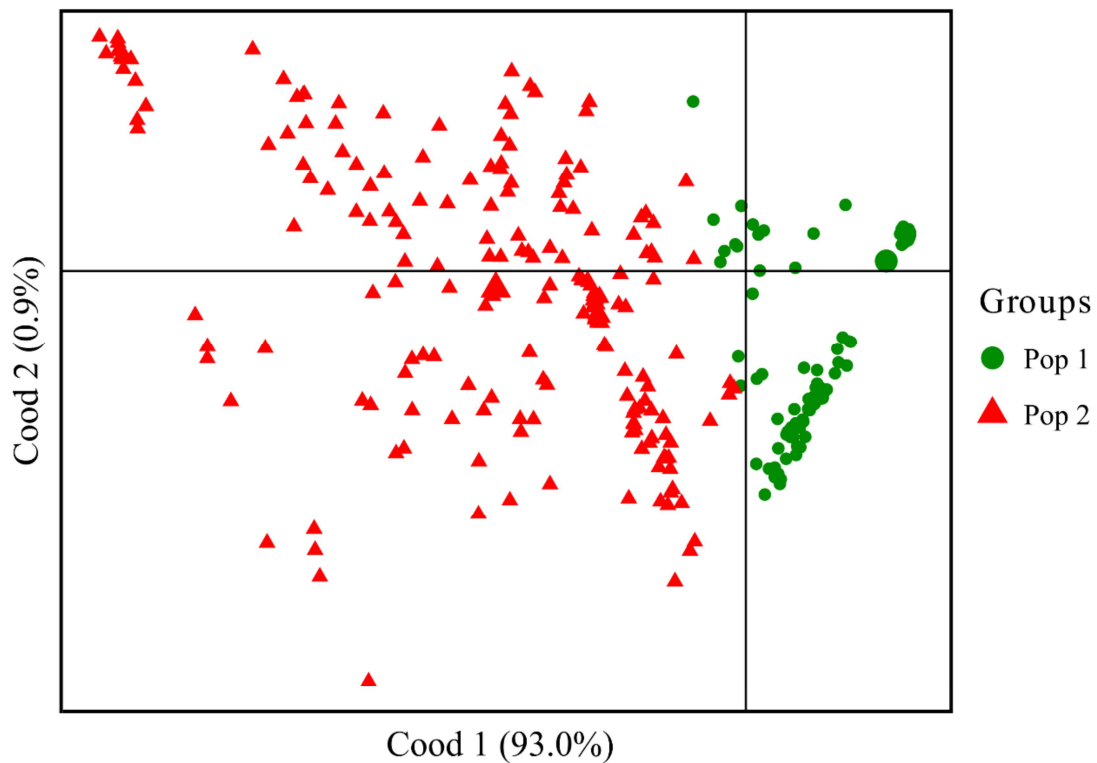
**Table 3** Parameters of genetic diversity between *Jatropha curcas* populations. 2015-2017, Brasília, DF

Population	$N$	$D$	$PIC$	$H_o$	$H_e$	$F_i$	$nPA$	$F_{st}$	$Nm$
pop1	367	0.03	0.03	0.03	0.03	-0.02	18	0.93	0.02
pop2	206	0.23	0.19	0.25	0.23	-0.08	515	0.25	0.75
Média		0.13	0.11	0.14	0.16	-0.05	266.5	0.59	0.385

$N$ : Number of individuals observed;  $D$ : Nei's genetic distance;  $PIC$ : polymorphic information content;  $H_o$ : mean heterozygosity observed;  $H_e$ : mean expected heterozygosity;  $F_i$ : inbreeding coefficient;  $F_{st}$ : fixation index;  $nPA$ : number of private alleles;  $Nm$ : gene flow; population 1 and population 2 (pop1 and pop2, respectively) refer to the populations identified by STRUCTURE.

