

Tomás Andrade da Cunha Dias

**Avaliação da disponibilidade de terras e do potencial bioenergético em 2050
considerando os limites da segurança alimentar**

Itajubá, setembro de 2021.

Tomás Andrade da Cunha Dias

**Avaliação da disponibilidade de terras e do potencial bioenergético em 2050
considerando os limites da segurança alimentar**

Dissertação submetida ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Sistemas Energéticos

Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora

Co-orientador: Prof. Dr. Diego Mauricio Yepes Maya

Itajubá, setembro de 2021.

AGRADECIMENTOS:

Gostaria de registrar meus agradecimentos ao Comitê da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro aos subsídios para apoiar esta pesquisa. Agradeço ao Professor Electo pela orientação incisiva desde a concepção e ao longo de todo o raciocínio lógico que foi estruturado, agradeço ao Professor Diego pelas orientações que lapidaram o trabalho com objetividade durante seu desenvolvimento, e agradeço aos Professores Horta, Marcelo e Regina pelas contribuições na melhoria deste trabalho. Serei, para sempre, grato à UNIFEI por tudo que vivi e aprendi aqui. Agradeço à minha família, por todo amor. Agradeço ao Brasil. Agradeço à Ciência. E agradeço à Deus. Muito obrigado!

RESUMO

Este trabalho avalia a área potencial de terras agricultáveis disponíveis para produção de bioenergia em 2050 sem comprometer os limites de segurança alimentar. Estimaram-se a demanda global por terras para produção de alimentos e o potencial de produção de bioenergia na área remanescente. A novidade desta pesquisa é a avaliação qualitativa e quantitativa dos parâmetros que influenciam a disponibilidade de terras para produção de bioenergia. Diferentemente dos estudos anteriores, o trabalho considera nas projeções o desperdício de alimentos, a área de terras degradadas, além de parâmetros geralmente desconsiderados por outros autores, como a agricultura urbana e o consumo de proteínas de insetos. A demanda por alimentos da população, a oferta da produção agrícola e a disponibilidade das terras excedentes que poderiam ser aproveitadas para a produção de biocombustíveis são as bases para o cálculo do potencial de produção de bioenergia. As projeções foram realizadas para 3 diferentes cenários: como de costume (C1), o melhor dos cenários realistas (C2) e a situação teórica (C3). As projeções desconsideram as influências econômicas e mercadológicas que regem a distribuição e o uso das terras. Algumas atividades humanas como consumo excessivo e desperdício podem resultar na redução da área disponível de terras para bioenergia, enquanto a aplicação de tecnologias disruptivas é o principal fator de aumento. Haverá terras aráveis suficientes para alimentar a população mundial em 2050 nos três cenários propostos. Contudo, mesmo escolhendo priorizar a preservação das florestas, e partindo para as áreas arbustivas como a próxima fronteira agrícola, a disponibilidade de novas terras aráveis para projetos de bioenergia poderia ser limitada no C1, e poderia ser necessário desmatar 24% das florestas (935 Mha). No C2, 5,7% das terras aráveis sobriam disponíveis para produzir bioenergia, atingindo 92% da meta de sequestro de carbono. E no C3, 42% das terras aráveis poderiam produzir bioenergia para sequestrar mais de 6 vezes a quantidade de carbono tida como meta para 2100. Os parâmetros com as maiores oportunidades de ganhos, por razões quantitativas e por viabilidade técnica de ação são o desperdício de alimentos, a baixa produtividade em decorrência da degradação de terras, o ganho de produtividade por tecnologia, e a redução no consumo de proteínas animais, especialmente de animais ruminantes. A potencial participação da bioenergia na matriz energética global é considerável até para o C1, em 7,5%, com 64 EJ. No melhor dos cenários realistas, C2, a bioenergia poderia representar 21,0% da produção global de energia, com 178 EJ, sendo que a produção de culturas energéticas poderia ser 31 vezes maior do que é hoje. Os resultados da potencial geração de bioenergia global obtidos nas projeções dos cenários mais realistas, C1 e C2, foram próximos entre si e de outros estudos reportados na literatura científica. No cenário que representa uma situação teórica, C3, a bioenergia poderia suprir quase duas vezes e meia a demanda global por energia primária em 2050.

Palavras-chave: demanda de alimentos, uso da terra por biocombustíveis, área de lavouras, projeções 2050.

ABSTRACT

This study evaluates the potential of available land areas for bioenergy production in 2050 without compromising food security limits. The estimates contain the global population food demand, the agricultural production supply, the availability of surplus land that could be used for biofuels production, and the bioenergy production potential in the remaining area. The novelty of this article is the qualitative and quantitative evaluation of the parameters that influence the availability of land for bioenergy production. Unlike previous studies, the work also considers food waste in projections, the degraded land area, in addition to parameters that are often disregarded by other authors, such as urban agriculture and the consumption of insect proteins. The projections were made for 3 different scenarios: business as usual (C1), the best of realistic scenarios (C2), and the theoretical situation (C3). The projections disregard the economic and market influences that govern the distribution and use of land. The current excessive consumption and the impacts of human activities are responsible for the reduction in the available land area for bioenergy, while the application of disruptive technologies is the main factor of increase. There will be enough arable land to feed the world population in 2050 in the three proposed scenarios. However, even choosing to prioritize the preservation of forests, and going to shrubland as the next agricultural frontier, the arable land available for new bioenergy projects could be limited in C1, and it would be necessary to deforest 24% of the forests area (935 Mha). In C2, 5,7% of arable land would remain available to produce bioenergy, reaching 92% of the carbon sequestration target. And in C3, 42% of arable land could produce bioenergy to sequester more than 6 times the amount of carbon stipulated for 2100. The parameters with the greatest opportunities for gains, for quantitative reasons and technical feasibility of action, are food waste, low productivity due to land degradation, increases in productivity due to technological gain, and reduction in the consumption of animal proteins, especially from roasting animals. The potential participation of bioenergy in the global energy matrix is relevant even for C1, at 7.5%, with 64 EJ. In the best of realistic scenarios, C2, bioenergy could represent 21.0% of global energy production, with 178 EJ, while the energy crops could produce 31 times bigger than today. The results of the global bioenergy potential obtained in the projections of the most realistic scenarios, C1 and C2, were close to each other and other studies in the bibliography. In the theoretical situation, C3, bioenergy could supply almost two and a half times the total global demand for primary energy in 2050.

Keywords: food demand, biofuel land use, croplands area, 2050 projections.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Projeções do potencial de biomassa por período e estudo individual. Adaptado de (SLADE <i>et al.</i> , 2011).....	7
Figura 2.2 - Processos de degradação do solo. Fonte: (IDEAM - U.D.C.A, 2015).....	9
Figura 2.3 - Conversão alimentar de carnes e alimentos derivados de animais (GORDON, 2011).	11
Figura 2.4 - Água necessária para a produção de alguns alimentos. (VASCONCELLOS, 2017).....	11
Figura 2.5 - Uso do capital natural dos setores mais impactantes para o meio ambiente. (GRISOTTO, 2015).....	12
Figura 2.6 - Comparação entre a quantidade de proteínas contidas em 100 gramas de algumas espécies de insetos a de algumas carnes (SPINACÉ, 2013).....	13
Figura 2.7 - Parcela estimada de energias renováveis no consumo global final. Adaptado de: REN21, 2018.....	14
Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia utilizada e o escopo de cada etapa.	18
Figura 3.2 - Parcelas representativas das principais fontes de suprimento de carnes no mundo. (FAO, 2015).....	24
Figura 3.3 - Fluxo de energia alimentar global, em kcal/pessoa/dia. (BERNERS-LEE <i>et al.</i> , 2018b).26	
Figura 3.4 - Evolução da produtividade das lavouras e da área demandada per capita para a agricultura de 1961 a 2009. (FAO, 2011).....	27
Figura 3.5 - Alocação da área da superfície global para a produção de alimentos (RITCHIE; ROSER, 2017).....	28
Figura 3.6 - Parcelas das fontes globais de biomassa para energia primária (PANEQUE, 2017).	34
Figura 3.7 - Produção global de biocombustíveis de 2000 a 2019 (em 1.000 barris de óleo equivalente por dia) (STATISTA, 2019).	36
Figura 3.8 - Diagrama dos ganhos potenciais em eficiência energética (CULLEN; ALLWOOD, 2010).	37
Figura 4.1 - Influência dos fatores que interferem na disponibilidade de terras para projetos de biocombustíveis.	38
Figura 4.2 - Comparação entre a alocação de terras agriculturáveis para os 4 cenários.	43
Figura 4.3 - Comparação entre a porcentagem da alocação das terras agriculturáveis nos 4 cenários..	44
Figura 4.4 - Áreas disponibilizadas para projetos de biocombustíveis em função dos fatores em cada cenário.....	45
Figura 4.5 - Área de terras necessária para suprir a demanda proteica, separadas por fonte animal. ...	46
Figura 4.6 – Demanda da área de terras necessária para garantir a segurança alimentar em 2050 para diferentes autores e para os C2050.....	47
Figura 4.7 - Potencial de sequestro de carbono dos cenários projetados em comparação à meta de sequestro de carbono para 2100.	47
Figura 4.8 - Potencial oferta de bioenergia e demanda energética primária global (EJ).	50
Figura 4.9 - Resultados principais das avaliações de bioenergia e de disponibilidade de terras.	51
Figura 4.10 - Participação das fontes de biomassa na oferta global de bioenergia em cada cenário. ...	52
Figura 4.11 - Comparação entre os resultados obtidos para 2050 e projeções de outras literaturas científicas.	53
Figura 4.12 - Participação dos alimentos e da energia de uso final na produção total de bioenergia. ...	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Principais fatores envolvidos na disponibilidade de recursos e as características de cada cenário.....	20
Tabela 3.2 - Liberação média de carbono pelo desmatamento de 1 hectare de florestas e de terras arbustivas (Adaptado de HE et al., 2018).....	30
Tabela 3.3 – Parâmetros adotados como variáveis de correção para as projeções.....	32
Tabela 3.4 – Valores adotados para as variáveis de correção para cada cenário.	37
Tabela 4.1 - Valores relacionados à demanda de alimentos, estipulados para os parâmetros nos cenários da projeção.	39
Tabela 4.2 - Valores relacionados à oferta de terras para cultivo de alimentos, estipulados para os parâmetros nos cenários da projeção.	40
Tabela 4.3 - Resultados das áreas de terras demandadas para cultivo e produção animal, de terras degradadas, e de terras disponíveis para projetos de biocombustíveis nos cenários da projeção.	41
Tabela 4.4 - Geração de bioenergia por fonte de biomassa no C0.....	48
Tabela 4.5 - Potencial de produção de bioenergia anual por fonte nos C2050.....	49
Tabela 4.6 - Resultados das projeções de bioenergia e a contribuição na matriz energética global em cada cenário.	49
Tabela 4.7 - Produção de bioenergia para alimentação e para uso energético.	54

LISTA DE SIGLAS

1G	Biocombustível de 1ª Geração
2G	Biocombustível de 2ª Geração
AA	Áreas Agrícolas
AB	Áreas para Bioenergia
ACA	Áreas de Cultivo de Alimentos
ACV	Análise do Ciclo de Vida
AD	Áreas Degradadas
BECCs	Bioenergia com Captura e Estocagem de Carbono
C	carbono
C0	Cenário Atual
C1	Cenário “como de costume”
C2	Cenário “melhor dos realistas”
C3	Cenário “situação teórica”
CO ₂	dióxido de carbono
D	Desperdício
EUBCE	<i>European Biomass Conference & Exhibition</i>
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
g	gramas
Gigatons	bilhão de kilogramas
GPA	Ganho de Produtividade Anual
ha	hectares
hab	habitantes
IDpC	Ingestão Diária per capita
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
kcal	kilocalories
m ²	metro quadrado
MgC	milhão de gramas de Carbono
Mha	milhão de hectares
NETs	Tecnologias de Emissão Negativa
n ^o H	número de Habitantes
ONU	Organização das Nações Unidas
PA	Produção de Alimentos
PPAD	Perda de Produtividade Acumulada por Degradação
Pph	Produção por hectare
TWh	Tera Watt.hora, ou, trilhão de Watt.hora
ton	mil kilogramas
W	Watt

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS:	3
1.Introdução	1
1.1.Justificativa	2
1.2.Metodologia.....	2
1.3.Objetivos.....	3
1.3.1.Objetivos Gerais.....	3
1.3.2.Objetivos Específicos.....	3
1.4.Novidade da Pesquisa	4
2.Revisão Bibliográfica	6
2.1.Solos	7
2.2.Produção de Alimentos.....	10
2.3.Bioenergia	13
3.Materiais e Métodos	17
3.1.Avaliação da área disponível	17
3.1.1.Definição dos Cenários	18
3.1.2.Principais parâmetros envolvidos na disponibilidade de terras para projetos de bioenergia.....	20
3.1.3.Metodologia de Cálculo.....	20
3.1.4.Fundamentação da definição dos parâmetros de cada cenário	22
3.2.Avaliação da bioenergia	30
3.2.1.Definição dos cenários	30
3.2.2.Principais parâmetros envolvidos no potencial de geração bioenergética	31
3.2.3.Metodologia de Cálculo.....	32
3.2.4.Fundamentação da definição dos parâmetros de cada cenário	33
4.Resultados e Discussões	38
4.1.Avaliação da área disponível	38
4.2.Avaliação da bioenergia	48
4.3.Os alimentos são uma fonte de bioenergia	54
5.Conclusões	56
6.Produtos da Dissertação	58
6.1.Apresentação oral em congresso internacional.....	58

6.2.Publicação de artigo em revista internacional Land Use Policy, Elsevier	58
6.3.Publicação na revista Ingenio Magno, Universidad Santo Tomás	58
6.4.Publicação de artigo em revista internacional Renewable Energy, Elsevier	58
6.5.Co-autoria em capítulo de livro	58
6.6.Outros artigos (em desenvolvimento).....	58
6.6.1.Potencial teórico e técnico de geração de bioenergia em 2050.....	58
6.6.2.AC.V de Sistemas de Aquaponia.....	59
Referências	60

1. Introdução

O debate entre a produção de biocombustíveis e a segurança alimentar teve origem no período de 2007-2008, quando houve um grande aumento na produção global de biocombustíveis e nos preços das commodities alimentícias, gerando discussões sobre a relação econômica entre a produção de biocombustíveis e o aumento no preço dos alimentos. Por outro lado, estudos recentes indicam que o mercado de biocombustíveis impacta de forma relativamente pequena no preço global dos alimentos (cerca de 1 a 4%) e que o aumento nos preços teve maior influência por outros fatores, como fatores de mercado, condições climáticas desfavoráveis e o aumento no preço do barril de petróleo (FAAJI *et al.*, 2017).

Uma vez que os tratores e as máquinas agrícolas são movidos a combustíveis derivados do petróleo, o aumento no preço do petróleo reflete no aumento do preço final dos alimentos. Já a produção de biocombustível se torna mais viável à medida que o preço dos combustíveis fósseis aumenta, o que justifica o aumento no volume produzido naquele período. Alguns autores afirmam que de forma global, a produção de biocombustíveis não impacta diretamente na precificação média das commodities alimentícias (AJANOVIC, 2011). Compreende-se que apesar da competição por terras e recursos como água e fertilizantes, o crescimento da representatividade dos biocombustíveis poderia reduzir a dependência das lavouras por combustíveis fósseis.

Analogamente, há uma preocupação sobre condições ambientais extremas por mudanças climáticas causarem perdas na produção agrícola em algumas regiões, e podem ser ainda mais frequentes no futuro. A redução na oferta de alimentos causa o aumento dos preços e conseqüentemente, a redução da segurança alimentar. Nesse âmbito, o uso de biocombustíveis em substituição ao uso dos fósseis visando à redução do aquecimento global poderia mitigar parte das mudanças climáticas e de suas conseqüências (FUTURE LEARN, 2017). Apesar do benéfico potencial climático dos biocombustíveis, muitos ainda contestam o seu uso alegando que a atividade põe em risco a segurança alimentar, uma vez que as culturas energéticas competem com as culturas alimentícias pelas terras de maior qualidade (MARTINDALE, 2015).

1.1. Justificativa

Em razão da crescente preocupação sobre as mudanças climáticas que podem ser provocadas pelo aquecimento global de origem humana, pesquisadores de diferentes instituições têm buscado alternativas para mitigar suas consequências futuras nos sistemas produtivos e na sociedade. Dentre as energias renováveis, a bioenergia se destaca por um aspecto único, considerado fundamental para reduzir a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, a capacidade de realizar o sequestro de carbono. A bioenergia também se destaca pelo alto fator de capacidade de geração, que ao contrário de outras fontes intermitentes como solar e eólica, fornece de forma constante com uma potência mais estável. Mas qual é o potencial sustentável da produção de bioenergia sem comprometer a segurança alimentar no futuro?

Está é a pergunta que os autores tentam responder ao longo desta pesquisa por meio da modelagem dos fatores que interferem na demanda e na capacidade produtiva de alimentos no mundo. São construídos 3 cenários, um sendo como de costume, um sendo o melhor dos cenários realistas e um baseado em condições teóricas, a fim de se levantar informações, compreender as dinâmicas entre os fatores e identificar riscos e oportunidades que podem ser úteis para a tomada de decisão, sendo esta a contribuição no meio científico. É importante ressaltar que este estudo considera o aspecto de potencial técnico produtivo de alimentos e bioenergia, portanto tem limitações com relação à realidade e não deve ser assumido como um estudo para aplicação prática sem que antes sejam realizadas outras considerações.

1.2. Metodologia

A estimativa da quantidade de terras disponíveis para projetos de biocombustíveis se baseia nos principais parâmetros que influenciam a demanda e a oferta de produção agrícola, de alimentos e de biocombustíveis. São parâmetros que interferem com diferentes intensidades na projeção para cada um dos temas, como o tamanho da população, as tecnologias que aumentam a produtividade agrícola, a qualidade dos solos e até os hábitos alimentares da população. É necessário avaliar os parâmetros de forma a compreender as relações entre eles, para projetar cenários futuros a partir de dados e projeções da literatura.

As projeções foram realizadas para 3 diferentes cenários: *como de costume (C1)*, *o melhor dos cenários realistas (C2)* e *a situação teórica (C3)*. As projeções foram realizadas a partir de dados históricos e considerando as expectativas de especialistas para cada parâmetro envolvido no cálculo.

De acordo com a *Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO)*, para atingir um estado de segurança alimentar, além da disponibilidade de alimentos, é preciso que a população tenha acesso físico e econômico a uma alimentação nutritiva capaz de fornecer as calorias necessárias para uma vida saudável (FAO, 2006). Isto significa que somente disponibilidade de terras não é suficiente para atingir a segurança alimentar, precisa-se também de acessibilidade de forma estável e capacidade de preparo dos alimentos. E mesmo focando somente na disponibilidade de alimentos, é preciso que haja também disponibilidade de outros recursos - como água, energia e capital – mas o estudo não os considera, caracterizando-os como um fator limitante. Esta pesquisa aborda a demanda global de alimentos, terras produtivas, e o potencial de produção de bioenergia em 3 cenários futuros.

1.3. Objetivos

Para avaliar a contribuição que a bioenergia pode ter na estabilidade climática mundial, sem comprometer a disponibilidade de alimentos, é necessário conhecer o potencial de recursos disponíveis para produzir biocombustíveis e estimar o respectivo potencial de sequestro de carbono.

1.3.1. Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho é avaliar a área em potencial de terras agricultáveis disponíveis para projetos de bioenergia em 2050 sem comprometer a disponibilidade de alimentos, um dos pilares da segurança alimentar, que é uma premissa do cálculo. A área de terras disponíveis para biocombustíveis será considerada como a diferença entre o total de terras agricultáveis (que pode ser utilizada para cultivo) do mundo e a área demandada para culturas alimentícias visando à atender toda a população.

1.3.2. Objetivos Específicos

A primeira etapa da projeção consiste em modelar a demanda por terras para culturas alimentícias para que se possa simular diferentes cenários para 2050. A segunda etapa visa a projetar os potenciais teóricos e técnicos de geração bioenergética no mundo até 2050. Os

objetivos específicos são:

1. Identificar os parâmetros que influenciam na demanda global por alimentos e consequentemente, na demanda por terras produtivas para lavouras.
2. Obter, a partir da bibliografia, valores atuais e projeções futuras para cada parâmetro com base em 3 cenários distintos.
3. Modelar as relações entre os parâmetros envolvidos de forma lógica para quantificar a área necessária de terras para cultivo de alimentos em cada cenário.
4. Avaliar o potencial teórico e o potencial técnico de geração de bioenergia a partir das terras cultiváveis remanescentes.
5. Compreender os possíveis impactos, positivos ou negativos, no ambiente. Assim como as possibilidades de atuação visando ao desenvolvimento sustentável.

1.4. Novidade da Pesquisa

A novidade desta pesquisa é a avaliação qualitativa e quantitativa dos parâmetros que interferem na disponibilidade de terras para projetos de bioenergia. Diferentemente de outros estudos realizados, além dos parâmetros considerados, a metodologia deste trabalho considera também o desperdício de alimentos nas projeções, que afeta uma parcela significativa dos alimentos que são produzidos anualmente, e a área de terras degradadas ou abandonadas por baixa produtividade. O estudo ainda considera no cálculo parâmetros que são geralmente negligenciados por outros autores, mas que tem um altíssimo potencial de ganho de escala num futuro próximo, como a influência da agricultura urbana e do consumo de proteínas de insetos.

A estrutura desta dissertação é composta: pela introdução, na qual se apresenta o debate sobre o uso da terra para produção de alimentos e energia, bem como os argumentos que motivaram esta pesquisa; pela revisão bibliográfica sobre as propriedades do solo, a produção dos alimentos e a biomassa como fonte de energia; pelas metodologias propostas na modelagem do cálculo e na obtenção dos valores necessários para as estimativas de disponibilidade de terras e da avaliação da bioenergia; os resultados obtidos e as análises; seguidos pelas principais conclusões; e a menção de outros trabalhos desenvolvidos ao longo

do curso de mestrado. Os capítulos “Materiais e Métodos” e “Resultados e Discussões” foram divididos em duas etapas visando à apresentação cronológica do raciocínio, uma vez que foi necessário obter os resultados da disponibilidade de terras para então estimar o potencial bioenergético.

Por meio de projeções em 3 cenários distintos, pôde-se vislumbrar os riscos e o efeito das tendências e propostas atuais de desenvolvimento sustentável, além do potencial técnico das oportunidades envolvendo as atividades econômicas direta ou indiretamente relacionadas aos setores agropecuário, energético e tecnológico.

A primeira etapa da pesquisa consiste na compreensão dos fatores mais determinantes que afetam a demanda global por alimentos, e a capacidade produtiva para cultivá-los. A etapa seguinte é a avaliação qualitativa dos mesmos a fim de modelar o método de cálculo. Então, se torna possível quantificar cada parâmetro para o Cenário Atual (C0) e para os cenários futuros, com dados oriundos de fontes confiáveis, obtidos na bibliografia. A etapa seguinte consiste em realizar as simulações para obter os resultados referentes à ocupação de terras agricultáveis em cada cenário. Realizadas as simulações da ocupação das terras para culturas alimentícias, serão obtidas as áreas potencialmente disponíveis para projetos de bioenergia, viabilizando as análises de potencial teórico e técnico de produção bioenergética global.

2. Revisão Bibliográfica

Outros autores têm utilizado diversas metodologias para estimar a área necessária de terras para suprir a demanda alimentícia global no futuro, em diferentes cenários. Pesquisadores da World Resources Report chegaram à conclusão de que serão necessários 600 milhões de hectares a mais de cultivo para suprir a demanda em comparação com a área ocupada atualmente (SEARCHINGER *et al.*, 2019). Outro estudo relacionando a estabilização do crescimento populacional com o aumento de produtividade dos campos sugere que será necessária uma expansão das fronteiras agrícolas na ordem de menos de 10% da área ocupada atualmente (PARDEY *et al.*, 2014). Por outro lado, há um estudo que concluiu que se a sociedade continuar a viver num cenário Business-as-usual (como de costume), será necessário um aumento de 119% na área atual de cultivo caso não haja adaptações sociais (BERNERS-LEE *et al.*, 2018a). Projeções da FAO resultaram em demandas mínimas e máximas de áreas de terras destinadas ao cultivo de lavouras, em cerca de 1,65 e 1,90 bilhões de hectares em 2050, respectivamente (FAO, 2018).

Temas como o potencial de geração de biomassa para fins energéticos, e a avaliação da disponibilidade de terras agricultáveis no futuro, são amplamente debatidos no meio científico. Há muitas pesquisas sobre o potencial bioenergético global no futuro, mas poucas que consideram no cálculo, não somente fontes de bioenergia como também variações de produção/consumo resultantes dos comportamentos da população futura em diferentes cenários. A *International Renewable Energy Agency (IRENA)* publicou um relatório com suas projeções de bioenergia para 2050, incluindo outras estimativas de alguns dos estudos mais relevantes a respeito do tema. Na literatura, as estimativas de potencial bioenergético variam entre 50 EJ (exajoule) e 1500 EJ/ano (IRENA, 2014), como pode ser observado na Figura 2.1. Os resultados contidos na figura abrangem diferentes metodologias para definição e quantificação do potencial de biomassa, variando também na consideração dos recursos disponíveis para fins bioenergéticos.

