

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**BALANÇO DOS GASES DE EFEITO ESTUFA NA CADEIA PRODUTIVA DO
CHOCOLATE COM ABORDAGEM DE CICLO DE VIDA**

DIOGO RODRIGUES TEZOTTO

ORIENTADOR: PROF. DR APARECIDO DOS REIS COUTINHO

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2018

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**BALANÇO DOS GASES DE EFEITO ESTUFA NA CADEIA PRODUTIVA DO
CHOCOLATE COM ABORDAGEM DE CICLO DE VIDA**

DIOGO RODRIGUES TEZOTTO

ORIENTADOR: PROF. DR APARECIDO DOS REIS COUTINHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.


SANTA BÁRBARA D'OESTE

2018

**BALANÇO DOS GASES DE EFEITO ESTUFA NA CADEIA PRODUTIVA DO
CHOCOLATE COM ABORDAGEM DE CICLO DE VIDA**

DIOGO RODRIGUES TEZOTO

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 27 de fevereiro de 2018, pela Banca
Examinadora constituída pelos Professores:


Prof. Dr. Aparecido do Reis Coutinho - UNIMEP
Presidente e Orientador


Prof. Dr. Fernando Celso de Campos
UNIMEP


Prof. Dr. Guilherme de Castilho Queiroz
ITAL

Dedico este trabalho a todos que seguem o
firme propósito de fazer o bem e evoluir.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade que nos dá de nos desenvolvermos.

À minha família, àquela em que nasci e fui muito bem acolhido e orientado pelos meus pais Angelo Carlos Tezotto e Mara Regina Rodrigues Tezotto, irmão Leonardo Rodrigues Tezotto e também à família que construí junto de minha esposa dedicada e paciente, Cintia Fernanda Raveli Tezotto e o presente que Deus nos deu, Luisa Raveli Tezotto, que mesmo jovem soube esperar seu pai concluir este trabalho.

Ao meu orientador, Prof^o Dr. Aparecido dos Reis Coutinho, pelo exemplo de conduta, palavra sempre amiga e incentivadora que muito nos honra poder fazer parte do seu grupo de orientados.

A Universidade Metodista de Piracicaba, UNIMEP, com todo seu corpo docente, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela oportunidade que me possibilitaram de adentrar neste maravilhoso mundo da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes – Brasil.

[...] “juntavam e partiam os cocos. Ficavam aqueles montes de caroços brancos de onde o mel escorria. Nós da colheita nos afastávamos uns dos outros e mal trocávamos algumas palavras. Os da juntagem conversavam e riam. A tropa de cacau mole chegava e enchia os caçuás. O cacau era levado para o cocho para os três dias de fermento. Nós tínhamos que dançar sobre os caroços pegajosos e o mel adería aos nossos pés. Mel que resistia aos banhos e ao sabão massa. Depois, livre do mel, o cacau secava ao sol, estendido nas barcaças. Ali também dançávamos sobre ele e cantávamos. Os nossos pés ficavam espalhados, os dedos abertos. No fim de oito dias os caroços de cacau estavam negros e cheiravam a chocolate. Antônio Barriguinha, então, conduzia sacos e mais sacos para Pirangi, tropas de quarenta a cinquenta burros. A maioria dos alugados e empreiteiros só conhecia do chocolate aquele cheiro parecido que o cacau tem”.

*Cacau
Romance de Jorge Amado*

“Boa Terra, velha esfera que nos leva aonde for. Pro futuro, quem nos dera que te dessem mais valor”

*Mês de Maio
Música de Almir Sater e Paulo Simões*

TEZOTTO, Diogo Rodrigues. **Balanço dos gases de efeito estufa na cadeia produtiva do chocolate com abordagem de ciclo de vida**. 2018. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

RESUMO

Com o crescimento da concentração do dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera da Terra ao longo de décadas, ocorrido principalmente devido à queima de combustíveis fósseis, estudos e pesquisas têm sido desenvolvidos na busca de compreensão dos seus efeitos sobre a biodiversidade, o clima e o equilíbrio do planeta. Os setores de geração de energia elétrica e aquecimento, seguido das emissões causadas pela agricultura, silvicultura e outros usos da terra e pelo setor industrial são os maiores causadores. O presente trabalho analisou a cadeia produtiva do chocolate, mensurando suas emissões e o sequestro correspondente de CO₂, por meio de estudo de caso em uma indústria de pequeno porte no Brasil. Utilizando-se da ferramenta de ACV e extrapolando dados por toda a cadeia, foi possível elaborar o balanço de massa, o consumo de energia elétrica e a emissão de CO₂. Foi analisado o cultivo do cacau e seu respectivo sequestro de carbono para elaborar o balanço do CO₂. Desse modo, foi possível detectar que o balanço de massa para a produção de chocolate tem perdas de 3,17% enquanto a indústria processadora tem uma eficiência de 34,95% para a fabricação de um dos seus produtos e, onde também, há maior consumo de energia elétrica. As emissões de CO₂ em razão do consumo anual de energia seriam de 0,598 MgCO₂eq.ano⁻¹ e 0,120 MgCO₂eq.ano⁻¹ para processadoras e fabricantes, respectivamente. Por fim, foi positivo observar que o sequestro de carbono pelas lavouras de cacau, correspondente à área cultivada para atender a demanda do estudo, foi superior às emissões captando cerca de 54,64 x 10³ MgCO₂eq sendo considerada, portanto, sustentável e um importante mecanismo de sequestro do CO₂ atmosférico.

Palavras-chave: Carbono, GEE, Chocolate, Cacau, Avaliação do Ciclo de Vida, ACV.

TEZOTTO, Diogo Rodrigues. **Balance of greenhouse gas in the chocolate production chain with life cycle approach**. 2018. 110p. Dissertation (Master of Production Engineering) – School of Engineering, Architecture and Urbanism, Methodist University of Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

ABSTRACT

In the last decades the growth of carbon dioxide (CO₂) concentration in the Earth's atmosphere due to the burning of fossil fuels have been study object for students and researchers in search of an understanding its effects on biodiversity, climate and equilibrium of the planet. The emissions caused by electric power generation and heating sectors, agriculture, forestry and other uses of the land, besides the industrial sector, are the major causes. This dissertation uses a case study in a small Brazilian industry to measure emissions and the corresponding CO₂ sequestration. With the LCA method and extrapolating data to the chain, it was possible to elaborate mass balance, electric energy consumption and CO₂ emission. In the other hand, *cocoa* cultivation and the respective carbon sequestration were analyzed to elaborate the CO₂ balance. Thus, it was possible to detect that the mass balance of chocolate has losses of 3.17%, while the processing industry has a low efficiency of 34.95% for the manufacture of one of its products with much more electricity consumption. The CO₂ emissions due to energy consumption for one year were 0.598 MgCO₂eq.year⁻¹ and 0.120 MgCO₂eq.year⁻¹ for both, processors and manufacturers respectively. Finally, it was positive to note that the carbon sequestration by cocoa cultivation in according to area to meet the production demand of the study was higher than the emissions; with value about 54.64 x 10³ MgCO₂eq. being considered a balanced chain and an important atmospheric CO₂ sequestration mechanism.

Key words: Carbon, GHG, Chocolate, Cocoa, Life Cycle Assessment, LCA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Estrutura da atmosfera em função da temperatura e altitude.....	6
Figura 2	Balço energético da atmosfera.....	8
Figura 3	Efeito estufa, emissão e reemissão de fótons infravermelhos.....	9
Figura 4	Aumento da luminosidade solar, surgimento do oxigênio e a diminuição do CO ₂ nos vários períodos geológicos.....	10
Figura 5	Ciclo natural do carbono e tamanho dos reservatórios.....	12
Figura 6	Níveis de concentração de CO ₂ nos últimos 400.000 anos.....	15
Figura 7	Emissões antropogênicas no mundo por setor.....	16
Figura 8	O ciclo do carbono natural em uma vegetação.....	19
Figura 9	Conceito simplificado de uma ACV de um produto.....	25
Figura 10	Estágios de um estudo de ACV pela sistemática da ISO.....	27
Figura 11	Clonagem por enxertia em fazenda de Linhares, Espírito Santo.....	33
Figura 12	Sistema radicular do cacau.....	34
Figura 13	Esboço artístico de floresta com sistema cabruca de cultivo do cacau.	35
Figura 14	Uma das formas de balizamento para plantio do cacau em sombreamento provisório.....	38
Figura 15	Formação das flores no cacau.....	39
Figura 16	A estrutura caulífera do cacau.....	40
Figura 17	Características do cacau e seus componentes.....	41
Figura 18	Sugestão de poda para pleno desenvolvimento do cacau.....	42
Figura 19	Formas corretas de colheita usando ferramentas.....	42
Figura 20	Representação da fase de quebra do cacau.....	43
Figura 21	Típico cocho de fermentação.....	43
Figura 22	A secagem natural das amêndoas.....	44
Figura 23	Fluxograma resumido do processamento das amêndoas do cacau.....	45
Figura 24	As amêndoas do cacau.....	47
Figura 25	A cadeia do cacau-chocolate.....	48
Figura 26	Relação entre produção de amêndoas e consumo equivalente de chocolates no mundo em 2014.....	49
Figura 27	Produção de amêndoas secas, período 2014-2015, por país.....	49

Figura 28	Os dez maiores países consumidores de amêndoas equivalentes per capita.....	50
Figura 29	Os maiores países processadores de amêndoas de cacau no período 2014-2015.....	51
Figura 30	Produção e consumo de chocolates no Brasil.....	51
Figura 31	Roteiro de pesquisa.....	53
Figura 32	Representação simplificada da delimitação da fronteira do estudo.....	54
Figura 33	Diagrama síntese que representa a forma de condução do estudo.....	57
Figura 34	A cadeia produtiva do cacau-chocolate.....	58
Figura 35	Fluxo conceitual do modelo de produção da empresa analisada.....	60
Figura 36	Fluxograma de processo produtivo do chocolate em tablete com abordagem de ACV.....	62
Figura 37	Balanço de massa por processo.....	66
Figura 38	Balanço de massa no processamento do cacau.....	71
Figura 39	Sistemas de cultivo.....	77
Figura 40	Diagrama simplificado do espaçamento do cultivo do cacau a pleno sol..	77
Figura 41	Fluxograma simplificado do cultivo do cacau.....	78
Figura 42	Diagrama síntese do balanço de CO ₂ , com ênfase no consumo de energia elétrica na fabricação de chocolates.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Uma parcela do espectro eletromagnético.....	7
Tabela 2	Média mensal e média anual do fator de emissão de CO ₂ no Brasil em 2016 do setor elétrico.....	17
Tabela 3	As principais normas da série ISO 14.000.....	24
Tabela 4	Exemplos de estudos de ACV relacionados à indústria alimentícia.....	28
Tabela 5	Características dos componentes do fruto do cacau.....	40
Tabela 6	Produção de chocolates da empresa estudada no ano de 2015.....	60
Tabela 7	Receita básica de chocolate ao leite.....	63
Tabela 8	Resumo do balanço de massa para o processo produtivo do chocolate	64
Tabela 9	Dados coletados no consumo de energia elétrica por processo.....	67
Tabela 10	Resumo do consumo geral mensal de energia elétrica e respectiva produção de chocolates no ano de 2015 na empresa estudada.....	68
Tabela 11	Balanço de massa no processamento do cacau.....	70
Tabela 12	Resumo do consumo de energia elétrica no processamento das amêndoas.....	72
Tabela 13	Taxas estimadas de consumo de energia elétrica por Kg de produto oriundos do processamento das amêndoas.....	73
Tabela 14	Estimativa das emissões equivalentes de CO ₂ na produção de chocolate em função do consumo de energia elétrica.....	75
Tabela 15	Consumo estimado de energia elétrica e sua respectiva emissão equivalente de CO ₂ para o processamento de amêndoas em um ano...	75
Tabela 16	Análise de contribuição para as emissões de CO ₂ , por produto, referente ao estudo de caso.....	76
Tabela 17	Estudos referentes ao estoque de carbono arbóreo do cacauero.....	79

LISTA DE SIGLAS

ABIA	Associação Brasileira das Indústrias da Alimentação
ABICAB	Associação Brasileira da Indústria de Chocolates, Cacau, Amendoim, Balas e Derivados
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
CCS	<i>Carbon and Capture Storage</i>
CEPEC	Centro de Pesquisas do Cacau
CEPLAC	Comissão Executiva de Planejamento da Lavoura Cacaueira
CONMETRO	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
COP	<i>Conference of the Parties</i>
GEE	Gases de efeito estufa
ICCO	<i>The International Cocoa Organization</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organizações das Nações Unidas
SAF	Sistema agroflorestal
SAGS	Sistema agrosilvicultural
SIN	Sistema Interligado Nacional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA	2
1.2. QUESTÕES DE PESQUISA	3
1.3. OBJETIVO GERAL	3
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. O CLIMA DA TERRA	5
2.2. O CICLO DO CARBONO	11
2.2.1. AS ATIVIDADES HUMANAS SOBRE O CICLO DO CARBONO	13
2.2.2. EMISSÕES ANTROPOGÊNICAS POR SETOR	16
2.3. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	16
2.4. O SEQUESTRO DO CARBONO	18
2.5. EFICÁCIA NO USO DOS RECURSOS NATURAIS E SUSTENTABILIDADE	20
2.6. A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	22
2.6.1. DEFINIÇÃO CONCEITUAL DE ACV	24
2.7. BALANÇO DE MASSA	29
2.8. CHOCOLATE: HISTÓRIA, CONCEITOS E CARACTERÍSTICAS	29
2.8.1. O CACAU	32
2.8.2. BENEFICIAMENTO DO CACAU	42
2.8.3. PROCESSAMENTO DAS AMÊNDOAS DO CACAU	45
2.8.4. ASPECTOS ECONÔMICOS DO CACAU-CHOCOLATE	48
2.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	52
3. MÉTODO DE PESQUISA	53
4. RESULTADOS	58
4.1. CADEIA DE PRODUÇÃO DO CACAU CHOCOLATE	58
4.2. PRODUÇÃO DE CHOCOLATE	59
4.2.1. BALANÇO DE MASSA DA PRODUÇÃO DO CHOCOLATE	64
4.2.2. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA PRODUÇÃO DO CHOCOLATE	67
4.3. PROCESSAMENTO DAS AMÊNDOAS DO CACAU	69
4.3.1. BALANÇO DE MASSA DO PROCESSAMENTO DAS AMÊNDOAS DO CACAU	69
4.3.2. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO PROCESSAMENTO DAS AMÊNDOAS	72
4.4. ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CO ₂	74
4.5. ESTIMATIVAS DO SEQUESTRO DE CARBONO NO CULTIVO DO CACAU	76

4.6. BALANÇO DE CO ₂ COM ÊNFASE NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA PRODUÇÃO DE CHOCOLATES	80
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	82
6. CONCLUSÃO	84
6.1. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

1. INTRODUÇÃO

A Terra tem cerca de 4,5 bilhões de anos e a presença do ser humano *homo sapiens* é atribuída há pelo menos 200.000 anos. No decorrer do tempo, estes vêm formando civilizações, distribuindo-se pela superfície da crosta terrestre e interagindo com a biosfera do planeta (BRASSEUR; ORLANDO; TYNDALL; 1999).

O constante crescimento populacional, acompanhado pelo processo de industrialização, resultou no desenvolvimento de atividades que modificaram e continuam modificando o planeta Terra. As mudanças que têm a participação direta do homem na paisagem terrestre ficaram conhecidas como antrópicas (ou antropogênicas) e incluem, entre outras coisas, desmatamentos, mudanças nos cursos dos rios, extração de minérios, utilização de combustíveis fósseis, não tratamento de resíduos e dejetos, atividades agrícolas, uso de fertilizantes, pesticidas e diversas outras substâncias químicas, utilização de águas subterrâneas, aterros de áreas alagadas, produção de lixo (HINRICHS; KLEINBACH; DOS REIS; 2014).

Um dos efeitos da ação antropogênica que tem sido objeto de estudos é o aumento da temperatura do planeta, difundido como aquecimento global. Estudos mostram que a temperatura tem aumentado nos últimos anos e que estaria trazendo como consequências, mudanças climáticas que resultam em secas, desertificação de áreas, excesso de chuvas, derretimento de geleiras e outros (BRAGA *et al.*, 2005).

Dentre as causas do aumento da temperatura está o desequilíbrio que vem sofrendo a camada de ozônio (O_3). Com a diminuição da concentração desta camada, em função do uso de aerossóis e combustíveis fósseis, ocorre maior passagem de raios infravermelhos emitidos pelo sol para a Terra (BAIRD e CANN, 2011).

Por outro lado, o aumento da concentração de CO_2 emitido para a atmosfera, principalmente pela queima de combustíveis fósseis, é o principal agente do efeito estufa. O acúmulo de carbono na paisagem terrena ocorreu ao longo de milhares de anos. A ação do homem utilizando-o por meio da combustão devolve-o rapidamente e em grande escala à atmosfera, podendo trazer consequências graves para a atual biosfera terrestre (TEIXEIRA *et al.*, 2009).

Diversas ações governamentais, intragovernamentais e não governamentais têm sido realizados na busca de soluções para conhecer, mensurar e propor ações tanto para frear as emissões, quanto promover a captura do carbono já lançado na atmosfera, mitigando seus impactos sobre o meio ambiente (IPCC, 2006).

Em um destes levantamentos feito pelo IPCC (2014), foram apontados os setores que mais utilizam combustíveis fósseis e emitem GEE. Nesta classificação, àqueles setores ligados a geração de energia elétrica e aquecimento ficaram em primeiro lugar, seguidos pela agricultura, silvicultura e outros usos da terra, tendo na sequência, o setor industrial.

No setor industrial, destaca-se a indústria de transformação, em que as características das matérias primas, aliadas ao consumo de energia resultam em emissões de gases de efeito estufa (ROY *et al.*, 2008).

Dentre as indústrias de transformação está a indústria alimentícia que é grande consumidora de energia (ROY *et al.*, 2008). De acordo com a *Food and Agriculture Organization* (FAO, órgão das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação), o setor atualmente consome, direta ou indiretamente, cerca de 30% do total da energia mundial (DALLEMAND *et al.*, 2015).

A cadeia produtiva das indústrias alimentícias engloba os principais setores apontados pelo IPCC como maiores emissores de GEE, pois nestes, há consumo de energia, há uso da terra para cultivo e há processamento das matérias primas pelas indústrias.

Dos vários alimentos produzidos por esta cadeia está o chocolate. As empresas que o fabricam, movimentaram em 2015 cerca de US\$ 276 bilhões comercializando cerca de 1,7 milhões de toneladas (SQUICCIARINI e SWINNEN, 2016). No Brasil, a cadeia produtiva do cacau-chocolate representa um faturamento total no mercado de US\$ 4,7 bilhões (PWC, 2012).

1.1. JUSTIFICATIVA

De uma forma geral, as empresas vêm recebendo pressões da sociedade, tanto na forma de cumprimento às leis quanto na forma de reputação no mercado para uma conduta sustentável de suas atividades.

A constante busca por sistemas produtivos mais eficientes, guiados por métricas de desempenho financeiro, da saúde dos colaboradores, da segurança ocupacional, entre outros, deve ser também empregada no consumo de energia, não somente visando sua melhor utilização, mas, notavelmente se esta utiliza-se de recursos naturais finitos, como os combustíveis fósseis.

Sendo a indústria alimentícia uma consumidora de energia que a aplica para a produção, conservação e a distribuição de alimentos, é estratégico o estudo de suas atividades e quanto contribuem nas emissões de CO₂ para a atmosfera.

Portanto, justifica-se o estudo de cadeias na qual possam apresentar processos que buscam eficiência no consumo de energia e apresentem balanço positivo de CO₂, com sequestros maiores que suas emissões, evidenciando assim, cadeias produtivas sustentáveis.

1.2. QUESTÕES DE PESQUISA

As principais questões a serem respondidas são:

- 1) Como é o balanço de massa do chocolate e qual o consumo de energia elétrica desde a entrada de matéria-prima na indústria até a confecção de um tablete?
- 2) Com relação à emissão e sequestro do CO₂, qual é o resultado deste balanço na cadeia produtiva do chocolate, considerando desde o plantio do cacaueteiro, o processamento das amêndoas até o momento em que o chocolate é produzido?

1.3. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo geral avaliar a cadeia produtiva do chocolate, com relação ao balanço de massa, o consumo de energia elétrica e o correspondente balanço entre emissão e captura de CO₂.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Utilizar os conceitos da ACV – Avaliação do Ciclo de Vida, para elaborar o fluxograma básico do processo de produção do chocolate, desde a obtenção da matéria prima até o seu processamento industrial;
- b) Elaborar o balanço de massa do processo de produção do chocolate;
- c) Elaborar o balanço de energia do processo de produção do chocolate;
- d) A partir dos balanços de massa e de energia elétrica, elaborar o balanço de CO₂, compreendendo a emissão e a captura nas diversas fases.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é apresentada a revisão de literatura, em que foram levantados os principais tópicos do tema em estudo nas diversas fontes de pesquisa para dar sustentação à dissertação.

2.1. O CLIMA DA TERRA

O planeta Terra consiste de um sistema fechado, que se divide em 4 sistemas naturais: um invólucro gasoso denominado atmosfera, uma camada superficial chamada litosfera, um conjunto de partes líquidas conhecida como hidrosfera e a biosfera, que corresponde ao desenvolvimento e a presença da vida nestes sistemas. Todos eles estão interligados, do ponto de vista da química, física e da história, desde os primórdios evolutivos do planeta (TEIXEIRA *et al.*, 2009).

Na atmosfera da Terra há presença de vários gases que estão retidos próximos à sua superfície em virtude da atração gravitacional. É possível encontrar próximo ao orbe, cerca de 85% dos gases presentes na massa total da atmosfera; contudo, à medida que se analisa-a verticalmente, a concentração de gases torna-se rarefeita. A figura 1 apresenta a estrutura física da atmosfera terrestre em função da temperatura e da altitude com suas divisões. Apesar de não ser possível visualizar os limites entre estas divisões, a diferença de pressão das camadas gasosas indicam estas fronteiras (AGUADO e BURT, 2004).

A atmosfera é composta, em dados aproximados, numa altitude de até 90 Km, de nitrogênio diatômico - N₂ (78% das moléculas), oxigênio diatômico - O₂ (cerca de 21%), argônio – Ar (cerca de 1%), dióxido de carbono – CO₂ (cerca de 0,04%), vapor d'água (em presença sempre variável) e de diversos outros gases em quantidades menores. Estes elementos vêm interagindo há bilhões de anos, movidos principalmente pela energia emitida pelo sol (BRASSEUR; ORLANDO; TYNDALL; 1999).

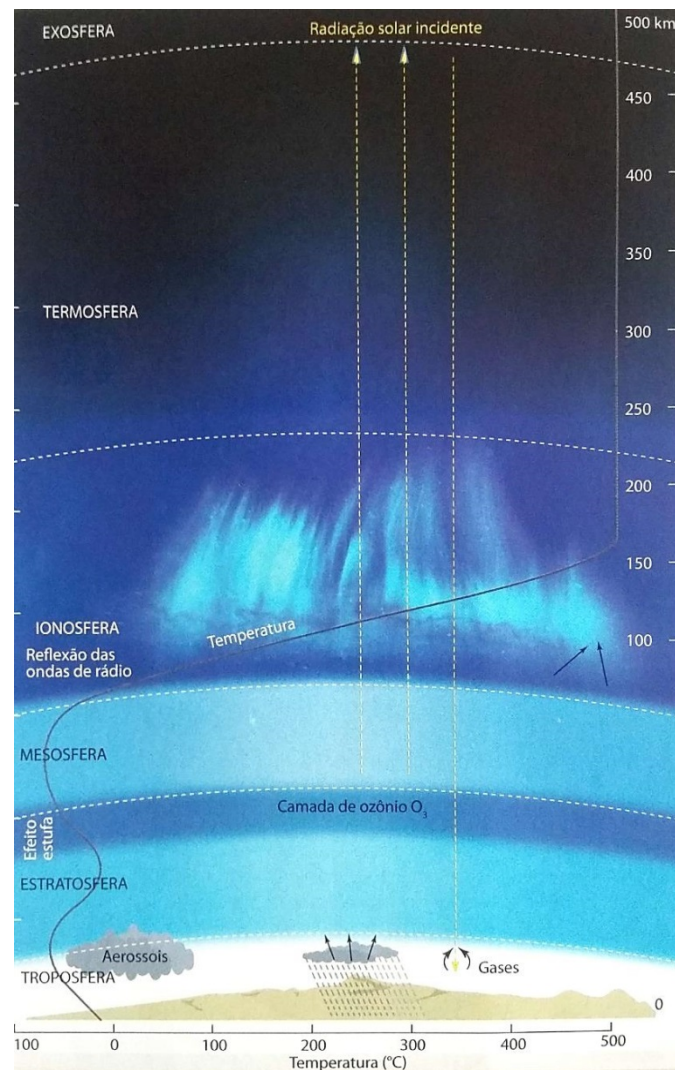


Figura 1. Estrutura da atmosfera em função da temperatura e da altitude.

Fonte: Teixeira *et al.* (2009).

As energias luminosas provenientes do sol apresentam comprimentos de ondas variadas (tabela 1). Por sua vez, cada substância na natureza tem uma tendência em absorver luz em um dado comprimento de onda devido às diferenças nos níveis de energia dos seus elétrons. Desta relação entre a absorção de luz por moléculas e a sua energização (ativação), ocorrem reações químicas importantes na atmosfera. Dentre as principais reações químicas, destaca-se o caso do oxigênio (O_2) que não absorve luz do espectro visível (400 a 750 nm) de modo significativo, mas absorve alguns tipos de luz ultravioleta (UV) com comprimentos de ondas entre 50 e 400 nm (BAIRD e CANN, 2011).

Tabela 1. Uma parcela do espectro eletromagnético.

Comprimento de onda (nm)	Faixa principal	Intervalo do comprimento (nm)	Subfaixa
< 50	Raios X	---	---
50	Ultravioleta	200	UV - C
~		280	UV - B
< 400		320	UV - A
400	Visível	400	Violeta
~			~
750		750	Vermelho
750 >	Infravermelho	4.000	Infravermelho
		100.000	térmico

Fonte: Baird e Cann (2011)

A luz solar UV que chega a Terra com determinados comprimentos de onda são atenuadas acima da estratosfera pelo O_2 e mais alguns outros constituintes. Há uma remanescente luz solar que é atenuada na própria estratosfera pelas moléculas do O_2 (que filtram a maior parte da luz UV solar 120 nm à 200 nm e protegem nossa pele, olhos e demais danos) e uma grande concentração de ozônio (O_3). A estratosfera dos dias atuais, em sua parte superior, apresenta uma grande concentração de ozônio (O_3) originado em virtude da radiação solar intensa que separa o oxigênio O_2 em radicais livres O^0 que podem recombinar-se com outros O_2 para formar O_3 . Este mesmo ozônio também se decompõe ao receber raios ultravioletas oriundos da superfície da Terra, mantendo equilíbrio entre produção e decomposição (BRAGA *et al.*, 2005; BAIRD e CANN, 2011).

A faixa de concentração do O_3 na parte superior da estratosfera ficou conhecida como camada de ozônio e é considerado um escudo natural da Terra por atenuar os raios ultravioletas (UV's). É também por esta razão que uma redução significativa na quantidade de ozônio (depleção), comumente chamado de "buraco na camada de ozônio", é motivo de tanta preocupação entre comunidades científicas e autoridades, em função dos danos que causam à vida na Terra (TEIXEIRA *et al.*, 2009).

Além da forma natural de depleção do ozônio, alguns gases antropogênicos, quando atingem a estratosfera, aumentam o potencial de destruição do O_3 . Dentre estes gases, encontram-se o cloro, flúor e o carbono, que são o resultado no uso de

compostos comumente chamados de CFC e muito utilizados principalmente na década de 1980 em aerossóis e refrigeradores. Quanto maior a depleção do O_3 maiores serão os efeitos prejudiciais a muitas formas de vida no planeta, inclusive a espécie humana (BRASSEUR; ORLANDO; TYNDALL; 1999).

Não sendo o O_3 totalmente eficiente para os diversos comprimentos de ondas do sol, uma parte destas atingem a troposfera. Do total de luz que o planeta Terra recebe, considerando todos os comprimentos de ondas emitidos pelo sol, cerca de 50% são absorvidos pelos corpos d'água, pelo solo, vegetação, prédios, como mostra a figura 2. Mais de 20% da luz que chega são absorvidos por gotículas de água presentes no ar e nas nuvens, moléculas de gases (ozônio estratosférico, oxigênio diatômico e dióxido de carbono) e vapor de água. Os 30% restantes de luz solar são refletidos de volta para o espaço, cujo fenômeno é chamado de albedo (BAIRD e CANN, 2011).

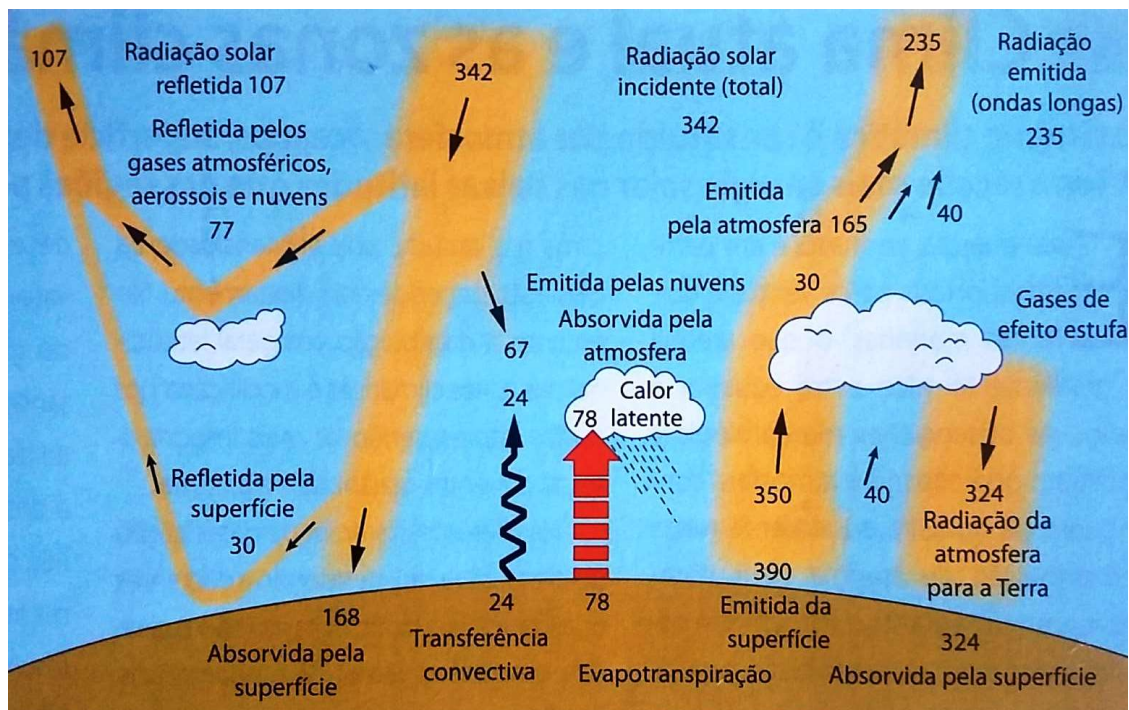


Figura 2. Balanço energético da atmosfera (em W/m^2)
Fonte: adaptado de IPCC (2007)

A intensidade de radiação solar que a Terra recebe tem formato de ondas curtas, enquanto que a reemissão desta radiação tem comprimento de onda mais longo. A energia reemitida não é luz visível nem UV porque a Terra não é quente o suficiente para emitir nesta faixa. Assim, para que sua temperatura se mantenha constante, a

quantidade de energia que a superfície do planeta absorve e a quantidade que ele libera devem ser iguais. Relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), informam que, considerando o dia e a noite, todas as estações do ano, em todas as latitudes e longitudes, a média total é de 342 W/m^2 emitidos pela luz solar, sendo 235 W/m^2 absorvidos pela atmosfera e superfície da Terra (resumidas na figura 2). Portanto, para manutenção da temperatura média atual de $+15^\circ\text{C}$, os mesmos 235 W/m^2 devem ser reemitidos em igual valor para o espaço (LEAN; BEER; BRADLEY; 1995 ; IPCC, 1996; BAIRD e CANN, 2011).