Regarding the principal coordinate analysis, it is observed the formation of two genetic subgroups in the population considering the Bayesian information (BIC) as a criterion. In red,

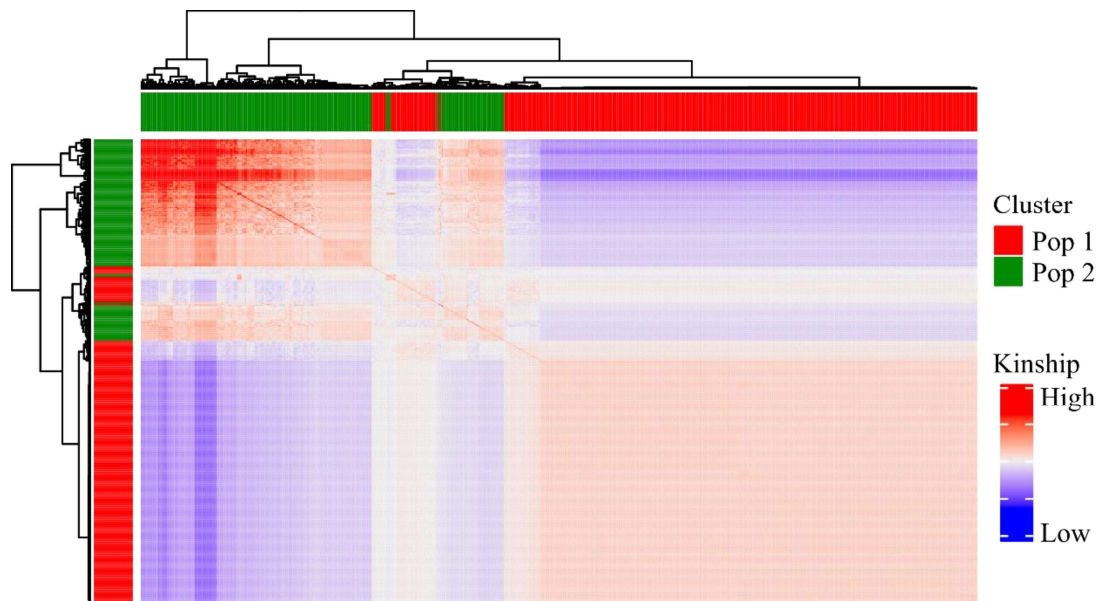
the population with 360 individuals (Pop 1), and in green the second population with 213 individuals (Pop 2). The groups have low overlap, allowing a clear distinction between them (Fig1). It is observed that the two axes explained 93.9% of all variation, allowing the identification of the population structure in a more reliable way.