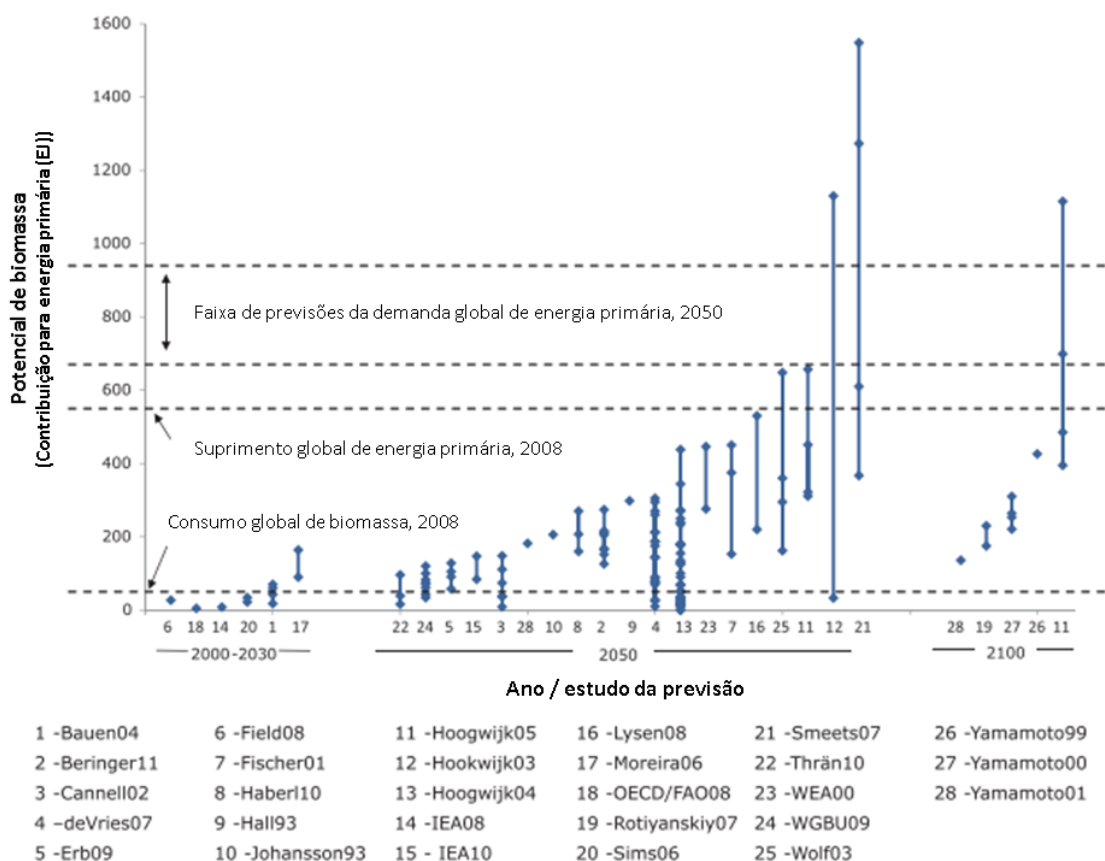


Figura 2.1 - Projeções do potencial de biomassa por período e estudo individual. Adaptado de (SLADE *et al.*, 2011)

Em estudos cujas metodologias se baseiam no aproveitamento sustentável, o potencial global de bioenergia varia entre 60-120 EJ/ano (SEARLE; MALINS, 2015), 110-245 EJ/ano (WU *et al.*, 2019), 130-270 EJ/ano (BERINGER; LUCHT; SCHAPHOFF, 2011), e 215–1272 EJ/ano (SMEETS *et al.*, 2007).

2.1. Solos

O solo é um recurso natural e renovável que presta diversos serviços ecossistêmicos e ambientais (BURBANO, 2016). São constituídos por minerais (areia, silte e argila), ar, água e matéria orgânica que atuam livremente em simbiose e associação com os seres vivos (macro, meso e microorganismos) (BARRIOS, 2007). Estes organismos tem a função de misturar, degradar e sintetizar a matéria orgânica a fim de garantir a continuidade dos ciclos biogeoquímicos, essenciais para as relações naturais e para a sobrevivência humana.

A preservação do solo extremamente importante devido à vital relevância que tem sobre o funcionamento dos sistemas terrestres, como o ciclo da água, a regulação climática, os ciclos dos nutrientes e a biodiversidade (WIESMEIER *et al.*, 2018). Tudo isso se traduz em benefícios para a segurança alimentar, nutrição, saúde e segurança energética em termos de bioenergia (GREINER *et al.*, 2017). Nesse contexto, o solo tem mais funções estruturais como componente fundamental do meio ambiente, do que apenas como substrato para a produção agrícola. O solo é um bioecossistema complexo e dinâmico onde as funções não são lineares, razão pela qual o torna vulnerável a impactos devido à contaminação ou degradação de suas propriedades.

As propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, estabelecem sua saúde ou seu estado de deterioração. Isto possibilita a maior compreensão das relações de causa e efeito dos processos de degradação e contaminação do solo, para que sejam aplicadas as estratégias de restauração mais eficientes em cada situação. As propriedades físicas dos solos desempenham um papel importante na determinação da aplicabilidade do solo para usos agrícolas, e influenciam diretamente nas suas propriedades químicas e biológicas (PHOGAT; TOMAR; DAHIYA, 2015).

A degradação do solo é a diminuição de uma ou mais ofertas de bens, serviços ou funções ecossistêmicas e ambientais, causadas por processos naturais ou antrópicos que, em casos críticos, podem causar perda ou a destruição total do recurso. A degradação dos solos pode ser física, química ou biológica. A Figura 2.2 relaciona os diferentes tipos de degradação do solo. Pode-se ver que os processos de degradação física incluem a deterioração da estrutura do solo, a formação de crostas ou selagem superficial, endurecimento, compactação, erosão e desertificação. Os processos químicos incluem desequilíbrio químico, lixiviação, perda de nutrientes, acidificação, salinização e poluição. Os processos biológicos de degradação do solo incluem redução de carbono e redução da biodiversidade do solo. Em suma, a degradação da terra resulta de um descompasso entre a qualidade da terra e o uso da terra (OSMAN, 2014).

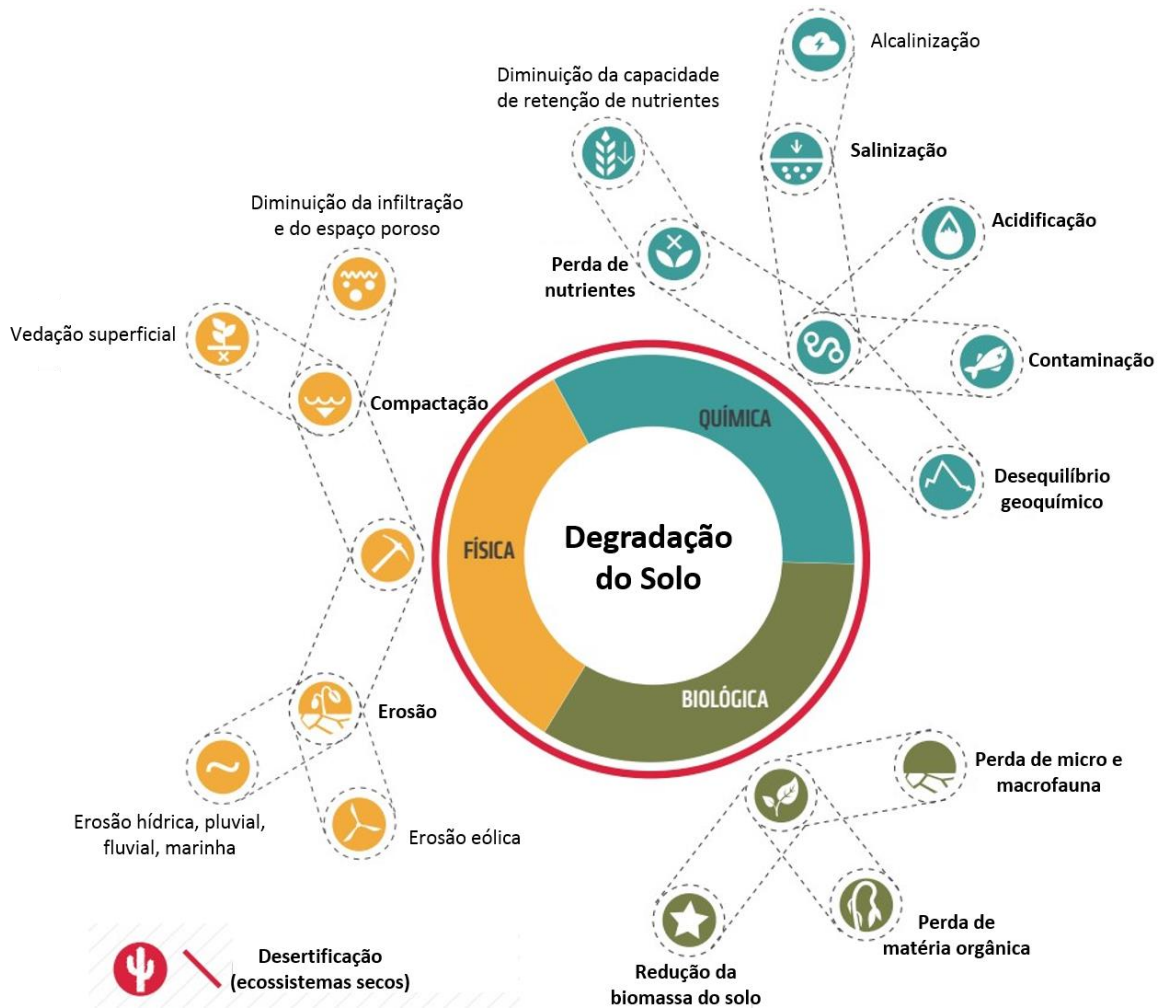


Figura 2.2 - Processos de degradação do solo. Fonte: (IDEAM - U.D.C.A, 2015)

A desertificação é o processo de deterioração de uma paisagem acarretado na ocorrência de características típicas de áreas desérticas. Isso se deve, em grande parte, aos efeitos da ação humana abusiva no uso da terra. Estima-se que mais de 20% dos 42 milhões de km² de terra de sequeiro estão sujeitos, em maior ou menor grau, aos processos de desertificação (LEHOUE´ROU, 2017). A desertificação pode ser definida como a diminuição ou destruição do potencial biológico do solo, e pode levar a condições de deserto (VERSTRAETE, 1986).

É considerada contaminação do solo, quando a concentração de determinada substância excede a capacidade do solo de purificação. Portanto, qualquer produto químico de origem natural ou antropogênica que se acumula no meio do solo e altera o equilíbrio natural do solo é considerado contaminante (VARON; CALVET; PROST, 1996). Aproximadamente metade dos produtos químicos orgânicos produzidos industrialmente são depositados no meio ambiente de forma direta ou indireta, sendo alguns exemplos os resíduos e efluentes agrícolas, municipais e industriais. Quando estas substâncias atingem o ambiente natural, vários processos de degradação e transferência se iniciam (ABOUL-KASSIM; SIMONEIT, 2001).


2.2. Produção de Alimentos

São três fatores primários que determinam o crescimento da população: mortalidade, fertilidade e dinâmica populacional. Todos fortemente ligados à educação e ao desenvolvimento humano (KC; LUTZ, 2017). Os padrões de alimentação também mudam com o passar dos anos, e a tendência é que com o desenvolvimento da sociedade, a segurança alimentar aumente, como resultado da elevação na oferta e distribuição de alimentos.

A produção de alimentos, estimada em termos de calorias de uma dieta saudável, superou em mais de duas vezes a demanda em 2010 (SZABÓ, 2015). Alguns autores sugerem que a fome não é um problema resultante da produção de alimentos, mas sim da sua logística e distribuição (NDICHU, 2015). Aproximadamente 842 milhões de pessoas passam fome em todo o mundo. Desse número, 98% das pessoas afetadas pela fome vivem em países em desenvolvimento. Aproximadamente 9 milhões de pessoas morrem de fome no mundo a cada ano, dos quais 3,1 milhões são crianças (TURK, 2017).

Enquanto milhões morrem de fome, o desperdício de alimentos varia de 30 a 40% tanto para países desenvolvidos quanto para países em desenvolvimento. Cerca de 54% do desperdício acontece nos estágios iniciais de produção, manuseio e armazenamento pós-colheita, enquanto 46% ocorrem nas etapas de processamento, distribuição e consumo de alimentos. Os países em desenvolvimento registram mais perdas de alimentos na produção agrícola, em decorrência das limitações financeiras e de infraestrutura, enquanto nos países desenvolvidos o desperdício é maior no varejo, por razões como comportamento do consumidor com falta de comunicação nas cadeias de suprimento (FAO, 2013).

Como o estudo aborda a demanda de alimentos e a produtividade, o consumo de carne deve ser considerado nas estimativas, visto que a conversão alimentar pode variar consideravelmente para diferentes criações animais. Conversão alimentar é a relação entre a quantidade de alimento que se pode obter à partir da produção animal dividido pela sua demanda de ração durante a engorda até atingir o ponto de abate. A Figura 2.3 apresenta a conversão alimentar dos principais tipos de criação animal no mundo, evidenciando o quão alta é a demanda de recursos para engordar animais como suínos, e principalmente bovinos.



	Leite	Peixe	Ovos	Frango	Suíno	Bovino
Conversão Alimentar (kg de alimento / kg em peso vivo)	0.7	1.5	3.8	2.3	5.9	12.7
Conversão Alimentar (kg de alimento / kg em peso comestível)	0.7	2.3	4.2	4.2	10.7	31.7

Figura 2.3 - Conversão alimentar de carnes e alimentos derivados de animais (GORDON, 2011).

A água é um recurso fundamentais para a produção de alimentos, e alguns tipos de alimentos requerem muita água ao longo de sua cadeia produtiva. A pegada de água de determinado alimento é o somatório do volume de água consumido desde o cultivo e a colheita, até os processos de tratamento do produto para disponibilização ao consumidor final. Na Figura 2.4 pode-se observar o consumo total de água para alguns alimentos e bebidas (VASCONCELLOS, 2017).

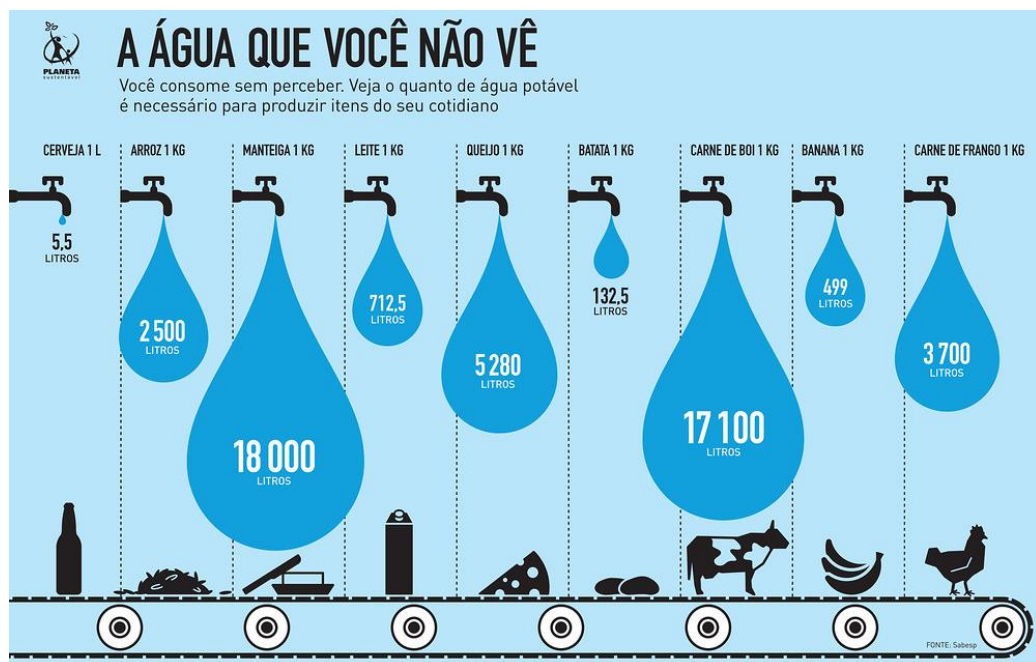


Figura 2.4 - Água necessária para a produção de alguns alimentos. (VASCONCELLOS, 2017)

O gráfico da Figura 2.5 reúne as atividades econômicas que mais causam impactos no meio ambiente ao longo de sua cadeia produtiva, considerando-se por impacto a poluição ou o consumo de recursos, como o uso da água e o uso da terra. Verificou-se que das 10 mais

impactantes, 8 são atividades relacionadas ao setor agropecuário (GRISOTTO, 2015). No mundo, a Agricultura é responsável por 24% das emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2014). Já no Brasil, o setor agropecuário é responsável por 69% das emissões de gases de efeito estufa, contabilizados desde o desmatamento para abertura de novas áreas, às emissões de poluentes no processo digestivo (principalmente o metano), incluindo as emissões relacionadas ao cultivo, como o uso de fertilizantes (MELLO, 2016).

O MAIOR PROBLEMA EM CADA SETOR
USO DE CAPITAL NATURAL – CUSTO EM R\$ MILHÕES

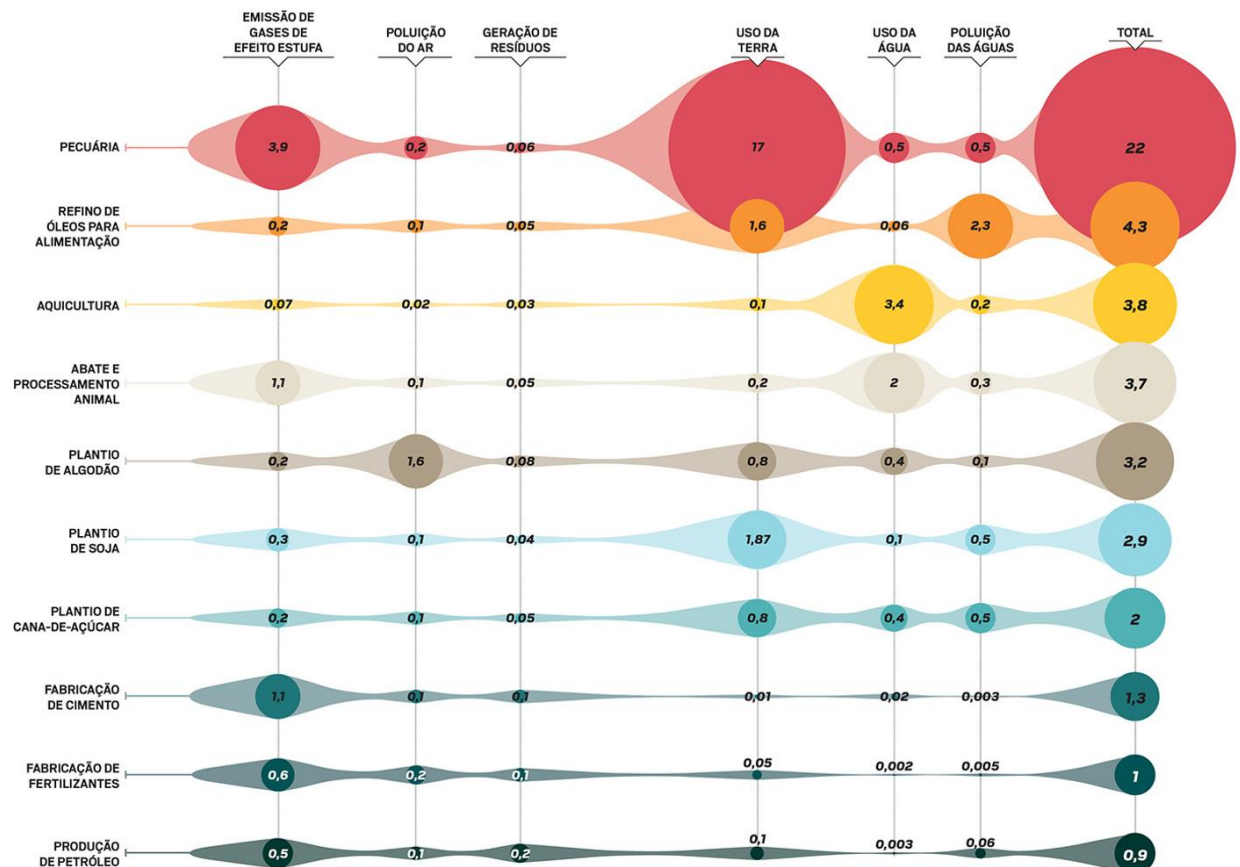


Figura 2.5 - Uso do capital natural dos setores mais impactantes para o meio ambiente. (GRISOTTO, 2015)

Uma alternativa para reduzir os impactos é a aplicação de biofertilizantes e defensivos biológicos em substituição aos industriais para correção de parâmetros do solo e para controle de pragas, respectivamente. São menos agressivos ao solo e formam um ambiente mais propício para o desenvolvimento da biota, fundamental para a manutenção dos nutrientes do solo, e para os ciclos do nitrogênio, do carbono e da água. (CARNEIRO, 2007).

Fazendas urbanas são uma possibilidade de atrelar a produção ao consumo, reduzindo perdas na logística. Avanços tecnológicos têm possibilitado cultivos urbanos em larga escala,

muitas vezes com cultivos em ambiente controlado com iluminação artificial. No caso da degradação desenfreada dos solos férteis do mundo, ainda seria possível produzir alimentos a partir de técnicas de cultivo sem solo, como por exemplo a hidroponia e a aquaponia, técnicas com vantagens como a otimização do espaço, economia de até 90% de água com relação a cultivos convencionais e proteção contra pragas e insetos. A hidroponia se caracteriza pelo cultivo de vegetais onde as raízes absorvem nutrientes essenciais a partir de uma solução nutritiva aquosa

A dieta das pessoas é um fator crucial para alcançar o desenvolvimento sustentável. Dietas baseadas em vegetais tem grande potencial de mitigação das mudanças climáticas, pois a demanda por carnes diminuiria consideravelmente. A inserção de insetos na alimentação é outro fator importante que pode ser decisivo no cenário futuro do agronegócio, pois os insetos são excelentes decompositores e se multiplicam exponencialmente. O teor de proteína de alguns insetos é superior à maioria das carnes que consumimos. Na Figura 2.6 são comparados o teor de proteína de algumas carnes e de alguns insetos, e observa-se que os insetos são em média de 2 a 3 vezes mais ricos em proteínas do que outros animais (SPINACÉ, 2013).



Figura 2.6 - Comparação entre a quantidade de proteínas contidas em 100 gramas de algumas espécies de insetos a de algumas carnes (SPINACÉ, 2013).

2.3. Bioenergia

A biomassa é a quarta maior fonte de energia na matriz global, após o carvão, petróleo e gás natural. É um recurso energético versátil que pode se transformar em outras formas de energia. Além disso, em comparação com outras energias renováveis, a biomassa é um recurso que está espalhado por todo mundo (LADANAI; VINTERBÄCK, 2009).

Das energias renováveis, a bioenergia é a que mais contribui na matriz global, com 46,4 EJ ou 12,8% da matriz. Destes, 7,8% se referem ao uso tradicional da biomassa por países

em desenvolvimento (para cozinhar e para aquecimento), e os outros 5% são do uso moderno da biomassa, por meio de biocombustíveis (REN21, 2018). A Figura 2.7 representa as parcelas de energias renováveis no consumo global. A diferença entre o uso tradicional e o uso moderno de biomassa está nos processos que transformam a biomassa in natura em um combustível mais limpo e eficiente, que caracteriza os biocombustíveis.

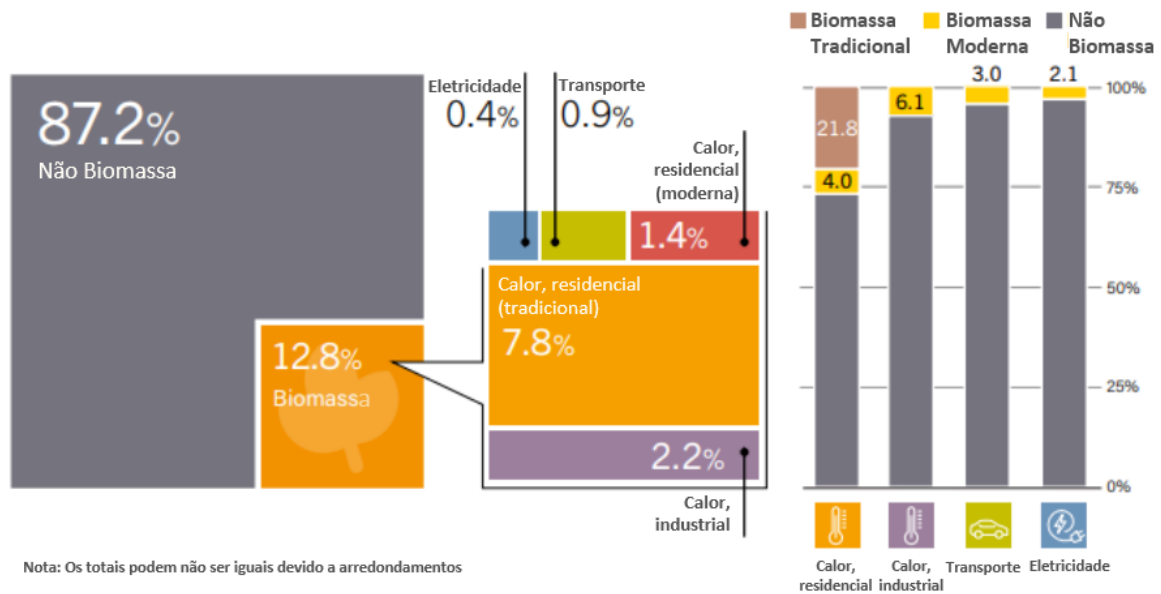


Figura 2.7 - Parcela estimada de energias renováveis no consumo global final. Adaptado de: REN21, 2018.