Da mesma forma que a irradiação solar direta tem uma parte absorvida pelos gases presentes na estratosfera, o mesmo efeito se repete na reirradiação emitida pelo planeta, isto é, há absorção da luz infravermelha a comprimentos de ondas característicos. Há dois importantes fenômenos a considerar aqui: o primeiro é que, os gases já citados (principalmente vapor d'água e CO_2), presentes na estratosfera, absorvem o fóton infravermelho e são novamente reemitidos em direções aleatórias. O segundo fenômeno é que a energia absorvida dos fótons infravermelhos é redistribuída como calor entre as moléculas vizinhas, aumentando a temperatura do ar na região da molécula absorvedora (IPCC, 1996). A figura 3 resume estes acontecimentos.

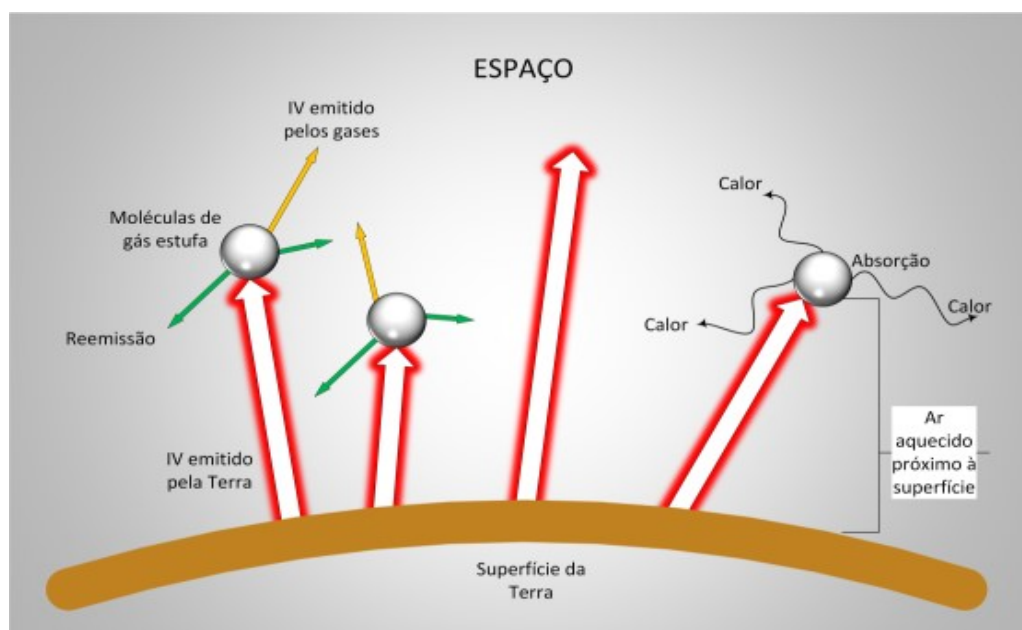


Figura 3. Efeito estufa, emissão e reemissão de fótons infravermelhos
Fonte: adaptado de Baird e Cann (2011).

Esta interceptação pelos constituintes atmosféricos dos fótons infravermelhos emitidos pela Terra e a consequente distribuição de calor, que aumenta a temperatura da troposfera, é chamado de efeito estufa. Este é um fenômeno natural que mantém a temperatura média do planeta em $+15^{\circ}\text{C}$, ao invés de aproximadamente -18°C caso não houvesse esta absorção (BRAGA *et al.*, 2005).

De forma natural a presença dos GEE na atmosfera terrestre bloqueiam parte da radiação infravermelha. O vapor d'água, o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e ozônio (O_3), entre outros gases, são essenciais para a manutenção da vida, pois, sem eles, a Terra seria mais fria. Portanto, o clima global é regulado pelo influxo de energia solar na atmosfera e a emissão da radiação infravermelha da Terra (IPCC, 2013).

Na figura 4 é possível observar que houve, ao longo de bilhões de anos, diferentes eras geológicas bem como vários períodos glaciais.

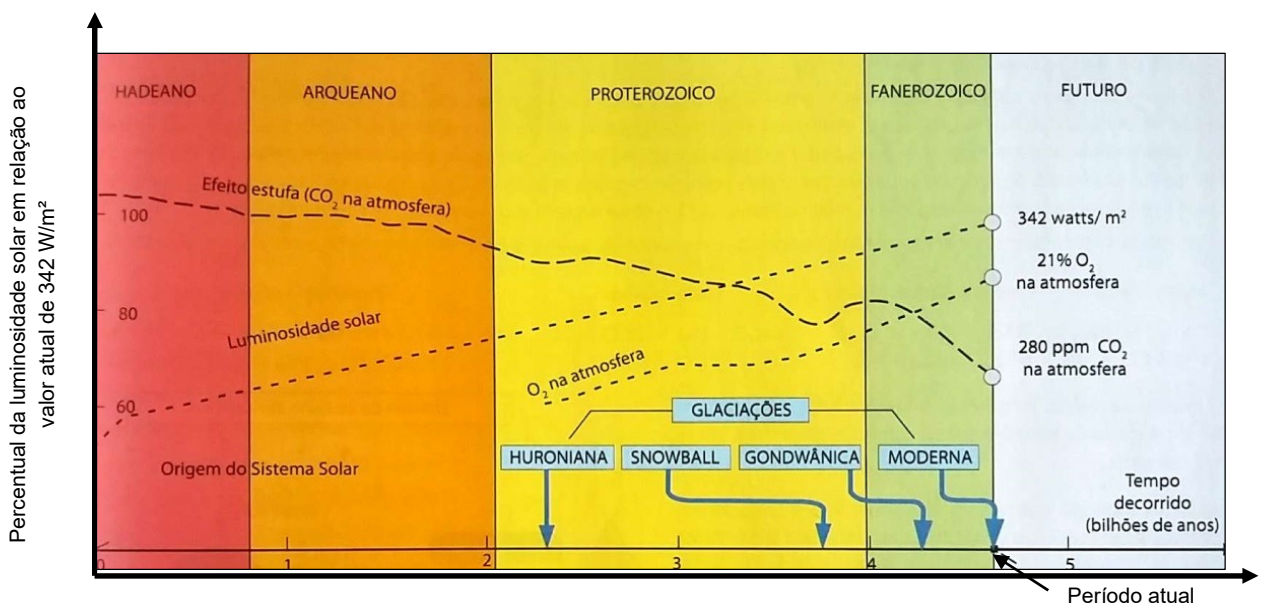


Figura 4. Aumento da luminosidade solar, surgimento do oxigênio e a diminuição do CO_2 nos vários períodos geológicos. **Fonte:** adaptado de Teixeira *et al.* (2009).

Nos primórdios da vida na Terra, a intensidade da radiação solar era inferior a dos dias atuais. Por outro lado, havia maior quantidade de CO_2 na atmosfera que, numa ação direta do efeito estufa, gerava a manutenção do calor em temperaturas amenas ou até mais altas que as atuais. Como o planeta Terra consiste de um sistema fechado, o CO_2 que foi reduzido da atmosfera não desapareceu

simplesmente, este foi sendo incorporado nos oceanos, na formação de carbonato de cálcio (calcários), nos solos e nas vegetações pela sua dissolução, ou seja, pelo ciclo do carbono. É por isto que, apesar do fato da radiação solar ter aumentado, este foi compensado pela dissolução de CO₂, estabilizando as temperaturas como amenas ou maior que as atuais sem comprometer a presença da água, essencial para a formação da vida (TEIXEIRA *et al.*, 2009; AGUADO e BURT, 2004).

O estudo da história geológica da Terra exige conhecimento de transformações globais passadas, assim como o comportamento passado do ciclo do carbono. Este entendimento não pode ser isolado do contexto dos acontecimentos presentes na tentativa de se projetar como será o futuro (SUNDQUIST e VISSER, 2003).

2.2. O CICLO DO CARBONO

A atmosfera sempre teve papel preponderante nas grandes transformações que ocorreram na superfície da Terra. O lento processo de deposição do CO₂ da atmosfera nos vários reservatórios terrestres ocorreu ao longo de bilhões de anos e foi possível por conta de inúmeros intemperismos químicos. Portanto, há uma grande quantidade de carbono compondo as estruturas da litosfera terrestre, outra quantidade dispersa na atmosfera (contribuindo com a formação do efeito estufa natural) e ainda, uma quantidade em fluxo dinâmico com os vários sistemas existentes que permanecem interagindo entre si. Toda esta fixação, fluxos e transferências relacionados ao carbono, ocorridos entre os vários reservatórios, são chamados de ciclo do carbono e contemplam uma série de transformações em torno da atmosfera, oceanos, plantas, animais, solos, rochas e sedimentos. Dentre os reservatórios, o menor é o da biosfera, seguido da atmosfera. Por sua vez, a crosta terrestre (litosfera) é a que mais armazena principalmente sob forma de rochas carbonáticas, seguida dos oceanos (hidrosfera) sob as formas de íons bicarbonatados e íons carbonatados (TEIXEIRA *et al.*, 2009).

As transferências dentro do ciclo do carbono podem ocorrer de forma muito rápida, a todo o momento, tanto quanto pode levar milênios para se fixar. Essa dinâmica é resumida na figura 5 em que é apresentado o ciclo natural do carbono sem a

influência das atividades humanas, resumindo os reservatórios, os fluxos anuais e o tempo estimado de formação de cada um (SUNDQUIST e VISSER, 2003).

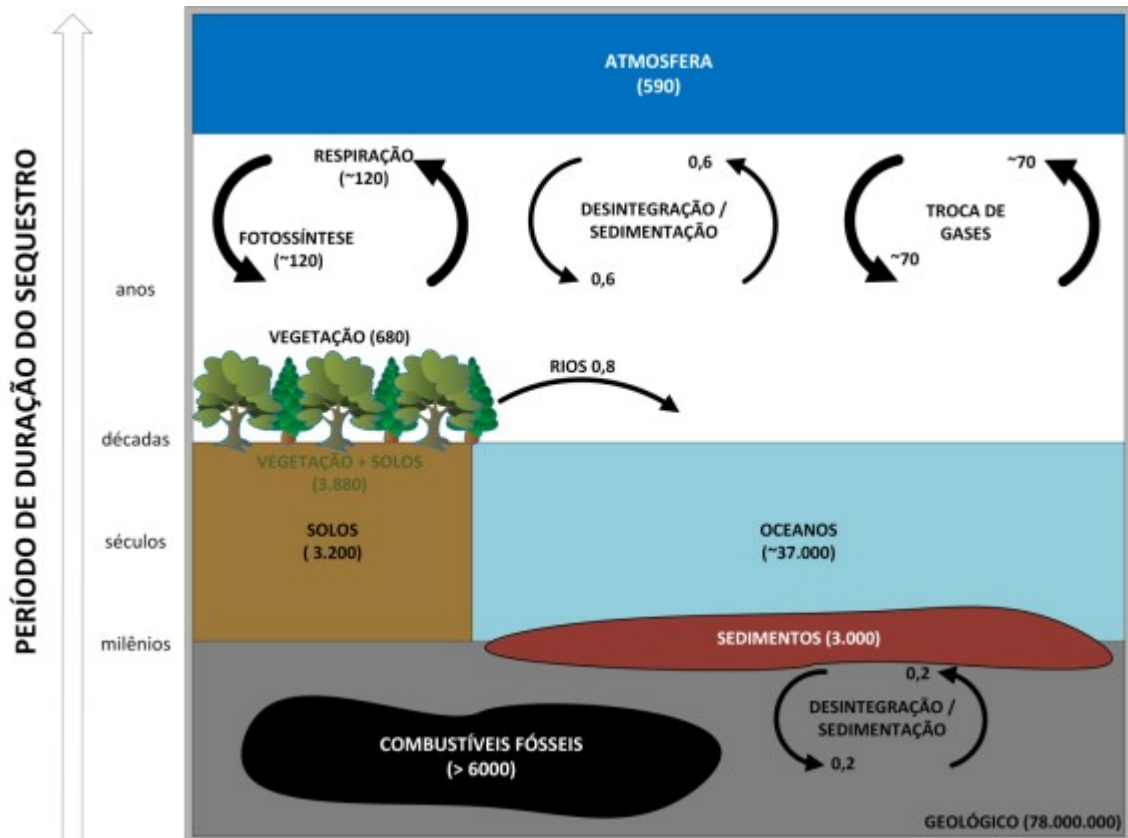


Figura 5. Ciclo natural do carbono e tamanho dos reservatórios (em Gt).
Setas representam fluxos anuais (Gt/ano).
Fonte: adaptado de Mcpherson e Sundquist (2009).

Da mesma maneira que o carbono entra na atmosfera como dióxido (CO_2), emanado pelos vulcões, pela respiração dos organismos vivos, por processos de oxidação da matéria orgânica e pela queima dos combustíveis fósseis, ocorre o processo reverso, isto é, de retirada do CO_2 da atmosfera. Este se dá pelo intemperismo químico das rochas (silicatos), pela dissolução nas águas, na fotossíntese e na alteração dos basaltos dos fundos dos oceanos. Há neste ciclo, portanto, um certo equilíbrio entre estes vários reservatórios que propiciam a manutenção da temperatura média da Terra. O fato é que quando a introdução de CO_2 na atmosfera é muito rápida, por exemplo, na queima de combustíveis fósseis, em termos geológicos, o sistema não tem tempo de se adaptar, o que acarreta na intensificação

do efeito estufa e no aumento global de temperatura (TEIXEIRA *et. al.*, 2009; SUNDQUIST e VISSER, 2003; BAIRD e CANN, 2011).

O CO₂ é uma molécula estável em condição ambiente. Na queima de combustíveis fósseis, o carbono e o hidrogênio durante a combustão são convertidos principalmente em dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O), liberando energia química no combustível para produzir energia mecânica, para gerar eletricidade ou para o transporte (IPCC, 2006).

O CO₂ é uma substância que também pode ser usada em diversos estados: desde sólido (gelo seco), líquido e na forma de gases para diversas aplicações industriais, tais como carbonatação de bebidas, extintores de incêndio, soldagem e produção de compostos químicos, inclusive fertilizantes, borrachas vulcanizadas, espumas de poliuretano, entre outros (RAVAGNANI, 2007).

2.2.1. AS ATIVIDADES HUMANAS SOBRE O CICLO DO CARBONO

Sejam as plantas, que se utilizam da energia do sol para realizar a fotossíntese, quanto para o homem sobreviver consumindo as energias presentes nos alimentos, o fato é que todo ser vivo consome energia. Para tal, em última instância, têm-se duas fontes de energia: aquela proveniente do sol e que chega continuamente à superfície terrena ou àquelas provenientes dos recursos extraídos do próprio planeta (TEIXEIRA *et al.*, 2009).

Além de energia para sua própria conveniência, o homem, com conhecimento e desenvolvimento das ciências, iniciou o caminho do progresso tecnológico. Essa fase de transição em que, dentre outras coisas, produtos deixaram de ser fabricados de forma artesanal para um processo de manufatura em larga escala, o domínio de técnicas agrícolas e o advento de máquinas à combustão, acelerou o processo de busca por novas formas de energia, principalmente a partir do século XVIII com a Revolução Industrial (BRASSEUR; ORLANDO; TYNDALL; 1999 ; SACHS, 2007).

Como as novas invenções careciam de energia para seu funcionamento, vários combustíveis com diferentes potenciais caloríficos foram sendo descobertos e comercializados. Cada qual originado de diferentes fontes da natureza foram

classificados segundo o seu grau de renovação natural, numa determinada escala de tempo compatível com a expectativa de vida do ser humano (HINRICHS; KLEINBACH; DOS REIS; 2014).

São duas as nomenclaturas utilizadas para classificá-las: renováveis e não renováveis. As energias provenientes de recursos renováveis são àquelas cujo combustíveis estão disponíveis na Terra e são naturalmente reabastecidos, como a biomassa, a hidroeletricidade, a energia solar, a eólica e a energia provocada pelas marés. De forma oposta, denominou-se energias de fontes não renováveis, aqueles combustíveis que estão disponíveis na Terra e foram formados em milhares ou milhões de anos em quantidades finitas, se esgotando a medida que vão sendo utilizados como os combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural) e a energia nuclear. Esta conceituação é importante para se entender que, com a extração de combustíveis fósseis, extrai-se também uma grande quantidade de carbono aprisionado por processos geológicos na formação do planeta, muitas vezes na forma de gás junto às jazidas de carvão ou dos poços petrolíferos. Além disso, depois de refinados e preparados para o consumidor, a combustão destes, despejam o dióxido de carbono para a atmosfera (BAIRD e CANN, 2011).

A figura 6 apresenta as variações na concentração do CO₂ na atmosfera, estimados durante os últimos 400.000 anos e o crescimento acentuado a partir da década de 1950, com sua expansão após a ocorrência da Segunda Guerra Mundial. O CO₂ absorve a energia de comprimento de onda mais longa ou refletem-na de volta para a superfície. Como um cobertor, essas concentrações minuciosas de GEE prendem a energia irradiada, convertendo-a em calor, criando o mesmo efeito que os vidros em uma estufa (que permite que a luz solar atravesse e parte do calor fique armazenado). Isto explica a origem do nome "efeito de estufa" (DHILLON e WUEHLISCH, 2013).

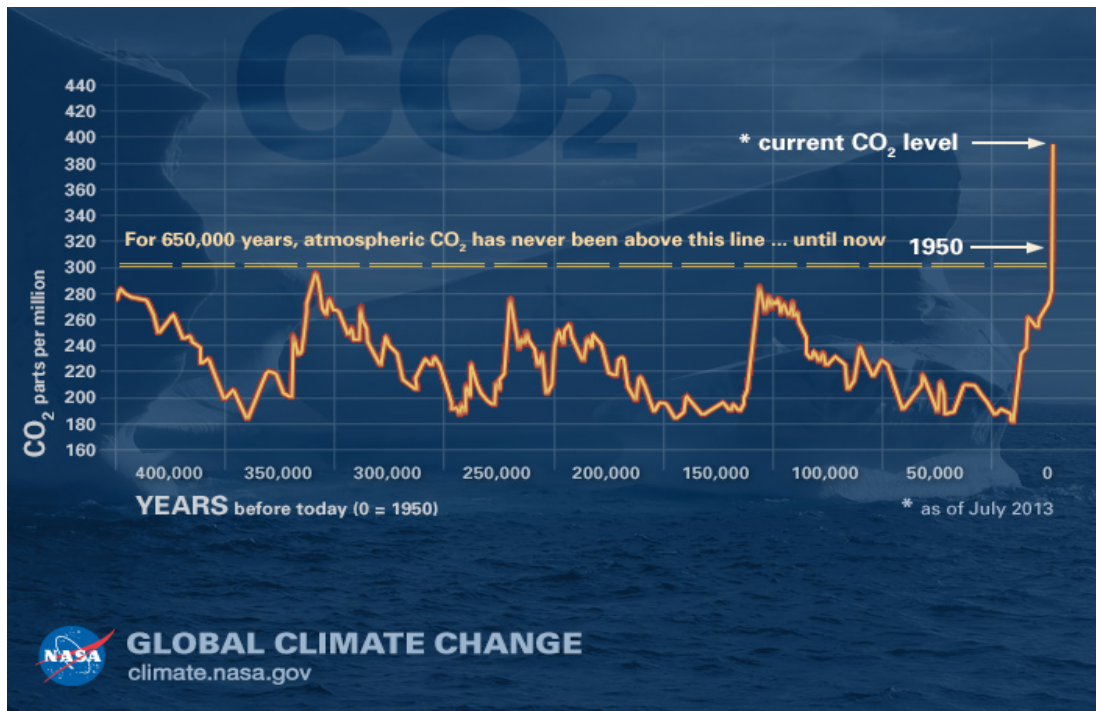


Figura 6. Níveis de concentração de CO₂ nos últimos 400.000 anos.
Fonte: Agência Espacial Norte Americana (NASA, 2016).

O GEE mais importante é o vapor de água. Sua concentração na atmosfera não é influenciada por emissões diretas relacionada a atividades antropogênicas, mas, no entanto, é ele quem amplifica qualquer aquecimento da atmosfera. Isso ocorre porque a atmosfera mantém mais vapor de água à medida que a litosfera se aquece. Enquanto isso, o CO₂ contribui com a maior proporção do efeito estufa devido sua maior concentração na atmosfera, seguido pelos clorofluorcarbonos (CFC), que estão presentes em baixas concentrações. O aumento da concentração de CO₂ na atmosfera contribui com mais da metade do aumento do efeito estufa, sendo o restante principalmente devido a aumentos de óxidos nitrosos, halocarbonos e metano (DHILLON e WUEHLISCH, 2013).

Segundo Sundquist e Visser (2003), as atividades humanas provocam alterações no ciclo do carbono, como a agricultura, a silvicultura e outras formas de uso da terra, que mudam a característica da cobertura terrestre e promovem o desmatamento e a degradação do solo. Estas atividades, aliadas a queima de combustíveis fósseis, alteram a dinâmica da movimentação, fixação e produção de CO₂. Embora algumas atividades humanas possam contribuir para a redução ou eliminação do carbono da atmosfera, seu efeito líquido em geral resulta no aumento da liberação de CO₂ para a atmosfera.

2.2.2. EMISSÕES ANTROPOGÊNICAS POR SETOR

Os GEE têm efeitos distintos no aquecimento do planeta e, portanto, para haver uma comparação entre as diferentes emissões dos diversos gases, estes são contabilizados em uma unidade comum, o tCO₂eq (toneladas de dióxido de carbono equivalente). O CO₂ é a substância que mais tem sido emitida para a atmosfera, numa ação antropogênica direta (MIRANDA, 2012).

Dados mundiais publicados pelo IPCC (2014) e representados na figura 7, mostram que a geração de eletricidade e aquecimento são os setores que mais contribuem com as emissões antropogênicas dos GEE nos inventários elaborados, seguido das emissões relacionadas à agricultura, silvicultura e outros usos do solo, aparecendo na sequência, as indústrias.

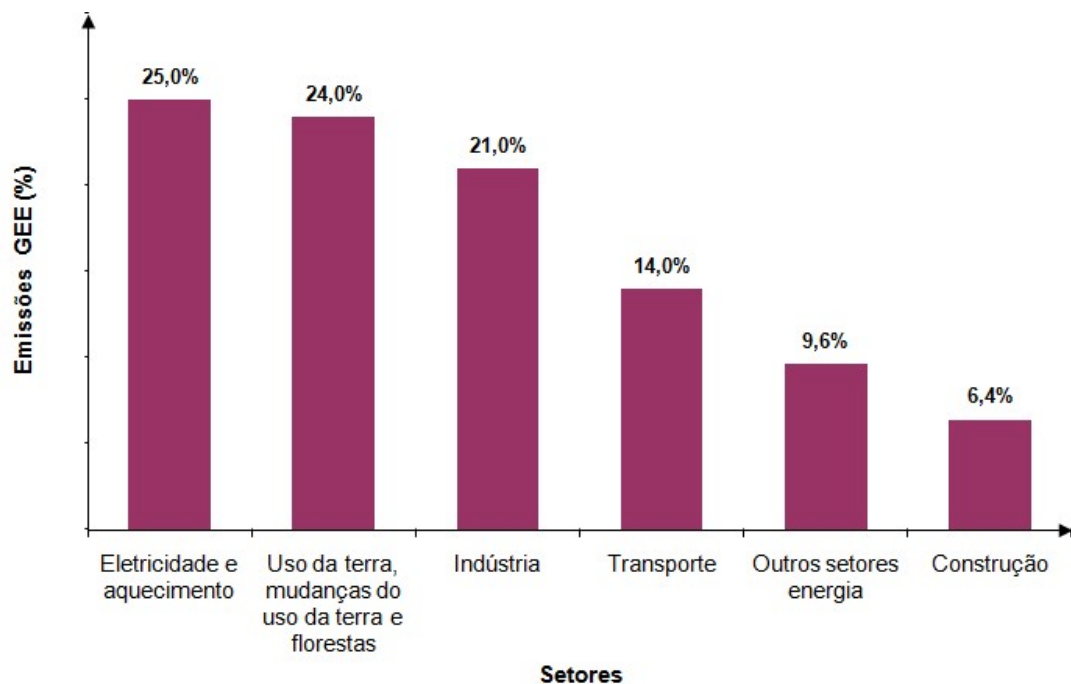


Figura 7. Emissões antropogênicas no mundo por setor em 2010 (% do total de 49 GtCO₂eq).

Fonte: adaptado de IPCC (2014)

2.3. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

O relatório anual Balanço Energético Nacional (BEN), elaborado no Brasil pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), aponta que a produção mundial de energia elétrica por fonte em 2014 estava dividida assim, em números aproximados, 40%

carvão mineral, 21% gás natural, 16% hidráulica, 10% nuclear e as demais pouco mais de 10% (EPE, 2017).

Em termos de comparação, as diversas tecnologias utilizadas para a geração de eletricidade no Brasil ficou assim dividida, no ano de 2016, em números aproximados, 68% de fonte hidráulica, 9% gás natural, 8% biomassa, 5% eólica, 4% carvão mineral, 2% nuclear sendo que, as demais, são geradas por derivados de petróleo e energia solar. Estes valores correspondem a um resultado com pouco mais de 80% de fontes renováveis ofertados no período no país (EPE, 2017).

No caso brasileiro, todas estas várias instalações são coordenadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), órgão responsável pela gestão e controle das operações nas instalações de geração e transmissão de energia elétrica. Todo este potencial instalado é dividido em dois sistemas: sistemas isolados e Sistema Interligado Nacional (SIN).

Dentro do segmento industrial brasileiro, os maiores consumidores de energia são as indústrias de alimentos e bebidas (25,4%), ferro gusa e aço (19,5%) e a de papel e celulose (13,9%), que juntas provêm uma importante parcela da riqueza da nação (EPE, 2016).

A quantificação das emissões de CO₂ referente à geração de energia no Brasil está a cargo do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) que divulga mensalmente o fator de emissão de CO₂. Este fator é calculado com base na matriz energética utilizada no período pelo SIN para geração e distribuição de energia elétrica. Este valor pode aumentar ou diminuir conforme a maior ou menor utilização de combustíveis fósseis para geração de energia na matriz brasileira. Para o ano de 2016, a média foi de 0,0817 gCO₂/kWh. A tabela 2 resume os dados desse período.

Tabela 2. Média mensal e média anual do fator de emissão de CO₂ no Brasil em 2016 do setor elétrico.

												gCO ₂ /kWh	
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média do ano	
0,0960	0,0815	0,0710	0,0757	0,0701	0,0760	0,0725	0,0836	0,0897	0,0925	0,1002	0,0714	0,0817	

Fonte: MCTI (2017)

2.4. O SEQUESTRO DO CARBONO

Segundo o IPCC (2006), a captura e o armazenamento de dióxido de carbono (do acrônimo em inglês CCS, *carbon capture and storage*) é uma opção no portfólio de ações que podem ser usadas para reduzir a presença de CO₂ na atmosfera bem como as emissões de GEE provenientes do uso contínuo de combustíveis fósseis.

O termo "sequestro de carbono" tem sido aplicado na literatura científica aos dois processos, naturais e deliberados, que removem o CO₂ da atmosfera ou de outras fontes de emissões. Processos naturais de remoção do carbono ocorrem de forma espontânea na natureza seguindo o ritmo do ciclo natural do carbono. Essa retirada da atmosfera demanda um longo tempo para poder dar conta do incremento antropogênico do carbono e que, portanto, depende de ações referentes a redução imediata das emissões e mitigação deste componente já presente na atmosfera. Além do sequestro natural do carbono, existem processos deliberados, isto é, aqueles que, de certa forma, recebem uma ação para direcionar artificialmente o CO₂ retirado da atmosfera ou mesmo de um processo que o gerou para um estoque natural (SUNDQUIST e MCPHERSON, 2009).

Desse modo, todos os mecanismos possíveis devem ser considerados na possibilidade de reduzir o CO₂ atmosférico, desde o sequestro deliberado de carbono, passando pelo uso de combustíveis renováveis como fontes de energia, a maior eficiência dos processos e uma melhor conservação de energia (SUNDQUIST e MCPHERSON, 2009).

Uma das estratégias para sequestrar o carbono atmosférico consiste em aumentar a absorção natural em plantas e solos. Este mecanismo, também chamado de sequestro "biológico" ou "ecológico", além de retirar, pode compensar as emissões para a atmosfera por meio da armazenagem na biomassa, que corresponde a massa de matéria de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal (POTTER; KLOOSTER; GENOVESE; 2009).

O sequestro de carbono ocorre por meio da fotossíntese na qual as plantas captam CO₂ presentes na atmosfera e o utilizam no processo de incorporação no novo tecido vegetal, liberando oxigênio para o ambiente, como um subproduto (PEREIRA NETO, 2012).

Pela fotossíntese, as plantas produzem seus próprios alimentos (chamadas autotróficas) dependendo para tal, da intensidade luminosa, da temperatura, da concentração de CO₂, do teor de nitrogênio presente nas folhas e da umidade do solo (MARENCO MENDOZA e LOPES, 2005).

As plantas se constituem dessa forma, de grandes reservas de carbono e, com método adequado, é possível avaliar o estoque de carbono presente na biomassa das árvores (nos troncos, galhos, folhas, raízes) (figura 8). Isto implica na retirada de CO₂ da atmosfera, contribuindo para a mitigação do efeito estufa.