**Figure 1.** Principal Coordinate Analysis (PCoA) for the 573 *Jatropha* genotypes.

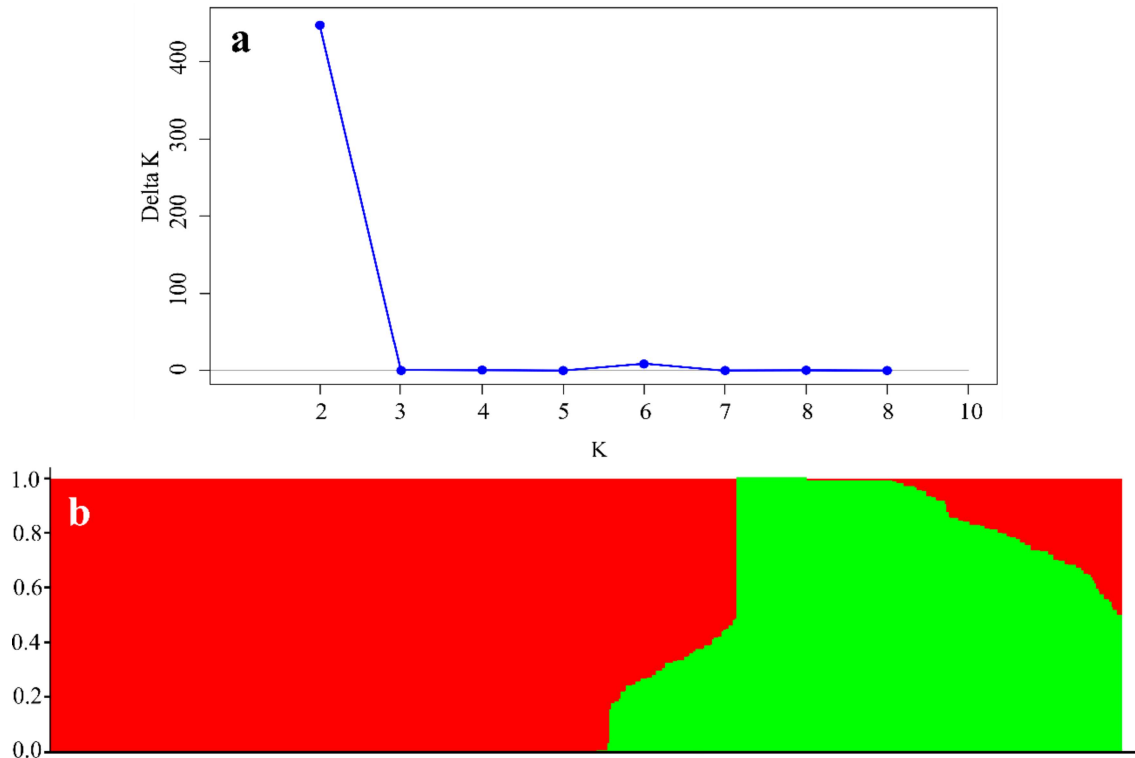
### Population Structure

Regarding the clustering performed by the dendrogram and considering the kinship matrix, it is effective to see low to moderate degree of kinship between evaluated groups (Fig2). Thus, there is an indication of the formation of two population structures, which corroborates with the STRUCTURE results.



**Figure 2.** Dendrogram representative of the genetic dissimilarity and additive kinship matrix between the 573 *Jatropha* genotypes. Cluster formed by STRUCTURE.

For the genotypes studied, the genetic structure analysis with a Bayesian approach showed that  $k=2$  (Fig 3a) was the ideal number of genetic groups ( $K$ ), for presenting the highest  $\Delta K$  following the inference of (Evanno et al. 2005), in which the  $K$  value indicated the presence of two genetic groups, or distinct populations. Thus, it can be seen in Fig 3b the formation of two populations, in which one with 369 genotypes and the other with 204. The clusters formed contain individuals with a 100% probability of belonging to one of the populations, but there are also those who have traits from both, in which these individuals were clustered in the population to which they have greater similarity.



**Figure 3.**  $\Delta K$  values (A) and population structure for the 573 *Jatropha* genotypes forming two distinct populations (B), with some genotypes having genetic traits from both being allocated into the with some genotypes that have genetic characteristics of both, being allocated in the cluster of greater genetic similarity. In red, the population with 369 individuals, and in green the second population with 204 individuals.

With a probability of adherence  $> 0.9$ , the Bayesian cluster indicated that the 573 evaluated genotypes were clustered as follows: 299 genotypes for the group I and 101 genotypes for group II. Some individuals in group I and group II had mixed probability, i. e., each genotype presented in its genome a fraction of alleles from each of the two groups, suggesting a hybrid nature for the genotypes evaluated. However, most individuals were assigned to the most trusted groups.



#### 4. Discussion

The results of analysis of variance revealed that the intrapopular variation was twice as high as the interpopular variation. Therefore, to increase the variability of *Jatropha*, a smaller number of households and a larger number of individuals per family should be used. This strategy avoids the genetic narrowing of populations and hence greater gains with selection will be obtained in breeding programs.

However, when we consider  $F_{st}$ , which is a population differentiation measure, where  $F_{st}$  values above 0.15 can be considered significant in differentiated populations (Frankham et al. 2002), we observe significant divergence within each *Jatropha* subpopulations. It should also be noted that the  $F_{st}$  value (0.26) between the two populations indicates relevant genetic differentiation between populations, even variation between populations has variation twice as low as variation within populations, as observed in AMOVA.

The genetic differentiation among populations is corroborated by the  $Nm$  value, in which according to (Wright 1965) the  $Nm$  value less than one (1.0) indicates limited genetic exchange between subpopulations. In this context, the  $Nm$  value (0.70) obtained here suggests the occurrence of low genetic exchange or moderate gene flow (Eltaher et al. 2018) causing a genetic differentiation among populations.