Biocombustíveis são os vetores energéticos da bioenergia moderna. Os biocombustíveis podem ser sólidos como os pellets de biomassa, líquidos como etanol e biodiesel e gasosos como o biogás e o gás de síntese. Os biocombustíveis têm um enorme potencial de mitigação de dano ambiental se comparado a combustíveis fósseis. Em razão do ciclo do carbono, as emissões da queima do biocombustível são neutralizadas, e os impactos ambientais relativos à cadeia produtiva destes podem ser consideravelmente menores que os impactos causados por combustíveis fósseis.

Por se tratar de uma fonte renovável de energia, os biocombustíveis têm vantagens ambientais como menores níveis de emissões de gases de efeito estufa e gases tóxicos em comparação a combustíveis fósseis e não irão acabar, como no caso das reservas atuais de petróleo. Mas as vantagens vão além disso. Economias baseadas em biocombustíveis tem produção descentralizada, levando desenvolvimento e tecnologia para áreas rurais, que tem impacto direto na sociedade, melhorando a qualidade de vida das pessoas. Isto ainda possibilita que a produção esteja próxima ao consumo, reduzindo a dependência por

combustíveis importados. Também podem ser obtidos a partir de diferentes fontes de biomassa incluindo resíduos, sendo neste caso uma forma de reciclagem. (SKYE, 2012). Em comparação com outras fontes renováveis como energia solar, eólica e hidráulica, a bioenergia se destaca pelo sequestro de carbono. Durante o crescimento as plantas absorvem carbono por meio da fotossíntese, e após a colheita, o carbono das raízes permanece no solo. Isso faz com que os biocombustíveis não sejam apenas tecnologias de geração carbono-neutro, mas sim carbono-negativos. Por outro lado, há também desvantagens relacionadas ao cultivo que podem comprometer a sustentabilidade dos biocombustíveis, como o uso de fertilizantes, agrotóxicos, quantidades massivas de água. O desmatamento de áreas florestadas para cultivo de culturas energéticas, a perda de biodiversidade e o maquinário industrial também representam os vetores de impactos ambientais inerentes dos biocombustíveis (SKYE, 2012).

A bioenergia pode ser produzida a partir de culturas energéticas e a partir de biomassa residual de origem agrícola, industrial ou municipal. No setor agrícola, há culturas conhecidas como “culturas Flex” que podem produzir alimentos, biocombustíveis e outros produtos químicos simultaneamente, proporcionando uma flexibilidade de adaptação com relação às variações de Mercado, como no caso da indústria sucro-energética (MSANGI, 2016). Os biocombustíveis mais produzidos no mundo são o etanol e o biodiesel. O etanol é um combustível baseado em álcool produzido a partir da fermentação e da destilação de materiais com alto conteúdo de carboidratos (açúcar e amido). Também pode ser produzido a partir de materiais ligno-celulósicos como madeira e fibras. O biodiesel é um combustível composto ésteres mono-alquílicos de ácidos graxos de cadeia longa e é obtido a partir de óleos vegetais e gorduras animais (ESCOBAR *et al.*, 2009). As principais matérias-primas para a produção desses biocombustíveis atualmente são: cana-de-açúcar, milho, trigo e arroz para etanol; e soja, palma e algodão, para o biodiesel (WEGGE; ROLSTAD; STORAUNET, 2013).

Os biocombustíveis podem ser produzidos a partir de diferentes rotas tecnológicas e a partir de diferentes matérias-primas. Biocombustíveis são classificados de acordo com o material utilizado e podem ser de 1^a, 2^a, 3^a e 4^a geração. Biocombustíveis de 1^a geração (1G) são produzidos a partir da biomassa de determinada cultura, geralmente uma cultura de alimentos com alta densidade energética, como óleos, grãos e açúcares. Os biocombustíveis 1G representam a grande maioria da produção atual, mas são alvo de críticas em decorrência

da competição por terras com as culturas alimentícias. Também dependem de técnicas relativamente ineficientes, como fermentação por leveduras e transesterificação por catalisadores alcalinos. (BIODIESEL BR, 2008). A FAO estimou num estudo hipotético que se as principais culturas de cereais e açúcar fossem convertidas em etanol (1G), estes alimentos poderiam suprir até no máximo 57% do consumo atual de petróleo. (FAO, 2008).

Por outro lado, os biocombustíveis de 2ª geração (2G) são produzidos a partir de técnicas que permitem o aproveitamento do material lignocelulósico, presente em árvores, grama, resíduos agrícolas e industriais. Acredita-se que as culturas energéticas não serão capazes de atender a toda demanda por biocombustíveis, e que os compostos lignocelulósicos são a próxima oportunidade entre as fontes de matéria-prima disponíveis. O aproveitamento de resíduos agrícolas é uma tecnologia promissora para suprir a demanda de etanol no futuro (ESCOBAR *et al.*, 2009). Com esta tecnologia, culturas celulósicas (eucalipto, pinus) que naturalmente reduzem a erosão do solo e aumentam o sequestro de carbono, se tornam ainda mais promissoras. (SHAKUN, 2012). Os principais resíduos agrícolas potenciais para a produção de etanol 2G são palha derivada do trigo, do arroz e do milho, além de bagaço de cana. Somente esses 4 resíduos contabilizam 1.394 milhões de toneladas de biomassa, e poderiam ser usados pra produzir 418,9 bilhões de litros de etanol 2G (SARKAR *et al.*, 2012).

Os biocombustíveis de 3ª geração, são produzidos a partir de espécies modificadas para alcançar maiores eficiências de conversão energética. Estão sendo desenvolvidas espécies de eucalipto com baixo teor de lignina para facilitar a conversão da matéria em etanol celulósico, espécies com teores de açúcar mais altos, milho geneticamente modificado, que já contém enzimas necessárias para conversão da biomassa, entre outros avanços. A 4ª geração é composta por plantas com alta eficiência de captação de carbono atmosférico. Estas espécies armazenam o carbono nos galhos, troncos e raízes, com grande potencial de aumento do sequestro de carbono atmosférico. (BIODIESEL BR, 2008).

3. Materiais e Métodos

Os Materiais e Métodos foram divididos em duas etapas para melhor organizar o raciocínio lógico da modelagem, da obtenção dos dados e das projeções para cada etapa, separando-se: a avaliação da área disponível e a avaliação da bioenergia. A metodologia do trabalho se baseia em um balanço direto equilibrando a demanda e a oferta globais de alimentos, para então se estimar o potencial bioenergético à partir das terras agricultáveis remanescentes respeitando os limites da segurança alimentar.

3.1. Avaliação da área disponível

A metodologia da primeira etapa baseia-se na demanda de alimentos pela população, na oferta da produção agrícola e na disponibilidade das terras excedentes que poderiam ser aproveitadas para a produção de biocombustíveis. As projeções foram realizadas a partir de dados históricos e considerando as expectativas de especialistas para cada parâmetro envolvido no cálculo. As estimativas consideram aspectos técnicos e também tendências de sociais de consumo, como avanços tecnológicos na produção agrícola e a popularização do vegetarianismo, respectivamente. As interferências mútuas entre a produção de alimentos e a de biocombustíveis fazem com que a segurança alimentar seja uma das premissas para o estudo. A diferença entre as áreas indica a parcela remanescente de terras disponível para projetos de bioenergia com o objetivo de amenizar o aquecimento global. As projeções consideram a área de florestas como um fator limitante para a disponibilidade de terras, visando a mitigar impactos ambientais e as emissões de carbono do desmatamento destas áreas para projetos de agropecuária.

Este é um estudo de potencial teórico de produção de biocombustíveis que desconsidera as influências econômicas, políticas e mercadológicas que regem a distribuição e o uso das terras. As projeções apresentadas são baseadas numa sociedade teórica, com todos os países e líderes engajados em erradicar a fome e a desnutrição, como se não houvesse fronteiras. Contudo, na realidade há fronteiras econômicas, logísticas e ideológicas. E os alimentos, assim como a energia, e ultimamente também a preocupação climática, são trunfos cruciais nas negociações internacionais. Na prática, se observa na sociedade fortes correlações entre os temas abordados nesta pesquisa, como consumo de alimentos, nível de riqueza da população, *Índice de Desenvolvimento Humano - IDH*, consumo de energia e capacidade

tecnológica. A dinâmica entre estes fatores tem um grau de complexidade elevado e não foi considerada nas projeções, sendo assim uma outra limitação do modelo.

Três cenários são definidos com diferentes perspectivas para os principais parâmetros envolvidos com a demanda e a oferta de terras para produção de alimentos – um como de costume, um sendo o melhor dos cenários realistas, e um teórico. A adoção das nomenclaturas tem como critério o potencial de disponibilidade de terras remanescentes para a produção de bioenergia em cada cenário, sendo o “como de costume” o cenário com menor disponibilidade de terras, e “a situação teórica” o cenário com a máxima disponibilidade teórica de terras. As nomenclaturas, portanto não se referem às opiniões dos autores sobre as condições propostas em cada cenário. A demanda por terras para culturas alimentícias foi modelada por meio de relações lógicas e foi possível avaliar a influência dos parâmetros que mais afetam a disponibilidade de terras numa mesma base, em *hectares (ha)*, e também estimar o potencial de contribuição da bioenergia na mitigação das mudanças climáticas em 2050 por meio do potencial de sequestro de carbono nos cenários propostos. A Figura 3.1 mostra as etapas do estudo.

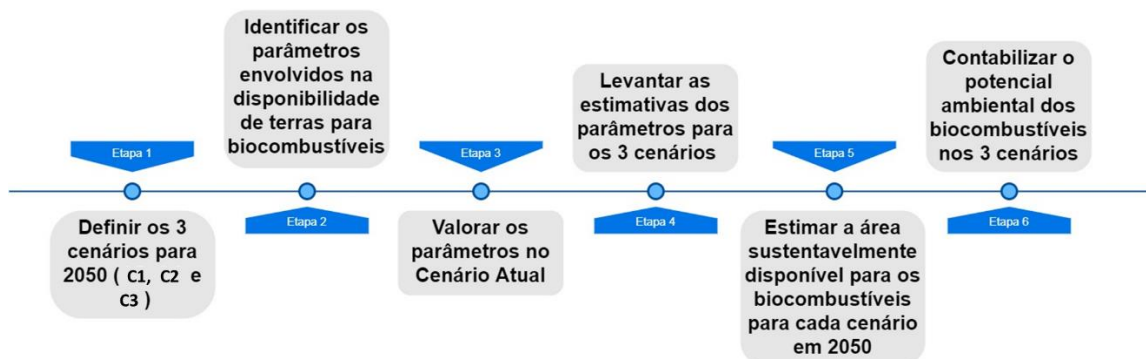


Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia utilizada e o escopo de cada etapa.

3.1.1. Definição dos Cenários

A avaliação tem uma abordagem ampla e holística, envolvendo projeções do setor agrícola e tendências de consumo da população para 3 diferentes cenários: o *Cenário “como de costume” - C1*, com critérios baseados em dados e projeções atuais, no caso de não haver mudanças drásticas no comportamento da sociedade; o *Cenário “melhor dos realistas” - C2*, baseado em propostas de desenvolvimento sustentável, de redução de emissão de carbono e de preservação dos recursos naturais; e o *Cenário “situação teórica” - C3*, que consiste num cenário teórico e extremo que considera os potenciais máximos de redução do uso da terra para estimar o potencial teórico de produção de biocombustíveis. Os 3 cenários C1, C2, C3

são os *Cenários de 2050 - C2050* e as projeções são baseadas no *Cenário Atual - C0*.

Para o C1 (como de costume) os critérios são baseados no estado atual de consumo e desenvolvimento da sociedade, tanto em razão do aumento da população quanto no aumento da ingestão de alimentos por pessoa. Considerou-se a intensificação do consumo das pessoas combinada ao um pequeno ganho de eficiência na produção agrícola, assim como o aumento na degradação de terras.

O C2 (melhor dos cenários realistas) é baseado em propostas existentes de redução de emissão de carbono das grandes potências mundiais e de instituições internacionais, considerando também tendências positivas de consumo da população, como a redução do desperdício, o ganho de produtividade agrícola, e o crescimento da agricultura urbana e do consumo de proteína de insetos.

O C3 (situação teórica) deve considerar os máximos indicadores de sustentabilidade, focando desde o aumento máximo na produtividade por ganhos tecnológicos até mudança de hábitos de uma população que não consome carnes vermelhas, nem desperdiça alimentos, entre outros comportamentos intangíveis.

Apesar de predições energéticas baseadas na extrapolação de tendências raramente serem precisas (CULLEN; ALLWOOD, 2010), “é melhor estar vagamente certo do que exatamente errado”, como disse uma vez o filósofo Carveth Read (PARDEY *et al.*, 2014). Além disso, as estimativas do C1 e do C3 resultam numa faixa abrangendo desde uma situação cada vez mais crítica para a estabilidade do clima até uma situação teórica que determina os potenciais máximos teóricos de ganho ambiental. O C2 possibilita vislumbrar o resultado das atuais propostas debatidas internacionalmente visando a desaceleração do aquecimento global para o futuro.

As principais limitações da pesquisa estão relacionadas ao escopo global e generalizado do estudo, pois uma vez que o estudo abrange dados globais, o que impossibilita análises pontuais, regionais ou mesmo por grupos, como comparações entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento. O mesmo ocorre para a análise dos cenários, já que cada um corresponde a um estado da arte de diferentes parâmetros em conjunto, dificultando a compreensão da influência individual de cada parâmetro de maneira consistente. Para satisfazer estas limitações, seria necessário a aplicação de técnicas de

estatística como a de Planejamento de Experimentos, acompanhado de um robusto levantamento de dados pontuais.

3.1.2. Principais parâmetros envolvidos na disponibilidade de terras para projetos de bioenergia

A identificação dos parâmetros que definem cada cenário foi embasada na metodologia de oferta e demanda. Considerou-se a demanda global por alimentos como uma multiplicação do número de pessoas no mundo, pela intensidade calórica de uma dieta média (kcal por pessoa por dia) e pela eficiência do consumo (considerando o desperdício). A oferta de produção de alimentos e de biomassa para fins energéticos é resultante da área disponível multiplicada pela capacidade de produção agrícola e pelos ganhos de eficiência. Foi possível traçar horizontes para estimar a área disponível para biocombustíveis no futuro e a importância que este setor terá no desenvolvimento sustentável para cada cenário. A Tabela 3.1 relaciona os principais parâmetros envolvidos na disponibilidade de recursos para os biocombustíveis, com as características de cada cenário proposto. Adotaram-se valores para cada parâmetro em cada cenário da avaliação de artigos científicos e fontes da literatura. Os valores foram incluídos no cálculo, relacionados ao uso da terra, para se obter a influência de cada parâmetro na potencial disponibilidade de terras para biocombustíveis nos cenários futuros.

Tabela 3.1 - Principais fatores envolvidos na disponibilidade de recursos e as características de cada cenário.

ASPECTO	C1	C2	C3	Dados relevantes para as estimativas
CRESCIMENTO POPULACIONAL	elevado	médio	baixo	demanda de alimentos
DESPERDÍCIO DE ALIMENTOS	valor atual	com propostas de redução	nulo	área de terras utilizadas atualmente
CONSUMO DE CARNE	elevado	substituição parcial da carne de ruminantes por proteínas de insetos	substituição total da carne de ruminantes por proteínas de insetos	uso da terra relacionado a diferentes dietas
PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA	baixa	média	elevada	eficiência no uso da terra
DEGRADAÇÃO DE TERRAS	elevada	média	recuperação de todas as terras degradadas	aumento das terras aráveis

3.1.3. Metodologia de Cálculo

Esta seção apresenta o equacionamento utilizado para a conversão de cada um dos parâmetros considerados em termos de acréscimo ou redução das terras necessárias para

satisfazer as demandas de alimentos em 2050.

Para garantir a segurança alimentar em termos de alimentos disponíveis (de forma global), deve-se estimar inicialmente a demanda de alimentos mundial, em quilocalorias (kcal). Esta grandeza foi obtida a partir da população total (habitantes), multiplicada pelo consumo específico de alimentos (kcal/hab.ano), considerando o desperdício (%) nas cadeias de produção e distribuição. Os valores do consumo de carne possibilitaram a comparação entre as demandas de alimentos dos cenários analisados, visto que alimentos de origem animal (principalmente de animais ruminantes) requerem muito mais recursos como, água, energia e principalmente espaço, além do impacto ambiental gerado.

A demanda calculada dos alimentos, incluindo o desperdício, é a quantidade mínima que deve ser produzida e ofertada para que se possa garantir a segurança alimentar. Foram calculadas as demandas para alimentos vegetais, para alimentos derivados de animais excluindo bovinos e ovinos de corte, e para carnes de bovinos e ovinos de corte, separadamente. No cálculo, as calorias das carnes bovina e ovina são subtraídas das calorias totais de origem pecuária, e todas estas são subtraídas das calorias per capita totais para obter as calorias ingeridas de origem vegetal. Os cálculos foram feitos desta forma tanto para base energética alimentar (kcal) quanto para a base proteica (gramas de proteínas).

$$\sum PA = \sum IDpC \times n^{\circ}H \times 365 \text{ days} \times (1 + D) \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde: PA é Produção de Alimentos; IDpC é Ingestão Diária per capita; n^oH é o número de Habitantes; e D é Desperdício.

A oferta mínima de alimentos foi relacionada com a produtividade agrícola média mundial (kcal/ha) de todas as culturas alimentícias, separadas entre alimentos de origem vegetal e alimentos de origem animal, para assim obter a área necessária de cultivo de alimentos. A porcentagem de alimentos produzidos pela agricultura urbana foi descontada da demanda total de alimentos antes do cálculo da área, a partir da produtividade média.

$$\sum Pph \text{ 2050} = \sum Pph \text{ 2013} \times (1 + \sum GPA)^{(2050-2013)} \times (1 - PPAD) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Onde: Pph é Produção por hectare; GPA é o Ganho de Produtividade Anual; e PPAD é a Perda de Produtividade Acumulada por Degradação.

As terras degradadas ou desertificadas foram subtraídas da parcela total disponível, o que resultou na área de terras necessária para alimentar o mundo.

$$\sum ACA \text{ 2050} = \frac{\sum PA \text{ 2050}}{\sum Pph \text{ 2050}} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Onde: ACA são as Áreas de Cultivo de Alimentos; PA é Produção de Alimentos; e Pph é Produção por hectare.

Somente o ganho de produtividade agropecuária, a agricultura urbana e a substituição

da pecuária por proteína de insetos são proporcionais ao aumento da disponibilidade de terras para produção de bioenergia. As estimativas para cada cenário seguem o mesmo raciocínio, mas com os valores ajustados para as expectativas no ano de 2050.

$$\sum AB = \sum AA - \sum ACA - \sum AD \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Onde: AB é o total disponível de Áreas para Bioenergia; AA é o total de Áreas Agricultáveis; ACA são as Áreas de Cultivo de Alimentos; e AD são as Áreas Degradadas.

A área potencial de cultivos energéticos foi obtida, e possibilitou estimar o potencial de sequestro de carbono para atingir as metas de controle da temperatura global.

3.1.4. Fundamentação da definição dos parâmetros de cada cenário

Cada um dos parâmetros que influenciam na disponibilidade global de recursos para projetos de biocombustíveis foram analisados de forma independente, estipulando-se valores de bibliografias atuais com justificativas para cada um dos cenários propostos. Foi determinado um valor para cada parâmetro em cada cenário. Se fossem atribuídos três valores de diferentes autores para cada parâmetro em cada cenário, seria possível realizar uma série de simulações seguindo o Método de Monte Carlo a fim de se estimar os cenários com maior probabilidade e com menor nível de ruído. Os autores reconhecem esta limitação da pesquisa. Compreendendo o C2 como o cenário mais provável entre os C2050 modelados, pode-se ter uma visão aproximada dos limites superiores e inferiores.

Crescimento populacional

A população global em Maio de 2019 era de 7,7 bilhões de pessoas (WORLDMETERS, 2019), e estima-se que esse número ainda irá crescer consideravelmente nas próximas décadas. Projeções da *Organização das Nações Unidas - ONU* indicam o crescimento populacional para o ano de 2050, com números globais entre 9,4 bilhões e 10,1 bilhões, sendo a estimativa média de 9,7 bilhões de pessoas. Estes valores foram considerados como base para os cálculos de demanda de alimentos para os cenários C3, C1 e C2, respectivamente (UN, 2019).

Consumo per capita de alimentos

De acordo com a FAO, em 2009, a média global de consumo per capita de alimentos foi de 2831 kcal por dia, valor adotado para o C0, com projeções alcançando 3070 kcal por dia em 2050, valor adotado para C1. Outros autores sugerem que estes valores poderiam chegar a 3129 kcal por habitante por dia na média global, valor adotado para C2, e 3408 kcal por habitante por dia em países desenvolvidos, valor adotado para C3 (PARDEY *et al.*, 2014). O consumo

per capita de alimentos é maior nos cenários C2 e C3 considerando que nestes cenários a população terá hábitos mais saudáveis, como maior prática de exercícios físicos, o que requer uma alimentação mais rica.

Desperdício de alimentos

O desperdício de alimentos no mundo gira entorno de 1/3 de toda a produção. Em 2010 isso representou 1,3 bilhões de toneladas de alimentos perdidos ou desperdiçados (FAO, 2010) num valor aproximado de 750 bilhões de dólares (JENKINS, 2018). Os alimentos não consumidos são responsáveis por gerar 3,3 bilhões de toneladas CO₂ equivalente todos os anos. A partir de 2018, essa parcela contabiliza 1,6 bilhões de toneladas anualmente (ELKS, 2018).

Há muitas iniciativas engajadas em reduzir o desperdício de alimentos ao redor do mundo, e foi publicado um estudo que concluiu que com 25% de redução no desperdício de alimentos, a demanda por alimentos poderia reduzir em 12%, assim como a demanda por terras poderia reduzir em 27%, e a necessidade de redução da emissão de gases de efeito estufa em 15% (RANGANATHAN *et al.*, 2018). O valor de 33% de desperdício foi considerado para o C1 supondo não haver mudanças significativas. Para o C2 considerou-se a redução de 25% dos 33% desperdiçados, enquanto para o C3 considerou-se desperdício nulo de alimentos.

Consumo de Carnes e Proteínas

Carne bovina requer 20 vezes mais terras e emite 20 vezes mais gases de efeito estufa por grama de proteína comestível do que outras proteínas vegetais. A pecuária representa 14,5% das emissões de gases de efeito estufa das atividades humanas sendo que a pecuária bovina representa 6%. A área necessária para a produção de uma tonelada de proteína por meio de gado bovino (e ovino) é cerca de 6 vezes maior do que a área necessária para produzir a mesma quantidade por meio de outras fontes de proteína animal (WAITE; RANGANATHAN, 2019).

Estudos sugerem que haverá um aumento de 30% no consumo per capita de bovinos e ovinos até 2050. Para outras carnes, o aumento no consumo per capita será de 23% (RANGANATHAN, 2013). Estes valores representarão o C1. O consumo mundial de carne bovina em 2018 foi de 70,37 milhões de toneladas de acordo com a OECD, e o mesmo órgão afirma que o consumo médio por habitante deve permanecer estável para os próximos anos em 6,5 kg por habitante ao ano (FORMIGONI, 2018). Com base nisso, o C2 considera o mesmo aporte de calorias de origem bovina que o C0. Para o C3, considerou-se que não haverá consumo de carne de ruminantes (bovina e ovina), e as proteínas de origem animal serão substituídas pelas proteínas de insetos, que causam menor impacto ambiental.

A Figura 3.2 apresenta a participação das fontes de suprimento de carne no mundo, indicando que bovinos e ovinos representaram 26,8% da produção em 2012 (FAO, 2015). Este valor foi utilizado para os C0, C1 e C2, enquanto no C3 o percentual adotado foi nulo. Um estudo da FAO estimou que o consumo médio de proteína global é de 71 gramas por pessoa por dia (SEARCHINGER *et al.*, 2019). Estima-se que alimentos de origem animal fornecem 33% da proteína consumida globalmente (RITCHIE; ROSER, 2017). Considerando as perdas na cadeia de produção, distribuição e consumo como o mesmo para os alimentos em geral, de 1/3, e com a população global, chegou-se a um total de proteínas produzidas anualmente pela pecuária. Apesar da maior pegada ambiental das carnes em relação aos vegetais, os alimentos de origem animal representam uma fonte importante de algumas das proteínas essenciais para o nosso metabolismo, como lisina e metionina, que podem ser escassas em algumas dietas vegetarianas ou veganas (HEGSTED *et al.*, 1955).