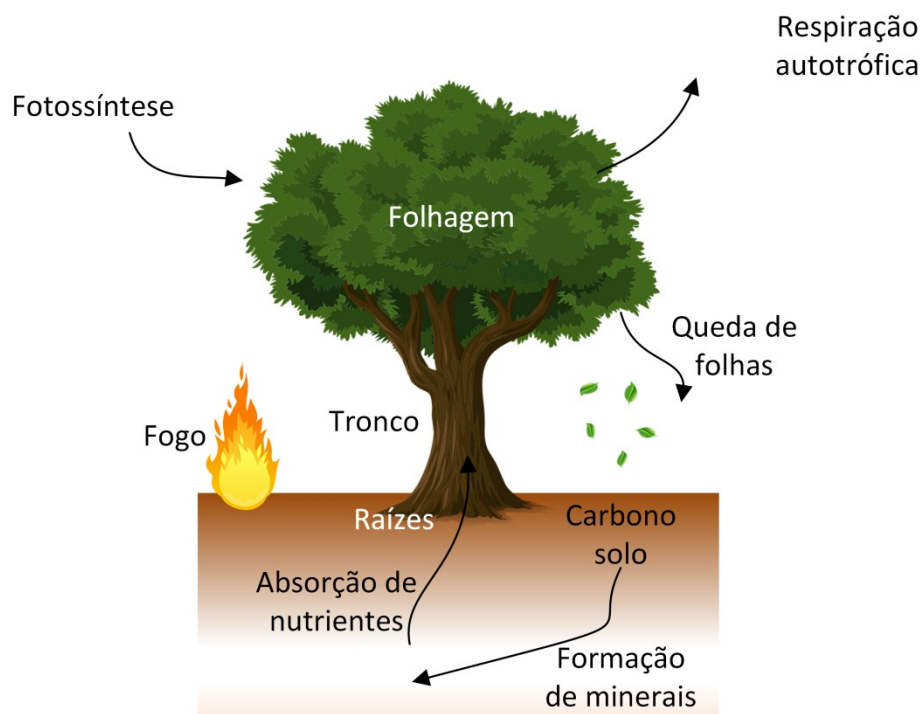


Figura 8. O ciclo do carbono natural em uma vegetação.

Fonte: adaptado de Bonan (2008).

Árvores, ao contrário de outras culturas anuais que morrem e se decompõem em curto espaço de tempo, são espécies de longa duração que desenvolvem uma biomassa, capturam quantidades de carbono ao longo de um ciclo de crescimento por muitas décadas. Por isso, um sistema florestal pode capturar e reter grandes volumes de carbono em longos períodos operando tanto como veículos para captação, quanto como reservatórios de carbono (SEDJO, 2001).

O armazenamento de carbono em biomassa pode ser incrementado por meio do plantio de novas florestas em terras onde, anteriormente, não eram florestas ou em terras antes devastadas. Além disso, o armazenamento de carbono em florestas manejadas pode ser potencializado com atividades e práticas que melhorem o adensamento das espécies em reflorestamento, aumentando por consequência, a densidade de carbono por unidade de área plantada (SUNDQUIST e MCPHERSON, 2009; SEDJO, 2001).

O sequestro de carbono também pode ser aprimorado por meio de manejos dos sistemas agroflorestais e em ambientes urbanos e suburbanos (silvicultura urbana). Em terras agrícolas, o armazenamento de carbono no solo pode ser aumentado por uma variedade de práticas, incluindo um aprimorado gerenciamento de resíduos das culturas, rotações de culturas, culturas que se utilizam de cobertura florestal, controle de erosão, gerenciamento de água e de nutrientes e maior utilização de sistemas de cultivo que requerem plantio mínimo ou sem preparo do solo. Como limitantes deste método de sequestro de carbono estão as taxas de crescimento da espécie e seu respectivo potencial de acumulação e a disponibilidade de terras (SUNDQUIST e MCPHERSON, 2009).

2.5. EFICÁCIA NO USO DOS RECURSOS NATURAIS E SUSTENTABILIDADE

O mundo emergiu da Segunda Guerra Mundial (1939 a 1945) dividido em dois blocos com viés econômicos distintos, o capitalismo ocidental e o socialismo soviético que, numa acirrada competição para desenvolver economicamente as nações que aderiam ao seu modelo, impulsionou o consumo e a consequente necessidade de produção de bens em larga escala, reduzindo preços e buscando novos mercados. Para suprir a demanda e manter os custos competitivos em escala global, a matriz energética mundial passou da biomassa para o carvão mineral até chegar ao petróleo e gás natural, com vantagens econômicas do petróleo e seus derivados. Apesar das vantagens econômicas, alguns aspectos perversos do ponto de vista da eficácia no uso da energia são característicos deste período. Um desperdício de energia (sobretudo no transporte), mas também no aquecimento e na climatização residencial (SACHS, 2007).

Chehebe (1997) destacou que depois da confirmação de que o petróleo não era um recurso renovável, foi gerada uma crise no início da década de 1970. Somados a alguns estudos de previsão de crescimento da população mundial em detrimento da demanda de recursos naturais e energéticos realizados por Meadows *et al.* (1972), os países desenvolvidos foram alertados para a necessidade de se colocar em prática uma melhor eficácia na utilização dos recursos naturais e no consumo de combustíveis para geração de energia, sublinhando-se a fragilidade do modelo de desenvolvimento econômico utilizado.

Após essa conscientização, emergiu o conceito de sustentabilidade. Em 1987, a Comissão Mundial das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, comumente conhecida como a Comissão *Brundtland*, apresentou em seu relatório “*Our common future*” a primeira definição de desenvolvimento sustentável: “*aquela que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações em satisfazer às suas próprias necessidades*” (VASTOLA, 2015).

Mais tarde surgiram outras definições amplas de sustentabilidade, uma delas popularizadas por Elkington (1997) no livro *Cannibals with Forks: the Triple Bottom Line of 21st Century Business* em que diz que “a sustentabilidade está ligada a três dimensões: econômica, ambiental e social”, em um conceito que mais tarde ficou conhecido como sendo o *Triple Bottom Line* (TBL). Este conceito expandiu o modelo tradicional de fazer negócios (somente de caráter econômico) e acrescentou as dimensões ambiental que, entre outras coisas, avalia a capacidade para suportar níveis de taxas de extração de recursos naturais, e a social, que está relacionada à capacidade de funcionar em um certo nível de bem-estar social e harmonia entre os envolvidos.

Assim, estes esforços chegaram à indústria que teve de desenvolver seus próprios sistemas de gerenciamento ambiental. Publicações de uma série de normas da *International Standardization Organizations* (da sigla ISO, Organização Internacional para a Padronização) começou a se disseminar e ganhar força entre as empresas (CHEHEBE, 1997).

2.6. A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Na comunidade científica é comum ser citado como sendo uma das primeiras aplicações da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), um estudo encomendado pela *Coca Cola Company* em 1965 ao MRI (*Midwest Research Institute*) com o propósito de comparar possíveis materiais a serem utilizados na embalagem de seus produtos (no caso, vidro ou material polimérico). Nesse estudo, foram levados em consideração o consumo de matérias-primas, a utilização de recursos energéticos e a geração de resíduos de cada uma das opções em materiais (CURRAN, 1996).

Por se tratar de uma empresa multinacional com grande alcance global esse estudo foi muito difundido, não somente pela sua importância em si, mas também por se tratar de uma grande corporação que iniciava com pioneirismo uma preocupação com as atividades relacionadas aos seus processos produtivos (RAMIREZ, 2009). Depois de divulgado o método, o MRI continuou realizando estudos similares tornando-se referência em “análises de energia” como eram conhecidos os relatórios na época, entre eles o REPA (*Resource Environmental Profile Analysis*).

Alguns estudos similares também foram feitos a partir da década de 1970 em vários países europeus como Inglaterra, Suécia e Alemanha (CHEHEBE, 1997; BOUSTEAD, 1996). Estes relatórios compreendiam a criação de fluxogramas de processos em que eram estudados os balanços de massas e de energia que, por conseguinte, provocavam a busca por dados referentes às matérias-primas e dos resíduos gerados em cada estágio.

Na segunda metade da década de 1980, aumentaram as discussões sobre meio ambiente e poluição. Esforços encabeçados pela norte-americana Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental - SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - UNEP (*United Nations Environment Programme*) fomentaram a discussão, a sistematização e a disseminação do conceito de Pensamento do Ciclo de Vida (*Life Thinking Assessment*) tanto para produtos quanto para processos. Esta maneira de pensar nos processos e nos produtos chamou a atenção das empresas privadas e da

Organização Internacional para a Normalização (ISO) que criou um comitê para uma possível sistematização (CHEHEBE, 1997).

Assim, em resposta à demanda mundial, a ISO, por meio do seu TC (*Technical Committee*) ISO/TC 207, responsável pela análise e implementação de sistemas de gestão padronizados internacionalmente, lançou em 1996 a série de normas ISO 14000 voltadas a sistemas de gerenciamento ambiental, enquanto que os produtos e serviços são destacados em outra série de normas, a ISO 14040. O estabelecimento destas normas criou padrões internacionais nas quais, organizações são auditadas por órgãos certificadores (CHEHEBE, 1997).

De acordo com Arvanitoyannis (2010) inicialmente, àqueles que se opuseram à ISO 14001 acreditavam que isso resultaria em poucos benefícios. As incertezas iniciais estavam relacionadas em entender se o não cumprimento dos regulamentos durante uma auditoria ISO poderia resultar em multas pecuniárias de agentes governamentais, o que gerava certa desconfiança. Porém, ao longo do tempo, a norma foi sendo compreendida, tornando-se uma ferramenta útil para gestão e boa governança das empresas.

Chehebe (1997) esclarece que o propósito dessas normas é fornecer às empresas ferramentas para a tomada de decisão bem como a avaliação de alternativas sobre métodos de manufatura. Elas podem também ser usadas para dar apoios às declarações de rótulos ambientais ou para selecionar indicadores ambientais.

A norma ISO 14040 (2006) cita em seu contexto que “o *aumento da conscientização, a importância da proteção ambiental e os possíveis impactos associados aos produtos fabricados e consumidos aumentaram o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender e enfrentar esses impactos. Uma das técnicas desenvolvidas para esse fim é a ACV*”.

Desta maneira, a ACV que já vinha sendo desenvolvido no ambiente acadêmico e por algumas instituições se estabelece como ferramenta também no Brasil por meio do CONMETRO (2010) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) incorporando as normas internacionais ao acervo nacional, como mostra a tabela 3. Desde 1994, a ABNT mantém um comitê com o objetivo de acompanhar e analisar os trabalhos desenvolvidos pelo comitê ISO/TC 207 e avaliar o impacto das normas

internacionais ambientais nas organizações brasileiras, elaborando assim as normas brasileiras correspondentes.

Em 2002, o UNEP e a SETAC se uniram para lançar a *Life Cycle Initiative*, uma parceria internacional para colocar em prática a ACV e promover a ferramenta. Conjuntamente, foram produzidos materiais de informação, apoio a fóruns de compartilhamento das melhores práticas e programas de treinamento em todas as partes do mundo, aumentando a qualidade e o alcance global dos indicadores assim como um conjunto de recomendações amplamente aceitas (CURRAN, 2006).

Tabela 3. As principais normas da série ABNT ISO 14000

Nº da norma ABNT ISO	Descrição	Última atualização
14001	Sistemas de gestão ambiental — Requisitos com orientações para uso	2015
14040	Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura	2009
14044	Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações	2014

Fonte: elaborado pelo autor.

Com o desenvolvimento de novas pesquisas e uma maior adesão das partes interessadas em aprimorar seus processos e produtos, o Brasil elaborou em 2016 um banco de dados chamado Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil) que abriga vários inventários, resultado de vários anos de pesquisas do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) (GUIA QUALIDATA, 2016).

2.6.1. DEFINIÇÃO CONCEITUAL DE ACV

Todos os produtos encontrados em nosso cotidiano sejam estes de metal, plástico, vidro, madeira, têxtil, eletrônico passam por processos de manufatura. Mesmo àqueles *in natura*, oriundos da agricultura modificam a paisagem onde são cultivados devido a necessidade de se adequar as condições para seu pleno desenvolvimento e consumo futuro implicando em correções no relevo, uso de

fertilizantes e agrotóxicos, expansão de áreas de cultivo que, de uma forma ou de outra, impactam no ambiente terrestre.

De forma resumida, a figura 9 mostra que o ciclo de vida de um produto começa com a análise das condições de retirada de sua matéria-prima da natureza, sendo que, depois de transformada, é disponibilizada para ser utilizada ou consumida, retornando para a natureza por meio da sua disposição final.

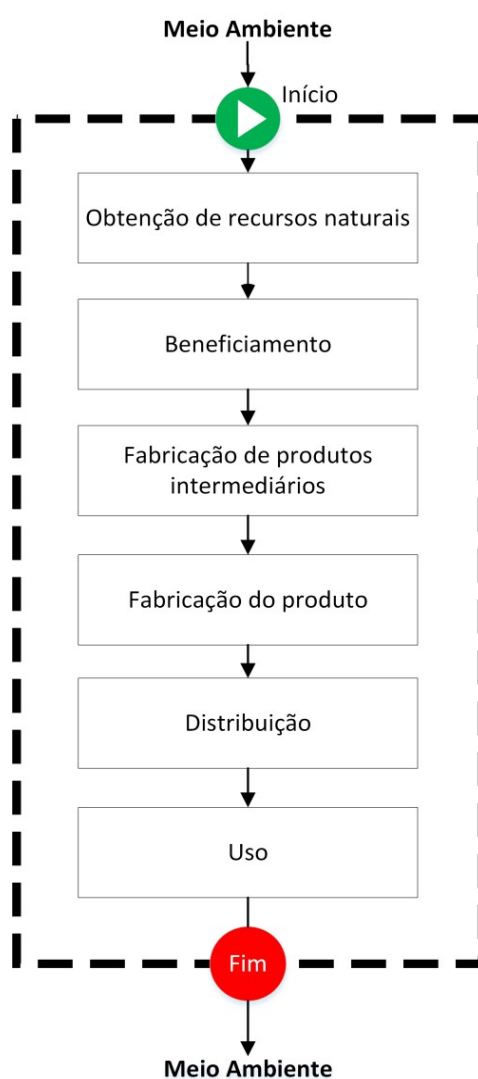


Figura 9. Conceito simplificado de uma ACV de um produto.
Fonte: adaptado de Ribeiro (2009)

Como relatam Baird e Cann (2011), a ACV é uma ferramenta que permite o cálculo de tudo o que entra e sai na vida de um produto, desde a extração da matéria-prima até a disposição final. Por esta razão, costuma-se dizer que a ACV faz uma abordagem completa, isto é “do berço ao túmulo”.

Curran (2006) expõe que a ferramenta possui técnicas que permitem avaliar os impactos de um produto, processo ou serviço. Seu resultado pode ser capaz de:

- i. Compilar um inventário sobre o uso de energia, balanço de materiais (entrada e saída) e das emissões correspondentes;
- ii. Avaliar os potenciais impactos ambientais associados a energia, balanço e emissões;
- iii. Interpretar os resultados ajudando os tomadores de decisão a escolher de forma mais assertiva seus produtos, processos e serviços.

Outros fatores como custos, desempenho, salubridade também podem influenciar a escolha da ACV como ferramenta de análise e decisão, de modo que a realização de uma ACV pode ajudar a orientar o desenvolvimento de novos produtos (CURRAN, 1996).

Segundo Roy *et al.* (2009) a ACV é uma ferramenta importante, que tem se desenvolvido rapidamente tanto pelas autoridades, indústrias envolvidas e nos estudos de ciências ambientais, visando comparar alternativas para produtos, processos e até serviços; comparar ciclos de vida alternativos para produtos e serviços e identificar pontos dos processos que englobam o Ciclo de Vida em que melhorias poderiam ser realizadas.

A norma ISO 14040 (2006) aborda que *“a ACV analisa os aspectos ambientais e os potenciais impactos ambientais (por exemplo, o uso de recursos e suas consequências ambientais) ao longo do ciclo de vida de um produto, desde a aquisição de matérias-primas até a produção, uso, destino no fim da vida, reciclagem e disposição final”*.

A coleta de dados e a análise dos resultados obtidos em uma ACV auxiliam na tomada de decisão, na seleção de indicadores ambientais para avaliação de desempenho de projetos ou reengenharia de produtos e processos, a identificação de prioridades, o uso alternativo de materiais entre outros (CHEHEBE, 1997).

Há algumas formas de se realizar um estudo de ACV. Entre eles, segundo Ribeiro (2009) três se destacam: o método desenvolvido pela SETAC em 1993, o da UNEP

em 1996 e o da ISO. No entanto, todos eles apresentam uma sequência similar que inclui: definição de meta e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e avaliação de melhorias ou interpretação. Além disso, ele cita como exemplo das diferenças entre os métodos, a determinação do fluxograma do processo: enquanto na ISO sugere-se que este deva ser feito na fase de definição de meta e escopo, os outros métodos (SETAC e UNEP) sugerem ser realizado na etapa seguinte, ou seja, na fase de análise do inventário.

Curran (2006), afirma que “os resultados finais de um estudo deve explicar de forma clara e abrangente as conclusões extraídas dos dados. Em alguns casos, pode não ser possível afirmar que uma alternativa é melhor que as demais por causa da incerteza nos resultados finais. Isso não implica que os esforços tenham sido desperdiçados”.

O procedimento para se realizar um estudo de ACV em acordo com a ISO, formalizado nas normas ISO 14040 e ISO 14044, apresentam-se divididos em 4 fases, a saber: 1) objetivo e definição de escopo; 2) análise do inventário; 3) avaliação de impacto e 4) interpretação. A figura 10 resume as etapas destas fases.

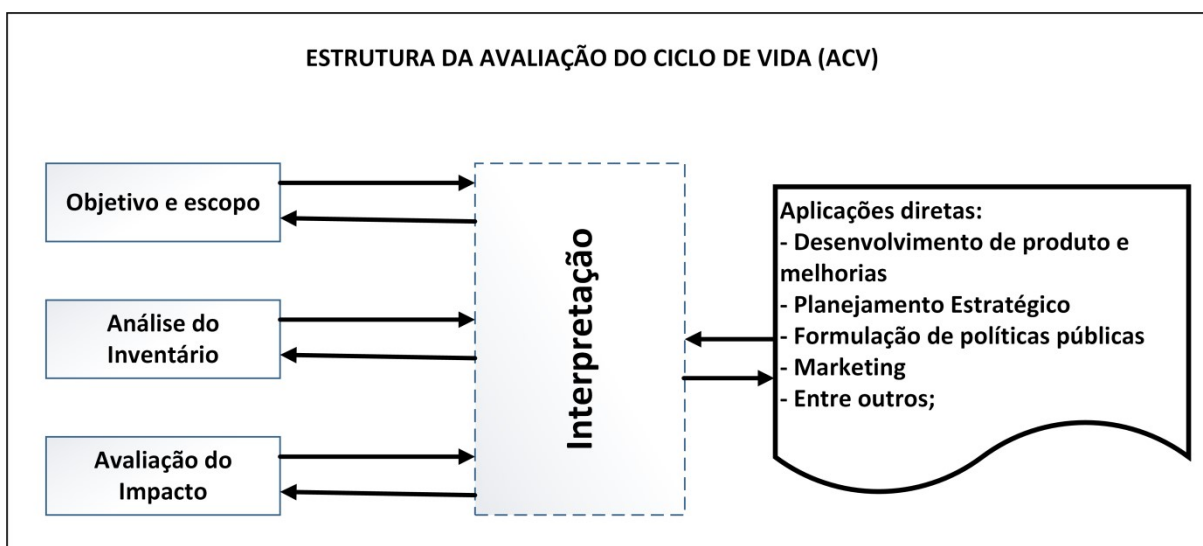


Figura 10. Estágios de um estudo de ACV pela sistemática da ISO.

Fonte: ISO 14040 (2006).

Para produtos alimentícios, Coltro *et al.* (2007) afirmam que os primeiros estudos relacionados à ACV foram realizados no início da década de 1990. Desde então,

muitos são os estudos relacionados à produção, conservação e distribuição de alimentos (tabela 4) que, na avaliação de ROY *et al.* (2009) justifica-se pelo tamanho da indústria e por ser grande usuário de energia. No mais, os consumidores dos países desenvolvidos exigem alimentos seguros, de alta qualidade e que sejam produzidos com o mínimo de impacto ambiental negativo (BOER, 2002).

Como a sociedade tem demandado maiores informações com respeito ao meio ambiente e ao uso dos recursos naturais, muitas organizações tem respondido com a criação de “produtos verdes” (*green products*) ou “processos verdes” (*green process*) em uma alusão àqueles produtos ou processos que apresentam menores impactos negativos em relação aos métodos tradicionais, muitas das vezes corroborados por estudos de ACV (CURRAN, 2006).

Tabela 4. Exemplos de estudos de ACV relacionados à indústria alimentícia

Produto	País	Referências
Cerveja	Grécia	Koroneos <i>et al.</i> , 2005.
Cerveja	Brasil	Trommer, 2014.
Soja	Brasil	Cavalett, 2008.
Cadeia do tomate	Itália	Del Borghi <i>et al.</i> , 2014.
Vinho	Canadá	Point; Tyedmers; Naugler; 2012.
Cacau	Gana	Ntiamoah e Afrane, 2008.
Leite	Espanha	Hospido; Moreira; Feijoo; 2003.
Ketchup	Suécia	Andersson; Ohlsson; Olsson; 1998.
Açúcar de beterraba	Alemanha	Brentrup <i>et al.</i> , 2001.
Trigo	Suíça	Charles <i>et al.</i> , 2006.
Maçã	Nova	I Canals; Burnip; Cowell; 2006.

Fonte: elaborado pelo autor.

Uma atenção especial tem sido dedicada em avaliações referentes à emissão de GEE por meio da técnica de ACV, mensurando o uso de energia e do uso de água na indústria alimentícia (STEENWERTH *et al.*, 2015).

2.7. BALANÇO DE MASSA

O balanço de massa é baseado na Lei da Conservação de Massa, no Princípio do Movimento Linear (Segunda Lei de Newton) e nas Primeira e Segunda leis da termodinâmica sendo utilizado para quantificar e medir a eficiência, desde a entrada até a saída em um sistema definido ou volume de controle (GIRARDI NETO; SILVA; PINHEIRO; 2017; VAN WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG; 2009).

Este conceito pode ser aplicado em processos de produção na qual as matérias primas iniciam o processo de fabricação e vão tendo perdas ou acúmulo de massa no decorrer dos diversos processos. Essa variação no fluxo de massa que sai ou entra no volume de controle resulta na taxa de variação de massa, podendo ser diferente de zero. Quando a variação for mais próxima de zero, maior será sua eficiência (ou conservação), enquanto que, do contrário, menos eficiente será esse processo (VAN WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG; 2009).

Uma das formas de se apresentar os resultados de um balanço de massa é na forma de diagrama. Utilizando-se de blocos com os principais componentes do sistema, suas ramificações associadas às etapas anteriores (insumos e matérias-primas) e posteriores (gestão dos resíduos, por exemplo), os dados são detalhados. Assim, é possível fazer um refinamento dos dados disponíveis em relação ao escopo proposto (PIOTTO, 2003).

2.8. CHOCOLATE: HISTÓRIA, CONCEITOS E CARACTERÍSTICAS

As primeiras plantações de cacau que se tem notícias são atribuídas às antigas civilizações americanas, como as dos Maias por volta de 600 d.C. Conforme os colonizadores europeus foram chegando às Américas, tanto os Astecas no México, quanto os Incas no Peru, cultivavam árvores de cacau e davam grande valor as amêndoas – sementes secas do fruto – utilizadas como moeda de troca (BECKETT, 2008).

Descobriu-se depois, que os Astecas torravam e moíam as amêndoas entre pedras resultando num líquido grosso e viscoso que formava uma torta. Com um pedaço desta torta e adição de água quente, muitas das vezes adicionando outros

ingredientes como baunilha, pimenta e mel, depois de uma boa agitação até torná-la espumosa, estava pronto o chamado *Xoco-atl* (*xoco* = amargo, *atl* = água): uma bebida amarga, de consumo festivo, usada para brindar o deus-serpente asteca *Quetzalcóatl* (BECKETT, 2008; TALBOT, 2009).

Por volta de 1520 o conquistador Hernán Cortez teria levado-a para a Espanha, tomando o cuidado de adicionar açúcar para diminuir o seu amargor, tornando-se uma bebida apreciada pelos nobres. Ainda assim, sua expansão foi lenta pela Europa, chegando a Itália por volta de 1606 e na França em 1657. Em 1727, Nicholas Sanders inovou ao substituir a água pelo leite (BECKETT, 2008).

O núcleo da amêndoa (cotilédone) depois de torrada e descascada, contém grande quantidade de gordura chamada manteiga de cacau. Naquela época, ao torrar e moer as amêndoas adicionava-se água para formar a bebida, que ficava com alto teor de gordura. Em 1828, um holandês chamado Van Houten desenvolveu uma prensa manual para extrair essa gordura das amêndoas. Essa extração resultava em dois produtos: uma torta quebradiça (pó do cacau) e uma gordura líquida (manteiga de cacau). Deste pó, ao ser misturado ao açúcar, deu origem as primeiras e rudimentares barras de chocolate sólido. O pó passou a ser usado também no preparo das bebidas, pois, misturadas com água quente ou leite, eram menos calóricas que a original. Além disso, depois de passar por uma alcalinização, o pó do cacau melhorava a bebida (BECKETT, 2008; TALBOT, 2009).

Ao se utilizar o pó, havia uma espécie de “efeito colateral”, isto é, restava a manteiga de cacau líquida. Isso foi resolvido ao descobrir-se que o chocolate comestível existente até então (mistura de açúcar moído e *nibs* de cacau) era duro e quebradiço. Adicionando a manteiga na mistura permitiu que todas as partículas sólidas fossem revestidas de gordura, formando uma barra uniforme que se fundia suavemente na boca, tal qual a conhecemos hoje (BECKETT, 2008).

Dessa maneira, em 1847 foi fundada a primeira fábrica destinada a produzir um chocolate comestível, estabelecida em Bristol, no Reino Unido, por Joseph Fry. O chocolate feito por Fry foi, inicialmente, um barra simples, de textura arenosa e sem a presença do leite (BECKETT, 2008).

Em 1875 é que se fez o primeiro chocolate em barra com sabor ao leite. Daniel Peter encontrou uma maneira de secar o abundante suprimento de leite líquido que ele encontrava na Suíça, originando o leite em pó. Foi ajudado em parte, pelo desenvolvimento de uma fórmula de leite condensado de Henri Nestlé, que conseguia remover a quantidade restante de água no leite condensado usando máquinas aquecedoras. Esta formulação tornou-se clássica e popularizou-se em todos os países em detrimento aos chocolates simples originais (BECKETT, 2008).

Ainda em busca de aperfeiçoamento, Rodolphe Lindt por volta de 1880, em sua fábrica em Berna na Suíça, inventou uma máquina, conhecida como “concha”, que produziu um chocolate mais suave e de melhor sabor. Esse processo quebrava os aglomerados e algumas das partículas maiores, revestindo-as com a manteiga de cacau. Ao mesmo tempo, a umidade e alguns produtos químicos ácidos eram evaporados no ar, produzindo um chocolate de degustação mais suave e menos adstringente (BECKETT, 2008).

Utilizando-se açúcar, leite em pó e manteiga de cacau, foi desenvolvido o chocolate branco por volta de 1930. Apesar de ser apreciado, as qualidades antioxidantes presentes no material escuro do cacau não são encontradas neste chocolate (BECKETT, 2008).

Por tudo isso é que o chocolate não demorou muito para se tornar um dos alimentos mais apreciados no mundo. Além dos chocolates com alto teor de cacau, passando pelo sabor ao leite e branco, há diversas outras aplicações, como revestimento de biscoitos, frutas, nozes, caramelos e *fondants*, resultando em novas combinações de sabores e texturas para satisfazer os consumidores ávidos por novas sensações (TALBOT, 2009).

Com o desenvolvimento do chocolate comestível, a demanda por cacau aumentou bastante. Inicialmente, grande parte vinha das Américas, principalmente do Brasil. Ao longo do tempo, a costa ocidental da África tornou-se uma importante área de cultivo, com destaque para países como Nigéria, Gana e Costa do Marfim (PIASENTIN e SAITO, 2014).

2.8.1. O CACAU

A semente do cacau é o principal produto comercializado do cacauzeiro. É uma planta da família *Malvaceae* cujo nome científico é *Theobroma cacao*, Linnaeus. Este nome foi atribuído pelo botânico sueco Linneu (1707-1778) em 1753, em que sua tradução livre do latim é “alimento dos deuses” ou “manjar dos deuses”. Em condições naturais, o cacauzeiro pode chegar até 25m de altura devido a competição por luz com outras espécies. Quando cultivadas adequadamente, o tamanho médio fica entre 3 a 5 m de altura (ALMEIDA e VALLE, 2007; SILVA NETO, 2001).

O cacauzeiro tem como região de origem o continente americano, provavelmente nas bacias dos rios Amazonas e Orinoco, podendo ser encontrado desde o Peru até o México no estrato inferior das florestas tropicais úmidas sob a sombra de outras árvores, fazendo parte da cultura indígena muito antes da chegada dos colonizadores (SILVA NETO, 2001). A cultura do cacau no Brasil foi autorizada pela Carta Régia de 1679 com os primeiros cultivos comerciais ainda extrativistas estabelecidos em 1746 no estado da Bahia (COSTA *et. al.*, 1973; PIASENTIN e SAITO, 2014).

As variedades tradicionais cultivadas do cacau estão em três grandes grupos principais: forastero, criollo e trinitário, cada qual com sua morfologia, características genéticas e origem geográfica (ALMEIDA e VALLE, 2007).

O cacau do tipo criollo foi cultivado pelos Astecas e Maias. Produz frutos grandes, com casca enrugada e grandes sulcos. É menos adstringente, possui sabor mais suave e frutado. Suas sementes, com interior branco ou róseo, apresenta tempo menor de fermentação (de 2 a 3 dias), são utilizadas para chocolates finos. Por ser uma variedade suscetível a doenças, sua área de cultivo é menor e mais restrita a América Central e do Sul (ALMEIDA e VALLE, 2007; FERREIRA *et al.*, 2013).

Variedades do tipo forastero são amplamente cultivados devido aos seus altos rendimentos e resistência a doenças. Seus frutos são ovóides, superfície lisa com sulcos imperceptíveis na casca. Sementes são de cor violeta-escuro, podendo ser pretas, possui tempo de fermentação mais longo (de 5 a 7 dias) com sabor mais amargo e adstringente (ALMEIDA e VALLE, 2007; FERREIRA *et al.*, 2013).