The observed heterozygosity ( $H_o$ ) was higher than expected ( $H_e$ ) for pop2. Therefore, there was an excess of heterozygous regarding the Hardy-Weinberg equilibrium model. This pattern becomes clearer when we observe the fixation index ( $F_i$ ), in which we found a negative value for pop2. The results obtained for  $H_e$ ,  $H_o$ , and  $F_i$  for pop1 suggest that the alleles in the population are randomly united, i.e., there is no mean deviation of the genotypic proportions of the population from the Hardy-Weinberg equilibrium for the loci analyzed.

$PIC$  values for all SNPs were below 0.5, with a mean value of 0.11.  $PIC$  values represent a good indicator of marker usefulness for linkage analysis when determining inheritance

between descending and parental genotypes (Salem and Sallam 2016). Thus, SNPs were more informative in pop2 ( $PIC$  0.19) than in pop1 ( $PIC$  0.03). All SNPs were considered not very informative according to a study carried out by (Botstein et al. 1980), in which the authors showed that markers with  $PIC \geq 0.5$  are highly informative, whereas markers with  $PIC$  from 0.25 to 0.5 are moderately informative, and markers with  $PIC$  values lower than 0.25 are slightly informative. This result may be due to the biallelic nature of SNPs, which restricted the  $PIC$  values to 0.5, when the two alleles have identical frequencies (Eltaher et al. 2018), which may be related to the low mutation rates in SNPs (Coates et al. 2009; Eltaher et al. 2018).

As for the number of private alleles, which provides information on alleles that existed in only one subpopulation, the pop2 showed 497 private alleles higher than those found in the pop1. Although it had fewer individuals in the population, indicating the high genetic diversity among the genotypes belonging to the pop2. Thus, according to (Borba et al. 2009) and (Salem and Sallam 2016), Private alleles provide useful information on the unique genetic variability in certain loci and thus allow the identification of genotypes with wide diversity, enabling use them in breeding programmes for maximizing the richness of alleles in the population.

For  $D$  and  $H_e$ , which indicate gene diversity for haploid markers and provide an estimate of mean heterozygosity and genetic distance between individuals in a population (Nei 1978), low  $D$  and  $H_e$  values for pop1 and moderate values for pop2 were found. In the study carried out by (Anggraeni et al. 2018), phenotypic variability was observed; however, when measuring genotypic diversity, they also found low genetic variability, such as  $H_e$  (0.271) and  $PIC$  (0.06).

Evaluated collections from Kenya and also found low diversity (Machua et al. 2011), as well (Rosado et al. 2010) evaluating Brazilian genotypes, once again found low genetic variability. However, in Chiapas, located in Mexico, which is the center of origin of the crop, the collections presented the highest genetic variability, with  $H_e$  ranging from 0.34 to 0.54 (Sanou et al. 2015). Nevertheless, the low variability observed for *Jatropha* populations is a

concern that the breeder should prioritize, since random fixation of alleles due mainly to selection in finite populations may cause a reduction in genetic variability, leading to a decrease in the selection gain.

When analyzing the *Jatropha curcas* collections from five Indonesian islands, they found low values of genetic differentiation and performed measurements of isolation by geographical distances to try to relate with low genetic differentiation, however they found insignificant values (Anggraeni et al. 2018). The low genetic differentiation and low variability in the *Jatropha curcas* collections can be explained by the narrow origins of the germplasm banks of the species. Furthermore, despite being an out-crossing plant, *Jatropha* can perform self-pollination, which also results in low genetic variability and low heterozygosity. Agricultural practices such as plant propagation by seedling and graft, as well as the performance of environmental factors in the natural selection of genotypes and epigenetics are also factors that should be taken into consideration when performing the genetic variability analysis (Yi et al. 2010; Negussie et al. 2013; Sanou et al. 2015).