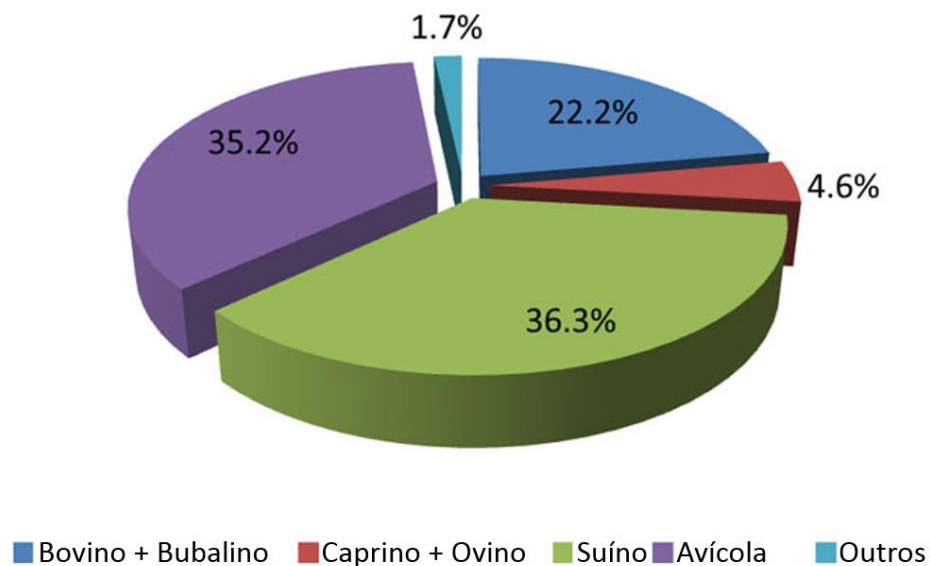


Figura 3.2 - Parcelas representativas das principais fontes de suprimento de carnes no mundo. (FAO, 2015).

A área necessária para a produção de proteína na pecuária bovina e ovina representa aproximadamente 1 grama de proteína por m² (RITCHIE; ROSER, 2017). Animais ruminantes são a fonte biológica de grande parte da produção de leite, representados por bovinos (82,7%), búfalos (13,3%), caprinos (2,3%), ovinos (1,3%) e camelos (0,4%). As espécies leiteiras consomem cerca de 40% da alimentação animal global e requer cerca de 1 bilhão de hectares de terras, dos quais 150 milhões de hectares produzem grãos comestíveis, e o restante são pastagens (FAO, 2016). O C3 considera a área de produção de leite na projeção.

Há cerca de 2000 espécies de insetos comestíveis no mundo. São considerados uma fonte sustentável de proteínas em razão sua produção caracterizada pela baixa necessidade de água, alimentos e ocupação de terras. A conversão energética é maior que a de peixes, e a economia de água por grama de proteína produzida é de 13 vezes comparada à de suínos e até 40 vezes comparada à bovinos. Em um hectare podem ser produzidas 150 toneladas de proteínas a partir de insetos, ou seja, 15 gramas por m² (WENDORF, 2019). Atualmente mais de 2 bilhões de pessoas já tem insetos na sua dieta (BRATSKEIR, 2017), aproximadamente 1 quarto da população (~25%).

O C1 não considera insetos na oferta proteica. Considerou-se no C3 a oferta proteica a partir de insetos em substituição total às proteínas oriundas da pecuária. Para estimar o C2 foi utilizado o pretexto de que das 25% de pessoas que já se alimentam de insetos, uma a cada 5 se alimentarão exclusivamente desta fonte para suprir suas demandas proteicas, portanto 5% da população mundial.

Oferta de alimentos

Das terras aráveis são extraídos os recursos orgânicos como alimentos, madeira, linho, e outras biomassas para suprir a população mundial. Para garantir a segurança alimentar e de outros suprimentos orgânicos a todos, as projeções devem ser feitas com a premissa de atender a necessidade da população no futuro (KLINE *et al.*, 2017). Estudos estimam que em 2013 foram produzidos, por meio de lavouras, 5935 kcal/pessoa/dia, mas destas, 808 kcal/pessoa/dia foram destinadas a outros usos que não a alimentação, como tabaco, algodão, linho, etc. Portanto foram produzidas 5127 kcal/pessoa/dia de alimentos destinados a humanos (BERNERS-LEE *et al.*, 2018b). Com esta informação, também contida na Figura 3.3, e sabendo que em 2013 a população mundial chegou a 7,2 bilhões de pessoas (UNITED NATIONS, 2013), obteve-se a produção anual de quilocalorias em culturas produzidas neste ano, cerca de 9,03 bilhões de gigacalorias (10⁶ kcal). Como os alimentos lácteos continuam presentes no C3, parte das culturas alimentícias ainda seriam direcionadas aos rebanhos leiteiros, produzindo leite e contribuindo para suprir a demanda global de alimentos em 134 kcal/pessoa/dia (FAO, 2016).

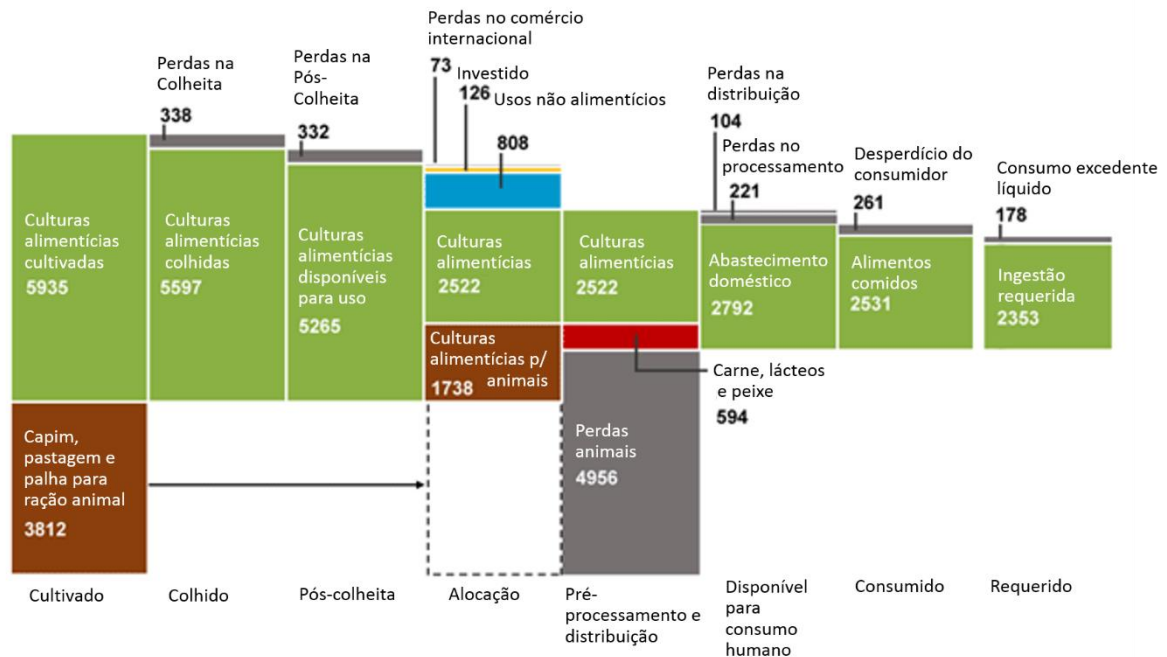


Figura 3.3 - Fluxo de energia alimentar global, em kcal/pessoa/dia. (BERNERS-LEE *et al.*, 2018b)

A área global ocupada para a produção de vegetais não alimentícios como tabaco contabiliza 4 milhões de hectares (MACKAY; ERIKSEN, 2002), enquanto a de algodão representa cerca de 2,5% das terras aráveis, ou 127,5 milhões de hectares (HELVETAS, 2007). Para todos os futuros cenários, considerou-se o total de 131,5 milhões de hectares como constantes, representando ambas as culturas de tabaco e algodão. As bebidas (tanto alcoólicas como não alcoólicas) fornecem energia na forma de energia (kcal) em nossa alimentação, e por isso a área de terras destinadas aos cultivos de cereais e açúcares para produção de bebidas não foi subtraída do cálculo como no caso do tabaco e do algodão.

Produtividade agrícola

Pela análise da Figura 3.4 pode-se perceber a evolução da produtividade da agricultura em quase cinco décadas. O aumento se deve aos avanços em pesquisas e tecnologias voltadas para o setor. Um estudo concluiu que um aumento entre 25% e 70% na produção de alimentos atual seria suficiente para suprir a demanda alimentar no futuro (HUNTER *et al.*, 2017). Estes valores foram considerados como o aumento acumulado de produtividade do C2 e do C3, respectivamente, enquanto o C1 desconsiderou aumentos na produtividade agrícola, dada pela área per capita demandada para alimentar uma pessoa, por hectare em 2050 comparado a atualidade. Com a iminente revolução digital do setor agrícola, os ganhos de produtividade por tecnologias tem um enorme potencial de crescimento a partir de avanços na genética, em sistemas autônomos e na inteligência artificial, e há autores que defendem ganhos acumulados

superiores aos considerados nesta pesquisa (FUGLIE; WANG; BALL, 2012).

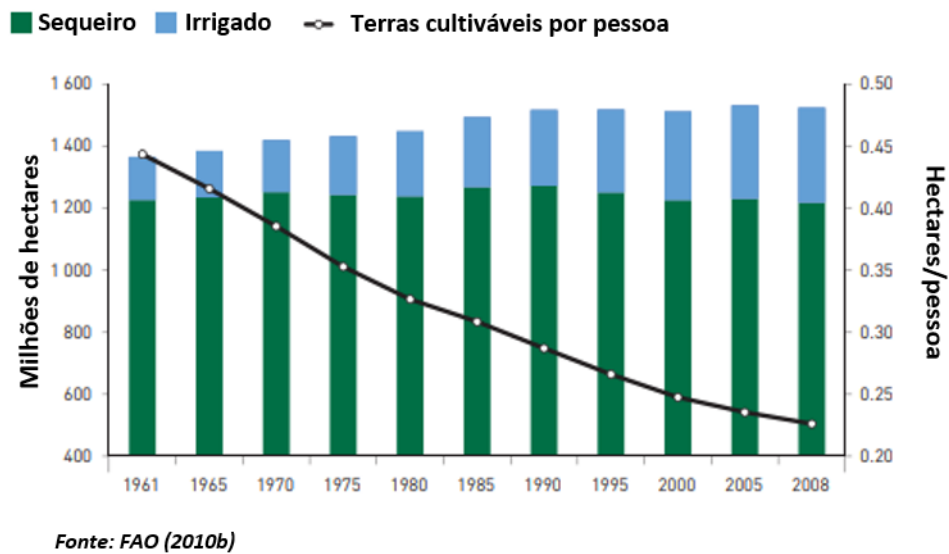


Figura 3.4 - Evolução da produtividade das lavouras e da área demandada per capita para a agricultura de 1961 a 2009. (FAO, 2011)

Por outro lado, entre 1998 e 2013, cerca de 20% das áreas de lavouras e pastagens apresentaram tendências decrescentes de produtividade por degradação (ORR, 2019). De acordo com a FAO, espera-se que em 2050 as mudanças climáticas e a degradação de terras reduzam a produtividade agrícola em 10% na média global, chegando a 50% em determinadas regiões (IPBES, 2018). Um outro estudo sugere que mais de 25% da produção agrícola será perdida neste século por fatores como as mudanças climáticas, degradação das terras, escassez de água e pragas e doenças invasivas (NELLEMANN *et al.*, 2009). O C1 considerou o valor de 25% de perda de produtividade, enquanto o C2 considerou como 10% e o C3 não considerou perdas de produtividade relacionadas às mudanças climáticas ou a outros fatores mencionados anteriormente. Há outros estudos que indicam que uma concentração mais elevada de CO₂ na atmosfera poderia aumentar a taxa fotossintética das plantas e a produtividade das lavouras (SMITH, Lamar, 2017), mas isto não foi considerado nas projeções.

Áreas disponíveis: terras aráveis, terras ocupadas, áreas urbanas e terras degradadas, marginais ou abandonadas

A área total de superfície emersa do planeta Terra é de 14,9 bilhões de hectares, dos quais 10,4 bilhões são agricultáveis. Deste total, são utilizados 5,1 bilhões de hectares para a agricultura, sendo 4 bilhões ocupados com pecuária e 1,1 bilhão ocupado com lavouras (CLARK; TILMAN, 2017). Mesmo ocupando quase 4 vezes a área utilizada para cultivos em lavouras, os alimentos de origem animal fornecem apenas 17% da oferta calórica global e somente 33% da oferta global de proteínas, como pode ser observado na Figura 3.5. Isto deixa claro que as lavouras tem uma eficiência muito maior na conversão de energia alimentar e

proteína do que a pecuária (RITCHIE; ROSER, 2017). Além das terras ocupadas pela agropecuária, há 3,9 bilhões de hectares ocupados por florestas e ainda 1,2 bilhões de hectares de terras arbustivas. Escolhendo priorizar a preservação das florestas, e pensando nas áreas arbustivas como as próximas fronteiras agrícolas, as projeções consideraram as áreas arbustivas como disponíveis para a produção agrícola de culturas alimentícias ou energéticas.

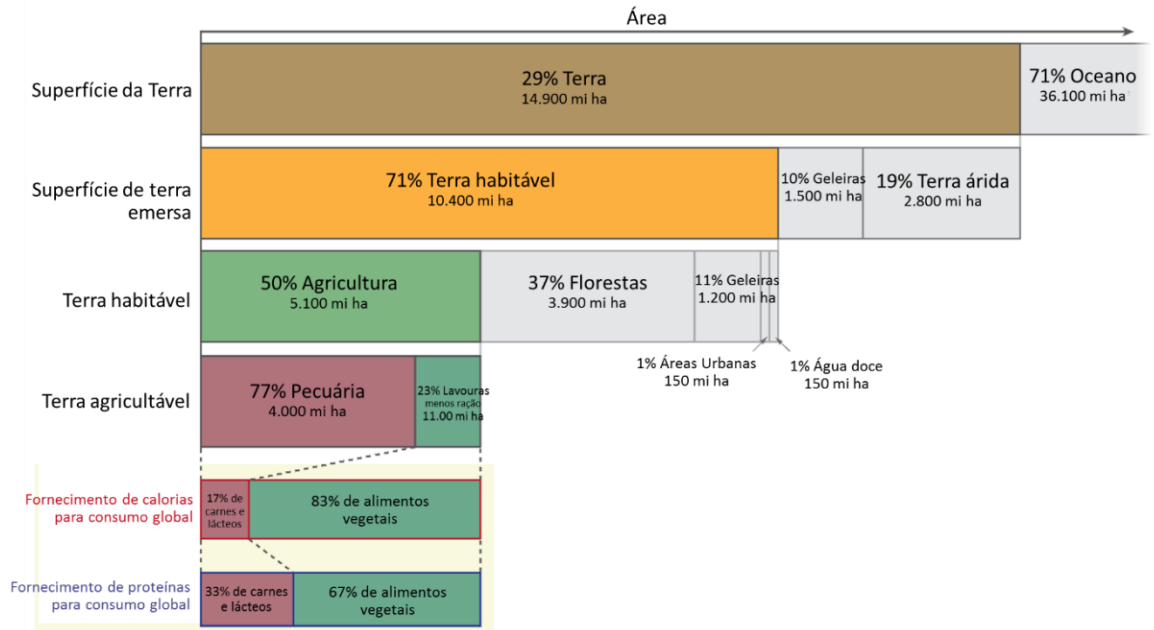


Figura 3.5 - Alocação da área da superfície global para a produção de alimentos (RITCHIE; ROSER, 2017).

As atividades humanas têm degradado 991 milhões de hectares de solo no mundo. O Cenário Atual considera este número como terras perdidas por baixa produtividade (CAI; ZHANG; WANG, 2011). Um estudo da FAO indicou faixas de valores de perda de terras por motivos de urbanização, degradação do solo e mudanças climáticas de 2012 a 2050. A área de terras perdidas em razão da urbanização deve variar entre 1,6 milhões a 3,3 milhões de hectares por ano. A área perdida por degradação do solo deve variar entre 1 milhão e 2,9 milhões de hectares por ano. Enquanto a área perdida em razão das mudanças climáticas deve ser de 0,5 milhão a 1,4 milhões de hectares por ano. Estes valores combinados representam de 3,1 a 7,6 milhões de hectares por ano de 2012 a 2050. A área perdida acumulada ao longo dos 38 anos será de a 117,8 a 288,8 milhões de hectares de terras aráveis (FAO, 2018). Estes valores foram considerados como terras perdidas adicionais às terras perdidas atualmente para o C2 e para o C1, respectivamente. O C3 considerou que não haverá mais degradação ou abandono de terras em decorrência de baixa produtividade, e que todas as terras em estado de degradação moderado ou maior serão recuperadas até 2050, ou seja, não restará nenhum hectare sequer de terras degradadas.

De acordo com a Figura 3.5, a área global urbana ocupa cerca de 150 milhões de hectares (RITCHIE; ROSER, 2017). Como a maior parte da população se concentra em centros urbanos, pode ser dizer que é onde grande parte da demanda de alimentos está. Utilizar a área urbana para cultivo de alimentos é uma estratégia para alcançar a segurança alimentar. A agricultura urbana pode contribuir na produção de alimentos, mas um estudo mais recente feito em Londres resultou em um valor limite: se fossem utilizadas todos espaços agricultáveis disponíveis em lotes vagos, seria possível produzir comida para alimentar 160.000 pessoas numa cidade de 8,1 milhões de habitantes (PLUMER, 2016), uma relação de aproximadamente 2% da população. Baseado nisso, foi considerado nas projeções uma porcentagem da população alimentada somente pela agricultura urbana, partindo de 0% no C0 e também no C1 e aumentando para 2% no C2. Um estudo baseado em dados do software Google Earth concluiu que a agricultura urbana poderia produzir até 10% dos suprimentos vegetais se implementada em todas as áreas disponíveis nas cidades (CRAWFORD, 2018), valor este adotado para o C3.

Potencial de Sequestro de Carbono

É necessário reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) para frear o aquecimento global em 2°C até 2100, aplicando *Tecnologias de Emissão Negativa (NETs)* como *Bioenergia com Captura e Estocagem de Carbono (BECCS)*. A meta de estocagem de carbono é de 3,3 Giga toneladas (bilhões de quilogramas) por ano, ocupando 380-700 milhões de hectares (SMITH, Pete *et al.*, 2015). Por outro lado, o potencial de sequestro de carbono de culturas energéticas é conhecido por variar entre 0,6 e 3,0 toneladas de carbono (C) por hectare por ano (LEMUS; LAL, 2005). Para estimar o potencial de sequestro de carbono em cada cenário, a meta de sequestro de carbono CO₂ foi convertida para uma meta de sequestro de C, por meio das massas molares de 44 e 12 g/mol, respectivamente. Isto resulta na meta de sequestro de 0,9 Giga toneladas por ano de C. Como o potencial de sequestro de carbono varia entre as diferentes culturas energéticas, foi considerado um valor médio na faixa entre 0,6 e 3,0, resultando no potencial de sequestro de 1,8 Giga toneladas de C por hectare por ano.

Alimentos perdidos e desperdiçados são responsáveis por 6% das emissões globais de gases de efeito estufa (RITCHIE, 2020). O C3, caracterizado por desperdício zero de alimentos considera 6% de redução na quantidade necessária de sequestro de carbono. Analogamente, o C2, aponta a redução de 25% deste valor e proporcionalmente considera 1,5% de redução na quantidade necessária de sequestro de carbono. O C1 continua sem alterações já que não possui melhorias no desperdício de alimentos.

A expansão das terras cultivadas causa o desmatamento dos biomas resultando em massivas emissões de carbono que variam para cada tipo de ecossistema. O desmatamento de

florestas libera 81,0 MgC por hectare (toneladas de C por hectare) enquanto o desmatamento de áreas arbustivas libera 16,6 MgC por hectare (HE *et al.*, 2018), como é mostrado na Tabela 3.2. As projeções consideram as emissões do desmatamento das áreas arbustivas em todos os cenários, e das áreas de florestas onde houver necessidade de expansão. Como a meta de sequestro de carbono está estipulada para 2100, a quantidade de carbono emitida pela ocupação destes biomas foi dividida ao longo dos próximos 80 anos, até 2100.

Tabela 3.2 - Liberação média de carbono pelo desmatamento de 1 hectare de florestas e de terras arbustivas (Adaptado de HE *et al.*, 2018).

	Florestas	Terras Arbustivas
Liberação de Carbono para cada 1 hectare desmatado	81,0 MgC	16,6 MgC

3.2. Avaliação da bioenergia

O objetivo na segunda etapa do estudo, é relativo à avaliação da bioenergia e consiste em estimar o potencial de geração de bioenergia em 2050 e a sua potencial contribuição na matriz energética global. A metodologia de cálculo desta etapa segue a mesma metodologia aplicada nas estimativas anteriores, e também é semelhante às metodologias aplicadas por outros autores no estudo de SLADE *et al.* (2011). Uma revisão bibliográfica foi realizada para se conhecer os números atuais da bioenergia global, e as perspectivas consideradas nos diferentes estudos existentes. As simulações foram conduzidas considerando-se as mesmas condições dos 4 cenários propostos na avaliação de terras da primeira etapa (C0, C1, C2, C3), e os valores utilizados no cálculo foram adotados à partir de dados da literatura para os mesmos 4 cenários. Os principais fatores envolvidos nas estimativas desta etapa são: a demanda energética global, o potencial de produção de bioenergia, a área global disponível para os diferentes usos do solo, a produtividade média global de energia primária por hectare, o aumento da população e de seus hábitos de consumo, e o ganho acumulado de eficiência na conversão energética. Foi considerado um valor único como referência para a demanda global de energia primária pela população em 2050. Como resultado da avaliação da bioenergia, foram estimados indicadores, tais como a geração de bioenergia primária global total, por fonte, e a sua respectiva contribuição da bioenergia na matriz energética global.

3.2.1. Definição dos cenários

A metodologia de coleta de dados, modelagem e cálculo da avaliação da bioenergia teve como base a mesma lógica das outras estimativas da disponibilidade de terras. E os dados necessários foram adotados para os mesmos 3 cenários: C1, C2, e C3.

As principais limitações do estudo são as descon siderações quanto aos diferentes tipos de processos de produção, transformação e consumo das cadeias bioenergéticas, como métodos de cultivo, tecnologias empregadas no aproveitamento, e uso final da bioenergia. Um estudo mais detalhado, almejando uma média ponderada mais aferida, necessitaria da inclusão da valores atuais e futuros das produtividades média das principais cultivos energéticos nas principais regiões produtoras do mundo, e de forma análoga, as variáveis pós-colheita e as rotas de conversão energética da biomassa pelas diferentes cadeias.

3.2.2. Principais parâmetros envolvidos no potencial de geração bioenergética

Para projetar o potencial de geração de bioenergia em 2050, foi feita a modelagem dos principais fatores que impactam a disponibilidade de recursos, a demanda da população, e os ganhos de produtividade e eficiência associados ao desenvolvimento tecnológico. Os resultados para cada cenário foram obtidos à partir de dados de estudos recentes, adotados para o C0, e associados a outros fatores que influenciam as tendências de variação de oferta de bioenergia para cada fonte.

Para o cálculo de geração de bioenergia, foi necessário relacionar recursos disponíveis e capacidades produtivas de diferentes fontes de biomassa, como por exemplo: a área total de terras agricultáveis disponíveis para fins bioenergéticos pela produtividade média de energia primária na forma de biomassa das culturas energéticas com maior participação; assim como o tamanho da população e a geração média de resíduos por habitantes. Alguns exemplos de fontes de biomassa consideradas no estudo são: culturas energéticas, lenha, resíduos agrícolas, resíduos de origem animal e outras biomassas residuais. Para estimar o potencial futuro de produção bioenergética foi necessário analisar as cadeias envolvidas na obtenção, no tratamento e na utilização das diferentes fontes, e os fatores considerados de maior influência no potencial de geração de bioenergia primária são:

- algumas taxas de variação do C0 para os C2050 resultantes da primeira etapa do estudo relacionadas à disponibilidade de biomassa, como: taxa da área de terras ocupadas por florestas ou culturas energéticas, a oferta calórica de origem vegetal e animal, o tamanho da população;
- os incrementos tanto da produtividade agrícola de biomassa quanto do consumo de material pela população;
- e às oportunidades de ganho de eficiência energética.

A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros adotados como fatores de correção para projetar o potencial energético de cada fonte em cada cenário. Estes parâmetros foram adotados por

exercerem grande influência nas variações de oferta de cada fonte, e chamados de variáveis 1 (Vr1), 2 (Vr2) e 3 (Vr3). Por exemplo, para o Vr1, a geração de resíduos florestais é proporcional à área de florestas, assim como a geração de RSU é proporcional à população. Enquanto para o Vr2, as taxas de ganho de produtividade da biomassa corrigem a proporcionalidade de Vr1 para os cenários futuros. E a Vr3 representa as oportunidades de ganho de eficiência na conversão energética da biomassa em energia de uso final. A utilização das variáveis possibilita simular diferentes cenários e os efeitos das suas características hipotéticas.