Por sua vez, o cacau do tipo trinitário possui características tanto do forastero, quanto do criollo, devido à hibridização espontânea, isto é, ocorrida naturalmente entre estas variedades. Suas sementes possuem cor branca ou violácea com sabor suave, cultivado na América Central, Camarões e Indonésia (ALMEIDA e VALLE, 2007; FERREIRA *et al.*, 2013).

Atualmente, são muitas as variedades e híbridos de cacau sendo cultivadas. Estes exemplares, chamados regionalmente de “clones”, apresentam combinações genéticas distintas, maior qualidade do produto, boas características fitotécnicas (porte e precocidade) e maior durabilidade na resistência às pragas. São cultivados por estaquia, enxertadas no campo (vide figura 11), em viveiros ou até para substituir cacauzeiros adultos com baixa produtividade. O contínuo desenvolvimento destes híbridos são fundamentais para o sucesso de novos plantios ou recuperação de áreas (SODRÉ, 2017).

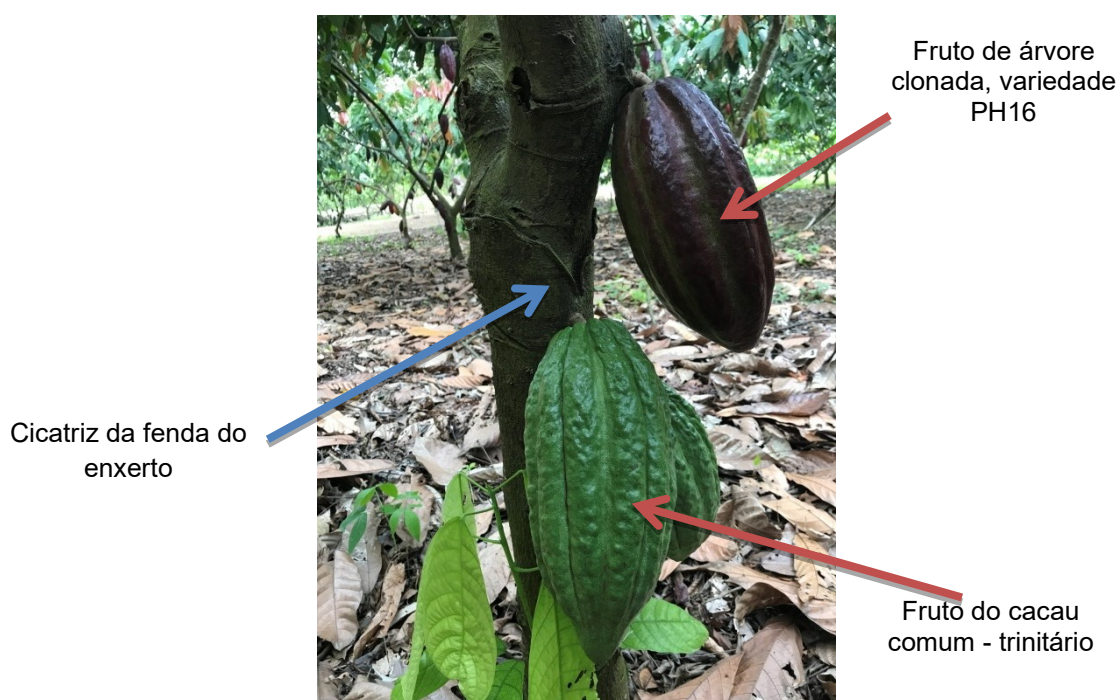


Figura 11. Clonagem por enxertia em fazenda de Linhares, Espírito Santo.
Fonte: o autor, 2017.

O cacauzeiro se caracteriza por ser uma planta que consome muita água e pela necessária umidade do solo que a planta perde durante a evapotranspiração em torno de 100 a 120 mm por mês (COSTA *et al.*, 1973; CORDEIRO, 1987). Seu ciclo

de cultivo é perene, tipicamente realizado nos trópicos entre as latitudes 20°N e 20°S da linha do Equador. Nesta faixa, o clima se caracteriza pela abundância de chuvas, constância de temperaturas elevadas durante o ano, boa radiação solar e comprimento regular do dia. Nestas regiões, a cacauicultura se desenvolve em temperaturas médias situadas entre 24 e 28°C com um índice pluviométrico entre 1.200 e 2.000 mm/ano (ADABE e NGO-SAMNICK, 2014; COSTA *et al.*, 1973; SILVA NETO, 2001).

Os solos devem apresentar profundidade mínima de 1,20m, serem bem drenados, mas com boa capacidade de retenção, com textura apropriada indicada sendo areno-argilosa e pH na faixa de 6,0 a 6,5. Suas raízes apresentam um sistema pivotante e secundário com comprimento e forma variável dependendo da estrutura, textura e consistência do solo (SILVA NETO, 2001). As raízes secundárias são responsáveis pela nutrição da planta e estão localizadas nos primeiros 30 cm do solo (Figura 12).

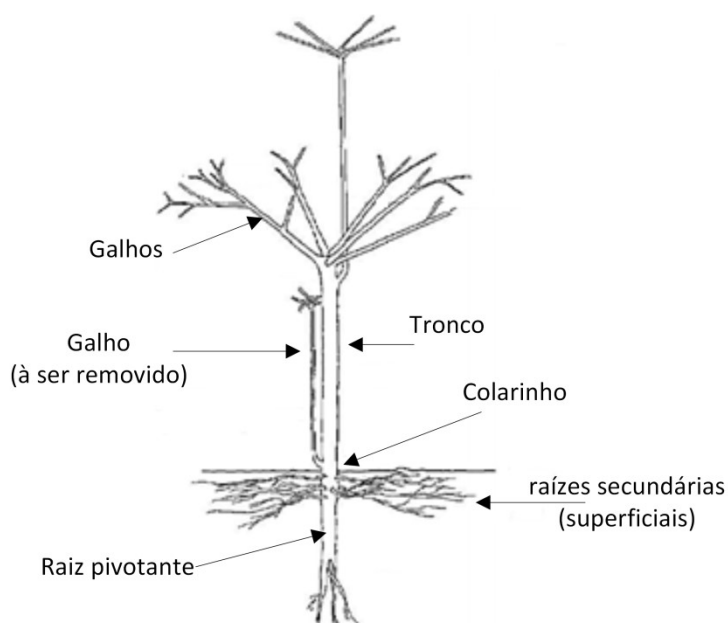


Figura 12. Sistema radicular do cacauero.

Fonte: adaptado de Van Vliet; Slingerland; Giller (2015).

Há diferentes formas de cultivo do cacau. Na sua origem, o cacauero em sua forma primitiva era encontrado no sub-bosque das florestas tropicais. Por esta razão, acreditava-se que o cacau deveria ser cultivado sempre na sombra de outras

árvores. Foi assim que as primeiras lavouras foram formatadas, ficando conhecidas como sistema tradicional ou cabruca. Nesta forma de cultivo, há substituição dos elementos do sub-bosque (estratos intermediários) da floresta tropical nativa pelas árvores de cacau, distribuídas de forma descontínua no solo, entremeadas com vegetação natural conforme ilustra a Figura 13 (SETENTA e LOBÃO, 2012).

De acordo com Lobão *et al.* (2004 e 2007), em virtude do cacau-cabruca se caracterizar pela substituição dos elementos do sub-bosque das florestas tropicais por uma cultura de vertente econômica sob a proteção de árvores remanescentes, foi necessário definir padrões técnicos quanto à densidade da plantação e do sombreamento desse sistema.

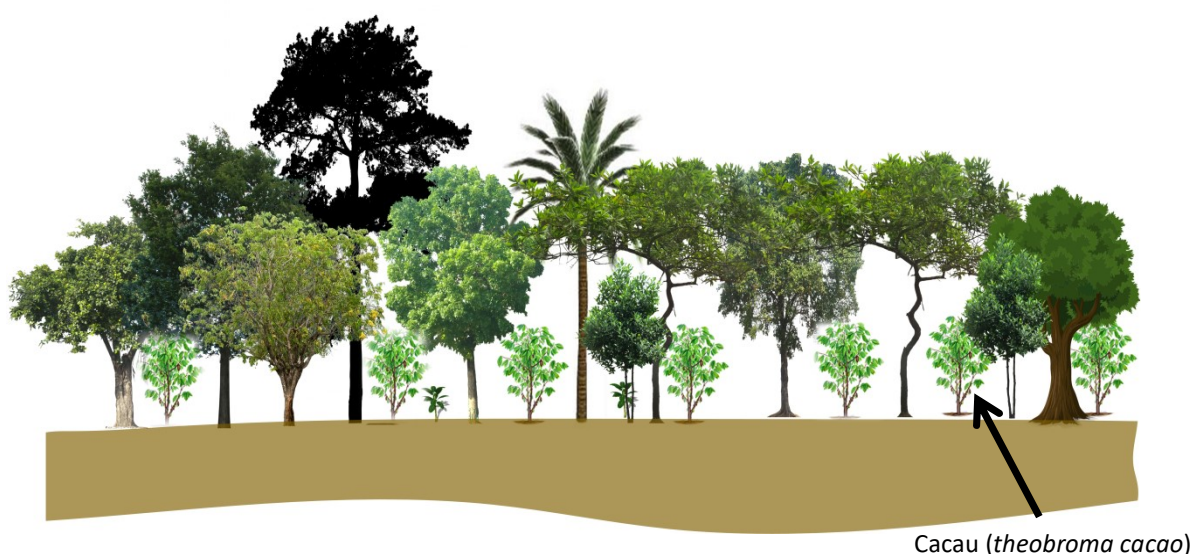


Figura 13. Esboço artístico de floresta com sistema cabruca de cultivo do cacau.

Fonte: elaborado pelo autor.

Assim, Setenta e Lobão (2012) definiram densidade arbórea como sendo “*um parâmetro populacional que revela o número de indivíduos existentes em uma determinada área; quanto maior for o seu valor, maior será a sua capacidade em fixar carbono orgânico, tanto no solo como na parte aérea da planta, como também maior será sua capacidade em interferir positivamente no ciclo hidrológico retendo, no sistema, a água da chuva, portanto, com maior capacidade de prestar serviços ambientais*”.

Em um sistema cacau-cabruca, a densidade de sombreamento refere-se ao número de indivíduos (ind) das diferentes espécies arbóreas existentes em uma determinada floresta. Estas são classificadas por Setenta e Lobão (2012) da seguinte forma:

- (i) Cabruca de baixa densidade: quando o sombreamento do cacauzeiro possui entre 18 a 50 ind.ha⁻¹;
- (ii) Cabruca de média densidade: entre 51 e 84 ind.ha⁻¹;
- (iii) Cabruca de alta densidade: quando é maior que 85 ind.ha⁻¹.

Ainda segundo os autores Setenta e Lobão (2012), áreas que apresentam densidade para sombreamento menor do que 18 ind.ha⁻¹ não devem ser consideradas cabruca, ainda que sejam passíveis de adensamento (denominado recabruca).

Assim, nos casos de densidade inferior a 18 indivíduos por hectare, é chamado de derruba total ou cacau a pleno sol (LOBÃO *et al.*, 2004; SETENTA e LOBÃO; 2012). Essas plantações são estabelecidas em áreas onde toda a floresta nativa foi removida, em uma densidade de 1.111 unidades/ha, podendo ser sombreado provisoriamente com banana e *Erythrina glauca* principalmente (FONTES *et al.*, 2014).

Uma outra forma de cultivo citado por Setenta e Lobão (2012) é o de cacau monocultural sombreado (tecnicamente formado) em consórcio com outra espécie produtiva chamados de sistema agroflorestal (SAF) ou agrosilvicultural (SAGS).

Na literatura é possível encontrar vários exemplos de SAF's e SAGS para a cacauicultura; cultivados tanto sob a proteção de um sombreamento monoespecífico (como eritrina, por exemplo) ou multiespecífico (seringueira e banana, por exemplo). Em ambos os casos, esta associação com outras espécies tem a finalidade de sombreá-lo tanto durante a fase de implantação das mudas (sombreamento provisório), quanto na fase produtiva (sombreamento definitivo) (EMBRAPA-CPATU, 1984; LEITE, 2006).

Mesmo havendo vários tipos de cultivo, Afoakwa (2010) afirma que, geralmente, as árvores de cacau são plantadas para atingir uma densidade final de 600-1200 árvores.ha⁻¹ e que os métodos modernos de cultivo levaram ao desenvolvimento de

árvores com um padrão de aproximadamente 3 m de altura para permitir a fácil colheita.

Depois de definida a forma de plantio, são utilizadas sementes extraídas dos frutos das árvores mais produtivas para formar novas mudas. Santos (2013) afirma que, no Brasil, a utilização de sementes melhoradas se deu à partir de 1960 quando foi criada a CEPLAC (Comissão Executiva de Planejamento da Lavoura Cacaueira) e o CEPEC (Centro de Pesquisas do Cacau).

As sementes não são plantadas diretamente no solo (o chamado plantio direto). É realizada uma etapa anterior, de preparação, com estas sendo plantadas em sacos de filmes plásticos (polietileno) em um viveiro, num período que varia de 5 a 8 meses antes do cultivo em solo definitivo. Quando a planta atinge cerca de 50 cm, ela estará pronta para ser transplantada para o solo definitivo (ADABE e NGO-SAMNICK, 2014).

Após transplantadas, devido à fragilidade da planta durante os estágios iniciais de crescimento, recomenda-se a proteção das mudas contra a ação dos ventos fortes, normalmente realizadas com o uso de outras culturas (AFOAKWA, 2010). Este método de proteção inicial é chamado de sombreamento provisório, realizado nos 2 primeiros anos após plantio (COSTA *et al.*, 1973).

É comum durante o sombreamento provisório, o uso da bananeira (*Musa sp*) intercalado num balizamento de 3 m X 3 m, plantada com pelo menos 6 meses de antecedência (LOBÃO *et al.*, 2004), conforme demonstrado na figura 14, que representa 1% de um hectare (10.000 m²).

Depois da retirada das bananeiras, que ocorre em média 30 meses após o plantio, pode utilizar-se da consorciação com outras espécies arbóreas de copa alta ou mantida sem sombreamento. À medida que a planta cresce, necessita cada vez menos de sombra para poder elevar as taxas fotossintéticas e aumentar o sequestro de carbono. A manutenção do sombreamento por outro lado, diminui a evapotranspiração excessiva, sendo recomendadas espécies como *Gliricidia sepium*, *Inga jinicuil*, *Leucaena glauca*, *Erythrina fusca*, *Albizia*, *Hevea brasilienses* entre outras (MÜLLER; GAMA-RODRIGUES; VALLE; 2007).

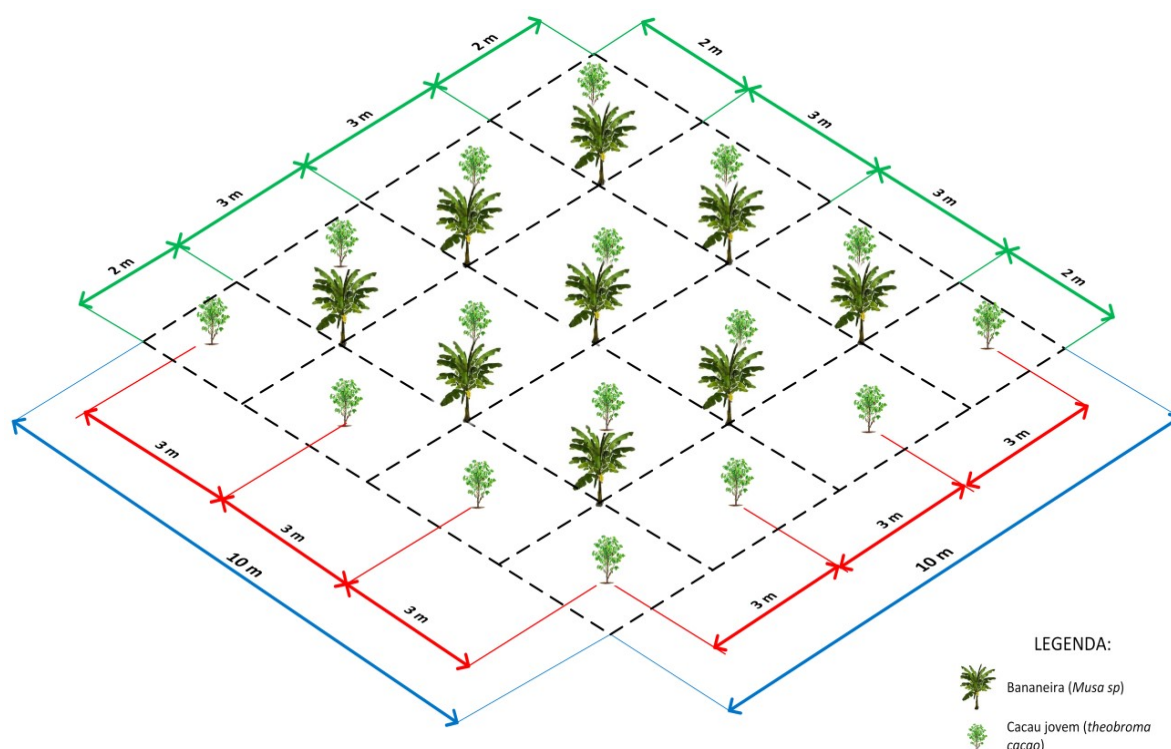


Figura 14. Uma das formas de balizamento para plantio do cacau em sombreamento provisório com bananeira.

Fonte: elaborado pelo autor.

Outra forma de plantio das árvores que vem sendo utilizada é a operação de enxertia. Como exemplo, pode-se plantar sementes do cacau trinitário comum em viveiros até atingir cerca de 50 cm de altura, transplanta-se em seguida ao solo definitivo. Depois que a muda está adaptada ao novo local, apresentando bom desenvolvimento vegetativo e elevado grau de maturação, realiza-se a enxertia de uma planta adulta de fruto clonado (SODRÉ, 2017).

Dentre os métodos de enxertia, há o de borbúlia em janela aberta, a garfagem, a garfagem de topo lateral ou a garfagem lateral. No caso de recuperação de plantas mais velhas, usa-se enxertia em copas ou a reenxertia (SODRÉ, 2017).

As primeiras colheitas de frutos ocorrerão entre 4 e 5 anos de vida da planta (ADABE e NGO-SAMNICK, 2014). Por se tratar de uma árvore do tipo caulífera, as flores surgem em almofadas florais no tronco ou nos ramos lenhosos (figura 15). Um cacauzeiro adulto pode produzir por ano até mais de 100.000 flores, das quais menos de 5% são fertilizadas por insetos do gênero *Forcypomia*. As flores não

polinizadas caem no período de quarenta e oito horas enquanto que àquelas que foram polinizadas, apenas 0,1% se transformam em frutos (SILVA NETO, 2001).

As flores costumam brotar em duas épocas: no período menos chuvoso do ano e após o início do período de chuvas. Das flores fecundadas, surgirão frutos maduros entre quatro e seis meses depois. Como nem todas as flores são polinizadas de uma só vez, há frutificação espaçada durante o período de colheita (SILVA NETO, 2001).



Figura 15. Formação das flores no cacauero.
Fonte: o autor, 2017.

Como pode ser observado na figura 16, os frutos são sustentados por pedúnculos lenhosos (pecíolos) e terem formato liso ou corrugado, em formatos de bagas, com cores que variam entre verde e violeta ao amarelo e alaranjado (ADABE e NGO-SAMNICK, 2014).

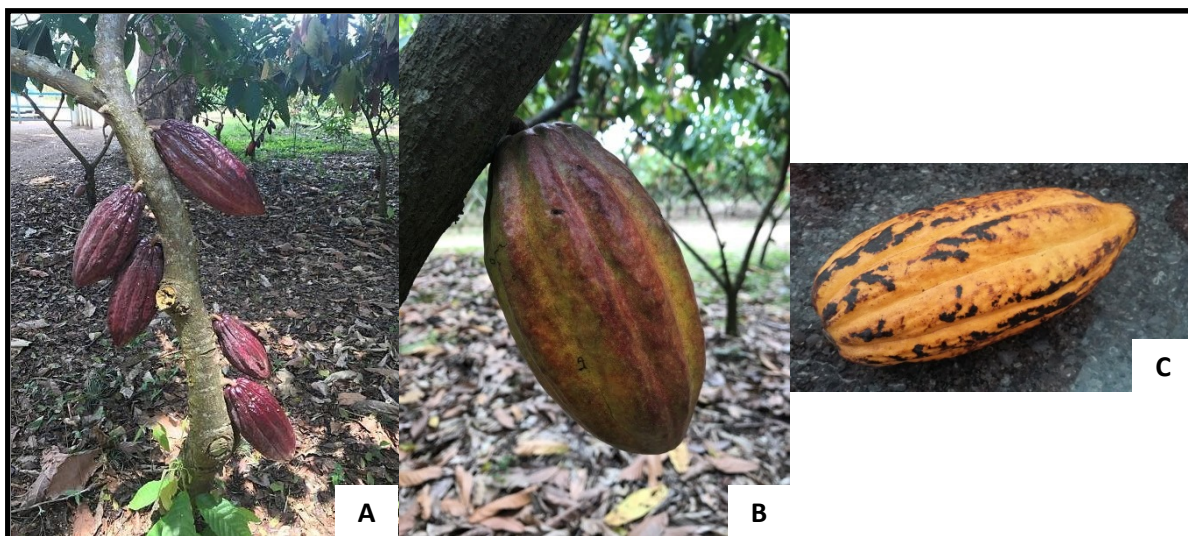


Figura 16. A estrutura caulífera do cacaveiro (A), o detalhe da sustentação do fruto por pedúnculo ou pecíolo (B) e um exemplar do fruto na cor amarela (C).

Fonte: o próprio autor, 2017.

As características físicas do fruto são resumidas na tabela 5 na qual são apresentados o percentual em peso de cada um de seus componentes.

Tabela 5. Características dos componentes do fruto do cacau encontrados no estado do Pará.

Componentes	Peso	% correspondente
Fruto	500g	100%
Casca do fruto	400g	80%
Sementes frescas ("cacau mole")	100g	20%
Amêndoas	50g	10%
Nibs	40g	8%
Testas	7,5g	1,5%
Outros	2,5	0,5%

Fonte: Silva Neto (2001)

Como pode ser observado na tabela 5, a casca representa uma grande parcela em peso do fruto. Esta é perecível, de baixa resistência mecânica, com alto teor de lipídeos e açúcares. Como utilização possível desta, há produção de biogás, biofertilizante, briquete e substrato para produção de enzimas. Nestes casos, é

necessário um pré-tratamento com secagem (natural ou forçada) para que se evite a deterioração da casca perecível (BATISTA, 2014).

Dentro do fruto podem ser encontrados de 20 a 50 sementes envoltas por uma mucilagem na cor branca levemente adocicada e sabor agradável. As sementes tem tamanho médio de 2 cm de comprimento por até 1 cm de espessura (figura 17) (ADABE e NGO-SAMNICK, 2014).

De acordo Müller, Gama-Rodrigues, Valle (2007) citando Thong e Ng (1980) e Alpizar *et al.* (1986), a biomassa acumulada no cacauero é crescente até a fase madura, tornando-se constante neste período. Cita-se também, quanto o material genético, a forma de manejo (com ou sem sombra) e as condições edafoclimáticas influenciam na produção e distribuição da biomassa na cultura do cacau, ressaltando que o cacauero não sombreado apresenta uma biomassa bastante alta em relação ao cacauero sombreado.

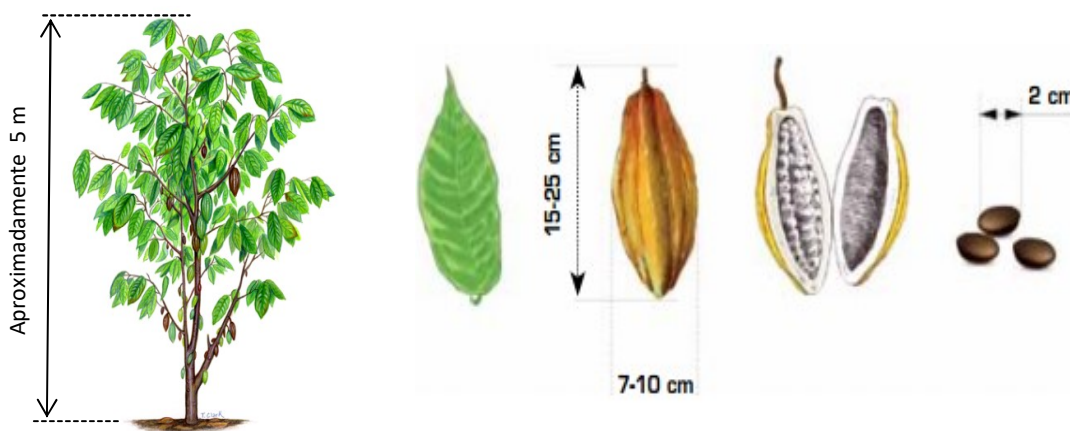


Figura 17. Características do cacauero e seus componentes.

Fonte: adaptado pelo autor de Adabe e Ngo-Samnck (2014)

Adabe e Ngo-Samnck (2014) informam a necessidade de se podar a cada 2 - 3 meses o cacauero visando maximizar sua produção removendo os galhos que ultrapassam a altura de 4m e demais ramificações secundárias. Como pode ser observado na figura 18, a proposta dos autores é manter o formato “taça de vinho”, ideal para o desenvolvimento da planta, colheita e distribuição da luz solar.



Figura 18. Sugestão de poda para pleno desenvolvimento do cacauieiro.
Fonte: Adabe e Ngo-Samnck (2014)

2.8.2. BENEFICIAMENTO DO CACAU

O processo de beneficiamento do cacau envolve 5 fases distintas e são realizadas na fase agrícola, ainda dentro das propriedades. São elas: colheita, quebra, fermentação, secagem e armazenamento (MARTINS, 2011). O processo de colheita é realizado com o auxílio de ferramentas, conforme ilustra a figura 19.



Figura 19. Formas corretas de colheita usando ferramentas.
Fonte: Adabe e Ngo-Samnck (2014)

Outro ponto importante é a escolha dos frutos com mesmo grau de maturação já que frutos verdes e verdoengos apresentam sementes com menor teor de açúcar, o que compromete o processo de fermentação e prejudica a qualidade do produto final. Depois de colhido, o cacau permanece em descanso por 3 dias para que possa concentrar o açúcar da polpa, fundamental para uma boa fermentação (FERREIRA *et al.*, 2013; ADABE e NGO-SAMNICK, 2014).

A quebra é o processo pelo qual o fruto é partido ao meio no sentido longitudinal e objetiva separar a casca das sementes envoltas na polpa, extraindo o chamado

“cacau mole” (figura 20), devendo este ser levado imediatamente para o processo de fermentação (FERREIRA *et al.*, 2013).



Figura 20. Representação da fase de quebra do cacau.

Fonte: adaptado de Adabe e Ngo-Samnack (2014)

Na sequência, o cacau mole é levado para locais cobertos, protegido dos ventos para serem acondicionados em recipientes chamados de cochos de fermentação (figura 21). É nesta etapa que se inicia uma das fases mais importantes do beneficiamento do cacau, precursor na formação do aroma e sabor do chocolate (MARTINS, 2011).



Figura 21. Típico cocho de fermentação.

Fonte: Martins (2011)

Nos cochos, as amêndoas começam a fermentar. De acordo com Martins (2011) as leveduras agem e se multiplicam convertendo os açúcares em álcool etílico e gás carbônico, elevando a temperatura e matando o embrião da semente o que, conseqüentemente, faz perder seu poder germinativo. A partir deste momento é que a semente passa se chamar amêndoa. Outras mudanças nesta fase ocorrem: a polpa vai ficando mais líquida, desprendendo-se aos poucos das amêndoas (“mel do cacau”) e a própria coloração da amêndoa muda de branca rósea para marrom

escura. Para uma uniformidade na fermentação, é necessário revolver as amêndoas no cocho de tempos em tempos até completar o processo no quinto ou sexto dia.

A próxima etapa consiste na secagem das amêndoas imediatamente após a fermentação. Estas possuem ainda, alto teor de umidade (cerca de 60%, devendo ficar entre 7% a 8%). Outros benefícios proporcionados pela secagem estão na redução da acidez e da adstringência bem como a potencialização na liberação dos componentes responsáveis pelo sabor e aroma característicos do chocolate. A figura 22 apresenta os processos de secagem. Quando natural, após espalhar as amêndoas nas barcaças ou estufas, recebem a irradiação solar por alguns dias até atingirem a umidade recomendada. Alternativamente, utiliza-se a secagem artificial em estufas que possuem queimadores dentro de uma câmara, aquecendo-a por meio da queima de combustíveis, como a biomassa de árvores (FERREIRA *et al.*, 2013 ; MARTINS, 2011).



Figura 22. A secagem natural das amêndoas: (A) por barcaças, (B) por estufas. Secagem artificial em construção de alvenaria: (C) vista por dentro e (D) visão externa.

Fonte: Martins (2011).

Por fim, as amêndoas são colocadas em sacos específicos para estocagem em um local bem arejado e que permita a presença de luz. Os sacos padrões são de 60 Kg, devem ser empilhados sobre estrados de madeira que facilitem a limpeza ao mesmo

tempo que não permita ter contato com quaisquer outros produtos como inseticidas, fungicidas, tintas, café, entre outros (FERREIRA *et al.*, 2013; MARTINS, 2011).

2.8.3. PROCESSAMENTO DAS AMÊNDOAS DO CACAU

O processamento do cacau consiste no emprego de tecnologias para a fabricação de quatro produtos comerciais extraídos das amêndoas: *nibs*, liquor, manteiga e o cacau em pó. Estes produtos são matérias primas para inúmeras aplicações. O liquor de cacau é uma massa sólida, feita dos *nibs* de cacau moído, que pode ser transformado em manteiga e cacau em pó. A manteiga de cacau é usada na fabricação do chocolate e também em cosméticos e produtos farmacêuticos. O cacau em pó pode ser usado tanto em bebidas e biscoitos quanto como corante (COHEN *et al.*, 2003). Na figura 23 é apresentado um fluxograma simplificado do processamento das amêndoas.

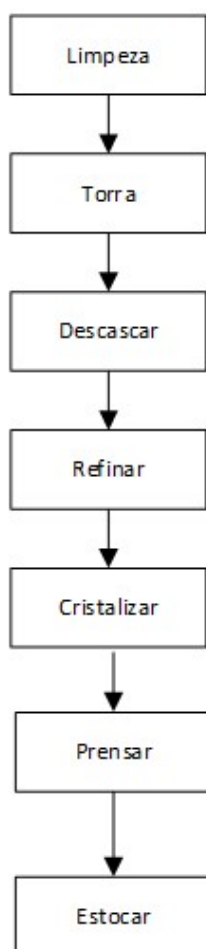


Figura 23. Fluxograma resumido do processamento das amêndoas do cacau.

Fonte: Beckett (2008).