Population structure is the distribution of individuals into partially isolated populations (Mitchell-olds et al. 2007). It is crucial to describe how the main traits are segregating within the studied population, thereby determining the relationships that generated it and defining which are the crossings that most generated new individuals. In this context, the population structure analysis still allows the understanding of genetic diversity and facilitates subsequent associative mapping studies. The presence of population structure in the mapping population may lead to false-positive associations between markers and the traits studied (Eltaher et al. 2018). Thus, the first step to carry out genomic association analysis is to test the underlying population structure, enabling reliable association between markers and traits.

It can be observed that the results from PCoA (Fig 1) indicated that the 573 *Jatropha* genotypes can be clustered into two distinct groups, coinciding with the STRUCTURE results.

However, we can verify great dispersion of the genotypes within the groups. This finding corroborates the result provided by AMOVA, i.e., the existence of greater variance within groups in detriment to the variance between groups.

The genomic kinship matrix helps in understanding the relationships between groups and individuals. Thus, considering the dendrogram and the genomic kinship matrix, the possibility of structuring two distinct populations according to the degree of kinship was verified. Thus, it is possible to obtain genetic values and allow better planning of the crossing blocks, reducing the effects of genetic narrowing.

When building a tree of neighbors in access from Asia, Africa and Mexico, use four groups, with great differentiation of the Asian and African genotypes, which were taken for cultivation, among the native genotypes of Mexico (Sanou et al. 2015). They also showed differences between them according to the city of Mexico that was collected, indicating limited gene flow, providing differentiation within the populations of *J. curcas*. On the other hand, (Basha and Sujatha 2007) analyzing 43 genotypes of *J. curcas*, found the formation of two groups, also indicating similarity between individuals of this species.

This result suggests that hybridizations between these genotype groups may result in the generation of similar offspring, with a very narrow genetic basis, and consequently reducing even more variability existing in the jatropha populations. Nevertheless, depending on the breeder's strategy and goal, this type of cross-breeding, considered convergent, can be used to facilitate the selection of superior genotypes in a shorter time, when considering genotypes that have superior performance in important agronomic traits, such as yield potential.

According to the genetic structure, they were formed twice (Fig. 3). This result is confirmed with what was not found in the dendrogram, as there are items that have characteristics of resources such as those that were attributed to which has the greatest similarity. Therefore, individuals with a 100% probability of belonging to form also form two

groups in the dendrogram and those assigned to it due to the greater similarity between those who are formed or the third group. (Sanou et al. 2015) found three populations, with low diversity and non-toxic individuals, high and toxic and low diversity, but toxic.

Low diversity is not a characteristic inherent only to this species since in the center of origin there are populations that show greater heterozygosity and there are also regions that show less genetic diversity. This differentiation is also related to toxicity, where non-toxic species have less differentiation when compared to toxic species (Basha and Sujatha 2007).

The low genetic diversity reported in *Jatropha* populations in different regions of the world has serious implications for the selection of genotypes and breeding strategies. This is a concern that the breeder should prioritize, since the random fixation of alleles due mainly to the selection in finite populations causes a reduction in the genetic variability, leading to a reduction in the gain by selection. The conventional breeding of *Jatropha*, based on phenotypic traits, has been used to increase oil yield and quality. However, it is possible that a large part of the variations of these phenotypic traits is non-inheritable, due to the existence of low dissimilarity between populations, thus limiting intraspecific crosses.

In this context, germplasm banks should be expanded, introducing accesses from the diversity Center and more representative collections from different geographic regions. This action may contribute to the increase in the genetic diversity *Jatropha*. However, this strategy must be carried out with great care, since considering the low genetic variability in germplasms in Africa, Asia, and South America and even germplasms originating in Mexico (Montes et al. 2014) the *Jatropha* mating system it can result in a high level of homozygosity and consequently lead to the narrowing of the genetic basis of the species.

The reason for the low variability of *Jatropha* may be associated with the use of very similar genotypes in different geographic regions, in which, even with the crossings, the formation of new variability was limited, causing the low genetic dissimilarity among the new

populations of this species in detriment of the original population. (Maghuly et al. 2015) also suggested that the introduction and domestication in other countries contributed to the low genetic diversity observed in *Jatropha*. Thus, the results observed in this work indicate that the vast majority of genotypes developed from the same ancestry, with no occasional changes over time in their adaptation site.