Tabela 3.3 – Parâmetros adotados como variáveis de correção para as projeções.

	Resultados da projeção para extrapolação da taxa	Incremento acumulado de produtividade e consumo	Eficiência acumulada na conversão energética
Fonte de bioenergia	(Vr1)	(Vr2)	(Vr2)
Lenha	Área florestas plantadas: (milhões de ha)	Incremento acumulado de produtividade média global de biomassa por hectare	Ganho de eficiência na conversão energética de biomassa C1 - sem ganhos de eficiência C2 - ganhos de eficiência economicamente viáveis C3 - ganho de eficiência teórica
Carvão vegetal			
Resíduos Florestais			
Agricultura (origem animal)	Oferta calórica: (bilhões de gigacalorias)	Incremento acumulado do consumo material per capita (ton/per capita /ano)	
Agricultura (origem vegetal)			
Culturas energéticas			
Liquor negro	Área culturas energéticas: (milhões de ha)	Incremento acumulado do consumo material per capita (ton/per capita /ano)	
Resíduos industriais (madeira)	População: (bilhões de pessoas)		
Madeira recuperada			
RSU			

3.2.3. Metodologia de Cálculo

Inicialmente foram obtidos dados da literatura, da produção global de bioenergia primária ($Bio_{global}(C0)$), e da contribuição percentual de cada fonte de bioenergia ($Fração_{fonte}(C0)$), para cálculo da bioenergia primária gerada por cada fonte ($Bio_{fonte}(C0)$) pela equação Eq. 3.5.

$$Bio_{fonte}(C0) = Bio_{global}(C0) \times Fração_{fonte}(C0) \quad (Eq. 3.5)$$

O cálculo da bioenergia gerada por cada fonte em 2050 ($Bio_{fonte}(C2050)$) por meio da Eq. 3.6 consiste na utilização de fatores de correção para projetar o potencial energético de cada fonte em cada cenário. Fatores estes que exercem grande influência nas variações de oferta de cada fonte, uma vez que estão associados de forma proporcional à disponibilidade da biomassa primária de cada fonte bioenergética. Como nomenclatura para as variáveis, determinaram-se

$V_r(C2050)$ para os C2050, e $V_r(C0)$ para o C0. Os parâmetros adotados para as estimativas são os que exercem maior influência no resultado final da produção de bioenergia para cada fonte, influenciando de forma proporcional. Na avaliação da bioenergia, assim como na avaliação da disponibilidade de terras, buscou-se a identificação dos fatores principais para cada aspecto considerado, e posteriormente foram adotados valores da bibliografia para cada cenário.

A Variável 1 (V_{r1}) representa um valor extraído dos resultados da projeção de disponibilidade de terras, sendo a razão entre a $V_{r1(C2050)}$ e a $V_{r1(C0)}$ representa uma taxa que multiplica a geração de bioenergia atual por fonte para uma melhor aproximação em cada cenário. Os parâmetros considerados em V_{r1} foram escolhidos porque consistem em parâmetros físicos limitantes e tratados como recurso de produção ou agente de consumo, como: área, produção calórica e pessoas consumidoras.

A Variável 2 (V_{r2}) representa o incremento acumulado de produtividade em biomassa por hectare, e de consumo de material *per capita* em 2050. As Variáveis 1 e 2 são complementares, enquanto V_{r1} contempla um parâmetro físico, V_{r2} contempla um parâmetro temporal, pois trata-se de uma taxa de produtividade ou consumo no tempo.

A Variável 3 (V_{r3}) representa o ganho acumulado de eficiência energética nas conversões de bioenergia primária em energia de uso final até 2050, e influencia o resultado por ampliar a capacidade de geração sem necessariamente ampliar a oferta primária.

$$\text{Biofonte}(C2050) = \frac{\left(\text{Biofonte}(C0) \times \left(\frac{V_{r1C2050}}{V_{r1C0}} \right) \times (1 + V_{r2C2050}) \right)}{1 - V_{r3C2050}} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

A bioenergia global gerada em 2050 ($\text{Bio}_{\text{global}}(2050)$) é o somatório de todas as frações de bioenergia primária gerada pelas diferentes fontes de biomassa ($\text{Bio}_{\text{fonte}}(2050)$), descrito na Eq. 3.7. E a Variação da C0 é a razão entre a produção de bioenergia global e por fonte dos C2050 em comparação com o C0.

$$\text{Bioglobal}(C2050) = \sum \text{Biofonte}(C2050) \quad (\text{Eq. 3.7})$$

3.2.4. Fundamentação da definição dos parâmetros de cada cenário

Os valores adotados para cada parâmetro em cada cenário foram retirados da bibliografia, sendo alguns de forma direta e outros de forma indireta, como fatores de correção

para alguns indicadores nos C2050. Como as projeções deste estudo se baseiam em resultados de outras estimativas, reconhe-se como limitação o risco pela propagação de erros, que não foi calculada. Porém os C2050 representam uma faixa de assertividade, sendo o C1 o limite inferior, o C3 o limite teórico, e o C2 o cenário mais realista, com determinadas características positivas pelas quais se percebe uma adesão ascendente, como redução do desperdício e aumento da eficiência.

Energia primária global

O consumo global de energia primária em 2018 foi de aproximadamente de 565,4 EJ (RITCHIE; ROSER, 2018). De acordo com um estudo recente sobre as perspectivas energéticas internacionais, o consumo global de energia primária deve aumentar em 50% de 2018 a 2050, totalizando 848,1 EJ. Valor adotado para todos os C2050 (EIA, 2019).

Bioenergia

Sendo a fonte renovável de energia mais representativa na matriz energética global, a bioenergia contribuiu com 55,6 EJ no suprimento de energia primária em 2018, cerca de 9,3% do total (WBA, 2020). A grande maioria da biomassa consumida como bioenergia é proveniente de material lenhoso. Como pode ser observado na Figura 3.6, cerca de 87% de toda bioenergia gerada tem a madeira como fonte direta ou indireta (BAUEN *et al.*, 2009). A partir das parcelas de cada fonte de bioenergia associadas à geração de bioenergia primária de 2018, foi estimado o total de bioenergia gerada por fonte.

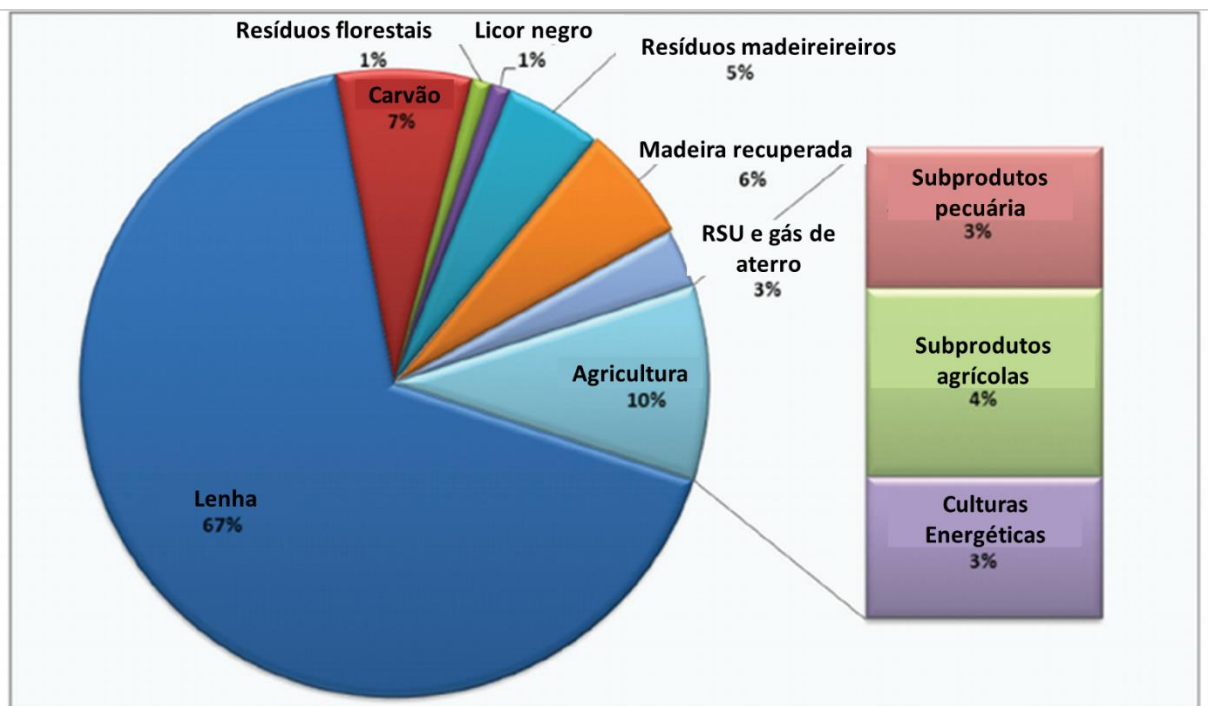


Figura 3.6 - Parcelas das fontes globais de biomassa para energia primária (PANEQUE, 2017).

Área de florestas manejadas para obtenção de madeira.

As florestas manejadas para exploração de madeira representam 30% da área total de florestas (FAO, 2020). A taxa de 30% foi aplicada às áreas de florestas calculadas na primeira etapa de projeções.

Oferta calórica alimentar

Para estimar o potencial energético dos resíduos de origem agropecuária em 2050, foram utilizados os valores de bioenergia primária de cada fonte (animal e vegetal) multiplicado por um fator de correção. O fator de correção neste caso é a variação da oferta de calorias para alimentos vegetais e animais entre os C2050 e o C0, uma vez que a oferta de resíduos depende da quantidade produzida.

Área atual destinada a culturas energéticas e biocombustíveis

Em 2008 a área global de terras destinadas à biocombustíveis era estimada em 13,8 milhões de hectares, o que representa menos de 1% da área global destinada à lavouras (GALLAGHER, 2008). Como o dado é de 2008, foi utilizado um fator de correção para os dias atuais. O fator adotado para a “correção” foi a variação entre a produção de biocombustíveis atual e a produção no ano de 2008. A produção de combustíveis por culturas energéticas em 2019 foi de 1.841,5 mil barris de óleo equivalente por dia (3,94 EJ), enquanto em 2008 foi de 923 mil barris de óleo equivalente por dia (1,98 EJ). A produção global praticamente dobrou (199,5%) durante este período (STATISTA, 2019), como pode ser observado na Figura 3.7. Utilizando-se o aumento de 199,5% como taxa de correção da área estimada de culturas energéticas de 2008 para os dias atuais, e desconsiderando ganhos de produtividade no período, a área global destinada a biocombustíveis em 2019 foi estimada em 27,53 milhões de hectares.

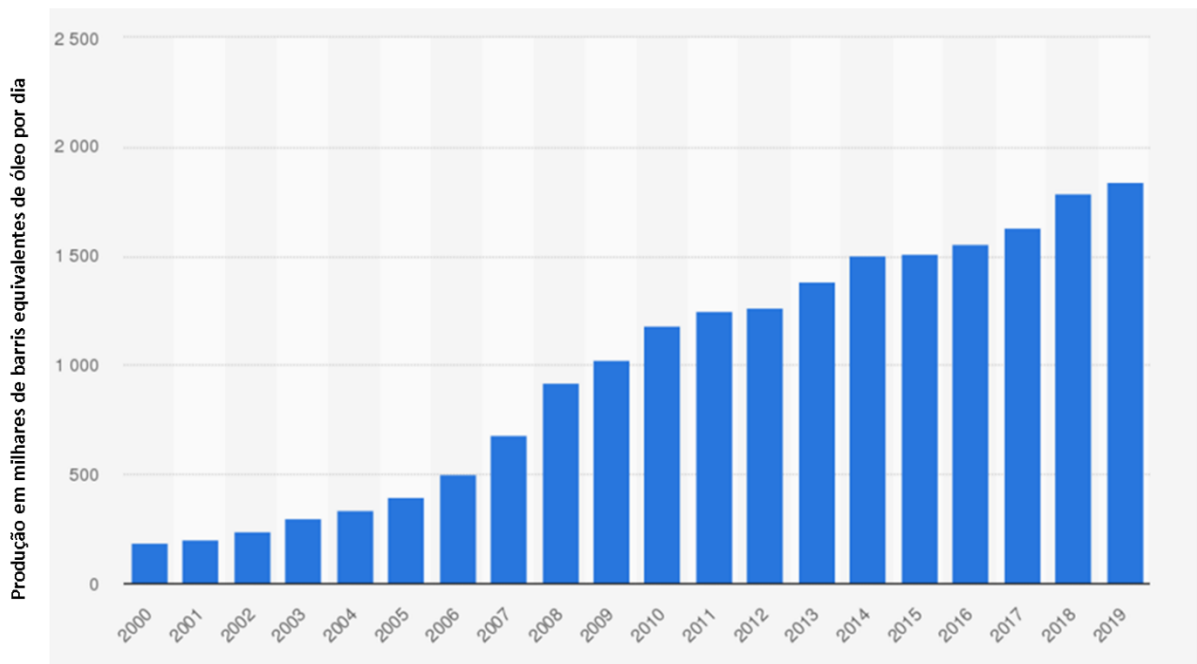


Figura 3.7 - Produção global de biocombustíveis de 2000 a 2019 (em 1.000 barris de óleo equivalente por dia) (STATISTA, 2019).

Incremento acumulado de produtividade média global de biomassa por hectare

A área disponível para projetos de bioenergia e a produtividade das culturas energéticas (kW / ha) definem o potencial de produção de bioenergia em cada cenário. Dessa forma, as projeções de ganho acumulado de produtividade média de biomassa por hectare até 2050 foram adotadas como 20% no C1, 50% no C2, e de 200% no C3 (HOOGWIJK et al., 2003). Esses valores de produtividade variam considerando diferentes níveis de avanços tecnológicos da produção agrícola e do processamento da biomassa na produção de biocombustíveis de primeira geração (culturas energéticas) e de segunda geração (biomassa residual da agricultura, indústria e RSU) para os cenários.

Consumo global de materiais

O consumo global e per capita de materiais foi utilizado como fator de correção para as estimativas de fontes de bioenergia derivadas da produção ou descarte de bens de consumo. Uma vez que a oferta de biomassa residual depende fortemente dos hábitos de consumo da população, a mesma variação no consumo global per capita de matéria prima para produção entre 2020 e 2050 foi adotada em todos os C2050. O consumo per capita de materiais aumentou 106% num período de 60 anos, de 1950 a 2010. Para a metade do tempo, 30 anos no intervalo de 2020 a 2050, considerou-se a metade do aumento per capita de materiais em 53% (SCHAFFARTZIK et al., 2014).

4. Resultados e Discussões

Os resultados e Discussões, assim como os Materiais e Métodos, também foram divididos em 2 seções para melhor apresentação das análises obtidas inicialmente para a Avaliação da área disponível, e então para a Avaliação da bioenergia.

4.1. Avaliação da área disponível

A respeito da avaliação qualitativa, a Figura 4.1 apresenta os parâmetros considerados na projeção separados em dois grupos: um com os fatores que reduzem a disponibilidade de recursos para projetos de bioenergia e outro com os fatores que aumentam a disponibilidade destes recursos. O consumo excessivo e os impactos das atividades humanas são responsáveis pela redução na disponibilidade de terras para biocombustíveis, enquanto as tecnologias disruptivas são os principais fatores de aumento das tais.



Figura 4.1 - Influência dos fatores que interferem na disponibilidade de terras para projetos de biocombustíveis.

Sobre a avaliação quantitativa, as Tabelas 4.1, 4.2, e 4.3 apresentam os dados coletados para demanda de alimentos, terras disponíveis, e resultados principais, respectivamente. A Tabela 4.1 contém os valores dos parâmetros que mais influenciam a demanda de alimentos. A Tabela 4.2 contém os valores relacionados à variação da oferta de terras. A Tabela 4.3 apresenta os resultados parciais e finais dos cálculos das áreas disponíveis para cada cenário, utilizados para a geração dos gráficos a seguir.

Tabela 4.1 - Valores relacionados à demanda de alimentos, estipulados para os parâmetros nos cenários da projeção.

Parâmetros		Cenário				
		2019	2050			
		C0	C1	C2	C3	
Demanda de alimentos	a	População mundial (bilhões)	7,7 (Worldometers, 2019)	10,1 (UN, 2019)	9,7 (UN, 2019)	9,4 (UN, 2019)
	b	Consumo per capita de alimentos (kcal/hab/dia)	2831 (Pardey, Beddow, Hurley, Beatty, & Eidman, 2014)	3070 (FAO, 2009 - citado por Pardey, Beddow, Hurley, Beatty, & Eidman, 2014)	3129 (Pardey, Beddow, Hurley, Beatty, & Eidman, 2014)	3408 (Pardey, Beddow, Hurley, Beatty, & Eidman, 2014)
	c	Consumo per capita de alimentos vegetais (kcal/hab/dia)	2418	2564	2623	2902
	d	Consumo per capita de carnes e derivados de animais, desconsiderando carne bovina e ovina (kcal/hab/dia)	363 (Ranganathan, 2013)	441 (Ranganathan, 2013)	456 (Ranganathan, 2013) e (Formigoni, 2018)	506 (Ranganathan, 2013)
	e	Consumo per capita de carnes, bovina e ovina (kcal/hab/dia)	50 (Ranganathan, 2013)	65 (Ranganathan, 2013)	50 (Ranganathan, 2013) e (Formigoni, 2018)	0
	f	Desperdício de alimentos mundo	33% (FAO, 2010) = 1,6 bilhões de toneladas (Elks, 2018)	33%	24,75% (Ranganathan, Waite, Searchinger, & Hanson, 2018).	0,0%
	g	Porcentagem da população alimentada somente pela agricultura urbana	0%	0%	2% (Plumer, 2016)	10% (Crawford, 2018)

Tabela 4.2 - Valores relacionados à oferta de terras para cultivo de alimentos, estipulados para os parâmetros nos cenários da projeção.

Parâmetros			Cenário			
			2019	2050		
			C0	C1	C2	C3
Potencial de produção de alimentos	h	Ganho de produtividade acumulada por desenvolvimento tecnológico até 2050	0%	0%	25% (Hunter, Smith, Schipanski, Atwood, & Mortensen, 2017)	70% (Hunter, Smith, Schipanski, Atwood, & Mortensen, 2017)
	i	Perda de produtividade acumulada por degradação de terras e mudanças climáticas até 2050	0%	25% (Nellemann et al., 2009)	10% (IPBES, 2018)	0%
	j	Produção específica de alimentos (milhões de kcal/ha)	8,21	6,16	9,23	13,95
	k	Produção necessária de vegetais no mundo (bilhões de gigacalorias)	9,03 (Berners-Lee, Kennelly, Watson, & Hewitt, 2018) e (United Nations, 2013)	12,57	11,35	8,55
	l	Produção de alimentos de origem animal no mundo, desconsiderando bovinos e ovinos de corte (bilhões de gigacalorias)	1,36	2,16	2,01	1,74
	m	Produção de carnes bovina e ovina no mundo (bilhões de gigacalorias)	0,19	0,32	0,22	0,00

Tabela 4.3 - Resultados das áreas de terras demandadas para cultivo e produção animal, de terras degradadas, e de terras disponíveis para projetos de biocombustíveis nos cenários da projeção.

Parâmetros			Cenário			
			2019	2050		
			C0	C1	C2	C3
Limiting: available land area (ha)	n	Proteínas produzidas por alimentos de origem animal, desconsiderando bovinos e ovinos de corte (milhões de toneladas)	64 (Searchinger, Waite, Hanson, & Ranganathan, 2019) e (FAO, 2015)	84 (Searchinger, Waite, Hanson, & Ranganathan, 2019) e (FAO, 2015)	76 (Searchinger, Waite, Hanson, & Ranganathan, 2019) e (FAO, 2015)	0
	o	Proteínas produzidas por carnes de bovinos e ovinos (milhões de toneladas)	23 (Searchinger, Waite, Hanson, & Ranganathan, 2019) e (FAO, 2015)	31 (Searchinger, Waite, Hanson, & Ranganathan, 2019) e (FAO, 2015)	28 (Searchinger, Waite, Hanson, & Ranganathan, 2019) e (FAO, 2015)	0
	p	Proteínas produzidas a partir de insetos (porcentagem final)	0%	0%	5% (Bratskeir, 2017)	100%
	q	Área ocupada por lavouras no mundo (milhões de ha)	1100 (Ritchie, 2017)	2042	1230	613
	r	Área ocupada por pecuária no mundo, desconsiderando gado bovino e ovino de corte (milhões de ha)	641	841	720	850
	s	Área ocupada por pecuária bovina e ovina de corte (milhões de ha)	2394	3140	2687	0
	t	Área ocupada por produção de insetos no mundo (milhões de ha)	0	0	34	536
	u	Área total ocupada por produção de proteínas a partir de fonte animal (milhões de hectares)	3035	3981	3442	1386
	v	Área total ocupada por lavouras e pecuária para alimentação (milhões de há)	4135	6024	4671	1999
	w	Área de terras abandonadas por baixa produtividade (milhões de ha)	991 (Cai et al., 2011)	1280	1109	0

Tabela 4.3 - Resultados das áreas de terras demandadas para cultivo e produção animal, de terras degradadas, e de terras disponíveis para projetos de biocombustíveis nos cenários da projeção.

Parâmetros		Cenário			
		2019	2050		
		C0	C1	C2	C3
x	Área total de terras ocupadas mais terras abandonadas/degradadas (milhões de ha)	5258	7435	5912	2130
y	Área de terras arbustivas (milhões de hectares)	1200	0	612	1200
z	Área de florestas (milhões de hectares)	3900	2965	3900	3900
aa	Potencial área remanescente para projetos de bioenergia (milhões de hectares)	1242	0	588	4370
ab	Fração da área potencial para biocombustíveis das terras aráveis, descontando as florestas	11.9%	0.0%	5.7%	42.0%

Após os cálculos observou-se que a soma da área total das terras ocupadas e das terras abandonadas por degradação resultaram em 5,258 bilhões de hectares para o C0, resultado próximo dos 5,1 bilhões de hectares ocupados pela agropecuária de acordo com dados da bibliografia (RITCHIE; ROSER, 2017), com uma divergência menor do que 3,1% entre os dois valores. Efetuou-se esta comparação para verificar o rigor do método científico proposto, por meio da proximidade do modelo com relação à atualidade. Apesar das incertezas envolvidas nos valores assumidos e na defasagem cronológica de alguns dados utilizados, a proximidade dos resultados com a realidade foi considerada suficiente para validar a metodologia aplicada permitindo a análise dos resultados.

Uma questão intrigante (e talvez altamente motivadora) deixa claro que é mesmo com as tendências atuais, ainda há muito a ser melhorado para alcançar um patamar de tranquilidade quanto à segurança alimentar e o uso eficiente dos recursos. A área ocupada pela pecuária é 2,75 vezes maior do que a área de lavouras enquanto os alimentos de origem animal fornecem menos de um terço da demanda proteica, e menos de um sexto da demanda energética.

Com os resultados das Tabelas 4.1, 4.2, e 4.3 foram obtidos os gráficos das Figuras 4.1 a 4.7. Plotou-se o gráfico de radar do uso final do solo para os 4 cenários diferentes (Figura

4.2), um gráfico abrangendo os mesmos resultados para facilitar a análise comparativa (Figura 4.3), um gráfico apresentando a influência de cada parameter sob a perspectiva de cada cenário na disponibilidade final de terras para projetos de biocombustíveis (Figura 4.4), um gráfico comparando a demanda de terras para suprir a demanda proteica em cada cenário com a ocupação por tipo de produção animal (Figura 4.5), um gráfico comparativo entre projeções de diferentes autores sobre a demanda por novas terras que devem ser cultivadas em 2050 em comparação com a atualidade (Figura 4.6), e finalmente o gráfico de potencial teórico de sequestro de carbono em cultivos energéticos na área disponível em cada cenário (Figura 4.7).