Como as amêndoas podem ser provenientes de diversas regiões do mundo apresentam, muitas vezes, impurezas e materiais estranhos como pedras, lascas de madeira, poeiras, cascas de árvores entre outros. Para minimizar estes efeitos e iniciar o processamento propriamente em si, as amêndoas são submetidas à limpeza para remover estes componentes que podem afetar a qualidade do produto, causar desgaste e danos às máquinas de processamento. Geralmente é realizada em várias etapas, com a utilização de peneiras, imãs e coletores de poeira (COHEN *et al.*, 2003).

Após a limpeza, as amêndoas podem ser classificadas em função do seu tamanho e levadas para torra. O processo de torração é um tratamento térmico que desenvolve o sabor e o aroma de chocolate, obtido principalmente pela reação de *Maillard* (uma reação entre aminoácidos e açúcares redutores). Dentre as transformações ocorridas nesta fase estão a redução do teor de umidade para cerca de 2%, a transformação na textura dos cotilédones (deixando-os mais quebradiços) e o desenvolvimento da cor típica de chocolate, entre outras coisas. Os parâmetros do processo de torração são tempo e temperatura, estabelecidos em função das características de sabor desejado, da origem e do tipo de amêndoas, da umidade e dos tratamentos anteriores a torração (COHEN *et al.*, 2003).

As amêndoas normalmente são descascadas após a torração enquanto ainda estão quentes pois a ação do calor facilita a separação da casca e do cotilédone. São utilizados moinhos que as quebram produzindo uma mistura de *nibs* e cascas (figura 24) que são separados posteriormente pela ação combinada de peneiras e colunas de ar (COHEN *et al.*, 2003).

Os *nibs* contém aproximadamente 55% de uma gordura conhecida como manteiga de cacau que permanece retida em células dentro dos cotilédones. Para ser liberada usa-se um processo de refino para quebrar estas células e produzir um ingrediente denominado líquido ou massa de cacau. O objetivo deste refino é reduzir o tamanho das partículas dos *nibs* desenvolvendo uma boa distribuição granulométrica, um parâmetro importante ligado à sua reologia. O grau de micronização varia de acordo com o tipo de produto requerido sendo que, quanto mais refinado, mais suave será no paladar (TALBOT, 2009).



Figura 24. As amêndoas de cacau: (A) torradas com casca; (B) o cotilédone com a casca removida; (C) os nibs de cacau, cotilédone quebrado.

Fonte: o autor (2017).

Com o atrito provocado pela micronização, o liquor torna-se uma massa líquida espessa devido a sua baixa temperatura de fusão. Nesse estágio ele necessita ser dosado em esteiras para cristalizar e voltar a ser sólido por meio dos chamados túneis de resfriamento, cujo formato em pedaços são comercializados como *kibbled* (COHEN *et al.*, 2003).

A extração da manteiga é realizada por um cilindro prensa depois do aquecimento do liquor até a temperatura de 80 °C. A pressão exercida e o tempo são controlados durante todo o processo. Após a extração da gordura, esta é filtrada para a retirada de possíveis partículas sólidas (COHEN *et al.*, 2003).

A manteiga pode ser submetida a tratamentos adicionais como desodorização (remoção de compostos e odores indesejáveis) e redução do conteúdo de ácidos graxos livres, entre outros. A torta resultante da extração é novamente moída resultando no pó do cacau natural, podendo ainda sofrer tratamentos químicos adicionais, como a alcalinização e a lecitinação para modificar sua cor, sabor e suas características de solubilidade (COHEN *et al.*, 2003).

2.8.4. ASPECTOS ECONÔMICOS DO CACAU-CHOCOLATE

A cadeia de abastecimento do cacau é complexa. Começa em países tropicais, geralmente com pequenos agricultores e termina com o chocolate comprado por diversos consumidores ao redor do mundo, ilustrado pela figura 25. A produção de cacau está distribuída atualmente em 3 macros regiões: África Ocidental, América e Oceania (LAVEN; PELDERS; STALEVSKI; 2010), conforme mostra a figura 26.

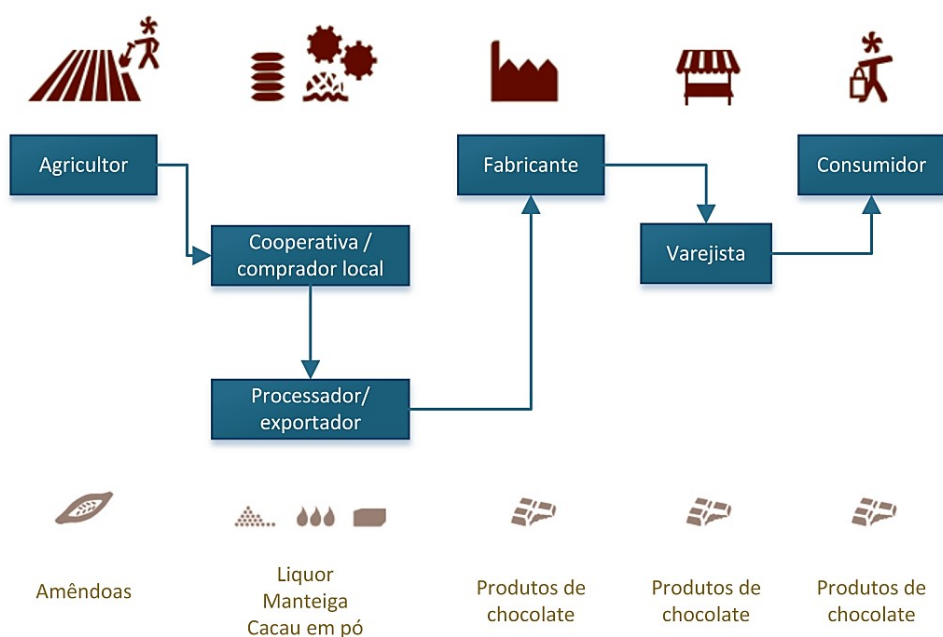


Figura 25. A cadeia do cacau-chocolate.

Fonte: Laven; Pelders; Stalevski (2010).

Ao contrário do agronegócio, em que há produção em escala e mecanização, o cultivo do cacau pode ser considerado um processo primitivo, feito em pequenas fazendas familiares, que muitas vezes, utilizam práticas agrícolas desatualizadas e limitadas (ICCO, 2012).

O cacau é considerado o esteio econômico de países como Camarões, Costa do Marfim e Ghana. Mais de 70 % da produção mundial total de cacau vem do continente africano, embora a infraestrutura para a agregação de valor esteja localizada principalmente na Europa (ICCO, 2012).

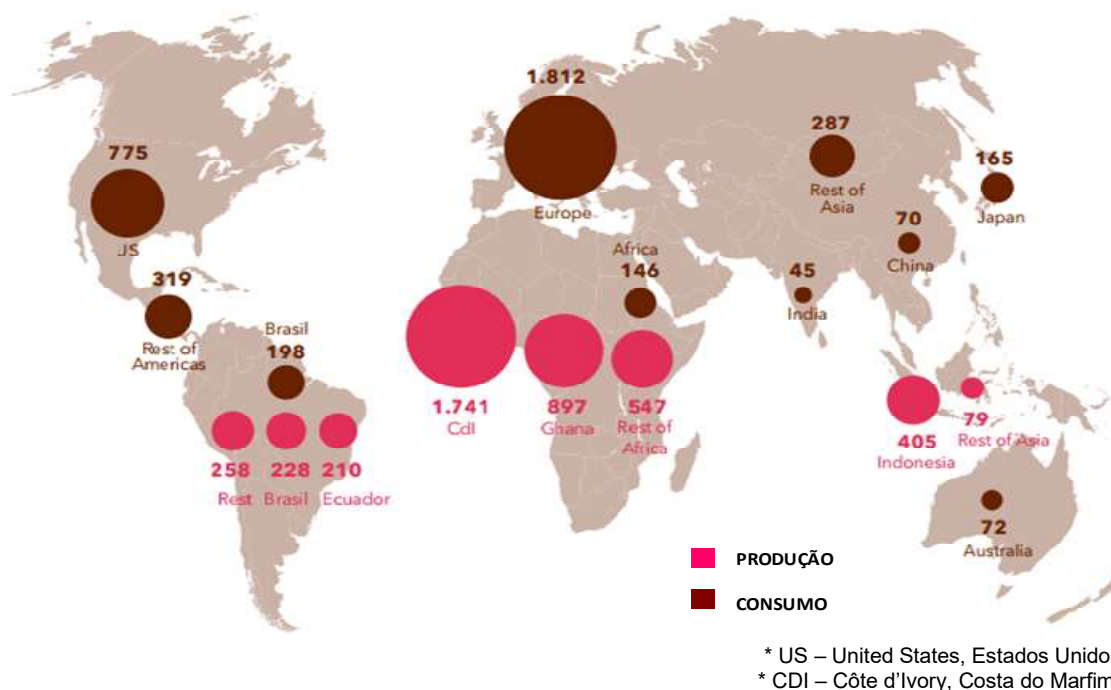


Figura 26. Relação entre produção de amêndoas e consumo equivalente de chocolates (em amêndoas), no mundo em 2014 (x10³ ton).
Fonte: Foutain e Hütz-adams (2015).

Dados da Organização Internacional do Cacau (ICCO, em inglês) apontam que os países em desenvolvimento são os maiores produtores de cacau, enquanto que os países consumidores de derivados do cacau são os países desenvolvidos, como mostrado nas figuras 27 e 28. Isso pode ser explicado em parte, porque os países que apresentam maior consumo normalmente não possuem clima adequado para a produção, gerando necessidade de importação de amêndoas secas (ICCO, 2017).

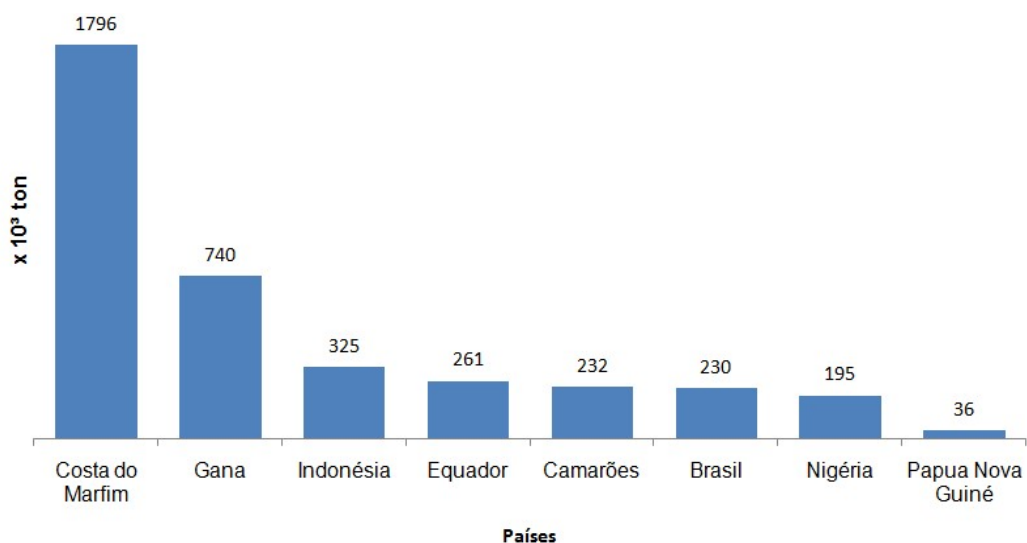


Figura 27. Produção de amêndoas secas, período 2014-2015, por país.
Fonte: adaptado de ICCO (2017)

Segundo Fold (2001) depois do desenvolvimento industrial no século XIX e expansão do consumo, esta indústria se dividiu em dois segmentos:

a) os processadores de cacau, que são especializados em torrar, descascar e moer as amêndoas para formar os produtos intermediários, como o liquor, a manteiga (gordura vegetal) e a torta (que depois de refinada, formam o pó do cacau).

b) os fabricantes de chocolate, que, partindo do liquor de cacau e acrescentando manteiga, açúcar, leite e outros ingredientes resultam nos tabletes e outros produtos derivados.

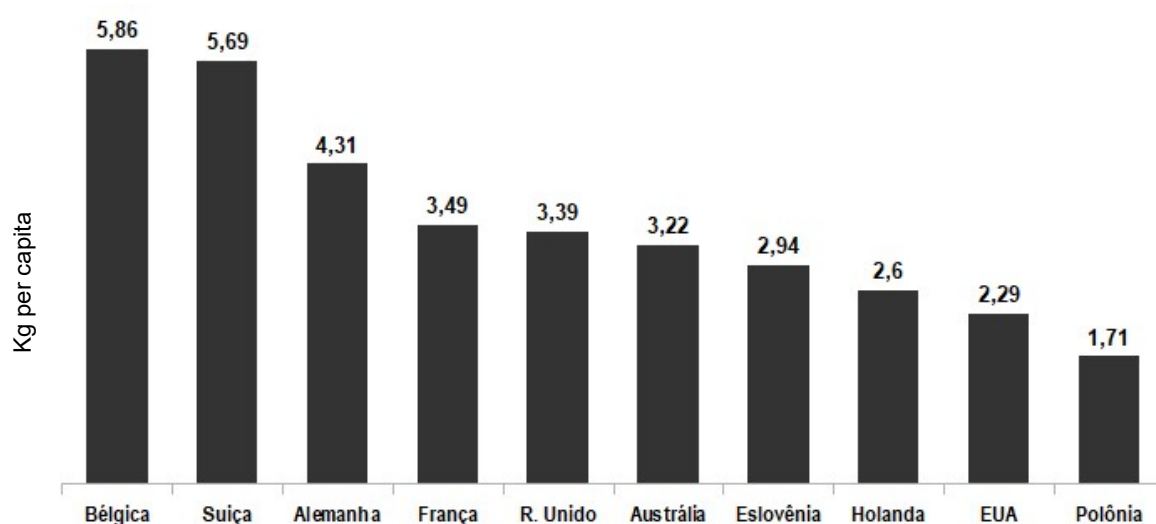


Figura 28. Os dez maiores países consumidores de amêndoas equivalentes per capita, 2014/2015 (em Kg/período). **Fonte:** adaptado de ICCO (2017).

O cultivo do cacau se concentra nos países próximos da linha do Equador em virtude do clima favorável para esta cultura. Entretanto, nem sempre, o país que processa amêndoas é o mesmo que cultiva o cacau. É possível verificar na figura 29, os países que mais processam amêndoas no mundo. Constata-se, que os maiores produtores de cacau perdem espaço neste segmento, entrando nesta classificação, países europeus como Holanda e Alemanha que não possuem nenhuma lavoura, e ainda assim, se destacam neste segmento.

Como pode ser percebido, há uma cadeia de suprimentos global em um sistema que inclui agricultores, compradores intermediários, organizações marítimas, processadores, fabricantes e distribuidores antes de se chegar ao consumidor final.

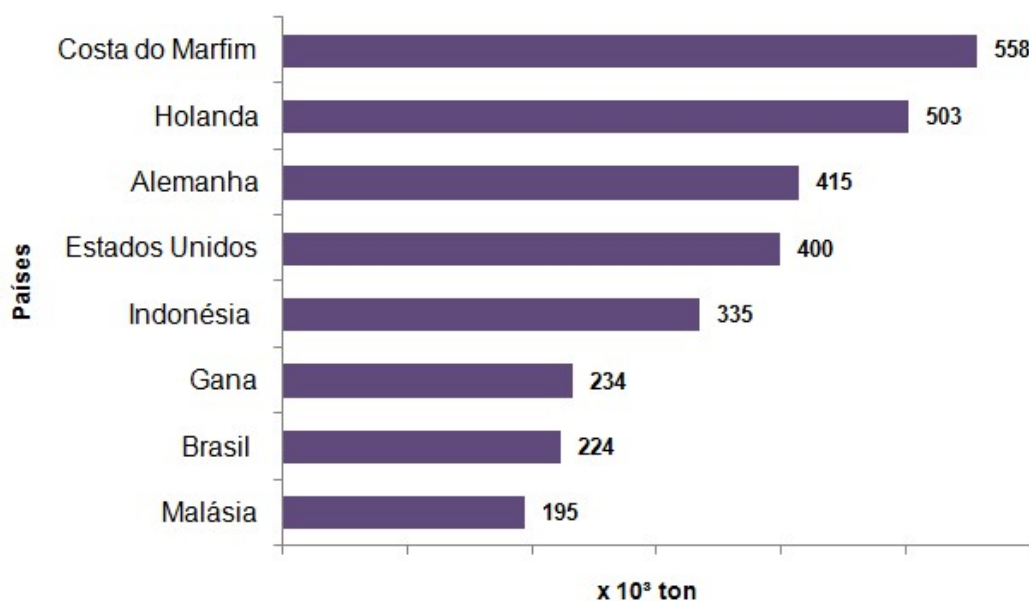


Figura 29. Os maiores países processadores de amêndoas de cacau, no período 2014-2015 (em 10^3 ton).

Fonte: adaptado de ICCO (2017).

Com relação ao Brasil, segundo dados da ABICAB (2017), foram consumidos 709×10^3 toneladas de chocolate em 2016. Apesar de ter havido uma queda expressiva com relação aos anos anteriores (figura 30) em função do cenário de recessão enfrentado pela economia brasileira, este segmento continua sendo importante para o país. Os fabricantes de chocolates, derivados do cacau e balas faturaram em 2016, R\$ 14,5 bilhões, representando pouco mais de 0,5% do PIB brasileiro (ABIA, 2017).

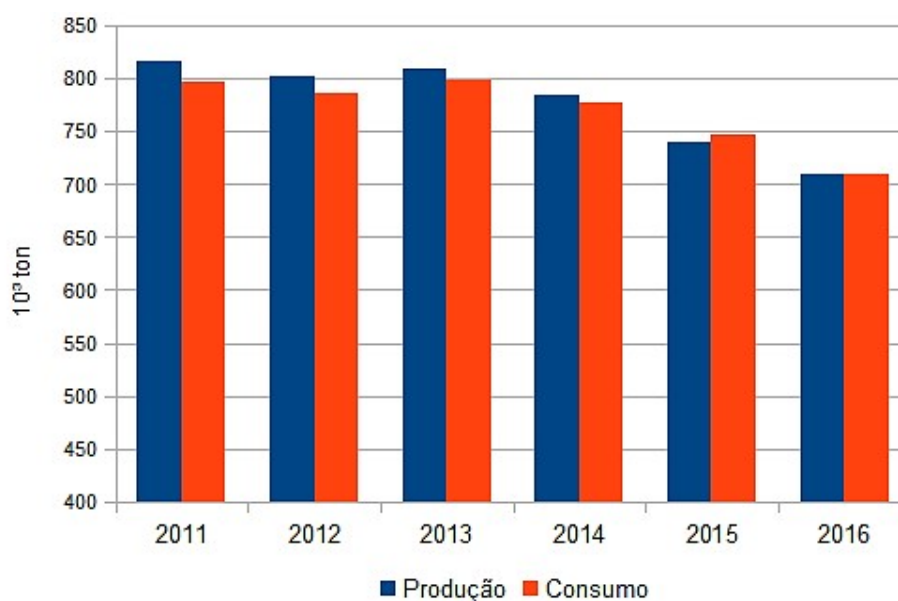


Figura 30. Produção e consumo de chocolates no Brasil. **Fonte:** ABICAB (2017)

2.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Ações antropogênicas na Terra estão transformando o planeta. Por um lado estamos recebendo uma maior irradiação solar em virtude do aumento do “buraco” na camada de ozônio, por outro, uma grande quantidade de CO₂ têm sido despejados na atmosfera, a maioria deste, gerado pela queima de combustíveis fósseis com um incremento grande a partir da Segunda Guerra Mundial. Os efeitos ainda estão sendo conhecidos e podem estar afetando entre outras coisas, o clima.

Inventários mundiais elaborados pelo IPCC apontaram quais os setores que mais contribuem com as emissões antropogênicas dos GEE. Pela ordem estão, a geração de eletricidade e aquecimento, a agricultura-silvicultura com outros usos do solo e as indústrias. No Brasil, a geração de eletricidade possui um indicador para suas emissões, chamado taxa equivalente de CO₂/kWh, que varia conforme a matriz energética utilizada. Dos setores apontados pelo IPCC, a indústria alimentícia engloba os três primeiros.

Para se conhecer as atividades de um sistema, um processo, de uma empresa ou até mesmo de uma cadeia de produção utiliza-se a ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida que engloba diversos aspectos conceituais de entradas e saídas, quantificações e balanços que são utilizadas para a tomada de decisão, nortear ações, corrigir excessos, melhorar a eficácia de um sistema ou vários subsistemas.

No segmento da indústria alimentícia encontram-se os fabricantes de chocolates que, por sua vez, iniciam suas cadeias com o cultivo agrícola atravessando diversas fases até chegar aos consumidores. Os fabricantes de chocolates têm uma importância significativa na economia brasileira gerando uma parcela de 0,5% do PIB nacional, possuindo sua própria cadeia de abastecimento com produtores, processadores, fabricantes e consumidores. Há ainda, a característica de manter certo equilíbrio entre oferta e demanda de amêndoas, atendendo o mercado interno.

A produção do chocolate tem sido aprimorada ao longo dos anos, desde quando este surgiu como bebida até os modernos formatos e ingredientes diversos. A utilização de processos produtivos ambientalmente corretos poderá agregar mais valor a este produto.

3. MÉTODO DE PESQUISA

O presente trabalho busca avaliar a cadeia produtiva do chocolate com relação ao balanço de massa, o consumo de energia elétrica e a correspondente emissão e captura de CO₂ utilizando-se da ACV. Assim, a pesquisa pode ser classificada como exploratória e desenvolvida na forma de um estudo de caso.

Foi realizado o levantamento teórico da literatura científica, delineadas as proposições e delimitada as fronteiras de estudo dos processos de fabricação do chocolate. A coleta quantitativa de dados foi feita em uma indústria no interior do Estado de São Paulo, além de produtores e pesquisadores de cacau nos Estados da Bahia e Espírito Santo. A figura 31 mostra de forma simplificada o roteiro do desenvolvimento da pesquisa.

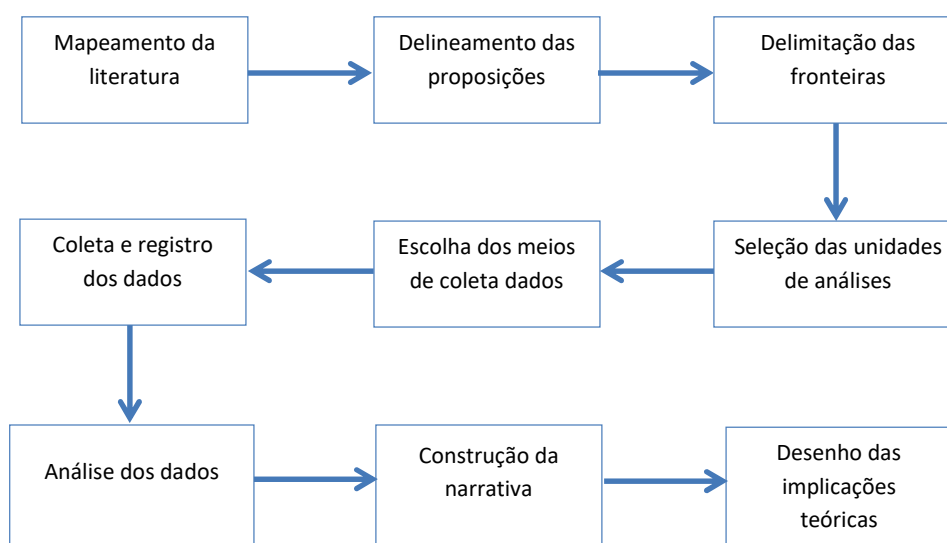


Figura 31. Roteiro da pesquisa.
Fonte: adaptado de Miguel (2007)

O estudo combina dados extraídos da literatura científica e um estudo de caso único, com alcance descritivo. A aplicação de um estudo de caso focaliza eventos contemporâneos (YIN, 2015) e, no caso presente, corresponde ao aumento da concentração de CO₂ na atmosfera e da sustentabilidade na cadeia produtiva de um produto específico, o chocolate. O alcance descritivo propõe a junção dos elementos

presentes na literatura científica, evidenciando os dados extraídos, relacionando-os ao tema e respondendo as perguntas de pesquisa.

Foi necessário delimitar as fronteiras para prover a devida profundidade que o estudo exige, optando-se em analisar a cadeia que envolve a fabricação do chocolate. Essa fronteira está demonstrada de forma simplificada na figura 32.

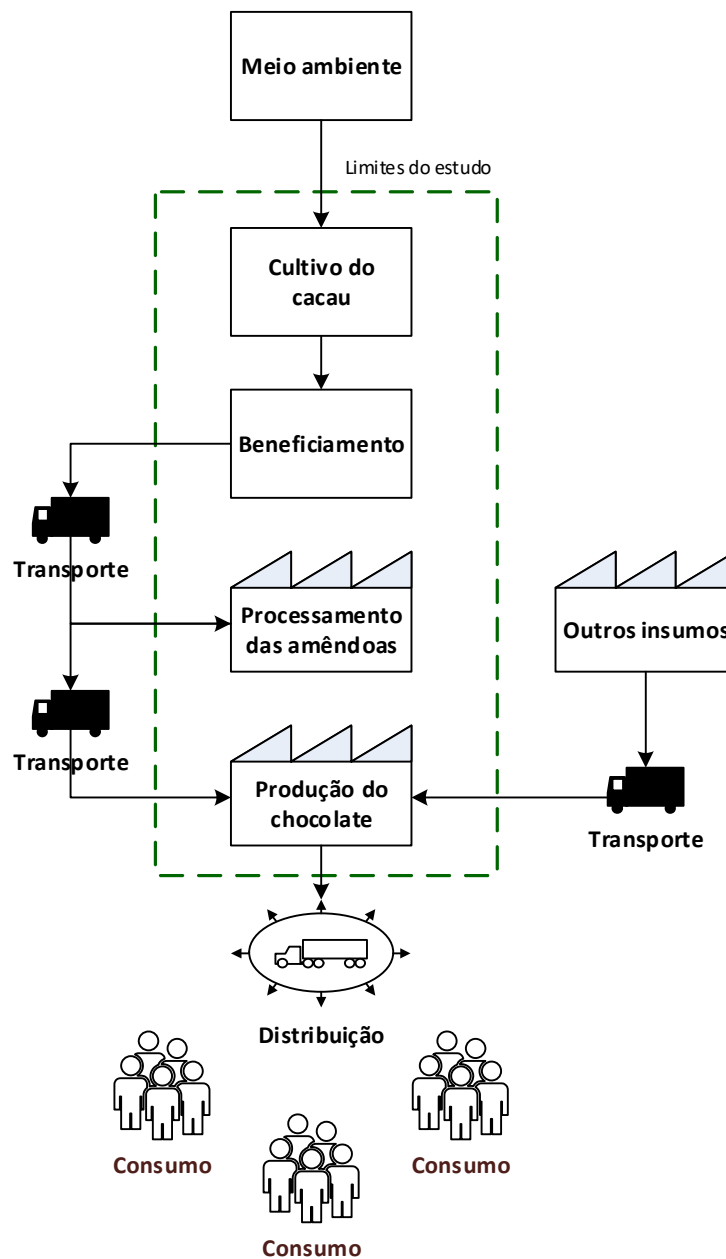


Figura 32. Representação simplificada da delimitação da fronteira do estudo.
Fonte: elaborado pelo autor.

Para delinear as proposições, o estudo concentrou-se na elaboração do consumo de energia elétrica e balanço de massa tanto para a fase de produção do chocolate quanto para a fase de processamento de amêndoas.

Na fase de produção do chocolate, as informações foram coletadas diretamente de uma empresa, um fabricante localizado no Brasil, interior do estado de São Paulo que contribuiu para que este estudo fosse realizado. A coleta dos dados foi feita *in loco*, por 15 dias durante o mês de maio do ano de 2016. Como se trata de um processo feito em bateladas de 1.500 Kg, repetitivo, não houve necessidade de se acompanhar o processo por mais tempo. Os equipamentos e o método de fabricação que a empresa utilizava no ano do estudo eram os mesmos do ano anterior, 2015.

Inicialmente foram feitas as observações diretas no chão de fábrica e, após compreensão da sequência do processo, foi elaborado um fluxograma para a coleta de dados. Foi possível dessa maneira, quantificar as entradas e saídas de cada etapa do processo produtivo para formar o balanço de massa. Na etapa posterior, recorreu-se aos profissionais da empresa para que, seguindo o fluxograma, realizasse a medição em cada etapa para quantificar o consumo de energia elétrica.

Na fase de processamento das amêndoas, os dados referentes ao balanço de massa e consumo de energia elétrica foram extraídos de um estudo de caso presente na literatura.

Buscou-se estabelecer na fase do processamento das amêndoas a mesma sequência apresentada anteriormente para a produção do chocolate, elaboração do fluxograma, balanço de massa e consumo de energia elétrica. No balanço de massa, optou-se por utilizar como dado de entrada, a mesma quantidade inicial do fluxograma da fabricação de chocolate, isto é 1.500 Kg de amêndoas (para se fazer um comparativo entre indústrias). O respectivo consumo de energia elétrica apresentado baseou-se também na literatura, obedecendo as capacidades produtivas dos equipamentos.

De posse do balanço de massa e do consumo de energia elétrica de ambas empresas (fabricação e processamento), estabeleceu-se a taxa de consumo de energia por tipo de produto fabricado. No caso dos fabricantes, consumo em kWh/Kg

de chocolate, enquanto que na indústria processadora foram quatro produtos destacados: *nibs*, liquor, manteiga e cacau em pó, todos obedecendo a mesma taxa em kWh/Kg.

Como a empresa em que foi realizado o estudo de caso forneceu os dados de produção anual de chocolates, foi possível estimar o consumo anual de energia elétrica baseado nas taxas encontradas. Deste consumo anual estimado, foi possível estimar também, a emissão equivalente de CO₂ da empresa em um ano baseando-se na taxa média de emissão por kWh, fornecidos pelo MCTI.

Ainda de acordo com a produção anual de chocolates da referida empresa e dos dados do balanço de massa, realizou-se uma extrapolação destes dados visando simular o abastecimento com matérias primas. Tomando o cuidado de considerar uma receita básica do produto chocolate, levantou-se a necessidade de matéria prima anual para atender essa demanda, da mesma forma que, com o balanço de massa da processadora de amêndoas, obteve-se a quantidade de amêndoas secas necessárias.

Conseqüentemente, diante da necessidade de amêndoa seca, recorreu-se novamente à literatura para encontrar as formas de cultivo, balizamento e produtividade por hectare das lavouras cacaeiras e seus respectivos sequestros de carbono. Assim, diante de tal necessidade, foi estimada a área necessária plantada de árvores, sendo feito em seguida, a estimativa de seqüestro de CO₂ deste cultivo.

Todo este fluxo de coleta de dados, extrapolação e a apresentação dos resultados foi baseado na ferramenta de ACV, gerando resultados para formar as implicações teóricas relacionadas a cadeia produtiva do cacau-chocolate. O diagrama-síntese representado na figura 33 resume a forma de condução deste estudo.