## **5. Conclusion**

There is moderate variability among the genotypes analyzed, confirming the initial hypothesis of this study. Therefore, it is necessary to perform new crosses between the individuals of this germplasm bank with individuals who have greater genetic variability, preferably from other countries, such as Mexico, which is the probable center of origin of *Jatropha curcas*, in order to obtain variability, maintain its conservation and enable genetic breeding programs.

We recommended using a greater number of individuals per family rather than the number of families in breeding programs in order to exploit the greater variability within populations and hence obtain higher gains with selection.

## References

- Anggraeni TDA, Satyawan D, Kang YJ, et al (2018) Genetic diversity of *Jatropha curcas* collections from different islands in Indonesia. *Plant Genet Resour Charact Util* 16:334–342. <https://doi.org/10.1017/S1479262117000387>
- Basha SD, Sujatha M (2007) Inter and intra-population variability of *Jatropha curcas* (L.) characterized by RAPD and ISSR markers and development of population-specific SCAR markers. *Euphytica* 156:375–386. <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9387-5>
- Bhering L, Junqueira V, Peixoto L, et al (2015) Comparison of methods used to identify superior individuals in genomic selection in plant breeding. *Genet Mol Res* 14:10888–10896. <https://doi.org/10.4238/2015.September.9.26>
- Borba TC de O, Mendes C dos A, Guimarães ÉP, et al (2009) Genetic variability of Brazilian rice landraces determined by SSR markers. *Pesqui Agropecuária Bras* 44:706–712. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2009000700009>
- Botstein D, White RL, Skolnick M, Davis RW (1980) Construction of a genetic linkage map in man using restriction fragment length polymorphisms. *Am J Hum Genet* 32:314–31
- Coates BS, Sumerford D V., Miller NJ, et al (2009) Comparative performance of single nucleotide polymorphism and microsatellite markers for population genetic analysis. *J Hered* 100:556–564. <https://doi.org/10.1093/jhered/esp028>
- Divakara BN, Upadhyaya HD, Wani SP, Gowda CLL (2010) Biology and genetic improvement of *Jatropha curcas* L.: A review. *Appl Energy* 87:732–742. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.013>
- Eltaher S, Sallam A, Belamkar V, et al (2018) Genetic diversity and population structure of F3:6 Nebraska Winter wheat genotypes using genotyping-by-sequencing. *Front Genet* 9:1–9. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00076>
- Evanno G, Regnaut S, Goudet J (2005) Detecting the number of clusters of individuals using

- the software structure: a simulation study. *Mol Ecol* 14:2611–2620.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2005.02553.x>
- Faleiro G (2007) MARCADORES GENÉTICO-MOLECULARES aplicados a programas de conservação e uso de recursos genéticos.
- Frankham R, Ballou JD, Briscoe DA, McInnes KH (2002) *Introduction to Conservation Genetics*. Cambridge University Press
- Heller J (1996) *Physic nut. Jatropha curcas L*
- Jombart T (2008) Adegnet: A R package for the multivariate analysis of genetic markers. *Bioinformatics* 24:1403–1405. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btn129>
- Laviola BG, Rodrigues EVV, Teodoro PE, et al (2017) Biometric and biotechnology strategies in *Jatropha* genetic breeding for biodiesel production. *Renew Sustain Energy Rev* 76:894–904. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.116>
- Li H, Tsuchimoto S, Harada K, et al (2017) Genetic Tracing of *Jatropha curcas L.* from Its Mesoamerican Origin to the World. *Front Plant Sci* 8:.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01539>
- Machua J, Muturi G, Omondi SF, Gicheru J (2011) Genetic diversity of *Jatropha curcas L.* populations in Kenya using RAPD molecular markers: Implication to plantation establishment. 10:3062–3069. <https://doi.org/10.5897/AJB10.1990>
- Maghuly F, Jankowicz-Cieslak J, Pabinger S, et al (2015) No Title. *Biotechnol J* 10:536–551.  
<https://doi.org/10.1002/biot.201400196>
- Mitchell-olds T, Willis JH, Goldstein DB (2007) Which evolutionary processes influence natural genetic variation for phenotypic traits? *Nat Rev Genet* 8:845–856.  
<https://doi.org/10.1038/nrg2207>
- Montes JM, Technow F, Martin M, Becker K (2014) Genetic Diversity in *Jatropha curcas L.* Assessed with SSR and SNP Markers. *Diversity* 6:551–566.