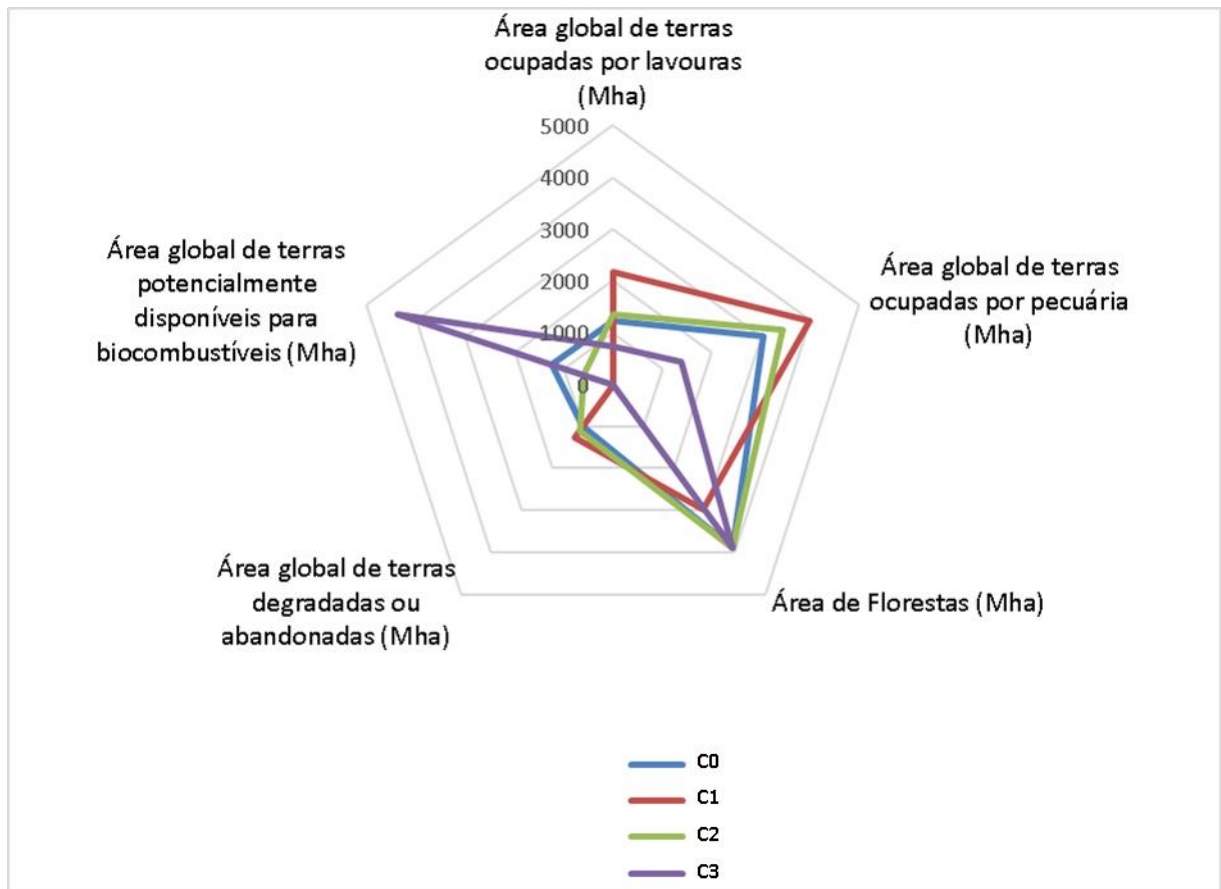


Figura 4.2 - Comparação entre a alocação de terras agriculturáveis para os 4 cenários.

À respeito da segurança alimentar em 2050, os resultados sugerem que haverá terras suficientes para alimentar toda a população, porém, no C1, a expansão agrícola desmataria 935 Mha (milhões de hectares). No C2, 5,7% das terras agriculturáveis sobriam para projetos de bioenergia (588 Mha), e no C3, 42% das terras agriculturáveis estariam disponíveis (4370 Mha). Comparando os dois cenários mais realistas, o C1 e o C2, compreende-se que a segurança alimentar será maior e os potenciais riscos à biodiversidade serão menores no C2. As ineficiências das cadeias de produção e de consumo refletem na pequena disponibilidade de terras para culturas energéticas, observadas na figura anterior.

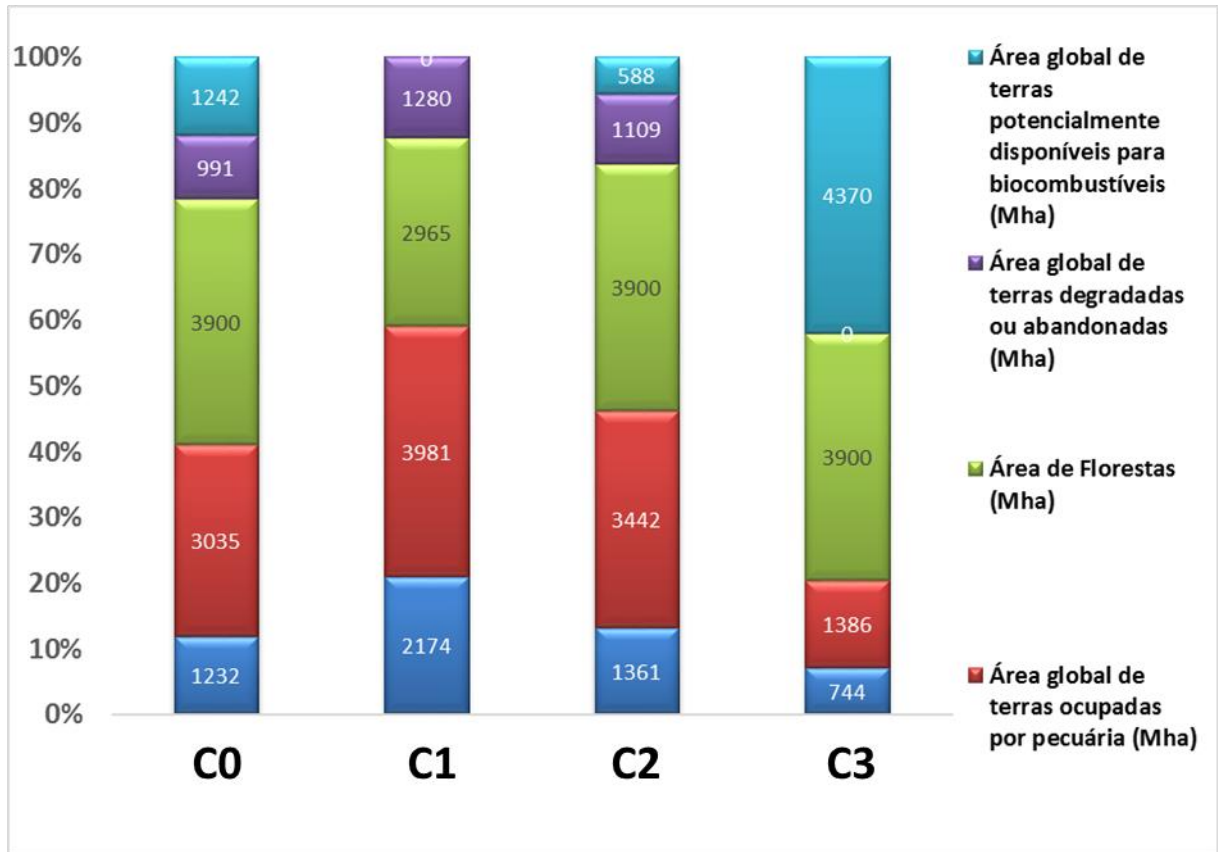


Figura 4.3 - Comparação entre a porcentagem da alocação das terras agriculturáveis nos 4 cenários.

Sobre o C3, considerando uma situação teórica para estimar os limites mínimos de ocupação de terras e os limites máximos de disponibilidade de terras para biocombustíveis, pode-se concluir que a quantidade mínima teoricamente necessária para alimentar o mundo em 2050 é de 20,5% das terras agricultáveis (2130 Mha). Neste cenário, não seria necessário desmatar nem as florestas nem as vegetações arbustivas, e ainda haveria 3170 Mha de terras remanescentes disponíveis para projetos de bioenergia.

Pensando na questão da biodiversidade, pode-se afirmar que alimentar todas as pessoas do planeta em 2050 sob a ótica do C1, poderá colocar em potencial risco de extinção algumas espécies vegetais e animais em decorrência da transformação de áreas ejetativas (biomas) em terras produtivas (lavouras). Optando-se pela priorização da preservação das florestas, mesmo no C2 seria necessário transformar 24% das florestas em terras agrícolas.

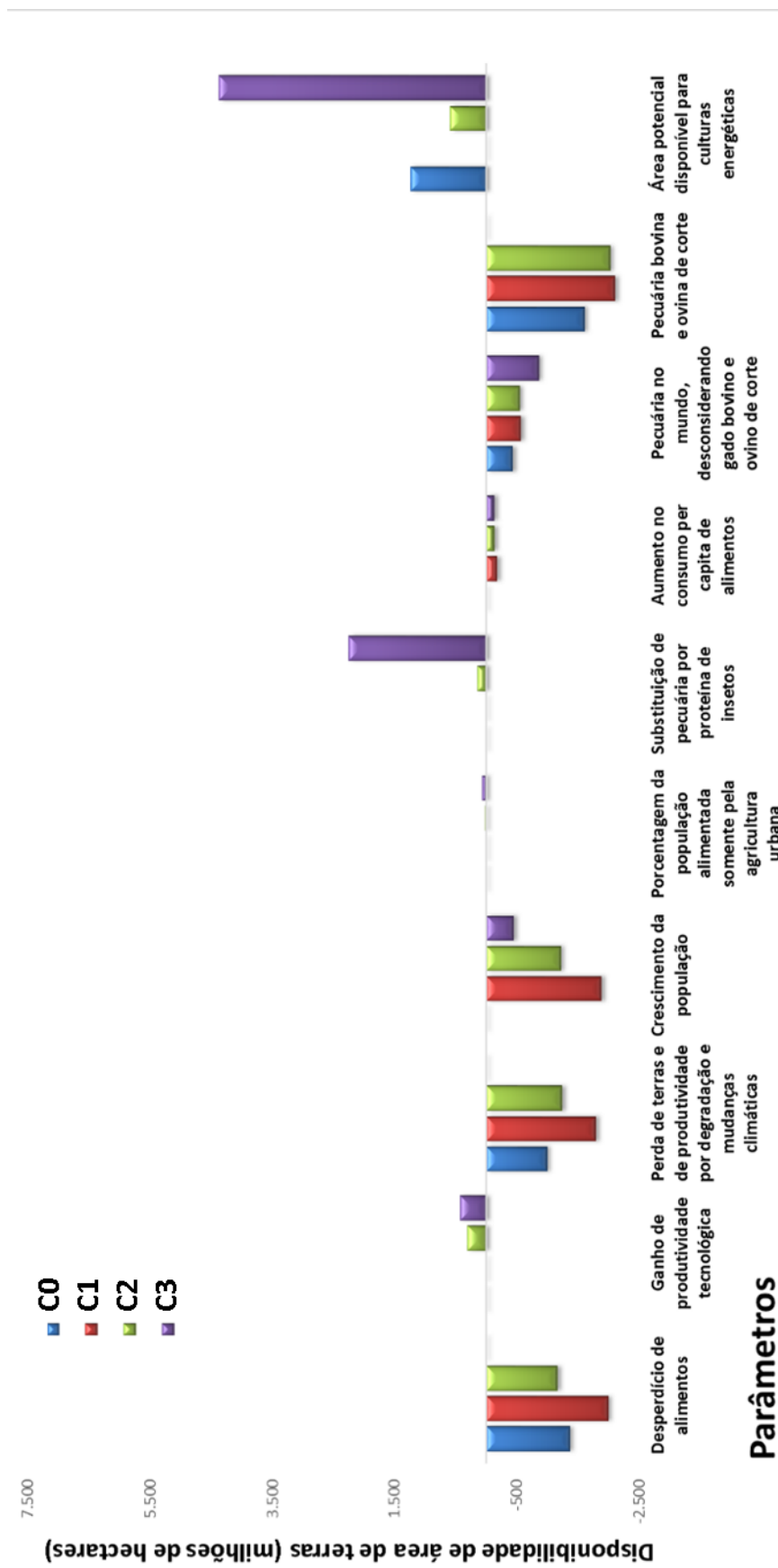


Figura 4.4 - Áreas disponibilizadas para projetos de biocombustíveis em função dos fatores em cada cenário.

Pelo gráfico da Figura 4.4, observa-se que os resultados dos C1 e C2 foram mais próximos entre si do que em comparação aos resultados do C3. Compreende-se que isto acontece porque o último foi modelado com base na demanda mínima teórica de terras para alimentar o mundo em uma situação teórica e impossível de se alcançar. Porém, isto permitiu identificar as questões que mais influenciam na disponibilidade de terras para projetos de bioenergia. Voltando a atenção para os cenários mais próximos da realidade (C1 e C2), conclui-se que os parâmetros com maiores possibilidades de ganhos por razão quantitativa e por viabilidade técnica de atuação são o desperdício de alimentos, a baixa produtividade em decorrência da degradação de terras, e o consumo de proteínas produzidas na pecuária, principalmente as oriundas de animais ruminantes como o gado bovino e o ovino.

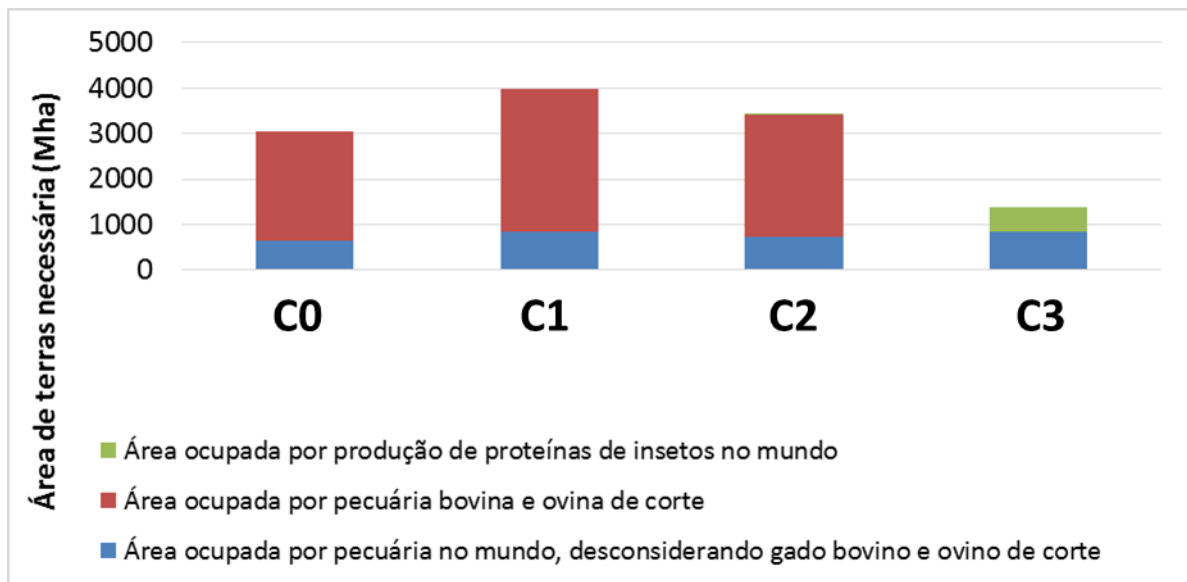


Figura 4.5 - Área de terras necessária para suprir a demanda proteica, separadas por fonte animal.

Mudar a fonte de proteínas de gado bovino e ovino para proteínas de insetos poderia significar mais 2056-2595 milhões de hectares de terras disponíveis, dependendo do cenário. Isto representa aproximadamente 20-25% de toda a terra arável do mundo.

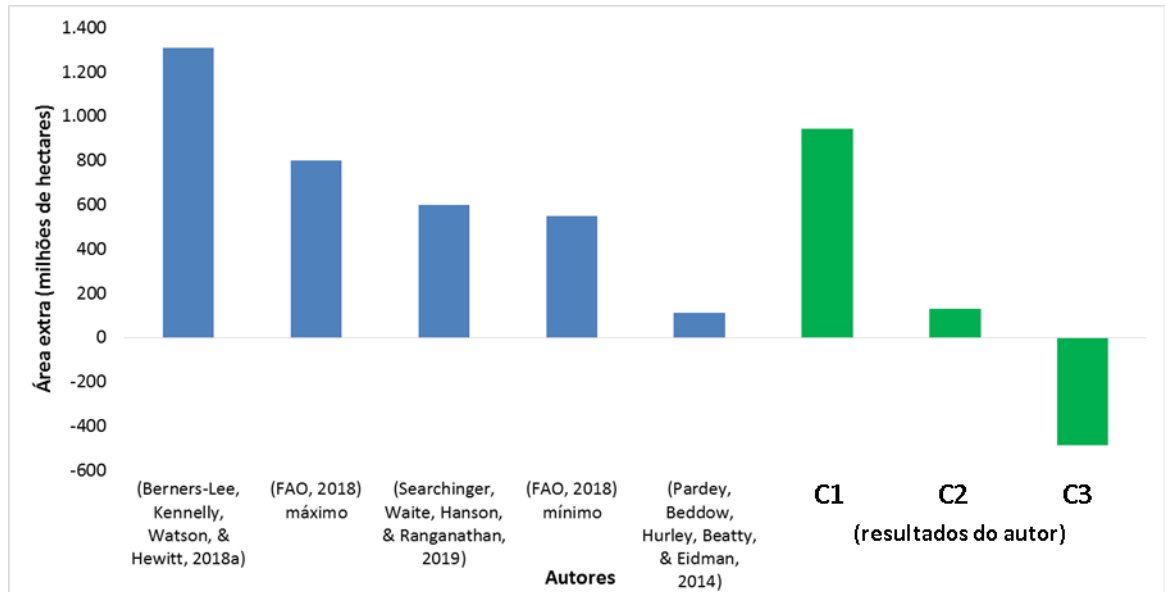


Figura 4.6 – Demanda da área de terras necessária para garantir a segurança alimentar em 2050 para diferentes autores e para os C2050.

Comparando as projeções de demanda de terras para agricultura em 2050 deste estudo com outros trabalhos da literatura científica, pode-se observar que tanto o C1 quanto o C2 resultaram em demandas por terras para culturas alimentícias dentro da faixa dos resultados de outros autores incluídos na Figura 4.6, próximos dos extremos.

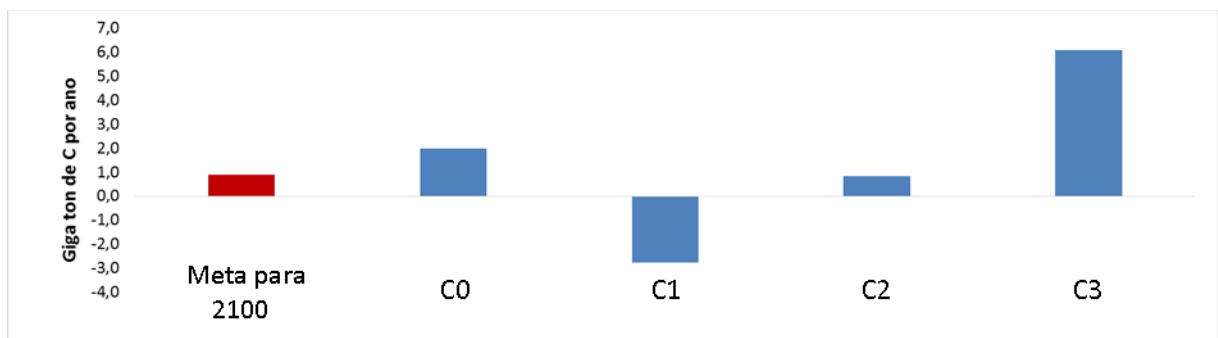


Figura 4.7 - Potencial de sequestro de carbono dos cenários projetados em comparação à meta de sequestro de carbono para 2100.

Os resultados obtidos para os potenciais de sequestro de carbono (C) por culturas energéticas indicam que as terras dedicadas à produção de biocombustíveis tem potencial de mitigar boa parte do aquecimento global, dependendo das tendências sociais e dos hábitos das pessoas. Pode-se observar pela Figura 4.7, que no C1, o desmatamento de áreas florestais causaria 3 vezes mais impactos no aquecimento global que a mitigação decorrente dos projetos de bioenergia poderiam evitar. No C2 seria possível alcançar 92% da meta, enquanto no C3, seria possível sequestrar 6 vezes mais carbono atmosférico do que as metas estabelecidas para 2100. Apesar dos resultados animadores, a grande maioria das terras disponíveis constituem

paisagens florestais ou arbustivas. No C2, a disponibilidade de terras para projetos de bioenergia é de 588 Mha, valor dentro da faixa de 380-700 Mha necessária para atingir a meta de sequestro de carbono em 2100.

4.2. Avaliação da bioenergia

Os resultados da avaliação de bioenergia são apresentados nas tabelas 4.4 a 4.6. À partir da avaliação foram obtidas a oferta potencial de bioenergia total e por fonte em cada cenário, assim como suas respectivas participações na matriz energética global. A análise foi conduzida pela comparação dos resultados das simulações entre os diferentes cenários e com as projeções encontradas na literatura. A Tabela 4.4 indica a geração de bioenergia por fonte à partir do percentual de participação no C0. A Tabela 4.5 contém o potencial de geração de bioenergia primária de diferentes fontes nos cenários propostos. A Tabela 4.6 apresenta as estimativas do potencial bioenergético para os C2050 e suas respectivas participações na oferta global de energia.

Tabela 4.4 - Geração de bioenergia por fonte de biomassa no C0.

	2017 (%)	2018 (EJ)
Fontes de bioenergia	100%	55,6
Lenha	67%	37,3
Carvão vegetal	7%	3,9
Resíduos Florestais	1%	0,6
Agricultura (origem animal)	3%	1,7
Agricultura (origem vegetal)	4%	2,2
Culturas energéticas	3%	1,7
Liquor negro	1%	0,6
Resíduos industriais (madeira)	5%	2,8
Madeira recuperada	6%	3,3
RSU	3%	1,7

Tabela 4.5 - Potencial de produção de bioenergia anual por fonte nos C2050.

Fonte de bioenergia	Potencial de produção bioenergética anual em 2050 [EJ]								
	C1			C2			C3		
	Variação do CO (%)	Bioenergia gerada (EJ)	Fração por fonte	Variação do CO (%)	Bioenergia gerada (EJ)	Fração por fonte	Variação do CO (%)	Bioenergia gerada (EJ)	Fração por fonte
TOTAL	14%	63,6		220%	178,0		3628%	2072,7	
Lenha	-9%	34,0	53,4%	146%	91,6	51,5%	2900%	1117,6	53,9%
Carvão vegetal	-9%	3,6	5,6%	50%	5,8	3,3%	2900%	116,8	5,6%
Resíduos Florestais	-24%	0,4	0,7%	50%	0,8	0,5%	2900%	16,7	0,8%
Agricultura (origem animal)	93%	3,2	5,1%	256%	5,9	3,3%	237%	5,6	0,3%
Agricultura (origem vegetal)	67%	3,7	5,8%	89%	4,2	2,4%	184%	6,3	0,3%
Culturas energéticas	20%	2,0	3,1%	3106%	53,5	30,0%	47515%	794,2	38,3%
Liquor negro	101%	1,1	1,8%	93%	1,1	0,6%	87%	1,0	0,1%
Resíduos industriais (madeira)	101%	5,6	8,8%	93%	5,4	3,0%	87%	5,2	0,3%
Madeira recuperada	101%	6,7	10,5%	93%	6,4	3,6%	87%	6,2	0,3%
RSU	101%	3,3	5,3%	93%	3,2	1,8%	87%	3,1	0,2%

Tabela 4.6 - Resultados das projeções de bioenergia e a contribuição na matriz energética global em cada cenário.

Parâmetros		Cenário			
		2019	2050		
		C0	C1	C2	C3
Potencial energético	Consumo global de energia primária (EJ)	565	848	848	848
	Área de terras aráveis disponíveis para projetos de bioenergia (milhões de ha)	27,5	27,5	588	4.370
	Parcela da área global agricultável ocupada por cultivos energéticos	0,26%	0,26%	5,7%	42,0%
	Potencial de geração de bioenergia primária (EJ)	56	64	178	2.073
	Potencial participação da bioenergia na matriz energética global	9,8%	7,5%	21,0%	244,4%

Com os resultados das Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 foram plotados os gráficos apresentados nas Figuras 4.8 a 4.11 seguidos de suas análises em cada cenário. Na Figura 4.8 observam-se as projeções de geração de bioenergia em comparação com a demanda global de energia primária e na Figura 4.9 são apresentados os resultados principais das avaliações de bioenergia e da disponibilidade de terras em uma visão macro. Os gráficos da Figura 4.10 contêm as projeções das parcelas de produção por fonte de biomassa, e a Figura 4.11 compara os resultados obtidos neste estudo com projeções de outros autores.

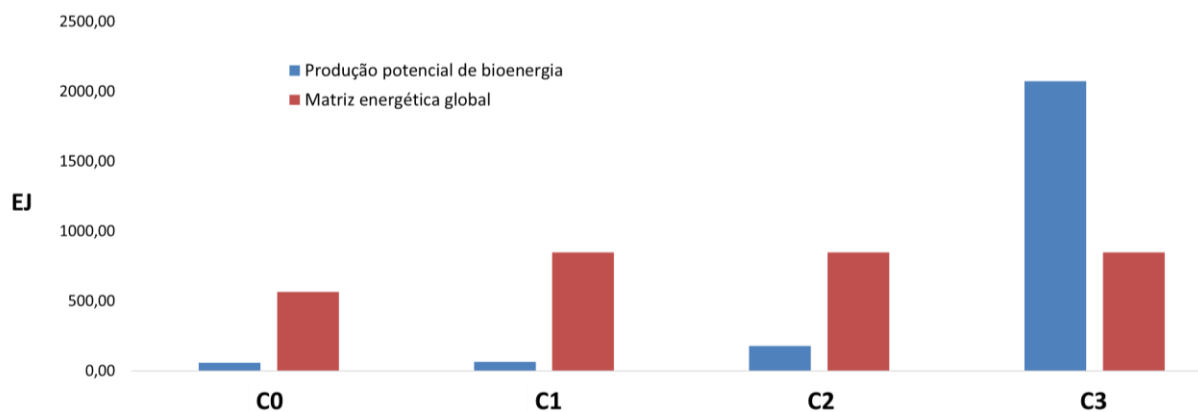


Figura 4.8 - Potencial oferta de bioenergia e demanda energética primária global (EJ).