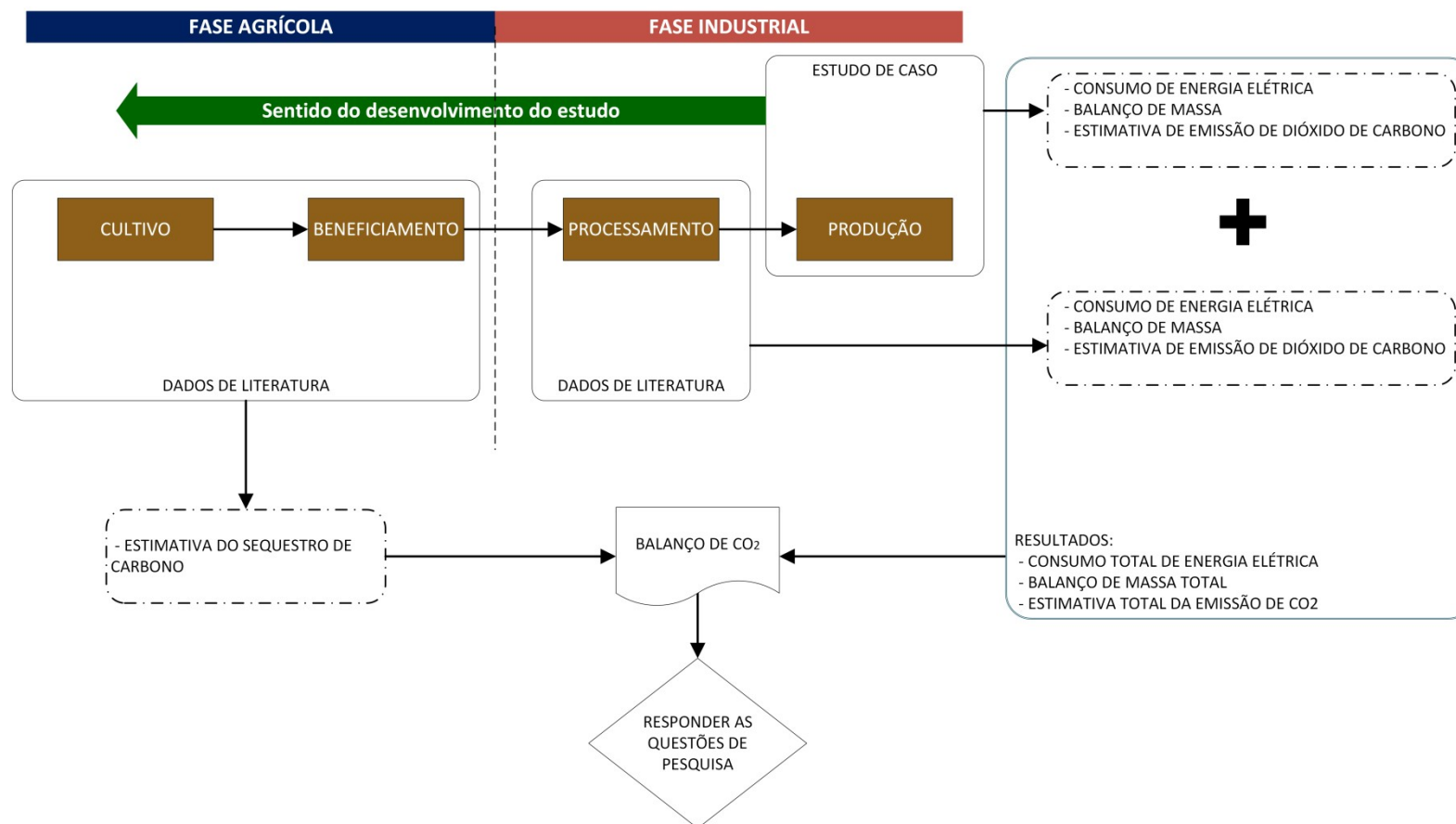
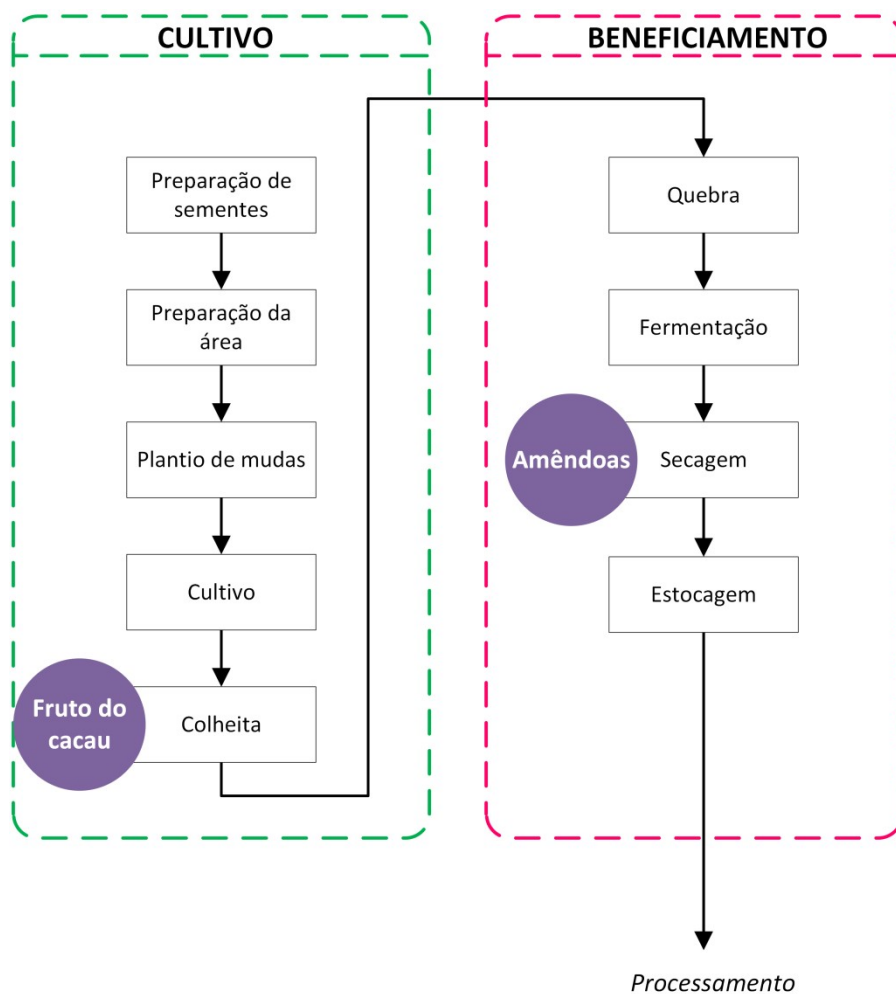


Figura 33. Diagrama-síntese que representa a forma de condução do estudo
Fonte: elaborado pelo autor.

4. RESULTADOS

4.1. CADEIA DE PRODUÇÃO DO CACAU CHOCOLATE

A figura 34 faz um resumo simplificado das fases de produção da cadeia produtiva do cacau e seus principais produtos.



LEGENDA



- Produtos comercializáveis resultantes de determinadas fases dos processos

Figura 34. A cadeia produtiva do chocolate
Fonte: elaborado pelo autor a partir de Beckett (2009), Cohen *et al.* (2003) e Talbot (2009).

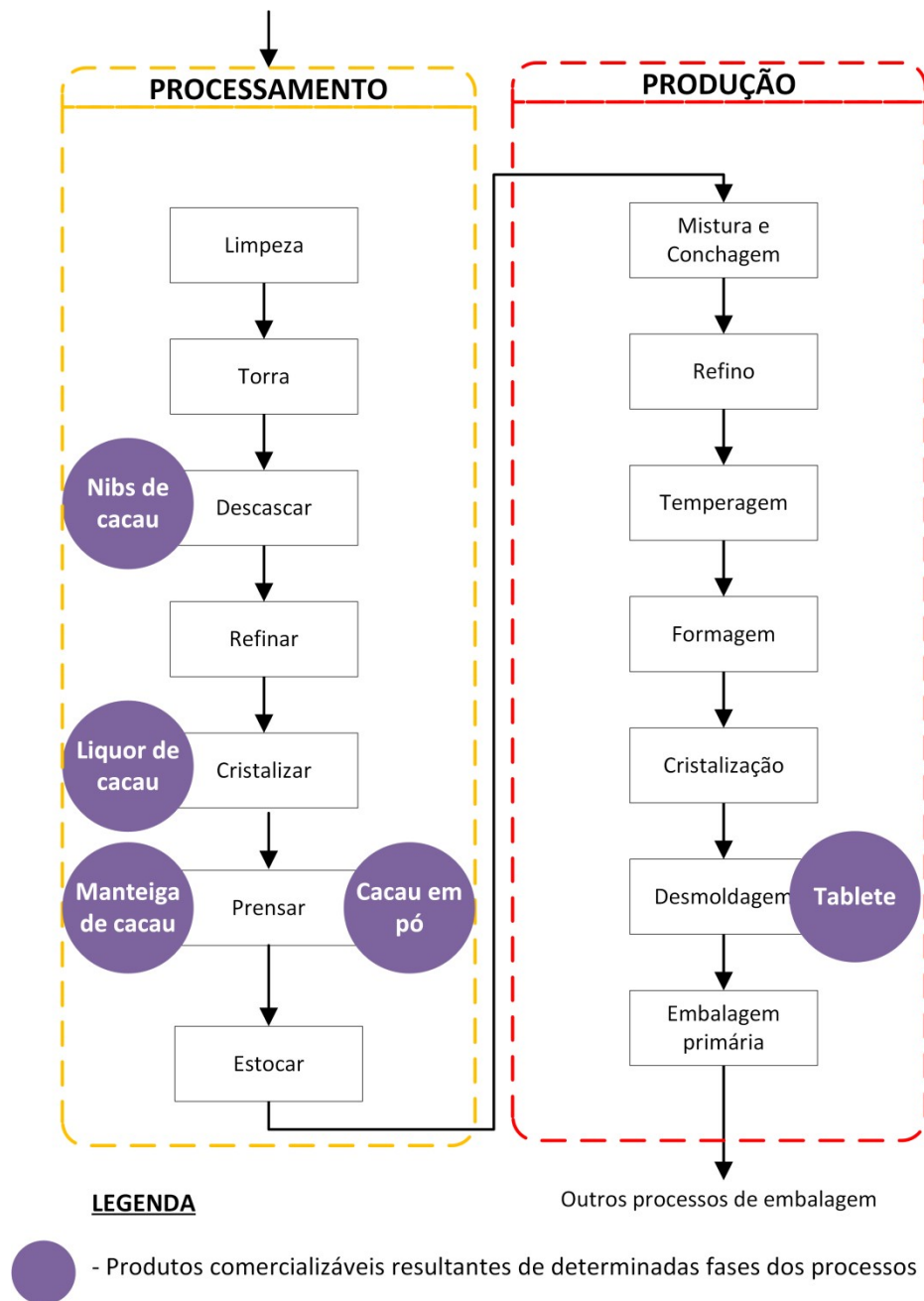


Figura 34. Continuação. A cadeia produtiva do chocolate
Fonte: elaborado pelo autor a partir de Beckett (2009), Cohen *et al.* (2003) e Talbot (2009).

4.2. PRODUÇÃO DE CHOCOLATE

Aplicando a ferramenta ACV, buscou-se identificar dentro do processo produtivo do chocolate, o balanço de massa e o consumo de energia diretamente ligada ao processo de transformação dos ingredientes em chocolate.

A empresa recebe os ingredientes de diversos fornecedores homologados pela companhia, dentre eles, os produtos oriundos do cacau que são enviados pelos processadores. Depois do recebimento e do acondicionamento adequado, a empresa processa os ingredientes de acordo com a formulação empregada para o chocolate, utilizando-se de diversos equipamentos em sequência para transformá-lo em tabletes. A figura 35 mostra um resumo conceitual do fluxo de entradas e saídas da empresa.

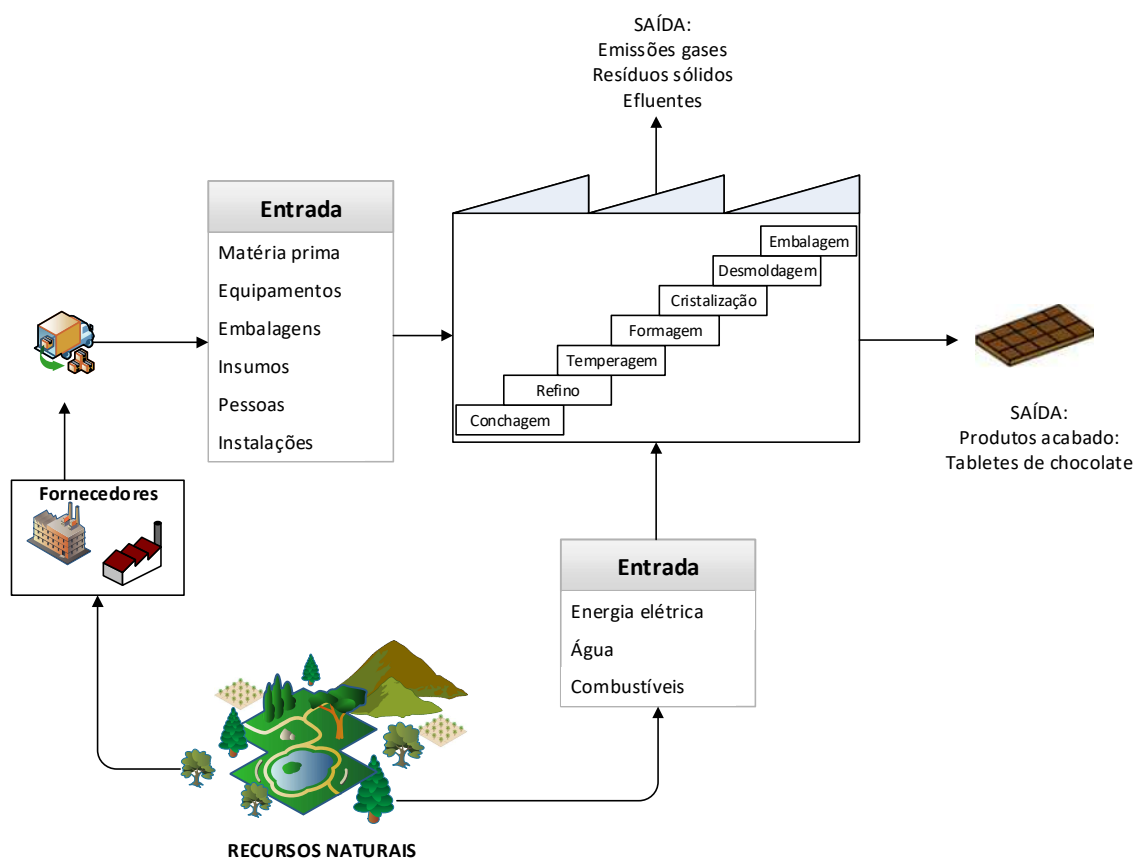


Figura 35. Fluxo conceitual do modelo de produção da empresa analisada.

Fonte: elaborado pelo autor.

Durante o ano de 2015, a empresa produziu um total de 1.460 t de chocolate conforme dados obtidos e apresentados na tabela 6.

Tabela 6. Produção de chocolates da empresa estudada no ano de 2015.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Produção chocolate (t)	140	140	140	90	80	100	120	140	130	130	140	110	

Total de chocolate produzido (t) -> 1.460

Fonte: elaborado pelo autor.

O fluxograma elaborado e representado na figura 36 apresentou a seguinte sequência: mistura e conchagem, refino, temperagem, formagem, cristalização, desmoldagem e embalagem. Estes termos são característicos da indústria alimentícia que produz chocolates.

As etapas apresentadas no fluxograma da figura 36 foram descritas por Cohen; Luccas; Jackix (2004) e aqui foram resumidas:

- a) mistura: é a homogeneização dos ingredientes nas proporções corretas da formulação até a obtenção de uma massa uniforme;
- b) conchagem: etapa em que o produto é submetido por várias horas à agitação e cisalhamento sob temperatura controlada (60°C a 70°C), removendo voláteis indesejáveis, promovendo a redução da umidade e da viscosidade, desenvolvendo sabor;
- c) refino: realiza-se a redução de granulometria da massa, de modo que 90% das partículas atinjam dimensões em torno de 20 μm ;
- d) temperagem (ou pré-cristalização): etapa responsável pela indução da cristalização da manteiga de cacau em sua forma mais estável, chamada de forma beta (β);
- e) formagem (ou moldagem): em que o chocolate em estado líquido é depositado em moldes, resfriados na etapa posterior até atingir um grau de cristalização (solidificação) adequado;
- f) desmoldagem: processo de extração dos tabletes solidificados do molde e;
- g) embalagem: inserção do tablete em envoltório protetivo para comercialização.

Importante destacar que na empresa estudada não há uso de caldeiras nem de biomassa para aquecimento. Entre as entradas apontadas na figura 36, o ar quente e água quente são aquecidos por meio da energia elétrica que, neste estudo, não estão contemplados no consumo direto. São apontados na “taxa indireta de consumo” apresentado na sequência deste capítulo.

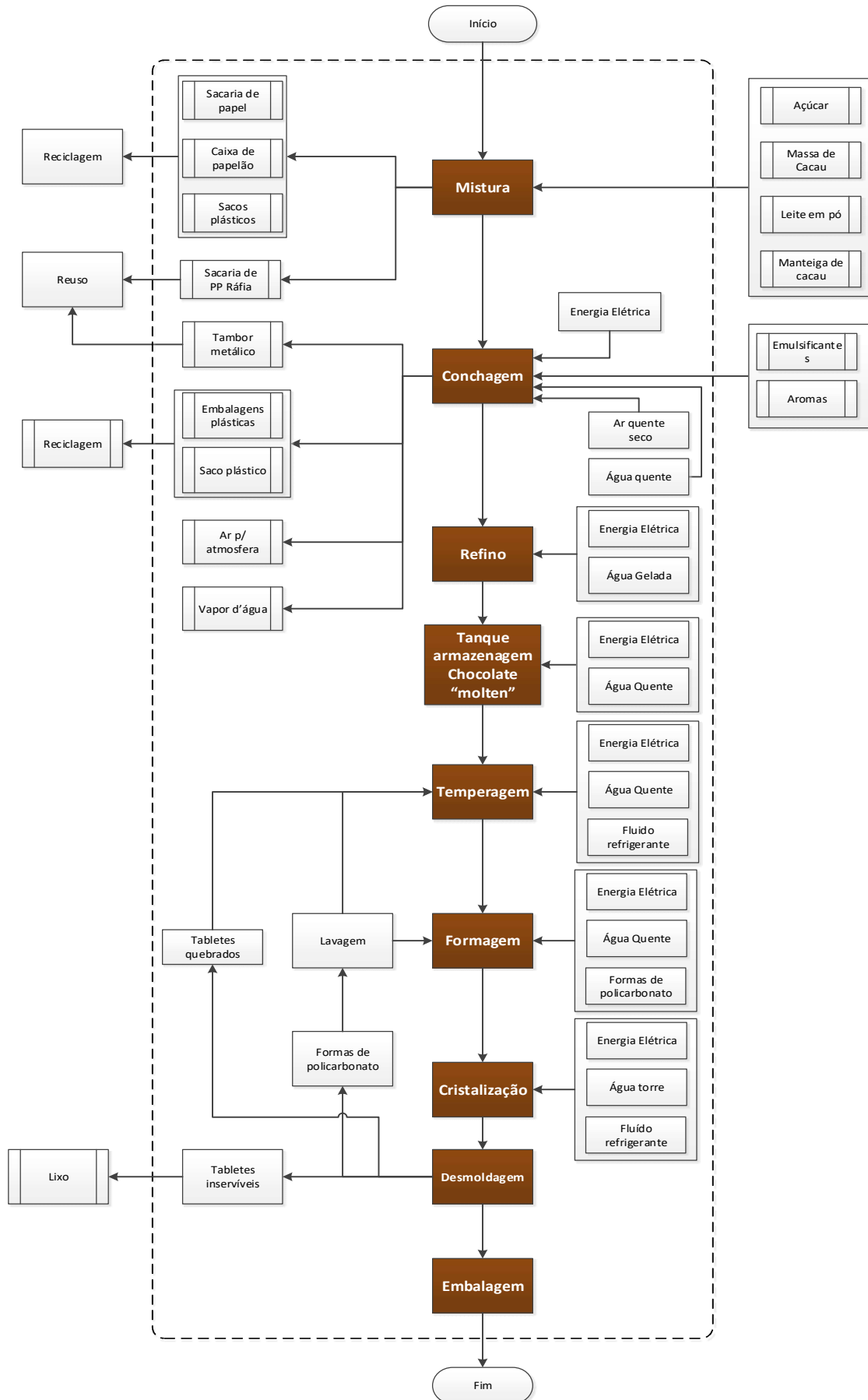


Figura 36. Fluxograma do processo produtivo do chocolate em tablete com abordagem de ACV. **Fonte:** elaborado pelo autor.

Devido à formulação do produto tratar-se de um componente intangível, um *know-how* da empresa que assegura a sua diferenciação, foi definido uma receita básica de chocolate sabor “ao leite” que se enquadra nas sugestões de Talbot (2009) e Beckett (2009). O peso final do tablete é de 100g cada unidade. A tabela 7 apresenta a formulação com seus ingredientes.

Tabela 7. Receita básica de chocolate ao leite.

Ingredientes	%	Em Kg
Açúcar	45,6%	684
Leite em pó	20,0%	300
Manteiga de cacau	21,4%	321
Liquor de cacau	12,0%	180
Lecitina de soja	0,5%	7,5
PGPR	0,5%	7,5
Total	100%	1500

Fonte: adaptado pelo autor de Talbot (2009) e Beckett (2009)

Não obstante, a formulação escolhida atende a legislação brasileira para chocolates, cuja regulamentação da composição deve conter no mínimo 25% (g/100 g) de sólidos totais de cacau (BRASIL, 2005).

De forma resumida, os ingredientes que compõem a formulação definida foram explanados por Beckett (2008):

- Açúcar (sacarose) é produzido da cana de açúcar ou da beterraba ambos dão o mesmo cristal natural dissacarídeo (glicose e frutose);
- Leite em pó: recomendado por conter baixa quantidade de água, já que esta destrói as propriedades de fluxo de chocolate líquido. A gordura láctea proporciona textura e sabor característicos;
- Manteiga de cacau: é a gordura da amêndoa extraída do *nib* do cacau. Proporciona a aglomeração dos componentes, maior viscosidade e é o principal ingrediente responsável em manter o produto sólido e de se fundir com a temperatura corporal (derreter na boca).
- Liquor de cacau: depois da amêndoa torrada e de retirada sua casca, são produzidos os *nibs* que derretido formam o liquor. Este produto contém tanto gordura quanto a parte sólida, dando corpo e conferindo sabor característico do chocolate;

- Lecitina: substância natural, frequentemente obtida da soja e usada para aumentar a viscosidade da massa de chocolate facilitando a fabricação. Também auxilia na unificação dos componentes da receita;
- PGPR (polirricinoleato de poliglicerol): redutor da viscosidade, auxilia no ajuste da escoabilidade da massa;

4.2.1. BALANÇO DE MASSA DA PRODUÇÃO DO CHOCOLATE

Seguindo o processo, na etapa de mistura e conchagem, os ingredientes da formulação são abastecidos diretamente no equipamento concha. O total de entrada de matérias primas perfazem 1.500 Kg (aqui considerado como entrada a 100%). Após a conchagem, o total de chocolate em estado líquido transferido por bomba é de 1.492 Kg (99,47%). Na sequência, um tanque recebe o produto que passa a circular por meio de tubulações em um circuito fechado integrado com um moinho de esferas para refino, tendo como saída resultante 1.481 Kg (98,73%). Após atingir o refino especificado, o montante é transferido para um tanque de armazenagem. O fabricante possui um tanque com capacidade de 6.000 Kg sendo que este possui um revestimento para mantê-lo em estado líquido (chocolate *molten*). Neste recipiente, há um agitador que mantém a massa derretida constantemente. A tabela 8 mostra resumidamente o balanço de massa da produção do chocolate.

Tabela 8. Resumo do balanço de massa para o processo produtivo do chocolate.

Etapa do processo	Balanço de massa			% redução por etapa (em função da entrada de 100%)
	Entrada (em Kg)	Saída (em Kg)	Perdas (em Kg)	
Mistura e conchagem	1.500,0	1.492,0	8,0	0,53%
Refino	1.492,0	1.481,0	11,0	1,27%
Armazenagem	1.481,0	1.481,0	0,0	1,27%
Temperagem	1.481,0	1.480,0	1,0	1,33%
Formagem	1.480,0	1.477,0	3,0	1,53%
Cristalização	1.477,0	1.477,0	0,0	1,53%
Desmoldagem	1.477,0	1.455,0	22,0	3,00%
Embalagem	1.455,0	1.452,5	2,5	3,17%
Total			47,50	

Fonte: o próprio autor

O processo seguinte é o da temperagem no qual o chocolate passa por um equipamento para receber um choque térmico que reduz sua temperatura entre 35°C a 40°C para 28°C ($\pm 0,5$ °C) e assim estimular a formação dos cristais tipo beta (β) presentes na manteiga de cacau que são responsáveis pela cristalização do produto. Na temperagem a saída total de chocolate foi de 1.480 Kg (98,67%).

Na formagem, o produto é dosado em moldes plásticos para dar formato ao produto (neste caso, em tabletes). Nesta etapa, a saída foi de 1.477 Kg (98,47%). Os moldes com chocolate derretido entram por meio de uma esteira numa câmara fria chamada de túnel de cristalização. Não foi registrado perda neste processo, permanecendo na saída, o total de 1.477 Kg (98,47%).

Após a cristalização, os tabletes estão formados e há uma operação manual de desmoldagem do chocolate. Ao final desta operação, resultou em 1.455 Kg de tabletes de chocolate (97,00%). Após o desmolde, os tabletes são inseridos num filme plástico de *Bopp* (polipropileno bi-orientado) numa máquina embaladora horizontal *flowpack* para comercialização. Ao final desta etapa, o rendimento total do chocolate foi de 1.452,5 Kg (96,83%).

Um resumo com estes valores está apresentado no fluxograma da figura 37. As diversas perdas decorrentes do processo se devem por questões de eficiência na descarga do produto em estado líquido.

Há outras perdas também no momento da transferência entre equipamentos, na passagem pelas tubulações, deficiências no processo de dosagem, quebras dos tabletes cristalizados no desmolde (realizados manualmente pelos operadores) e perdas no processo de embalagem.

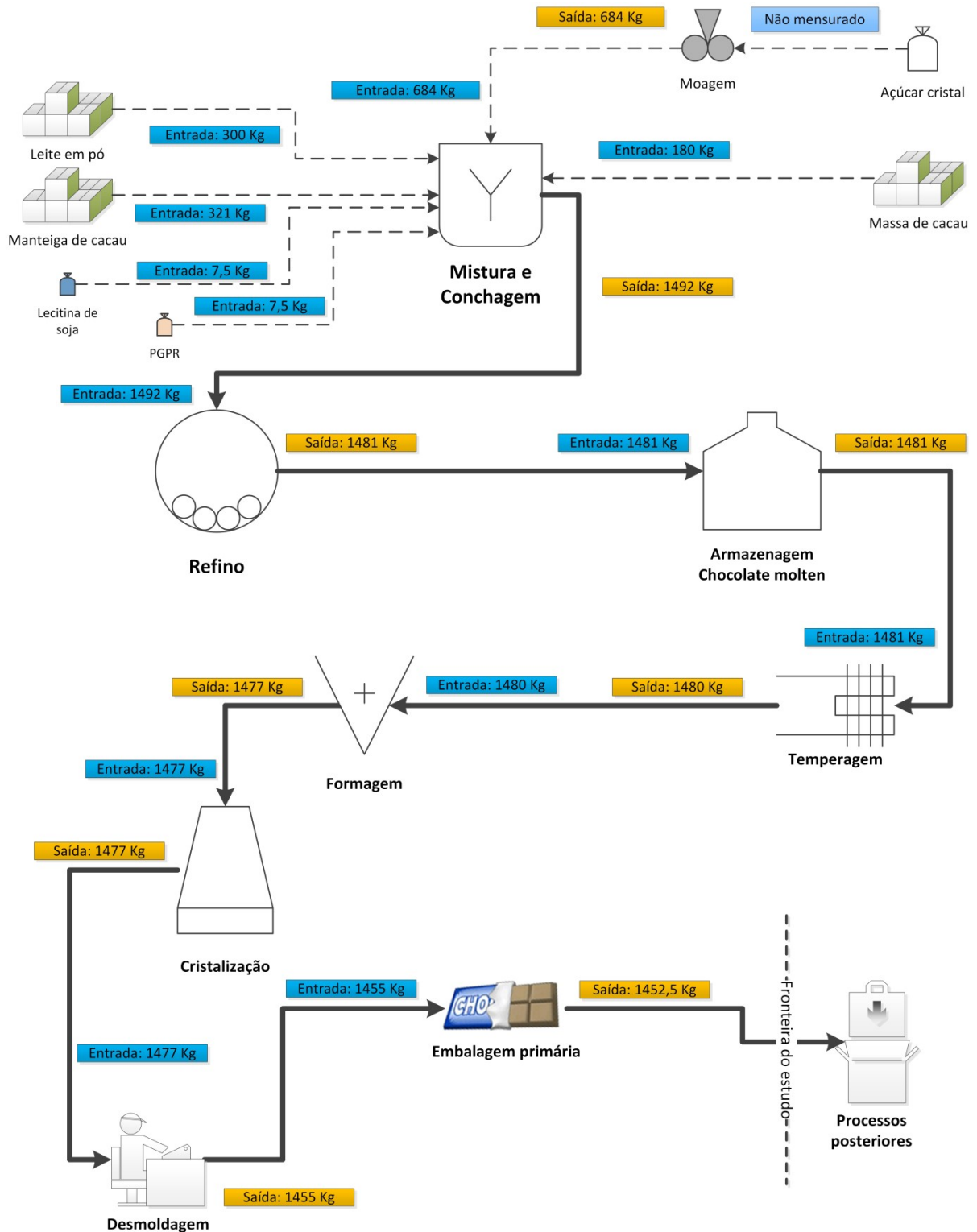


Figura 37. Balanço de massa por processo.

Fonte: o próprio autor.

4.2.2. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA PRODUÇÃO DO CHOCOLATE

Nesta fase, recorreu-se ao auxílio dos profissionais da empresa para a medição do consumo em cada etapa do processo nos vários dias de acompanhamentos realizados. Todos os equipamentos de medição encontravam-se testados e calibrados.