<https://doi.org/10.3390/d6030551>

Negussie A, Achten WMJ, Verboven HAF (2013) Floral display and effects of natural and artificial pollination on fruiting and seed yield of the tropical biofuel crop *Jatropha curcas* L. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12072>

Nei M (1978) Estimation of average heterozygosity and genetic distance from a small number of individuals

Pritchard JK, Stephens M, Donnelly P (2000) Inference of population structure using multilocus genotype data. *Genetics* 155:945–959

R Core Team D (2020) R: a language and environment for statistical computing. <https://www.r-project.org/>

Rosado TB, Laviola BG, Faria DA, et al (2010) Molecular Markers Reveal Limited Genetic Diversity in a Large Germplasm Collection of the Biofuel Crop *Jatropha curcas* L. in Brazil. *Crop Sci* 50:2372–2382. <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.02.0112>

Salem KFM, Sallam A (2016) Analysis of population structure and genetic diversity of Egyptian and exotic rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. *Comptes Rendus - Biol* 339:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2015.11.003>

Sanou H, Angulo-escalante MA, Martínez-herrera J, et al (2015) Loss of Genetic Diversity of *Jatropha curcas* L. through Domestication: Implications for Its Genetic Improvement. *Crop Sci* 55:749–759. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.02.0165>

Siju S, Ismanizan I, Wickneswari R (2016) Genetic homogeneity in *Jatropha curcas* L. individuals as revealed by microsatellite markers: implication to breeding strategies. *Brazilian J Bot* 39:861–868. <https://doi.org/10.1007/s40415-014-0117-7>

Vásquez-Mayorga M, Fuchs EJ, Hernández EJ, et al (2017) Molecular characterization and genetic diversity of *Jatropha curcas* L. in Costa Rica. *PeerJ* 5:e2931. <https://doi.org/10.7717/peerj.2931>

- Wright S (1965) The interpretation of population structure by F-statistics with special regard to systems of mating. *Evolution* (N Y) 19:395–420
- Ya N, Raveendar S, Bayarsukh N, et al (2018) Genetic Diversity and Population Structure of Mongolian Wheat Based on SSR Markers: Implications for Conservation and Management. *Plant Breed Biotechnol* 5:213–220. <https://doi.org/10.9787/pbb.2017.5.3.213>
- Yang Z, Lu R, Dai Z, et al (2018) Analysis of genetic diversity and population structure of a worldwide collection of *Corchorus olitorius* L. germplasm using microsatellite markers. *Biotechnol Biotechnol Equip* 32:961–967. <https://doi.org/10.1080/13102818.2018.1438852>
- Yi C, Zhang S, Liu X, et al (2010) Does epigenetic polymorphism contribute to phenotypic variances in *Jatropha curcas* L. *BMC Plant Biol* 10:259. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-10-25>