Por meio dos resultados para as projeções de bioenergia, observou-se que no C1 a produção de bioenergia poderia representar: 7,5% da matriz global com 64 EJ, participação menor que do C0 de 9,8% apesar do aumento de geração em 14%. No C2, tido como o melhor dos cenários realistas, a bioenergia poderia contribuir com 21,0% da produção global de energia, com 178 EJ, mais de duas vezes a produção no C0. E no C3, que representa uma situação teórica e utópica a bioenergia poderia suprir quase duas vezes e meia a demanda global por energia primária em 2050, sendo este excesso uma oportunidade para o aproveitamento de parte da biomassa para produção de biomateriais nas biorrefinarias.

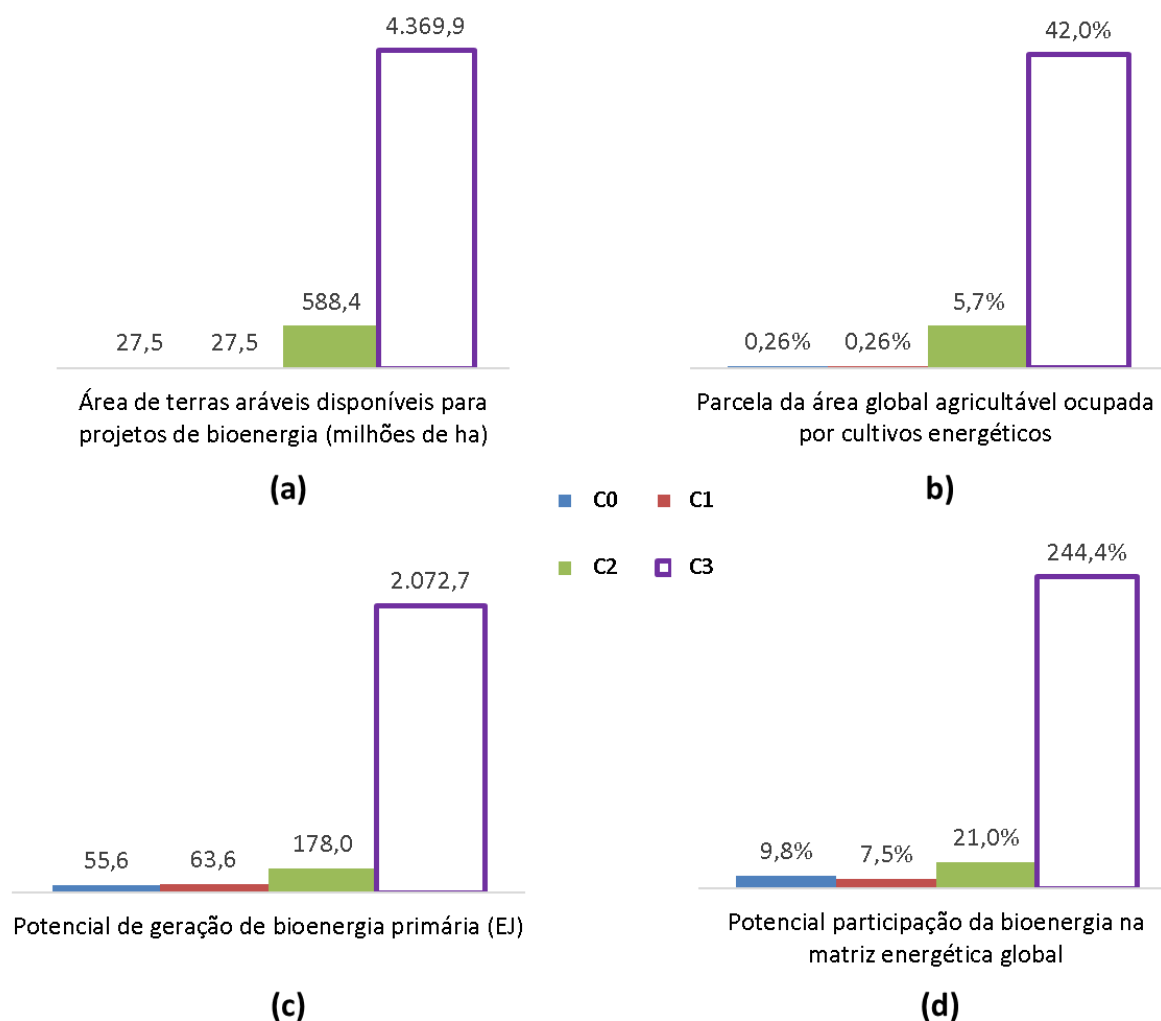


Figura 4.9 - Resultados principais das avaliações de bioenergia e de disponibilidade de terras.

Observando-se a Figura 4.9, fica evidente a proporcionalidade entre a área de terras disponíveis para projetos de bioenergia e o potencial de geração de bioenergia primária. Pode-se dizer que no C1, mesmo que com uma pequena área destinada aos cultivos energéticos, a bioenergia ainda representaria uma parcela considerável da matriz global, de 9,8% (vide o gráfico da Figura 4.9.d). No C2, uma parcela de 5,7% da área de terras agricultáveis poderia gerar 21% da demanda energética global, com 178 EJ, valor mais de 3 vezes maior que a produção atual.

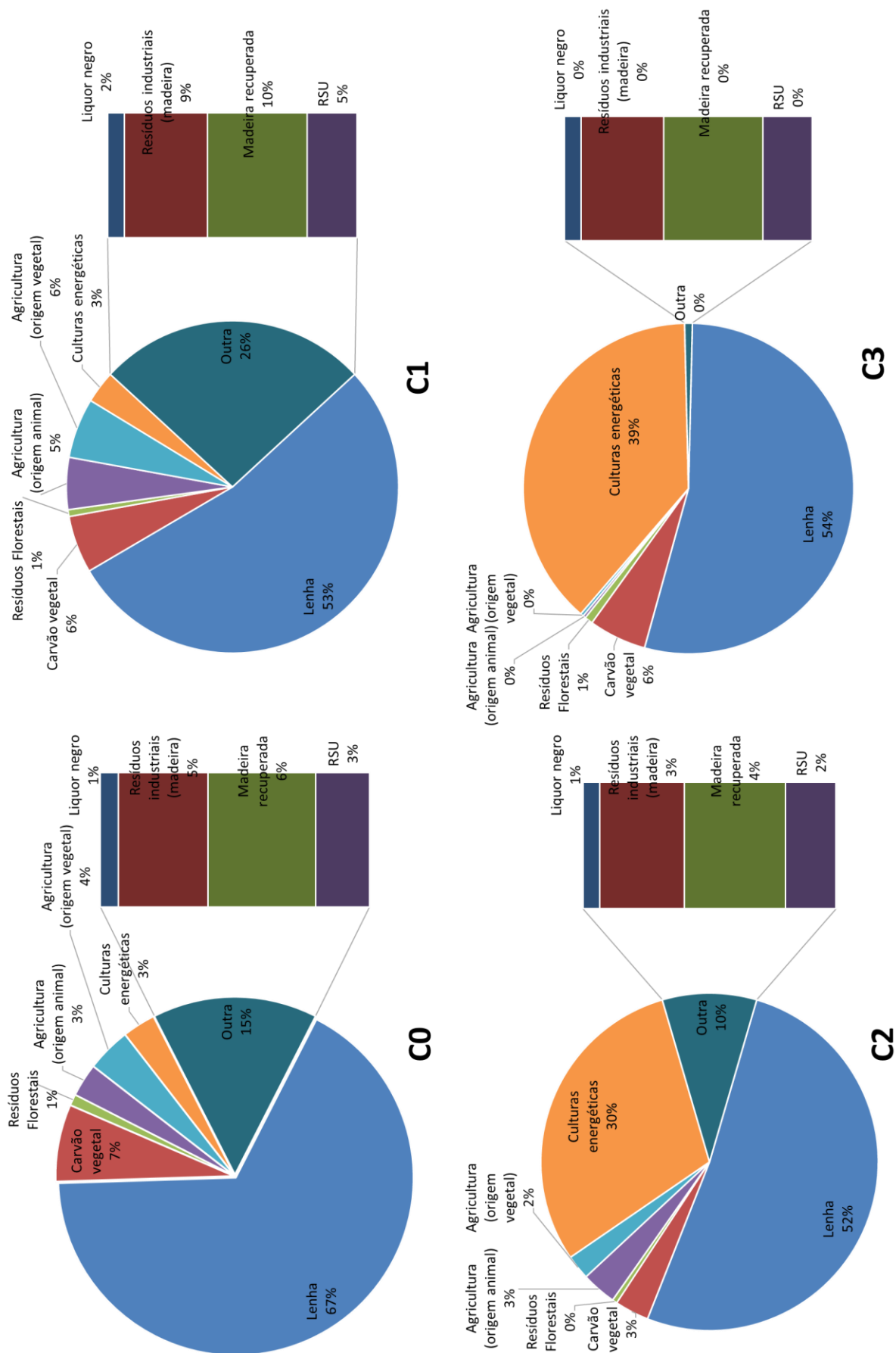


Figura 4.10 - Participação das fontes de biomassa na oferta global de bioenergia em cada cenário.

À primeira vista percebe-se pelos gráficos da Figura 4.10 que a lenha representa mais do que a metade da oferta bioenergética em qualquer cenário (mínimo foi 52% no C2). Considerando as biomassas que tem a madeira como fonte vegetal - lenha, carvão vegetal, resíduos florestais e industriais, madeira recuperada e liquor negro – contabiliza-se que no C0 a madeira é a fonte de biomassa com maior representatividade, com 87% da oferta bioenergética, e poderia representar 81% no C1, 63% no C2, e 61% no C3. Pelos gráficos da Figura 4.10 também se observa o ganho de relevância das culturas energéticas entre as fontes de bioenergia no C2 e no C3, resultado que se deve ao aumento na disponibilidade de terras para produção de bioenergia e pelos ganhos de produtividade acumulada de biomassa por hectare para culturas energéticas adotados em cada cenário. No melhor dos cenários realistas (C2) a produção de bioenergia por culturas energéticas tem potencial de crescer 31 vezes em relação ao C0 (ver Tabela 4.5). No C3 a disponibilidade teórica de terras associadas aos ganhos de produtividade e eficiência poderiam representar um aumento de 36 vezes na produção total de bioenergia em relação ao C0, sendo tão grandes as participações de culturas energéticas e florestais que as outras fontes de biomassa perderiam importância na participação global. No C1 as fontes de biomassa cujas disponibilidades estão mais ligadas aos hábitos de produção e consumo da população foram as que tiveram maior aumento na participação do fornecimento global bioenergético em comparação ao C0.

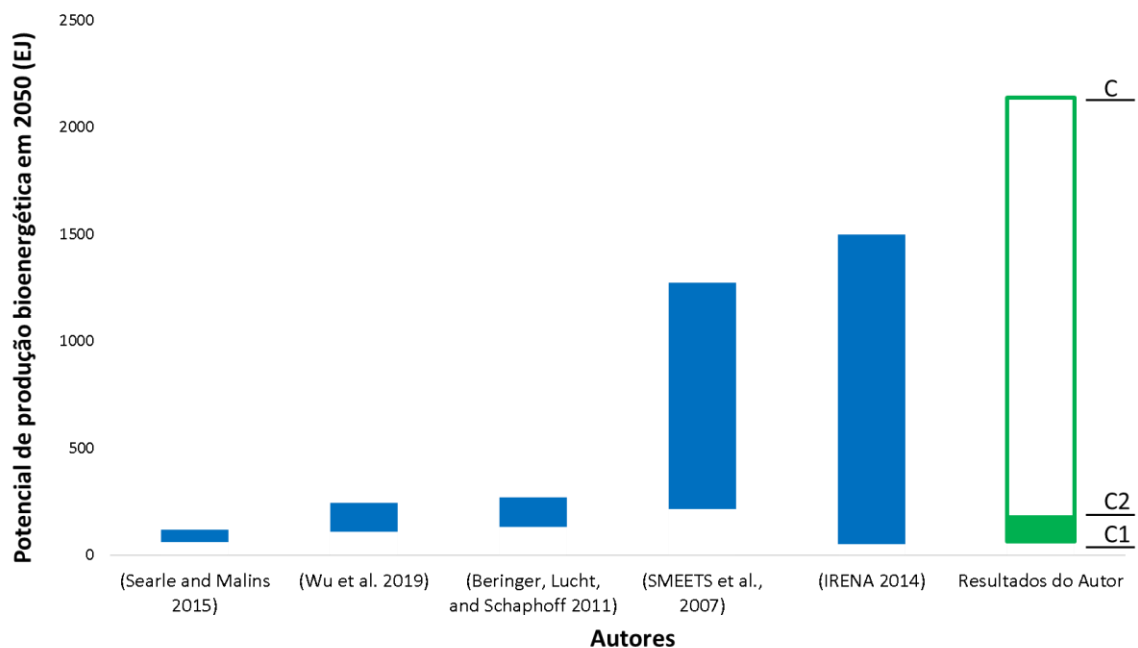


Figura 4.11 - Comparação entre os resultados obtidos para 2050 e projeções de outras literaturas científicas.

A Figura 4.11, compara os resultados deste estudo com projeções de outros autores baseadas em premissas semelhantes no âmbito do desenvolvimento sustentável. Os resultados obtidos nas projeções dos cenários mais realistas, C1 e C2, foram próximos entre si e dos outros estudos, com valores levemente menores que a maioria das projeções contidas na Figura 2.1. Sobre o C3, e considerando as numerosas e diversas projeções reportadas na literatura IRENA 2014 e SLADE *et al.* 2011, com diferentes premissas assumidas, inferiu-se que o potencial bioenergético teórico estimado para o C3 é da mesma ordem das maiores projeções da bibliografia, e maior em pelo menos 30% do que a mais alta. Pode-se atribuir a esta divergência uma combinação de dois fatores: à característica teórica do C3, em que foram extrapoladas as eficiências e suprimidas as irreversibilidades, não somente dos processos produtivos (oferta, de fontes de bioenergia), mas também das cadeias de consumo (demanda, por consumo da população e disponibilidade de terras) cuja inclusão no cálculo compõe um dos diferenciais deste estudo; ou à adoção de valores desatualizados na metodologia das estimativas, cujo risco pode ser considerado uma limitação do estudo.

4.3. Os alimentos são uma fonte de bioenergia

A fotossíntese é a conversão energética mais importante para a manutenção da vida na Terra, pois transforma a luz solar na fonte de energia consumida por todas as espécies vivas, vegetais ou animais. Mas a bioenergia dos alimentos não é incluída nem mencionada em muitas projeções, talvez porque seu aproveitamento já esteja comprometido com nossa alimentação.

Por fim, foram convertidas as demandas globais de calorías para alimentação em cada cenário em EJ para fins de comparação com a oferta bioenergética global. Foram somados os totais projetados da produção de alimentos de origem vegetal e animal (linhas k, l e m da Tabela 4.2) e convertidos de bilhões de gigacalorias para EJ. Os alimentos produzidos estão fora do cálculo de potencial bioenergético, e foram somados à oferta de bioenergia total para se estimar a participação dos alimentos na produção bioenergética total. Os resultados são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Produção de bioenergia para alimentação e para uso energético.

	C0	C1	C2	C3
Bioenergia para alimentação (EJ)	44,2	63,0	56,9	43,0
Bioenergia para uso energético (EJ)	55,6	63,6	178,0	2072,7
Participação dos alimentos na bioenergia total	44%	50%	24%	2%

A Figura 4.12 apresenta de forma gráfica os resultados da Tabela 4.7, possibilitando a comparação de quanto a energia dos alimentos representa na produção global de bioenergia em comparação com a energia de uso final proveniente da biomassa.

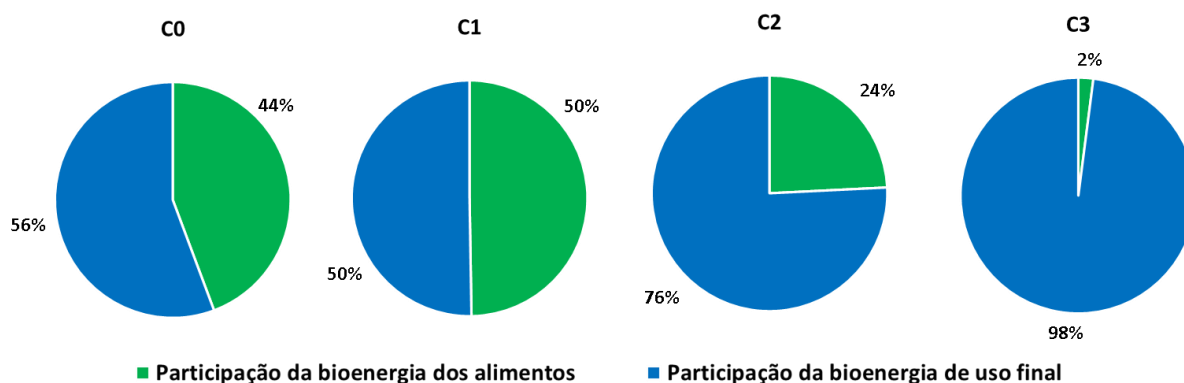


Figura 4.12 - Participação dos alimentos e da energia de uso final na produção total de bioenergia.

Percebe-se que atualmente, a produção de bioenergia dos alimentos é próxima à produção de bioenergia para uso energético, com uma participação dos alimentos de 44% do total. No C1, com uma população maior e pouca disponibilidade de áreas para produção de biocombustíveis, a participação dos alimentos na produção total de biomassa teria que aumentar para 50%, com uma produção de alimentos próxima de 63 EJ. Para o C2 o aumento na produção de lenha e biocombustíveis acarretaria num forte aumento da produção de bioenergia para uso energético, o que reduziria a participação dos alimentos para 24%. E no C3, os alimentos representariam 2% da produção teórica de bioenergia.

5. Conclusões

Analisando os resultados das simulações sobre a área potencial de terras disponíveis para projetos de bioenergia e das estimativas da potencial participação da bioenergia na matriz global em 2050 sob os C2050, e desconsiderando fatores limitantes como disponibilidade de água e energia para tais produções, concluiu-se que:

O consumo excessivo e os impactos das atividades humanas são responsáveis pela redução na área disponível de terras para bioenergia, enquanto as tecnologias disruptivas e suas aplicações são os principais fatores de aumento. Apesar dos riscos à biodiversidade inerentes à expansão das fronteiras agrícolas, há terras agricultáveis o suficiente no mundo para alimentar a população em 2050 nos 3 cenários propostos. Contudo, mesmo escolhendo priorizar a preservação das florestas, e partindo para as áreas arbustivas como a próxima fronteira agrícola, não haveria terras aráveis para projetos de bioenergia no C1, e seria necessário desmatar 24% das florestas (935 Mha) causando um grande impacto ambiental. No C2, 5,7% das terras aráveis sobriam disponíveis para produzir bioenergia, atingindo 92% da meta. E no C3, 42% das terras aráveis poderiam produzir bioenergia para sequestrar mais de 6 vezes a quantidade de carbono estipulada para 2100.

Como a grande maioria das terras disponíveis atualmente constituem paisagens florestais ou arbustivas, a expansão das fronteiras agrícolas afetará estes biomas reduzindo a área remanescente e pondo em risco sua ecologia. A carne de ruminantes pode ser comparável a um item de luxo, em razão da pegada ambiental que estes alimentos podem atingir durante sua produção. A redução do desperdício de alimentos e a recuperação de terras degradadas são outras possibilidades de ação para alcançar uma maior disponibilidade de terras, somadas à redução do consumo de carnes.

Por meio dos resultados para as projeções de bioenergia, foram estimados o potencial de geração de bioenergia em 2050 e sua potencial contribuição na matriz energética global: observou-se que mesmo com uma pequena área destinada aos cultivos energéticos no C1, a bioenergia ainda representaria uma parcela considerável da matriz global, de 7,5% com 64 EJ, uma participação menor que a do C0 de 9,8% apesar de um aumento de geração em 14%; no C2, tido como o melhor dos cenários realistas, a bioenergia poderia representar 21,0% da produção global de energia, com 178 EJ, mais de duas vezes o valor do C0; e no C3, que representa uma situação teórica e utópica a bioenergia poderia suprir quase duas vezes e meia a demanda global por energia primária em 2050.

Em todos os cenários analisados a lenha é a fonte de biomassa que representa mais da metade da oferta bioenergética global, de pelo menos 52%. A madeira como fonte direta ou

indireta de bioenergia representa 87% no C0 e poderia representar 81% no C1, 63% no C2, e 61% no C3. A participação das culturas energéticas na matriz global está diretamente ligada à disponibilidade de terras para projetos de bioenergia, e teve grande crescimento no C2 no C3, com uma geração global 31 vezes maior no melhor cenário realista do que no C0. Essa participação diminuiu com relação ao C1, no qual a disponibilidade de terras é menor e o consumo global é mais elevado, fator que contribuiu para o aumento da oferta de biomassa residual (agropecuário, industrial, RSU) das cadeias produtivas que atendem à demanda da população. No C1 as fontes de biomassa cujas disponibilidades estão mais ligadas aos hábitos de produção e consumo da população foram as que tiveram maior aumento na participação do fornecimento global bioenergético em comparação ao C0. Enquanto no C3, são tão grandes as participações de culturas energéticas e florestais que as outras fontes de biomassa perderiam importância na participação global.

Os resultados de geração de bioenergia global obtidos nas projeções dos cenários mais realistas, C1 e C2, foram próximos entre si e de outros estudos da bibliografia, com valores levemente menores que a maioria. A geração na faixa de 64-178 EJ foi compreendida como a mais provável para 2050. Sobre o C3, o potencial bioenergético teórico estimado foi 30% maior que os estudos com resultados mais altos da bibliografia. A divergência pode ser consequência de uma combinação entre as características teóricas do C3 ou da adoção de valores desatualizados, respectivamente um diferencial do estudo e uma limitação. Atualmente os alimentos representam quase metade de toda a produção de bioenergia.

Os alimentos são a fonte de energia mais importante para a manutenção da vida na Terra e atualmente representam cerca de 44% da bioenergia consumida pelos seres humanos (na forma de alimentos e na forma de energia de uso final). No C1, a produção de alimentos teria a mesma participação da energia de uso final na bioenergia, 50%. No C2, seria possível garantir a produção necessária de alimentos para a população com 24% da bioenergia produzida, cenário este caracterizado pelo crescimento da produção de bioenergia proveniente de culturas energéticas. E no C3, a demanda teórica de energia alimentar para a população representaria somente 2% do potencial teórico de produção de bioenergia.

É importante enfatizar que esta dissertação não deve ser assumida como um estado da arte (e nem foi concebido para tal), uma vez que suas análises contemplam uma série de aspectos generalizados que não representam a realidade localmente, e os valores utilizados no cálculo são globais. O detalhamento desta avaliação constitui uma oportunidade para trabalhos futuros.

6. Produtos da Dissertação

Os outros trabalhos nos quais o discente tem se dedicado ao longo do programa, contando com a supervisão e o auxílio dos orientadores, contemplam:

6.1. Apresentação oral em congresso internacional

Apresentação oral no congresso internacional *28th European Biomass Conference & Exhibition (e-EUBCE 2020)*, compartilhando com o mundo as principais conclusões abordadas neste trabalho sob o título: “*Global Potential Assessment of Available Land for Bioenergy Projects in 2050 within Food Security Limits*” (<https://www.e-eubce.com/>).

6.2. Publicação de artigo em revista internacional *Land Use Policy*, Elsevier

Um artigo que sintetiza o conteúdo desta dissertação de mestrado foi publicado na revista *Land Use Policy*, da editora Elsevier, e foi publicado no Volume 105 em Junho de 2021 sob o título “*Global potential assessment of available land for bioenergy projects in 2050 within food security limits*” (<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105346>).

6.3. Publicação na revista *Ingenio Magno*, Universidad Santo Tomás

Co-autoria em artigo publicado na *Revista Ingenio Magno*, da *Universidad Santo Tomás*, Volume 11, No.2 (2020), em Junho de 2021, páginas 147-162, de título “*Proposal for an autonomous system for a non-interconnected community based on biomass gasification*” (<http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/2186>).

6.4. Publicação de artigo em revista internacional *Renewable Energy*, Elsevier

Co-autoria em artigo publicado na revista *Renewable Energy* no Volume 180 em Dezembro de 2021 entitulado “*Life cycle assessment of charcoal production and electricity generation from eucalyptus in an industrial batch kiln*” (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.040>).

6.5. Co-autoria em capítulo de livro

O discente é co-autor do 20º capítulo da 3ª edição do livro “Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte”, entitulado “O Solo e o Meio Ambiente”, que será publicado pela Editora Interciência.

6.6. Outros artigos (em desenvolvimento)

Há também mais dois artigos em desenvolvimento com consideráveis chances de publicação:

6.6.1. Potencial teórico e técnico de geração de bioenergia em 2050

As projeções de estimativa de potencial bioenergético da segunda etapa de cálculos dessa

dissertação serão submetidas para publicação como uma continuação do artigo publicado na revista Land Use Policy (em desenvolvimento).

6.6.2. ACV de Sistemas de Aquaponia

Pesquisa que consiste na *Análise de Ciclo de Vida (ACV)*, com alocação energética, de um sistema comercial de aquaponia situado na cidade de Santa Rita do Sapucaí – MG (em desenvolvimento).