Assim, obteve-se os seguintes resultados para o processo de fabricação: mistura e conchagem 23,96 kWh, refino 57,64 kWh. Na armazenagem 9,70 kWh, seguido da temperagem 18,16 kWh. A formagem foi de 6,19 kWh; cristalização 19,71 kWh.

Por se tratar de uma operação manual, não há consumo de energia elétrica no processo de desmoldagem. Na embalagem primária, o valor obtido foi de 2,2 kWh. Estes dados estão resumidos na tabela 9.

Tabela 9 - Dados coletados no consumo de energia elétrica por processo.

Etapa do processo	Consumo de energia (kWh)	Tempo necessário para uma batelada (h)	Consumo total (kWh)
Mistura e conchagem	23,96	6	143,76
Refino	57,64	6	345,84
Armazenagem	9,70	*	465,60*
Temperagem	18,16	6	108,96
Formagem	6,19	6	37,14
Cristalização	19,71	6	118,26
Desmoldagem	---	6	---
Embalagem	2,20	6	13,20
Total			1.232,76

Fonte: o próprio autor.

* - empresa informou que o chocolate produzido no dia só é utilizado em média 48h depois.

Com esses dados, foi possível estabelecer uma taxa de consumo de energia elétrica por quilograma de chocolate produzido (kWh/Kg). Apesar de a batelada ser de 1.500 Kg, o balanço de massa apontou que, efetivamente, 1.452,5 Kg de chocolate são embalados ao fim do processo.

O consumo de energia necessário para produzir esta quantidade, foi de 1.232,76 kWh, conseguiu-se estabelecer uma relação entre energia elétrica necessária para

cada quilograma de chocolate produzido. Dessa maneira, a taxa encontrada foi de 0,848 kWh/Kg de chocolate.

Esta taxa foi elaborada a partir de dados obtidos nos processos que envolvem diretamente a fabricação do produto em si, não estando computados por exemplo, o consumo da resistência elétrica que aquece o tanque de armazenagem do chocolate ou a energia que mantém os computadores ligados. Como todas são importantes, convencionou-se diferenciar a energia elétrica consumida.

Àquela energia utilizada de forma direta na fabricação passou a ser identificada como “taxa direta de consumo” enquanto que a energia consumida pelos processos auxiliares da empresa recebeu o nome de “taxa indireta de consumo”.

Como ambas são importantes para responder às perguntas de pesquisa, foi necessário levantar o consumo geral da empresa. Para tal, foi necessário buscar todo o consumo de energia do ano de 2015. Os dados foram obtidos da concessionária de fornecimento público. A tabela 10 apresenta os dados de consumo de energia elétrica e da produção.

Tabela 10. Resumo do consumo geral mensal de energia elétrica e respectiva produção de chocolates no ano 2015 na empresa estudada

Mês	Consumo (kWh)	Produção de chocolate (Kg)
Janeiro	130.211	140.000
Fevereiro	128.120	140.000
Março	133.412	140.000
Abril	122.541	90.000
Maio	98.224	80.000
Junho	108.121	100.000
Julho	122.179	120.000
Agosto	125.410	140.000
Setembro	130.045	130.000
Outubro	132.142	130.000
Novembro	98.015	140.000
Dezembro	95.142	110.000
Total	1.423.562	1.460.000

Fonte: dados coletados pelo autor.

Estabelecendo o mesmo padrão de cálculo da taxa anterior, sendo o total de energia consumida em um ano de 1.423.562 kWh e uma produção total de 1.460.000 Kg de chocolate, desta forma, portanto, a “taxa indireta de consumo” foi de 0,975 kWh/Kg, uma diferença de +14,97% com relação a taxa direta de consumo. Esta diferença entre as taxas (0,127 kWh/Kg) quando analisada sozinha, representa o valor que deve ser acrescido para conhecer o consumo indireto da empresa.

4.3. PROCESSAMENTO DAS AMÊNDOAS DO CACAU

Toda a série de dados apresentados nesta parte da dissertação foram pesquisados e coletados na literatura sobre o tema, estando indicadas para consulta. Buscou-se assim, estabelecer a mesma sequência apresentada anteriormente para a produção do chocolate: levantamento do fluxograma, balanço de massa e consumo de energia elétrica.

O processamento das amêndoas de cacau pode ser realizada de diversas maneiras. Optou-se, seguir o fluxograma apresentado por Beckett (2008) partindo das amêndoas secas do cacau, que chegam por sacos às indústrias processadoras, seguindo os processos de fabricação destacados anteriormente na figura 23.

4.3.1. BALANÇO DE MASSA DO PROCESSAMENTO DAS AMÊNDOAS DO CACAU

Os dados quantificados referem-se a um estudo de caso da produção diária de uma empresa processadora e foram apresentados no estudo de Moh Riyan (2015), somados aos estudos de Saltini e Akkerman (2012) e Cohen *et al.* (2003).

A tabela 11 apresenta os dados referentes ao balanço de massa. A quantidade escolhida para desenvolvimento dessa análise foi de 1.500 Kg de amêndoas na entrada do processo. Essa referencia foi tomada somente para manter o mesmo valor do balanço de massa anterior elaborado para o processo de produção do chocolate e poder fazer comparação entre processamento de amêndoas e produção de chocolates. Apenas como informação, as amêndoas de cacau são fornecidas em sacos com 60 Kg, o que necessitaria de 25 sacas para o início do processamento.

Tabela: 11. Balanço de massa no processamento das amêndoas do cacau.

Processo	Entrada (em Kg)	Saída (em Kg)	Perdas (em Kg)	% perda	% redução por etapa (em função da entrada à 100%)
Limpeza e separação	1.500,00	N/A*	N/A*		
Torra	1.500,00	1.453,50	46,50	3,1%	3,10%
Descascamento	1.453,50	1.191,80	261,70	18,0%	20,55%
Refino	1.191,80	1.191,80	0,00	0,0%	---
Cristalização	1.191,80	1.191,80	0,00	0,0%	---
Prensagem					
Manteiga de cacau	1.191,80	524,3	0,00	0,0%	34,95%
Torta		667,5	0,00	0,0%	44,50%
Moagem da torta			0,00		
Cacau em pó	667,5	614,8	52,70	7,9%	41,00%

Fonte: adaptado de Saltini e Akkerman (2012) e Moh Riyan (2015).

* N/A: não aplicado. Valor depende de vários fatores como, tipo de fornecedor, região, métodos utilizados na fazenda, resultados da safra etc. Preferiu-se então manter sem valores para perda.

A figura 38 mostra o fluxograma do processamento das amêndoas. Neste, é apresentado o balanço de massa para uma entrada de 1.500 Kg de amêndoas secas. Como são quatro produtos resultantes, optou-se por apresentar os resultados considerando a produção individual de cada um deles. Por exemplo, com este valor de entrada de amêndoas, seria possível produzir 1.191,8 Kg de *nibs* e nenhum outro produto mais. Caso seja escolhida a produção de manteiga, com a mesma entrada, passando pelos processos anteriores de torra, descascamento, refino, cristalização e prensa, resultaria em 524,3 Kg. Valendo o mesmo raciocínio para os outros produtos.

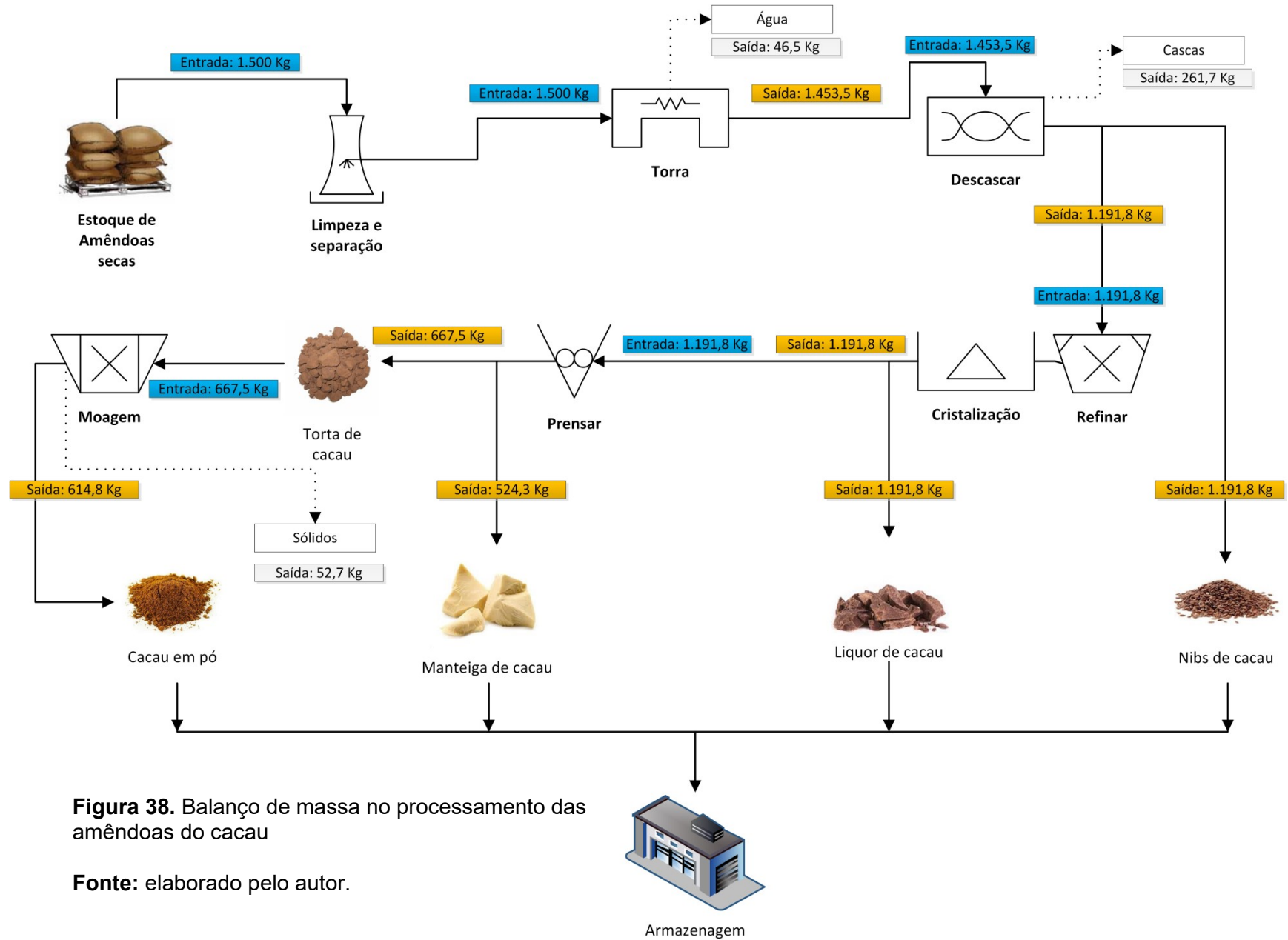


Figura 38. Balanço de massa no processamento das amêndoas do cacau

Fonte: elaborado pelo autor.

4.3.2. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO PROCESSAMENTO DAS AMÊNDOAS

A elaboração do consumo de energia elétrica para o processamento de amêndoas foi realizado baseando-se no estudo de caso de Moh Riyan (2015), somados aos estudos de Saltini e Akkerman (2012). Os cálculos foram feitos partindo dos valores apresentados no balanço de massa anterior (item 4.3.1), contemplando a quantidade de amêndoas na entrada de 1.500 Kg. As capacidades produtivas dos equipamentos do estudo foram mantidos para elaborar os resultados, conforme demonstrados na tabela 12.

Tabela 12. Resumo do consumo de energia elétrica no processamento das amêndoas.

Processo	Consumo de energia (kWh)	Tempo de operação (h)	Energia total consumida (Kwh)
Limpeza e separação	20,9	12,5	261,5
Torra	10,2	18,8	190,9
Descascamento	20,7	18,2	376,8
Refino	19,2	23,8	456,5
Cristalização	*	*	*
Prensagem	669,4	33,1	22.160,9
Moagem	45,4	49,7	2.256,5
		Total	25.703,1

* dados não fornecidos

Fonte: Moh Riyan (2015)

Como são pelo menos quatro produtos gerados a partir da amêndoa do cacau, foi necessário categorizar o consumo de energia elétrica para cada um deles ao passo que estes vão sendo processados. A tabela 13 detalha esta separação.

Tabela 13. Taxas estimadas de consumo de energia elétrica por Kg de produto oriundos do processamento das amêndoas.

Processo	Energia consumida no processo (kWh)	Balanço de massa Quantidade efetiva (em Kg)	Consumo equivalente (kWh/Kg)	Taxas de consumo de energia elétrica por produto resultante									
				Produto	Consumo (kWh/Kg)	Produto	Consumo (kWh/Kg)	Produto	Consumo (kWh/Kg)	Produto	Consumo (kWh/Kg)		
Limpeza e separação	261,5	1.500,0	0,17										
Torra	190,9	1.453,5	0,13	Nibs	0,62								
Descascamento	376,8	1.191,8	0,32			Liquor de cacau	1,00						
Refino	456,5	1.191,8	0,38					Manteiga de cacau	22,14				
Cristalização	**	1.191,8	**							Pó de cacau	42,41		
Prensagem manteiga*	22.160,9	524,3	21,13										
Prensagem torta*		667,5	16,60										
Moagem	2.256,5	614,8	3,67										

Fonte: elaborado pelo autor.

* para a prensagem, foi dividido o consumo de energia em duas partes iguais (11.180,45 kWh) para cada produto.

** dado não disponível

4.4. ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CO₂

Com os dados referentes às quantidades de energia elétrica consumida direta e indiretamente para a fabricação do chocolate e do consumo estimado no processamento das amêndoas, utilizou-se da seguinte equação adaptada do IPCC (2006) para elaborar a estimativa das emissões de CO₂ referente ao período estudado, baseando-se no fator de emissão do MCTI:

$$E_{CO_2} = Cons \times FE$$

Onde:

E_{CO_2} : Emissão de dióxido de carbono (gCO₂/ano)

$Cons$ Consumo de energia elétrica (kWh/ano)

FE Fator de emissão médio para o ano analisado (gCO₂/ano)

A energia elétrica consumida pela empresa em estudo no ano de 2016 (interior do estado de São Paulo) é proveniente do SIN, isto é, gerada de diversas localidades do país e operacionalizada pelo ONS. Na ocasião, a média do ano para emissão informada foi de 0,0817 gCO₂/kWh (MCTI, 2017). Foram levadas em consideração, as duas taxas de consumo de energia elétrica, direta e indireta por Kg de chocolate.

Considerando a média mensal de produção de chocolates da referida empresa no ano anterior (2015) de 121.667Kg, foi possível estimar a emissão equivalente anual de CO₂ por meio da extrapolação dos dados, mantendo-se a média produtiva para o ano do estudo (2016), além das perdas apontadas no balanço de massa.

Dessa maneira, a produção anual estimada seria de 1.507.801,3 Kg de chocolate, sendo 47.797,3 Kg referentes às perdas e 1.460.004 Kg de chocolates prontos para o consumo. Para atender esta demanda, um fornecimento de 1.470 gWh de energia elétrica para o mesmo período. A emissão de CO₂ correspondente aos valores apresentados é de 0,120 MgCO₂eq.ano⁻¹, demonstrados na tabela 14.

Tabela 14. Estimativa das emissões equivalentes de CO₂ na produção de chocolate em função do consumo de energia elétrica.

Método de cálculo	Taxa de consumo (kWh/Kg)	Média mensal de produção (Kg)	Média mensal de perdas e/ou reprocesso (Kg)	Consumo mensal estimado (kWh)	Fator de emissão médio de CO ₂ (gCO ₂ /kWh)	Mensal estimado (gCO ₂)	Anual estimado*		
							(gCO ₂)	MgCO ₂ eq.ano ⁻¹	
Direto	0,848	121.667	3.983	106.551	0,0817	8.705,25	104.463	0,104	
Indireto	0,127			15.958		1.303,74	15.645	0,016	
Fonte: elaborado pelo autor.									0,120

* padrão internacional para emissões e sequestro de carbono em Mg (megagrama) equivalente a 10⁶ g ou 1.000 Kg

Baseado na receita do produto adotado neste estudo para atender a demanda de produção de chocolates em um ano, foi feito também a extrapolação para o processamento das amêndoas. Levando-se em consideração a produção efetiva e as perdas apontadas no balanço de massa, serão necessários 322.669,5 Kg de manteiga de cacau e 180.936 Kg de liquor de cacau. Ainda considerando o balanço de massa, seria necessário receber em um ano, 1.150.939 Kg de amêndoas secas para gerar as respectivas quantidades de manteiga e liquor.

Com essas estimativas de produção, é possível estimar o consumo de energia elétrica utilizando-se das taxas de cada produto, bem como a emissão equivalente de CO₂ para um ano (tabela 15).

Tabela 15. Consumo estimado de energia elétrica e sua respectiva emissão equivalente de CO₂ para o processamento de amêndoas em um ano.

Produto	Qtde de amêndoas (Kg)	Rendimento	Quantidade de produto (Kg)	Taxa de consumo de energia elétrica (kWh/Kg)	Consumo estimado (kWh.ano ⁻¹)	Fator de emissão de CO ₂ (gCO ₂ /kWh)	Emissão equivalente de CO ₂	
							gCO ₂ eq.ano ⁻¹	MgCO ₂ eq.ano ⁻¹
Liquor de cacau	227.707,1	79,46%	180.936,1	1,00	180.936	0,0817	14.782,48	0,015
Manteiga de cacau	923.231,8	34,95%	322.669,5	22,14	7.143.903		583.656,88	0,584
	1.150.938,9				7.324.839		TOTAL ->	0,598

Fonte: elaborado pelo autor.

Entre os resultados totais de cada componente referente às emissões, a tabela 16 apresenta uma análise de contribuição de cada um dos produtos que fazem parte da formulação proposta para este estudo de caso.

Tabela 16. Análise do percentual de contribuição para as emissões de CO₂, por produto, referente ao estudo de caso.

Produto	%	Fase
Manteiga de cacau	81,21%	Processamento das amêndoas
Liquor de cacau	2,08%	Processamento das amêndoas
Tablete de chocolate	16,71%	Produção de chocolates

Fonte: elaborado pelo autor.

4.5. ESTIMATIVAS DO SEQUESTRO DE CARBONO NO CULTIVO DO CACAU

A quantidade de carbono incorporada pelas plantas depende do sistema de cultivo utilizado. O cacau é uma cultura arbórea perene, com ciclos produtivos médios de 30 anos (COTTA *et al.*, 2008) fato este que, de acordo com Teixeira; Bastos; De Oliveira (1994) é relevante pois as culturas anuais (soja, milho, trigo etc) recuperam pequenas quantidades de carbono, sendo que após o ciclo de cultivo, o carbono é novamente liberado para a atmosfera.

Cotta *et al.* (2008) relatam que durante a fase inicial de desenvolvimento das plantas, grande parte dos carboidratos são direcionados para a produção da copa e das raízes, enquanto que, com o passar do tempo, a produção de biomassa do tronco aumenta e a da copa diminui gradualmente. Nos estudos realizados pelos autores, analisando o cacauzeiro, a parte aérea deste apresentou maior percentual de carbono, representando 72% do total, enquanto que as raízes representam 28% para indivíduos com cerca de 6 anos de idade.

Dentre as formas de cultivo do cacauzeiro Wessel; Wood; Lass (1985) apresentaram um estudo comparativo entre as diversas modalidades cultivadas em Gana. A figura 39 apresenta os dois sistemas distintos: cabruca (sombreado) e a pleno sol.

O referido estudo apresentou cacauais cultivados (a) sem sombra e sem fertilizantes, (b) sem sombra e com fertilizantes, (c) com sombra e sem fertilizantes e (d) com sombra e com fertilizantes em um período de 24 anos. O resultado demonstrou que as condições favoráveis a maior produtividade ocorrem no sistema b, sem sombreamento e com uso de fertilizantes, o chamado sistema a pleno sol fertiirrigado, já que este apresentou mais flores, consequentemente maior polinização e maior crescimento de frutos.



FIGURA 39. Sistemas de cultivo: lavoura de cacau monocultivo à pleno sol (A) e sistema “cabruca” (B) em propriedades na cidade de Linhares, região do Baixo Rio Doce, no estado do Espírito Santo.

Fonte: o autor (2017).

Há também, uma representação gráfica do plantio do cacau no modelo a pleno sol na figura 40. Algumas outras vantagens atribuídas a este modelo, quando comparados com sistemas sombreados, estão na redução de doenças, na possibilidade de mecanização e a fertirrigação. Com o balizamento na modalidade 3m x 3m de espaçamento, é possível cultivar 1.111 árvores.ha⁻¹ (SODRÉ, 2017).

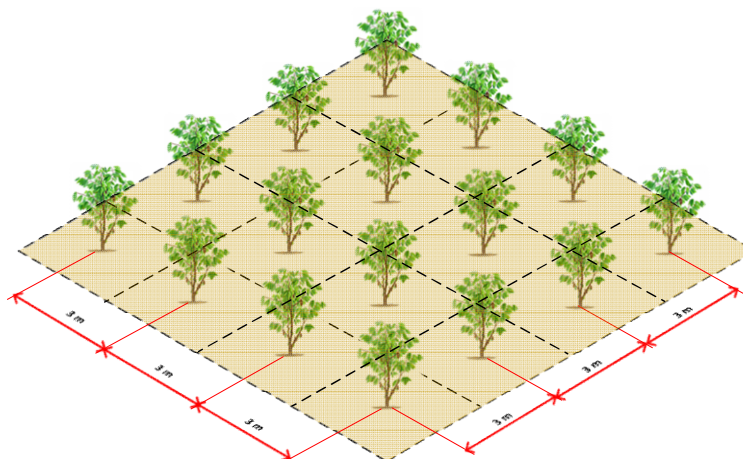


Figura 40 - Diagrama simplificado do espaçamento do cultivo do cacau a pleno sol.

Fonte: adaptado pelo autor de Sodré (2017).

A figura 41 indica as entradas e saídas de um fluxograma simplificado, do cultivo do cacauero.

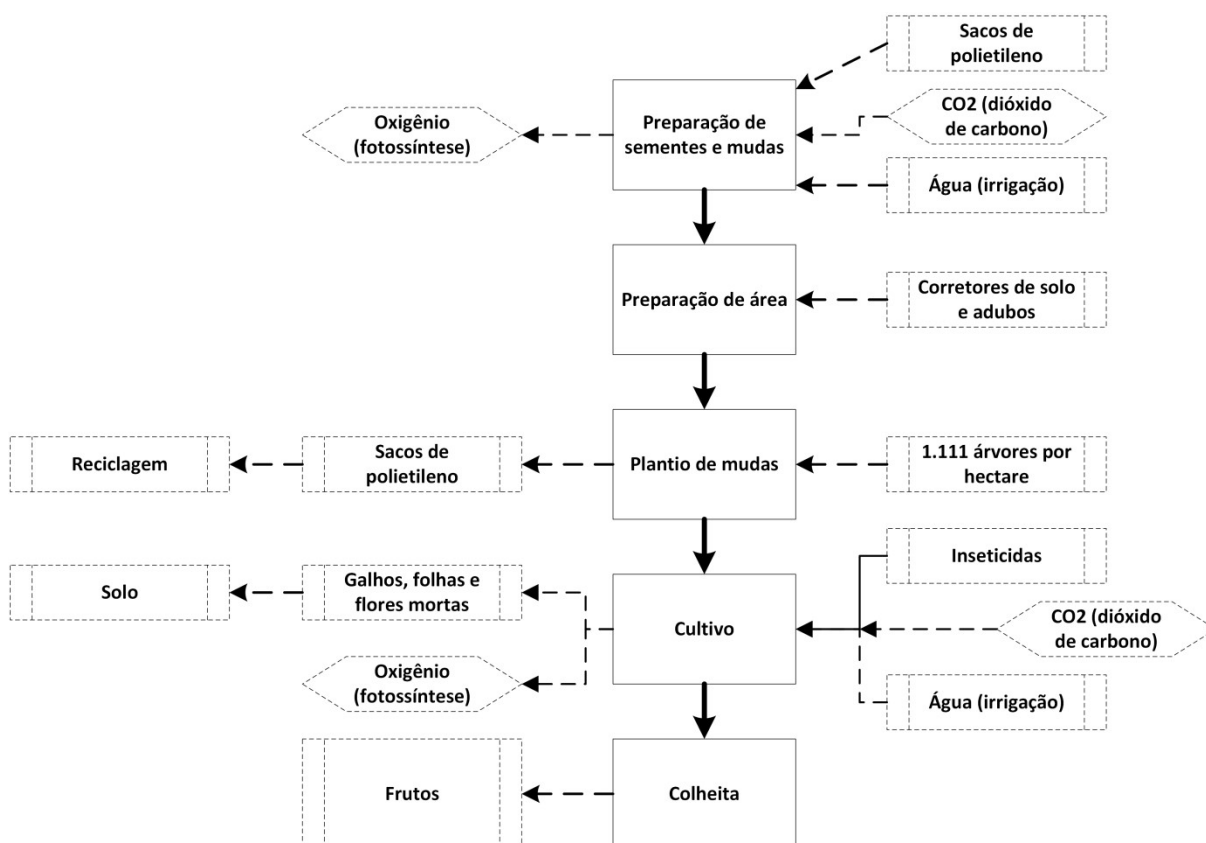


Figura 41. Fluxograma simplificado do cultivo do cacauero.
Fonte: elaborado pelo autor

Os estudos relacionados ao cultivo do cacau e a respectiva incorporação de carbono nos diversos sistemas de plantio estão resumidos na tabela 17.

De acordo com Bonamico (2017) a variação entre as quantidades de carbono estocado nos diferentes sistemas agroflorestais de cacau estão relacionados a fatores como fertilidade do solo, presença e quantidade de sombreamento, densidade do plantio, entre outras coisas. Duguma; Gockwski; Bakala (2001) e Somarriba *et al.* (2013) já afirmaram que o cacauero, plantado em sistema agroflorestal, é superior no sequestro de carbono e na biodiversidade.

Portanto, esse estudo optou em definir suas estimativas de sequestro de carbono pelo sistema em monocultivo a pleno sol considerando não existir a presença de outras espécies arbóreas. São dois os estudos, de Rajab *et al.* (2016) e N'gbala; Guéi; Tondoh (2017), que apresentam esta característica. A escolha pelo método a pleno sol também visa fazer uma análise mais próxima daquilo que uma cultura cacaueteira absorve realmente do carbono atmosférico sem a presença de outras espécies. Consideraremos para este cálculo, os resultados do estudo de Rajab *et al.* (2016) que apesar de não ser no Brasil, apresenta o menor valor (9,70 MgC ha⁻¹) se comparado ao de N'gbala; Guéi; Tondoh (2017). Esta decisão busca manter uma análise mais conservadora dos resultados.

Tabela 17. Estudos referente ao estoque de carbono arbóreo do cacaueteiro.

Região do estudo	Brasil (Bahia)	Costa Rica	Brasil (Bahia)	Indonésia	Indonésia	Indonésia	Brasil (Pará)	Costa do Marfim
Sistema de plantio	SAF com seringueira	SAF com Louro-amarelo (<i>cordia alliodora</i>)	Cabruca	A pleno sol	SAF com <i>gliricidia sepium</i>	SAF com diversas espécies	SAF com diversas espécies	A pleno sol
Balizamento (nº ind / ha ⁻¹)	1.111	1.111	70 à 480	892	1047	1384	1,111	Não informado
Idade média dos indivíduos (anos)	6	25	Não informado	20 – 25	20 – 25	20 – 25	14	26
Estoque de carbono arbóreo do cacaueteiro (MgC ha ⁻¹)	5,22	6,50	18,86	9,70	7,10	10,20	13,53	22,70
Incremento ano (MgC ha ⁻¹)	2,50	5,10	Não informado	2,00	2,00	2,00	Não informado	Não informado
Autor(es)	Cotta <i>et al.</i> (2008)	Ortiz <i>et al.</i> (2008)	Schroth <i>et al.</i> (2015)	Rajab <i>et al.</i> (2016)	Rajab <i>et al.</i> (2016)	Rajab <i>et al.</i> (2016)	Bonamico (2017)	N'gbala; Guéi; Tondoh (2017)

Fonte: elaborado pelo autor.

Sodré (2017) informa que a produtividade necessária para uma lavoura de cacau ser economicamente sustentável deve estar acima de 750 kg.ha⁻¹ano⁻¹. Desta maneira, o estudo considerou esta mesma produtividade mínima esperada (750 kg.ha⁻¹ano⁻¹), apontada pelo autor Sodré (2017) como economicamente sustentável, para estimar

dentro deste critério, a área necessária de cultivo visando atender a demanda de amêndoas do estudo de caso. Assim, o resultado encontrado foi de 1.535 ha^{-1} .

Para estimar a quantidade de CO_2 retirado da atmosfera é necessário antes, informar que uma tonelada de carbono equivale a 3,67 t de CO_2 , obtido em razão dos pesos moleculares diferentes: carbono ($\text{C} = 12$) e dióxido de carbono ($\text{CO}_2 = 44$). Para saber a quantidade de CO_2 emitido ou armazenado a partir da quantidade de carbono de um determinado depósito deve-se multiplicar por 3,67 (TITO; LEÓN; PORRO; 2009).

Com a área estimada para plantio de 1.535 ha^{-1} e considerando a produtividade mínima esperada de $750 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ economicamente sustentável, a quantidade de CO_2 removido da atmosfera será, portanto:

$$\text{CO}_2 \text{ removido} = \text{área necessária} \times \text{estoque de C} \times 3,67 \text{ (peso molecular)}$$

$$\text{CO}_2 \text{ removido} = 1535 \times 9,70 \times 3,67$$

$$\text{CO}_2 \text{ removido} = 54.645,76 \text{ MgCO}_2\text{eq}$$

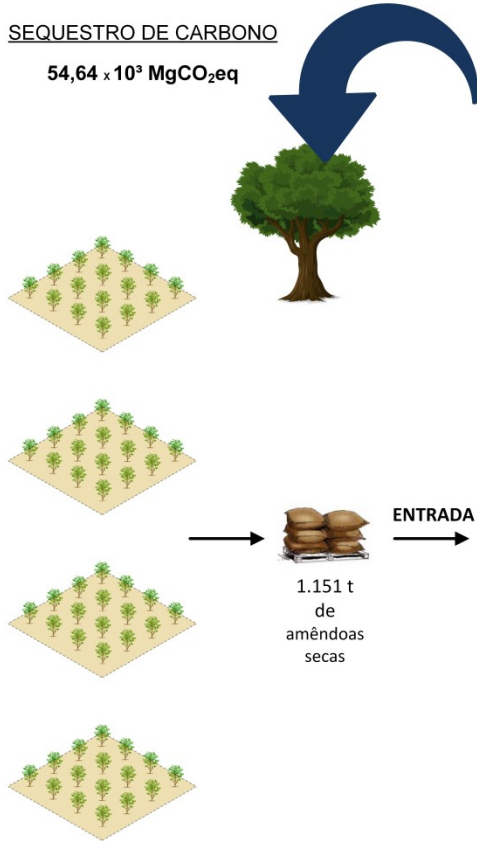
Desse modo, a estimativa de sequestro equivalente de CO_2 referente ao cultivo do cacau para esse estudo resultou em um valor estimado de $54,64 \times 10^3 \text{ MgCO}_2\text{eq}$.