**SUPPLEMENTARY FILE**

**Table S1.** individuals were derived from 70 crossbreeds.

Fam ily	Cro ss	Family number	Code	Traits	Fa mil y	Cros s	Family number	Code	Traits
1	16 x 13	10	TS X TS	toxic and susceptible	67	11 x 8	8	TS X TS	toxic and susceptible
2	14 x 7	9	TS X TS	toxic and susceptible	10	16 x 43	11	TS X TS	toxic and susceptible
3	21 x 8	9	TS X TS	toxic and susceptible	15	23 x 39	10	TS X TS	toxic and susceptible
4	4 x 20	10	TS X TS	toxic and susceptible	32	22 x 43	8	TS X TS	toxic and susceptible
5	21 x 3	11	TS X TS	toxic and susceptible	39	10 x 41	12	TS X TS	toxic and susceptible
6	19 x 3	9	TS X TS	toxic and susceptible	47	5 x 41	10	TS X TS	toxic and susceptible
7	4 x 9	5	TS X TS	toxic and susceptible	69	2 x 41	5	TS X TS	toxic and susceptible
8	22 x 8	10	TS X TS	toxic and susceptible	16	28 x 29	6	NTS X NTS	non-toxic and susceptible
9	19 x 6	10	TS X TS	toxic and susceptible	28	26 x 30	8	NTS X NTS	non-toxic and susceptible
11	13 x 9	10	TS X TS	toxic and susceptible	37	28 x 29	8	NTS X NTS	non-toxic and susceptible
12	14 x 20	7	TS X TS	toxic and susceptible	38	28 x 28	11	NTS X NTS	non-toxic and susceptible
13	17 x 8	7	TS X TS	toxic and susceptible	41	26 x 29	9	NTS X NTS	non-toxic and susceptible
14	13 x 20	8	TS X TS	toxic and susceptible	45	29 x 29	8	NTS X NTS	non-toxic and susceptible
21	2 x 2	9	TS X TS	toxic and susceptible	48	26 x 25	5	NTS X NTS	non-toxic and susceptible
22	4 x 7	9	TS X TS	toxic and susceptible	52	29 X 30	8	NTS X NTS	non-toxic and susceptible
23	14 x 9	9	TS X TS	toxic and susceptible	53	28 x 30	8	NTS X NTS	non-toxic and susceptible
24	21 x 6	8	TS X TS	toxic and susceptible	54	27 x 29	9	NTS X NTS	non-toxic and susceptible
25	11 x 6	13	TS X TS	toxic and susceptible	55	28 X 30	9	NTS X NTS	non-toxic and susceptible
26	11 x 3	8	TS X TS	toxic and susceptible	56	27 x 25	7	NTS X NTS	non-toxic and susceptible
30	5 x 2	6	TS X TS	toxic and susceptible	68	27 x 30	7	NTS X NTS	non-toxic and susceptible
31	5 x 4	6	TS X TS	toxic and susceptible	17	22 x 31	9	TS X RT	toxic and susceptible

33	22 x 13	11	TS X TS	toxic and susceptible	18	17 x 31	8	TS X RT	toxic and susceptible
34	16 x 8	7	TS X TS	toxic and susceptible	19	17 x 32	11	TS X RT	toxic and susceptible
35	3 x 3	5	TS X TS	toxic and susceptible	20	17 x 33	10	TS X RT	toxic and susceptible
40	19 x 8	11	TS X TS	toxic and susceptible	29	22 x 33	8	TS X RT	toxic and susceptible
42	1 x 4	6	TS X TS	toxic and susceptible	49	22 x 32	9	TS X RT	toxic and susceptible
43	3 x 2	6	TS X TS	toxic and susceptible	51	2 x 31	7	TS X RT	toxic and susceptible
50	3 x 4	5	TS X TS	toxic and susceptible	59	12 x 32	9	TS X RT	toxic and susceptible
57	3 x 6	6	TS X TS	toxic and susceptible	65	12 x 31	10	TS X RT	toxic and susceptible
58	13 x 7	7	TS X TS	toxic and susceptible	70	1 x 31	10	TS X RT	toxic and susceptible
60	1 x 1	7	TS X TS	toxic and susceptible	27	28 x 25	9	NTS X RT	non-toxic and resistant
61	4 x 4	5	TS X TS	toxic and susceptible	36	29 x 32	6	NTS X RT	non-toxic and resistant
62	17 x 13	7	TS X TS	toxic and susceptible	44	28 x 32	9	NTS X RT	non-toxic and resistant
63	6 x 6	5	TS X TS	toxic and susceptible	46	32 X 32	5	RT X RT	resistant and toxic
66	5 x 5	6	TS X TS	toxic and susceptible	64	32 X 30	9	RT X RT	resistant and toxic