Referências

- ABOUL-KASSIM, T. A. T.; SIMONEIT, B. R. T. Pollutant-Soild Fase Interactions: Mechanism, Chemistry and Modelling. **The Handbook of Environmental Chemistry Vol. 5 Part E**. [S. l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001. p. 1–105.
- AJANOVIC, A. Biofuels versus food production: Does biofuels production increase food prices? **Energy**, vol. 36, no. 4, p. 2070–2076, 2011. DOI 10.1016/j.energy.2010.05.019. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.019>.
- BARRIOS, E. Soil biota, ecosystem services and land productivity. **Ecological Economics**, vol. 64, no. 2, p. 269–285, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.004>.
- BAUEN, A.; BERNDES, G.; JUNGINGER, M.; LONDO, M.; VUILLE, F. **Bioenergy - A sustainable and reliable energy source**. [S. l.: s. n.], 2009. Available at: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/MAIN-REPORT-Bioenergy-a-sustainable-and-reliable-energy-source.-A-review-of-status-and-prospects.pdf>. Accessed on: 31 Aug. 2020.
- BERINGER, T.; LUCHT, W.; SCHAPHOFF, S. Bioenergy production potential of global biomass plantations under environmental and agricultural constraints. **GCB Bioenergy**, vol. 3, no. 4, p. 299–312, 1 Aug. 2011. DOI 10.1111/j.1757-1707.2010.01088.x. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1757-1707.2010.01088.x>. Accessed on: 27 Aug. 2020.
- BERNERS-LEE, M.; KENNELLY, C.; WATSON, R.; HEWITT, C. N. Current global food production is sufficient to meet human nutritional needs in 2050 provided there is radical societal adaptation. **Elem Sci Anth**, vol. 6, no. 1, p. 52, 18 Jul. 2018a. DOI 10.1525/elementa.310. Available at: <https://www.elementascience.org/article/10.1525/elementa.310/>. Accessed on: 3 Oct. 2019.
- BERNERS-LEE, M.; KENNELLY, C.; WATSON, R.; HEWITT, C. N. Current global food production is sufficient to meet human nutritional needs in 2050 provided there is radical societal adaptation. **Elem Sci Anth**, vol. 6, no. 1, p. 52, 18 Jul. 2018b. DOI 10.1525/elementa.310. Available at: <https://www.elementascience.org/article/10.1525/elementa.310/>. Accessed on: 22 Sep. 2019.
- BIODIESEL BR. Biocombustíveis - Da primeira a quarta geração. 2008. Available at: <https://www.biodieselbr.com/destaques/2007/biocombustiveis-primeira-quarta-geracao-10-03-08.htm>. Accessed on: 22 Nov. 2018.
- BRATSKEIR, K. By 2050, we'll all be eating bugs — on purpose. 2017. Available at: <https://www.mic.com/articles/167368/by-2050-well-all-be-eatings-bugs-on-purpose>.
- BURBANO, H. El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. **Ciencias Agrícolas**, vol. 33, no. 2, p. 117–124, 2016. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>.
- CAI, X.; ZHANG, X.; WANG, D. Land availability for biofuel production. **Environmental Science and Technology**, vol. 45, no. 1, p. 334–339, 1 Jan. 2011. <https://doi.org/10.1021/es103338e>.
- CARNEIRO, L. G. **Treinamento Teórico e Prático de Agroecologia para Produtores Rurais**. [S. l.: s. n.], 2007.
- CLARK, M.; TILMAN, D. Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. **Environmental Research**

Letters, vol. 12, no. 6, p. 064016, 1 Jun. 2017. DOI 10.1088/1748-9326/aa6cd5. Available at: <http://stacks.iop.org/1748-9326/12/i=6/a=064016?key=crossref.f80d1b1b72259fb25e1f060a8362e9ca>. Accessed on: 17 May 2019.

CRAWFORD, A. Scholars Estimate the Global Potential of Urban Farming - CityLab. 2018. **Citylab - Big Data Suggests Big Potential for Urban Farming**. Available at: <https://www.citylab.com/environment/2018/02/big-data-suggests-big-potential-for-urban-farming/552770/>. Accessed on: 13 Feb. 2020.

CULLEN, J. M.; ALLWOOD, J. M. Theoretical efficiency limits for energy conversion devices. **Energy**, vol. 35, no. 5, p. 2059–2069, 1 May 2010. DOI 10.1016/J.ENERGY.2010.01.024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544210000265>. Accessed on: 31 Jan. 2019.

EIA, U. S. E. I. A. International Energy Outlook 2019. 2019. **Analysis & Projections**. Available at: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>. Accessed on: 10 Jun. 2020.

ELKS, S. Global food waste could rise by a third by 2030 - study - Reuters. 2018. **Reuters - Big Story 10**. Available at: <https://www.reuters.com/article/us-global-food-waste/global-food-waste-could-rise-by-a-third-by-2030-study-idUSKCN1L61YR>. Accessed on: 22 Sep. 2019.

ESCOBAR, J. C.; LORA, E. S.; VENTURINI, O. J.; YÁÑEZ, E. E.; CASTILLO, E. F.; ALMAZAN, O. Biofuels: Environment, technology and food security. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 13, no. 6–7, p. 1275–1287, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.014>.

FAAJI, A. P. C.; DIAZ-CHAVEZ, R. A.; YOUNGS, H.; FRITSCH, U. R.; FELBY, C.; SOMERVILLE, C. Biofuels for Europe | Land and Food - Biofuels for Europe. 2017. **Land and Food**. Available at: <http://www.biofuelsforeurope.eu/land-and-food/>. Accessed on: 15 Nov. 2018.

FAO. **3. Land and water systems at risk**. [S. l.: s. n.], 2011. <https://doi.org/978-1-84971-326-9>.

FAO. “Biofuels and agriculture - a technical overview” in *The state of food and agriculture*. , p. 10–22, 2008. .

FAO. FAO’s Animal Production and Health Division: Meat & Meat Products: Meat Composition. 2015. **5 March**. Available at: http://www.fao.org/ag/againfo/themes/en/meat/backgr_sources.html. Accessed on: 18 Oct. 2019.

FAO. FAO - Noticias: El desperdicio de alimentos daña al clima, el agua, la tierra y la biodiversidad. 2013. Available at: <http://www.fao.org/news/story/es/item/196368/icode/>. Accessed on: 25 Jun. 2019.

FAO. Global Forest Resources Assessment 2020 Key findings. 2020. DOI 10.4060/ca8753en. Available at: <https://doi.org/10.4060/ca8753en>. Accessed on: 21 Apr. 2021.

FAO. Key facts on food loss and waste you should know! | SAVE FOOD: Global Initiative on Food Loss and Waste Reduction | Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2010. Available at: <http://www.fao.org/save-food/resources/keyfindings/en/>. Accessed on: 17 May 2019.

FAO. **Policy Brief Changing Policy Concepts of Food Security**. [S. l.: s. n.], 2006. Available at: <http://www.foodsecinfoaction.org/>. Accessed on: 26 Aug. 2020.

FAO. **The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050**. [S. l.: s. n.], 2018. Available at: <http://www.fao.org/3/I8429EN/i8429en.pdf>.

FAO. **The Global Dairy Sector: Facts**. [S. l.: s. n.], 2016.

FORMIGONI, I. Projeções do consumo mundial de carne bovina, de 2018 a 2026. 2018. Available at: <http://www.farmnews.com.br/historias/consumo-mundial-de-carne-bovina-3/>. Accessed on: 17 May 2019.

FUGLIE, K. O.; WANG, S. L.; BALL, V. E. **Productivity growth in agriculture: an international perspective**. Wallingford: CABI, 2012. DOI 10.1079/9781845939212.0000. Available at: <http://www.cabi.org/cabebooks/ebook/20123305091>. Accessed on: 7 Feb. 2021.

FUTURE LEARN. Impact of climate change on agriculture. 2017. Available at: <https://www.futurelearn.com/courses/climate-smart-agriculture/0/steps/26565>. Accessed on: 15 Oct. 2019.

GALLAGHER. **The Gallagher Review of the indirect effects of biofuels production Renewable Fuels Agency Ashdown House Sedlescombe Road North St Leonards-on-Sea East Sussex TN37 7GA**. [S. l.: s. n.], 2008. Available at: www.renewablefuelsagency.org. Accessed on: 21 Apr. 2021.

GORDON, J. Science Buzz. 2011. Available at: <http://www.sciencebuzz.org/blog/feeding-world-one-billion-time>. Accessed on: 17 May 2019.

GREINER, L.; KELLER, A.; GRÊT-REGAMEY, A.; PAPRITZ, A. Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. **Land Use Policy**, vol. 69, no. June, p. 224–237, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.025>.

GRISOTTO, R. Os setores da economia mundial com maior impacto ambiental - Época NEGÓCIOS | Ação. 2015. Available at: <https://epocanegocios.globo.com/Informacao/Acao/noticia/2015/09/os-setores-da-economia-mundial-com-maior-impacto-ambiental.html>. Accessed on: 25 Jun. 2019.

HE, H.; ZHANG, C.; ZHAO, X.; FOUSSENI, F.; WANG, J.; DAI, H.; YANG, S.; ZUO, Q. Allometric biomass equations for 12 tree species in coniferous and broadleaved mixed forests, Northeastern China. **PLoS ONE**, vol. 13, no. 1, 1 Jan. 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186226>.

HEGSTED, D. M.; TRULSON, M. F.; WHITE, H. S.; WHITE, P. L.; VINAS, E.; ALVISTUR, E.; DIAZ, C.; VASQUEZ, J.; LOO, A.; ROCA, A.; COLLAZOS, C.; RUIZ, A. Lysine and methionine supplementation of all-vegetable diets for human adults. **The Journal of nutrition**, vol. 56, no. 4, p. 555–576, 10 Aug. 1955. DOI 10.1093/jn/56.4.555. Available at: <https://academic.oup.com/jn/article/56/4/555/4721982>. Accessed on: 7 Feb. 2021.

HELVETAS. **From the Plant to the T-Shirt**. Zürich: [s. n.], 2007.

HOOGWIK, M.; FAAIJ, A.; VAN DEN BROEK, R.; BERNDES, G.; GIELEN, D.; TURKENBURG, W. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. **Biomass and Bioenergy**, vol. 25, no. 2, p. 119–133, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00191-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00191-5).

HUNTER, M. C.; SMITH, R. G.; SCHIPANSKI, M. E.; ATWOOD, L. W.; MORTENSEN, D. A. Agriculture in 2050: Recalibrating targets for sustainable intensification. **BioScience**, vol. 67, no. 4, p. 386–391, 2017. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>.

IDEAM - U.D.C.A. **Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia**. Bogotá D.C.: IDEAM - MADS, 2015.

IPBES. THE ASSESSMENT REPORT ON LAND DEGRADATION AND RESTORATION 2 SUMMARY FOR POLICYMAKERS OF THE IPBES ASSESSMENT REPORT ON LAND DEGRADATION AND RESTORATION

Disclaimer on maps Photo credits Technical Support Graphic Design MEMBERS OF THE MANAGEMENT COMMITTEE W. [S. l.: s. n.], 2018. Available at: www.ipbes.net.

IPCC. No Title. 2014. .

IRENA. **Global Bioenergy SUPPLY AND DEMAND PROJECTIONS A working paper for REmap 2030.** [S. l.: s. n.], 2014. Available at: www.irena.org/remap. Accessed on: 27 Aug. 2020.

JENKINS, T. Infographic: the Best and Worst Countries for Food Waste. 2018. **Fineding Lovers**. Available at: <https://www.finedininglovers.com/article/best-and-worst-countries-food-waste>. Accessed on: 13 Aug. 2019.

KC, S.; LUTZ, W. The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. **Global Environmental Change**, vol. 42, p. 181–192, Jan. 2017. DOI 10.1016/j.gloenvcha.2014.06.004. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959378014001095>. Accessed on: 17 May 2019.

KLINE, K. L.; MSANGI, S.; DALE, V. H.; WOODS, J.; SOUZA, G. M.; OSSEWEIJER, P.; CLANCY, J. S.; HILBERT, J. A.; JOHNSON, F. X.; MCDONNELL, P. C.; MUGERA, H. K. Reconciling food security and bioenergy: priorities for action. **GCB Bioenergy**, vol. 9, no. 3, p. 557–576, Mar. 2017. DOI 10.1111/gcbb.12366. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/gcbb.12366>. Accessed on: 10 Dec. 2019.

LADANAI, S.; VINTERBÄCK, J. Global Potential of Sustainable Biomass for Energy. **SLU, Institutionen för energi och teknik Swedish University of Agricultural Sciences Department of Energy and Technology**, , p. 32, 2009. DOI ISSN 1654-9406. Available at: http://pub.epsilon.slu.se/4523/1/ladanai_et_al_100211.pdf.

LEHOUE ROU, H. N. Desertization: Irreversible Extension of Desert Land. *In: Encyclopedia of Soil Science. Third Edit [S. l.]: CRC Press LLC., 2017. p. 657–663.* <https://doi.org/10.1081/E-ESS3-120001691>.

LEMUS, R.; LAL, R. **Bioenergy crops and carbon sequestration.** [S. l.: s. n.], 2005. Available at:

https://www.researchgate.net/publication/248936831_Bioenergy_Crops_and_Carbon_Sequestration.

MACKAY, J.; ERIKSEN, M. **The Tobacco Atlas.** Geneva: [s. n.], 2002. Available at: http://www.ph.ucla.edu/epi/faculty/zhang/courses/epi242/WHO_The_Tobacco_Atlas_Part1.pdf. Accessed on: 27 Mar. 2020.

MARTINDALE, W. **Global food security and supply.** [S. l.: s. n.], 2015. DOI 10.1002/9781118699287. Available at:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118699287>. Accessed on: 15 Nov. 2018.

MELLO, D. Agropecuária é responsável por 69% das emissões de gases do efeito estufa | Agência Brasil. 2016. **Agência Brasil - Pesquisa e Inovação.** Available at: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/pesquisa-e-inovacao/noticia/2016-10/setor-agropecuario-e-responsavel-por-69-das-emissoes-de-gases>. Accessed on: 11 Jul. 2019.

MSANGI, S. **Producing bioenergy doesn't have to conflict with food security.** [S. l.: s. n.], 2016.

NDICHU, E. **Esther Ndichu: Hunger isn't a food issue. It's a logistics issue | TED Talk.**

- Hunger isn't a food issue. It's a logistics issue.** [S. l.: s. n.], 2015. Available at: https://www.ted.com/talks/esther_ndichu_hunger_isn_t_a_food_issue_it_s_a_logistics_issue. Accessed on: 15 Nov. 2018.
- NELLEMANN, C.; MACDEVETTE, M.; MANDERS, T.; EICKHOUT, B.; SVIHUS, B.; PRINS, A. G.; P., K. B. **The Environmental Food Crisis - The environment's role in averting future food crisis.** [S. l.: s. n.], 2009. Available at: http://www.ghbook.ir/index.php?name=های_رسانه_و_فرهنگ&option=com_dbook&task=readonline&book_id=13650&page=73&chckhashk=ED9C9491B4&Itemid=218&lang=fa&tmpl=component.
- ORR, B. J. Desertification, Land Degradation and Drought in Perspective. **Convention to Combat Desertification**, no. June, 2019. <https://doi.org/10.1891/9780826190123.ap02>.
- OSMAN, K. T. **Soil degradation, conservation and remediation.** New York: Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2014. vol. 9789400775, . <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7590-9>.
- PANEQUE, M. Bioenergy - a Sustainable and Reliable Energy Source. **Agricultural Research & Technology: Open Access Journal**, vol. 4, no. 4, 2017. DOI 10.19080/artoaj.2017.04.555642. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Shares-of-global-primary-biomass-sources-for-energy-Source-IPCC-2007a-b-IEA-Bioenergy_fig1_259575158. Accessed on: 10 Jun. 2020.
- PARDEY, P. G.; BEDDOW, Ja. M.; HURLEY, T. M.; BEATTY, T. K. M.; EIDMAN, V. R. A Bounds Analysis of World Food Futures: Global Agriculture Through to 2050. **The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics**, vol. 58, p. 571–589, 2014. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1467-8489.12072>. Accessed on: 22 Sep. 2019.
- PHOGAT, V. K.; TOMAR, V. S.; DAHIYA, R. Soil Physical Properties. **Soil Science: An Introduction**. First. [S. l.]: Indian Society of Soil Science, 2015. p. 135–172. <https://doi.org/10.1017/9781316809785.008>.
- PLUMER, B. The real value of urban farming. (Hint: It's not always the food.). 2016. Available at: <https://www.vox.com/2016/5/15/11660304/urban-farming-benefits>.
- RANGANATHAN, J. The Global Food Challenge Explained in 18 Graphics. Dec. 2013. **World Resources Institute**. DOI 10.1029/2007GB002952. Available at: <https://www.wri.org/blog/2013/12/global-food-challenge-explained-18-graphics>. Accessed on: 17 Oct. 2019.
- RANGANATHAN, J.; WAITE, R.; SEARCHINGER, T.; HANSON, C. How to Sustainably Feed 10 Billion People by 2050, in 21 Charts | World Resources Institute. **World Resources Institute**, , p. 1–26, 2018. Available at: <https://www.wri.org/blog/2018/12/how-sustainably-feed-10-billion-people-2050-21-charts>. Accessed on: 29 Oct. 2019.
- REN21. **Ren21: Renewables 2018 global status report.** [S. l.: s. n.], 2018. DOI 978-3-9818911-3-3. Available at: <https://www.ren21.net/gsr-2019/>.
- RITCHIE, H. Food waste is responsible for 6% of global greenhouse gas emissions - Our World in Data. 2020. **Our World in Data**. Available at: <https://ourworldindata.org/food-waste-emissions>. Accessed on: 1 Apr. 2020.
- RITCHIE, H.; ROSER, M. Energy. 2018. **Our World in Data**. Available at: <https://ourworldindata.org/energy#all-charts-preview>. Accessed on: 10 Jun. 2020.
- RITCHIE, H.; ROSER, M. How much of the world's land would we need in order to feed the global population with the average diet of a given country? 3 Oct. 2017. **Our World In Data**

- **Agricultural land by global diets**. DOI 10.1088/1748-9326/aa6cd5. Available at: <http://stacks.iop.org/1748-9326/12/i=6/a=064016?key=crossref.f80d1b1b72259fb25e1f060a8362e9ca>. Accessed on: 23 Sep. 2019.
- SARKAR, N.; GHOSH, S. K.; BANNERJEE, S.; AIKAT, K. Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. **Renewable Energy**, vol. 37, no. 1, p. 19–27, 2012. DOI 10.1016/j.renene.2011.06.045. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045>.
- SCHAFFARTZIK, A.; MAYER, A.; GINGRICH, S.; EISENMENGER, N.; LOY, C.; KRAUSMANN, F. The global metabolic transition: Regional patterns and trends of global material flows, 1950-2010. **Global Environmental Change**, vol. 26, no. 1, p. 87–97, 1 May 2014. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.03.013>.
- SEARCHINGER, T.; WAITE, R.; HANSON, C.; RANGANATHAN, J. CREATING A SUSTAINABLE FOOD FUTURE WORLD RESOURCES REPORT. **World Resources Report**, vol. 1, no. July, p. 558, 2019. Available at: www.SustainableFoodFuture.org.
- SEARLE, S.; MALINS, C. A reassessment of global bioenergy potential in 2050. **GCB Bioenergy**, vol. 7, no. 2, p. 328–336, 1 Mar. 2015. DOI 10.1111/gcbb.12141. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/gcbb.12141>. Accessed on: 27 Aug. 2020.
- SHAKUN, J. Global view answers ice age CO2 puzzle | Simple Climate. 2012. Available at: <https://simpleclimate.wordpress.com/2012/04/04/global-view-answers-ice-age-co2-puzzle/>. Accessed on: 18 Nov. 2018.
- SKYE, J. Advantages and Disadvantages of Biofuels | LoveToKnow. 2012. **Green Living**. Available at: https://greenliving.lovetoknow.com/Advantages_and_Disadvantages_of_Biofuels. Accessed on: 12 Jul. 2019.
- SLADE, R.; SAUNDERS, R.; GROSS, R.; BAUEN, A. Energy from biomass : the size of the global resource An assessment of the evidence that biomass can make a major contribution to future global energy supply. **UK Energy Research Centre**, no. November, 2011. <https://doi.org/citeulike-article-id:12054248>.
- SMEETS, E. M. W.; FAAIJ, A. P. C.; LEWANDOWSKI, I. M.; TURKENBURG, W. C. A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050. **Progress in Energy and Combustion Science**, vol. 33, no. 1, p. 56–106, 1 Feb. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.08.001>.
- SMITH, L. Don't Believe the Hysteria Over Carbon Dioxide. 24 Jul. 2017. **The Daily Signal**. Available at: <https://www.dailysignal.com/2017/07/24/dont-believe-hysteria-carbon-dioxide/>. Accessed on: 7 Feb. 2021.
- SMITH, P.; DAVIS, S. J.; CREUTZIG, F.; FUSS, S.; MINX, J.; GABRIELLE, B.; KATO, E.; JACKSON, R. B.; COWIE, A.; KRIEGLER, E.; VAN VUUREN, D. P.; ROGELJ, J.; CIAIS, P.; MILNE, J.; CANADELL, J. G.; MCCOLLUM, D.; PETERS, G.; ANDREW, R.; KREY, V.; ... YONGSUNG, C. Global Carbon Project, CSIRO Oceans and Atmosphere Research. **Nature Publishing Group**, vol. 6, p. 19, 2015. DOI 10.1038/NCLIMATE2870. Available at: <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/AR5DB/>. Accessed on: 1 Apr. 2020.
- SPINACÉ, N. Infestação na cozinha . 2013. **Revista Época**. Available at: <https://epoca.globo.com/vida/noticia/2013/08/binfestacaob-na-cozinha.html>. Accessed on: 7 Jul. 2020.
- STATISTA. Global biofuel production. 2019. Available at: <https://www.statista.com/statistics/274163/global-biofuel-production-in-oil-equivalent/>.

Accessed on: 21 Apr. 2021.

SZABÓ, Z. Reviewing the food vs. fuel debate. vol. 06, no. June, p. 1–5, 2015. .

TURK, C. 15 Striking World Hunger Statistics | The Borgen Project. 2017. Available at: <https://borgenproject.org/15-world-hunger-statistics/>. Accessed on: 25 Jun. 2019.

UN. **World Population Prospects 2019 Highlights**. [S. l.: s. n.], 2019.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects - The 2012 Revision Highlights and Advance Tables**. [S. l.: s. n.], 2013. Available at:

https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2012_HIGHLIGHTS.pdf. Accessed on: 3 Oct. 2019.

VARON, B.; CALVET, R.; PROST, R. **Soil Pollution: process and dynamics**. 1st Editio. Berlín: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61147-6>.

VASCONCELLOS, M. A. Água virtual - Ecologia - InfoEscola. 2017. Available at: <https://www.infoescola.com/ecologia/agua-virtual/>. Accessed on: 12 Jul. 2019.

VERSTRAETE, M. M. Defining desertification: A review. **Climatic Change**, vol. 9, no. 1–2, p. 5–18, 1986. <https://doi.org/10.1007/BF00140520>.

WAITE, R.; RANGANATHAN, J. 6 Pressing Questions About Beef and Climate Change, Answered. **WRI**, 5 May 2019. DOI 10.1007/s10584-012-0640-0. Available at:

<https://www.wri.org/blog/2019/04/6-pressing-questions-about-beef-and-climate-change-answered>. Accessed on: 22 Sep. 2019.

WBA. **GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2020 World Bioenergy Association**. [S. l.: s. n.], 2020.

WEGGE, P.; ROLSTAD, J.; STORAUNET, K. O. On the spatial relationship of males on “exploded” leks: The case of Capercaillie grouse *Tetrao urogallus* examined by GPS satellite telemetry. **Ornis Fennica**, vol. 90, no. 4, p. 222–235, 2013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/3/034028>.

WENDORF, M. The Explosion of Insect Protein. 2019. Available at:

<https://interestingengineering.com/the-explosion-of-insect-protein>. Accessed on: 1 Nov. 2019.

WIESMEIER, M.; RABOT, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; WELLER, U.; HELMING, K.; STÖSSEL, B.; RUSSELL, D.; DAEDLOW, K.; BARTKE, S.; VOGEL, H.-J.; LANG, B.; WOLLSCHLÄGER, U. A systemic approach for modeling soil functions. **Soil**, vol. 4, no. 1, p. 83–92, 2018. <https://doi.org/10.5194/soil-4-83-2018>.

WORLDOMETERS. 2019. **Worldometers - real time world statistics**. Available at: <https://www.worldometers.info/>. Accessed on: 17 May 2019.

WU, W.; HASEGAWA, T.; OHASHI, H.; HANASAKI, N.; LIU, J.; MATSUI, T.; FUJIMORI, S.; MASUI, T.; TAKAHASHI, K. Global advanced bioenergy potential under environmental protection policies and societal transformation measures. **GCB Bioenergy**, vol. 11, no. 9, p. gcb.12614, 29 Mar. 2019. DOI 10.1111/gcb.12614. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.12614>. Accessed on: 27 Aug. 2020.