4.6. BALANÇO DE CO_2 COM ÊNFASE NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA PRODUÇÃO DE CHOCOLATES

Diante dos valores expostos e pela quantidade de dados apontados, foi elaborada a figura 42, que visa sumarizar graficamente os resultados, responder as perguntas referentes ao problema de pesquisa e desenhar as implicações teóricas.

SEQUESTRO DE CARBONO

54,64 x 10³ MgCO₂eq



CULTIVO DO CACAU

Área de plantio necessária:

1.535 ha⁻¹

ENTRADA

1.151 t de amêndoas secas

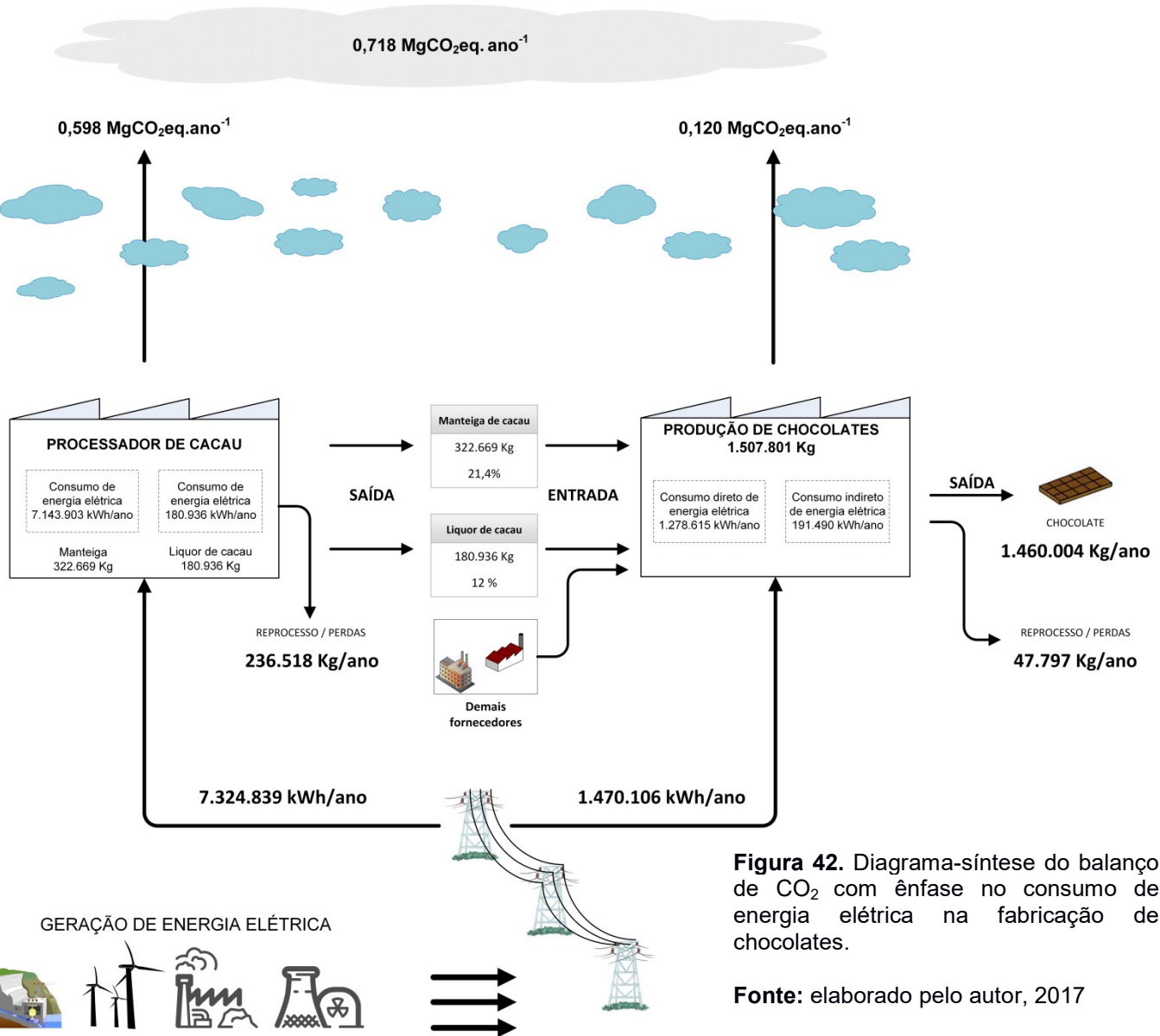


Figura 42. Diagrama-síntese do balanço de CO₂ com ênfase no consumo de energia elétrica na fabricação de chocolates.

Fonte: elaborado pelo autor, 2017

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No balanço de massa elaborado para a produção do chocolate, o total de ingredientes na entrada do processo sofre uma perda de 3,17% ao final. O processo de fabricação que mais contribui para este valor é o de desmoldagem com quase a metade (~ 47%) do número total. Por ser um processo realizado manualmente, esta peculiaridade pode fazer com que o processo esteja na dependência do manipulador e este fato colabore com o aumento deste índice em detrimento aos outros processos mais mecanizados. Apesar da ocorrência de quebra do tablete nesta fase de processo, ele pode ser reaproveitado ao derretê-lo e voltar para a temperagem, no chamado reprocesso. Todavia, não foi considerado estes valores no estudo, preferindo mantê-lo no índice de reprocessos e perdas no diagrama síntese final (até para destacar seu significativo valor anual simulado (47.797t), figura 42). Demais valores apontados no balanço de massa referem-se à retenção da massa líquida em tanques, tubulações e demais utensílios utilizados no processo.

Ainda na produção de chocolates, foi possível mensurar o consumo de energia elétrica em todos os processos de fabricação. Neste ponto, o consumo maior foi para armazenagem do chocolate *molten* sendo de 465,60 kWh. Por se tratar de um tanque de espera (pulmão) que não pode ser desligado, trabalha em agitação constante por todo o ano. Destaca-se também que, sendo uma empresa que trabalha 24 h por dia com a fabricação da massa de chocolate, seu custo de energia está inserida no chamado “horário de ponta” em que há cobrança diferenciada a maior para o consumo neste período.

Para um melhor entendimento da cadeia produtiva do chocolate, foi simulada uma produção de um ano, com base na capacidade produtiva por bateladas da empresa e no histórico de produção do ano anterior. Isto permitiu fazer extrapolações que complementaram o estudo. Primeiramente, destacam-se as taxas de consumo de energia elétrica por quilo de chocolate. Como resultado, obteve-se como taxa direta de consumo em 0,848 kWh/Kg de chocolate, enquanto que a taxa indireta de consumo foi de 0,975 kWh/Kg de chocolate, uma diferença de +14,97%. A diferença entre eles está no fato de que a indireta considera toda a energia consumida pela

empresa, o que significa considerar os processos auxiliares (excetuando-se àqueles ligados diretamente com a fabricação do chocolate).

O balanço de massa elaborado para a indústria processadora de amêndoas mostrou uma realidade diferente da produção de chocolates. Enquanto esta tem perdas na ordem de 3,17%, a processadora tem uma eficiência de apenas 34,95% para a fabricação de manteiga. Significa dizer que com 1 kg de amêndoas, faz-se 349,5g de manteiga. As cascas que são separadas do cotilédone representam a maior perda (este processo sozinho retêm cerca de 18% em peso do produto), seguido da torra, pela retirada de umidade.

Por se tratar de vários produtos a serem extraídos das amêndoas, o estudo mostrou haver uma contribuição maior no consumo de energia elétrica para os processadores quando comparado a fabricação de chocolate. Ao extrapolar o consumo de 1 ano para as demandas simuladas, as processadoras consumiriam ao final de um ano, 7,324 GWh contra 1,470 GWh dos fabricantes. Uma diferença superior em quase 5 vezes.

Na questão das emissões de CO₂ em razão do consumo de energia elétrica, os valores apresentados ao final de um ano seriam de 0,598 MgCO_{2eq}.ano⁻¹ e 0,120 MgCO_{2eq}.ano⁻¹ para processadoras e fabricantes, respectivamente.

Por outro lado, o sequestro de CO₂ correspondente as lavouras de cacau contabilizadas para atender a demanda estimada no estudo de caso seria muito superior as emissões. Cerca de 54,64x10³ MgCO_{2eq} seriam sequestrados em um período de 30 anos (como a literatura informa para esta cultura, utilizando o método a pleno sol e considerando também, a mesma produtividade da lavoura por ha⁻¹ para o mesmo período). Caso estas duas variáveis permanecessem inalteradas no período de 30 anos, a emissão total seria de 21,54 MgCO_{2eq} contra os 54,64x10³ MgCO_{2eq}, uma diferença no seqüestro em mais de 2.500 vezes.

6. CONCLUSÃO

O uso dos conceitos de ACV facilitam a compreensão e trazem clareza sobre um processo, seja este qual for. A condução das análises sob fluxograma sintetiza ao mesmo tempo que provê recursos para aprofundamento. Dessa maneira, foi possível mapear a cadeia produtiva do chocolate com indicações de entradas e saídas dos processos. Essa forma de apresentação também permitiu a condução do estudo de caso, em que foi possível elaborar o balanço de massa e o consumo de energia elétrica.

O balanço de massa demonstrou onde há maior eficiência na cadeia produtiva. Os resultados mostram que a produção do chocolate é mais eficiente que as processadoras de amêndoas. Da mesma maneira que, quando analisado o consumo de energia elétrica, as empresas processadoras de amêndoas consomem mais energia elétrica que os fabricantes de chocolate.

Com os dados referentes à energia elétrica, foi possível estimar a emissão de CO₂ em função dos dados fornecidos pelo MCTI e ONS para a correspondente matriz energética utilizada no Brasil para a geração de eletricidade. Constatou-se assim que, quando analisado o balanço entre a emissão gerada pelo consumo de energia elétrica e o sequestro biológico do carbono, a cadeia do chocolate mostrou-se sustentável em grande escala, isto é, há muito mais captação do que emissão podendo inclusive, ser considerada uma grande aliada no seqüestro do CO₂ atmosférico ajudando a diminuir a quantidade de GEE. Outro ponto importante é a característica da matriz energética brasileira ser de maioria renovável, fazendo com que o fator de emissão de CO₂ não seja alto.

O cacauero é uma cultura perene que mantém-se em crescimento constante durante pelo menos 10 anos e produzindo (no caso de à pleno sol) em pelo menos 30 anos, em acordo com a literatura. Quando levado em consideração outros sistemas de cultivo do cacau diferente do apresentado, este sequestro aumentará muito (em se tratando de sistemas que considera outros indivíduos como SAGS, SAF ou cabucas).

Ao se estender a análise até o cultivo, mesmo com as melhorias genéticas ocorridas com o cacau, há espaço para maior aprimoramento. As sementes que originam a matéria prima do chocolate representam cerca de 10% do peso do fruto e a baixa polinização das flores (cerca de 5%) é outro aspecto a ser melhorado nesta cultura.

Percebe-se também que há uma mudança em curso no Brasil com relação à cultura do cacau em que se está saindo de um conceito próximo do extrativista para o de alta produção. O desenvolvimento genético, a fertilização, a irrigação, o controle de pragas, o aprimoramento da colheita são processos que estão ocorrendo nas regiões produtoras, envolvendo agricultores, pesquisadores, fabricantes e processadores.

6.1. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Há outros pontos a considerar para serem explorados futuramente por novos pesquisadores interessados no tema deste trabalho:

- estudo da fabricação do chocolate considerando todos os processos de apoio à produção (como geração de calor, uso da água, transportes) mensurando a emissão de CO₂.
- a geração de resíduos e efluentes da cadeia produtiva do cacau-chocolate;
- os tipos e a utilização de embalagens tanto para matérias-primas como os produtos finais (barras, bombons, ovos de páscoa, entre outros);
- estudos de ACV para a fase de cultivo do cacau, com entradas e saídas, possíveis usos e reaproveitamento das cascas do fruto ou da casca da amêndoa para a geração de energia elétrica;

Todos estes estudos podem somar-se a este e inclusive, construir novos inventários de emissão e sequestro de carbono para a cadeia de fabricação do chocolate. Pode também, estimular outros pesquisadores a analisar outros produtos e suas cadeias, contribuindo com a promoção de sistemas produtivos mais eficientes, menos impactantes no aumento da concentração de CO₂ antropogênico na atmosfera, evidenciando e promovendo àqueles que são mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIA. Associação Brasileira das Indústrias da Alimentação. *Relatório anual*. São Paulo, 2017.

ABICAB. Associação Brasileira das Indústrias de Chocolates, Cacau, Amendoim, Balas e Derivados. *Relatório Mensal*. São Paulo. Maio, 2017.

ADABE, K.; NGO-SAMNICK, L. **Cocoa: Production and Processing**. *Engineers Without Borders, Cameroon and The Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation (CTA)*. Camarões, 2014

AFOAKWA, E.O. **Chocolate science and technology**. Wiley-Blackwell Publishers Inc. Ghana, 2010.

AGUADO, E.; BURT, J.E.; **Understanding weather and climate**. 3ª Ed. Pearson Education, New Jersey, 2004.

ALMEIDA, A.A.F.; VALLE, R.R. Ecophysiology of the cacao tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 425-448, 2007.

ALPIZAR, L.; FASSBENDER, H.W.; HEUVELDOP, J.; FÖLSTER, H.; ENRIQUEZ, G.. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. *Agroforestry systems*, 4(3), 175-189, 1986.

ANDERSSON, K.; OHLSSON, T.; OLSSON, P.; Screening life cycle assessment (LCA) of tomato ketchup: a case study. *Journal of Cleaner Production*, 6 (3), 277-288, 1998.

ARVANITOYANNIS, I.S.; **Waste management for the food industries**. Academic Press, Grece, 2010.

BAIRD, C.; CANN, M. **Química Ambiental**, 4a. ed. Ed., Bookmann. Porto Alegre, 2011.

BATISTA, R. R.; Rotas de aproveitamento tecnológico do resíduo orgânico agrícola: casca de coco, casca de cacau e casca de café destinadas a geração de energia.

Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. São Mateus, ES. 2014.

BECKETT, S.T.; **The Science of Chocolate**. Second Edition. The Royal Society of Chemistry. Cambridge, Great Britain, 2008.

BECKETT, S.T.; **Industrial Chocolate Manufacture and Use**. 4a. ed., Blackwell Publishing, Oxford, UK, 2009.

BOER, D.I.J.M.; Environmental impact assessment of conventional and organic milk production. *Livestock Production Science* 80 (1–2), 69–77, 2002.

BONAMICO, M.A.; Relação entre estoque de carbono acima do solo e produção de cacau em sistemas agroflorestais de cacau em São Félix do Xingu-PA, Brasil. *Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo*, 2017.

BONAN, G.B.; Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320, 5882, 1444-1449, 2008.

BOUSTEAD, I.; LCA How it came about. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1, 3, 147-150, 1996.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J.G.L.; MIERZWA, J.C.; DE BARROS, M.T.L.; SPENCER, M.; Eiger, S. **Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**. Pearson Prentice Hall. São Paulo, 2005.

BRASIL. Resolução de diretoria colegiada - RDC nº 264, de 22 de setembro de 2005.

BRASSEUR, G.; ORLANDO, J.J.; TYNDALL, G.S.; **Atmospheric chemistry and global change**. Oxford University Press, New York, 1999.

BRENTROP, F.; KÜSTERS, J.; KUHLMANN, H.; LAMMEL, J.; Application of the Life Cycle Assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilisers. *European Journal of Agronomy*, 14, 3, 221–233, 2001.

CAVALETT, O.; Análise do Ciclo de Vida da Soja. Tese Doutorado em Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2008.

CHARLES, R.; JOLLIET, O.; GAILLARD, G.; PELLET, D.; Environmental analysis of intensity level in wheat crop production using life cycle assessment. *Agriculture, ecosystems & environment*, 113(1), 216-225, 2006.

CHEHEBE, J.R.; **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Qualitymark, Editora CNI. Rio de Janeiro, 1997.

COHEN, K.O.; LUCCAS, V.; JACKIX, M.N.H.; Review: tempering or precrystallization of chocolate. *Brazilian Journal of food technology*, 7, 23-29, 2004

COHEN, K.O.; LUCCAS, V.; SOUSA, M.V.; JACKIX, M. Processamento tecnológico das amêndoas de cacau e de cupuaçu. Embrapa Amazônia Oriental-Documentos (INFOTECA-E), 2003.

COLTRO, L.; MOURAD, A.L.; GARCIA, E.E.C.; QUEIROZ, G.C.; GATTI, J.B.; JAIME, S.B.M. **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. Campinas: Cetea/Ital, 75, 2007.

CONMETRO. Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Resolução de nº 4. Ministério do Desenvolvimento e Comércio Exterior. Brasil, 2010.

CORDEIRO, Z.M.; **Sistema de Produção: banana/cacau para o Recôncavo Baiano**. EMBRAPA-CNPMF/CEPLAC. Cruz das Almas, BA, 1987.

COSTA, A.S.; FRAZÃO, D.A.C.; TOURINHO FILHO, E.; DAGUER, A.R.F.; Cultura do Cacau. Boletim técnico nº 18. IPEAN ACAR-PARÁ. Belém, PA. 1973.

COTTA, M.K.; JACOVINE, L.A.G.; PAIVA, H.N.D.; SOARES, C.P.B.; FILHO, A.D. C.V.; VALVERDE, S.R.; Quantificação de biomassa e geração de certificados de emissões reduzidas no consórcio seringueira-cacau. *Revista Árvore*, 32, 6, 2008.

CURRAN, M.A.; **Environmental Life-Cycle Assessment**. NY, McGraw –Hill, 1996.

CURRAN, M.A.; **Life cycle assessment: principles and practice**. Environmental Protection Agency. National Risk Management Research Laboratory Cincinnati, Ohio. U.S., 2006.

DALLEMAND, J.F.; PASCUA, I.P.; MOTOLA, V.; BANJA, M.; SCARLAT, N.; MEDARAC, H.; GORALCZYK, M.; **Energy use in the EU food sector: State of play and opportunities for improvement**. Publications Office of the European Union. Luxembourg, 2015.

DEL BORGHI, A.; GALLO, M.; STRAZZA, C.; DEL BORGHI, M.; An evaluation of environmental sustainability in the food industry through Life Cycle Assessment: the case study of tomato products supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 78, 121-130, 2014.

DHILLON, R.S.; WUEHLISCH, G V. Mitigation of global warming through renewable biomass. *Biomass and bioenergy*, 48, 75-89, 2013.

DUGUMA, B.; GOCKWSKI, J.; BAKALA. J.; Smallholder cacao (*Theobroma cacao* L.) cultivation in agroforestry system of west and central Africa: challenges and opportunities. *Agroforestry systems* , 51, 177-188, 2001.

ELKINGTON, J.; **Canibals with forks: the triple bottom line of 21st century business**. New Society Publishers, 1997.

EMBRAPA-CPATU. Anais do Simpósio do Trópico Úmido. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária e Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido. Belém, PA, 1984.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). *Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015* - Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2016.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). *Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016* - Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2017.

FERREIRA, A.C.R.; AHNERT, D.; MELO NETO, B.A.; NETTO MELLO, DURVAL, L.; Guia de Beneficiamento de Cacau de Qualidade. Instituto Cabruca. Ilhéus, Bahia, 2013.

FOLD, N.; Restructuring of the European chocolate industry and its impact on cocoa production in West Africa. *Journal of Economic Geography*, 1, 4, 405-420, 2001.

FONTES, A.G., GAMA-RODRIGUES, A.C., GAMA-RODRIGUES, E.F., SALES, M.V.S., COSTA, M.G., MACHADO, R.C.R.; Nutrient stocks in litterfall and litter in cocoa agroforests in Brazil. *Plant Soil*. 383, 313–335, 2014.

FOUNTAIN, A.C.; HÜTZ-ADAMS, F.; Cocoa Barometer 2015. VOICE Network, 2015.

GIRARDI NETO, J.; SILVA, J.D.; PINHEIRO, I.G.; Mass balance in the treatment of organic wastes from restaurants in bioreactor. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22(3), 491-499, 2017.

GUIA QUALIDATA. Requisitos de qualidade de conjuntos de dados para o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida. Brasília: Ibict, 2016.

HINRICHS, R.A.; KLEINBACH, M.; DOS REIS, L.B.; **Energia e Meio Ambiente**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

HOSPIDO, A.; MOREIRA, M.T.; FEIJOO, G.; Simplified life cycle assessment of Galician milk production. *International Dairy Journal*, 13, 10, 783-796, 2003.

I CANALS, L.M; BURNIP, G.M.; COWELL, S.J. Evaluation of the environmental impacts of apple production using life cycle assessment (LCA): case study in New Zealand. *Agriculture, ecosystems & environment*, 114, 2, 226-238, 2006.

ICCO. International Cocoa Organization. QBCS, Vol. XLIII N° 1, Cocoa year 2016/17. 2017.

ICCO - International Cocoa Organization. The Future of the World Cocoa Economy: Boom or Bust ? The World Cocoa Conference. Costa do Marfim, 2012.

IPCC - Climate change 1995: the science of climate change. Contribution of working group I to the second assessment of the intergovernmental panel on climate change. HOUGHTON, J.T. *et al.*; Cambridge University Press, Cambridge UK, 1996.

IPCC - Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC. SOLOMON, S. *et al.*; Vol. 4. Cambridge University Press, 2007.

IPCC - Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G.K.; ALEXANDER, L.V.; ALLEN, S.K.; BINDOFF, N.L; FORSTER, P. Cambridge University Press, p. 33-115, 2013.

IPCC - Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, v. 5. EDENHOFER, O. *et al.*; Cambridge, 2014.

IPCC - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. EGGLESTON H.S.; BUENDIA L.; MIWA K.; NGARA T.; AND TANABE K; Published: IGES, Japan, 2006.

ISO 14040 - International Standard Organization. Environmental Management Life Cycle Assessment Principles and Framework. Committee for Standardization, 2006.

KORONEOS, C.; ROUMBAS, D.; GABARI, Z.; PAPAGIANNIDOU, E.; MOUSSIOPOULOS, N.; Life cycle assessment of beer production in Greece. *Journal of Cleaner Production* 13, 433–439, 2005.

LAVEN, A.; PELDERS, P.; STALEVSKI, N.; **Chocolate forever: Dutch knowledge on sustainable cocoa**. KIT publishers, 2010.

LEAN, J.; BEER, J.; BRADLEY, R.; Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophysical Research Letters*. 22, 3195-3198. 1995.

LEITE, J.B.; Cacaueiro: Propagação por estacas caulinares e plantio no semi-árido do estado da Bahia. Tese de Doutorado. UNESP, Jaboticabal, 2006.

LOBÃO, D.E.; SETENTA, W.C.; LOBÃO, E.S.P.; CURVELO, K.; VALLE, R.R.; Cacau cabruca: sistema agrossilvicultural tropical. *Ciência, tecnologia e manejo do Cacaueiro*, 290-323, 2007.

LOBÃO, D.E.; SETENTA, W.C.; VALLE, R.R.; Sistema agrossilvicultural cacauero-modelo de agricultura sustentável. *Agrossilvicultura*, Viçosa, MG, 1 (2), 163-173. 2004.

MARENCO MENDOZA, R.; LOPES, N.F.; **Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. UFV, 2005.

MARTINS, J.M. Melhoria da Qualidade de Cacau. Ilhéus. CEPLAC/CENEX, 2011.

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Sistema de Registro Nacional de Emissões. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html>. Acesso em: 20/08/2017.

MEADOWS, D.H.; MEADOWS, D.L.; RANDERS, J.; BEHRENS, W.W. **The Limits to growth: a report for the club of Rome's Project on the Predicament of Mankind**. Universe Books, New York, 1972.

MIGUEL, P.A.C.; Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. *Production*, 17,1, 216-229, 2007.

MIRANDA, M.M.; Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2012.

MOH RIYAN, P.A.; Closed Model of Production System for Energy Independent in Cacao Processing Industry. Department of agroindustrial technology. Bogor Agricultural University, Bogor, 2015.

MÜLLER, M.W.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; VALLE, R.R.; Sistemas Agroflorestais com cacauero. *Ciência, Tecnologia e Manejo do Cacauero*. CEPLAC/CEPEC, Ilhéus, 246-271, 2007.

N'GBALA, F.N.; GUÉI, A.M.; TONDOH, J.E.; Carbon stocks in selected tree plantations, as compared with semi-deciduous forests in centre-west Côte d'Ivoire. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 239, 30-37, 2017.

NASA. Agência Espacial Norte Americana. Disponível em: <https://climate.nasa.gov>. Acesso em: 16 out. 2016.

NTIAMOAH, A.; AFRANE, G.; Environmental impacts of cocoa production and processing in Ghana: life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 16, 16, 1735-1740, 2008.

ORTIZ, A.; RIASCOS, L.; SOMARRIBA CHÁVEZ, E.; Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*). *Agroforestería en las Américas (CATIE)*. 46, 26-29, 2008.

PEREIRA NETO, J.A.; Estoques de Carbono em Sistemas Agroflorestais de Cacaueiro como Subsídios a Políticas de Serviços Ambientais. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Pará, Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido, Belém, 2012.

PIASENTIN, F.B.; SAITO, C.H.; Os diferentes métodos de cultivo de cacau no sudeste da Bahia, Brasil: aspectos históricos e percepções. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 9, 1, 61-78, 2014.

PIOTTO, Z.C.; Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel-Estudo de Caso. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.

POINT, E., TYEDMERS, P., NAUGLER, C.; Life cycle environmental impacts of wine production and consumption in Nova Scotia, Canada. *Journal of Cleaner Production*, 27, 11-20, 2012.

POTTER, C.; KLOOSTER, S.; GENOVESE, V.; Carbon emissions from deforestation in the Brazilian Amazon Region. *Biogeosciences*, 6, 2369-2381, 2009.

PWC 2012. Agribusiness Research and Knowledge Center. *The Brazilian cocoa industry market research*. PwC Brazil. Ribeirão Preto, São Paulo, Abril, 2012.

RAJAB, Y.A.; LEUSCHNER, C.; BARUS, H.; TJOA, A.; HERTEL, D.; Cacao cultivation under diverse shade tree cover allows high carbon storage and sequestration without yield losses. *Biologie der Georg-August University School of Science PloS one*, 11(2), 2016.

RAMIREZ, P.K.S.; Análise de métodos de alocação utilizados em Avaliação do Ciclo de Vida. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2009.

RAVAGNANI, A.T.F.S.G.; Modelagem Técnico-Econômica de Sequestro de CO₂ considerando Injeção em Campos Maduros. *Tese de Doutorado*. Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

RIBEIRO, P.H.; Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio a avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados. *Tese de doutorado*. Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, 2009.

ROY, P.; NEI, D.; ORIKASA, T.; XU, Q.; OKADOME, H.; NAKAMURA, N.; SHIINA, T. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*. 90 (1), 1-10, 2009.

ROY, P.; ORIKASA, T.; NEI, D.; OKADONE, H.; NAKAMURA, N.; SHIINA, T.A.; Comparative study on the life cycle of different types of meat. *Proceeding of the Third LACA Society Research Symposium*, Nagoya, JAPAN, 2008.

SACHS, I.; A revolução energética do século XXI. *Estudos Avançados*, 21, 21-38, 2007.

SALTINI, R.; AKKERMAN, R.; Testing improvements in the chocolate traceability system: Impact on product recalls and production efficiency. *Food Control*, 23, 1, 221-226, 2012.

SANTOS, C.C.; Influência dos processos de fermentação e secagem no teor de compostos fenólicos e capacidade antioxidante de amêndoas de cacau amazônico (*Theobroma cacao* var. Forasteiro). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

SCHROTH, G., BEDE, L. C., PAIVA, A. O., CASSANO, C. R., AMORIM, A. M., FARIA, D., ... & LÔBO, R. N. (2015). Contribution of agroforests to landscape carbon storage. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 20, 7, 1175-1190, 2015.

SEDJO, R.A.; **Forest carbon sequestration: some issues for forest investments.** Washington, DC: Resources for the Future, 2001.

SETENTA, W. ; LOBÃO, D.E.; **Conservação Produtiva: cacau por mais 250 anos.** Itabuna. BA, 2012.

SILVA NETO, P.J.; **Sistema de produção de cacau para a Amazônia brasileira.** Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira, Belém, PA (Brasil), 2001.

SODRÉ, G.A.; **Cultivo do cacau no estado da Bahia.** Ilhéus, BA, MAPA/Ceplac/Cepec. 126, 2017.

SOMARRIBA, E.; CERDA, R.; OROZCO, L.; CIFUENTES, M.; DÁVILA, H.; ESPIN, T.; ÁVILA, G.; ALVARADO, E.; POVEDA, V.; ASTORGA, C.; SAY, E.; DEHEUVELS, O.; ASTORGA, C.; Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 173, 46-57, 2013.

SQUICCIARINI, M.P.; SWINNEN, J.; **The Economics of Chocolate.** Oxford University Press, 2016.

STEENWERTH, K.L.; STRONG, E.B.; GREENHUT, R.F.; WILLIAMS, L.; KENDALL, A., Life cycle greenhouse gas, energy, and water assessment of wine grape production in California. *Journal of Life Cycle Assessment*, 20, 1243–1253, 2015.

SUNDQUIST, E.T.; MCPHERSON, B. J.; **Carbon Sequestration and Its Role in the Global Carbon Cycle.** American Geophysical Union, 2009.

SUNDQUIST, E.T.; VISSER, K.; The Geologic History of the Carbon Cycle. Treatise on Geochemistry: *Environmental Geochemistry*, p.425-472. Elsevier, 2003.

TALBOT, G.; **Science and technology of enrobed and filled chocolate, confectionery and bakery products.** Elsevier, 2009.

TEIXEIRA, L.B.; BASTOS, J.B.; DE OLIVEIRA, R.F.; Biomassa vegetal em agroecossistema de seringueira consorciada com cacau no nordeste paraense. Embrapa Amazônia Oriental-Séries anteriores, 1994.

TEIXEIRA, W.; DE TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.R.; TAIOLI, F.; **Decifrando a terra**. Oficina Textos. São Paulo: IBEP 98, 2009.

THONG, K.C.; NG, W.L.; Growth and nutrients composition of monocrop cocoa plants on inland Malaysian soils. *Growth and nutrients composition of monocrop cocoa plants on inland Malaysian soils.*, 262-286, 1980.

TITO, Marcos Rognitz; LEÓN, M. C.; PORRO, R. **Guia para determinação de carbono em pequenas propriedades rurais**. Centro Mundial Agroflorestal, ICRAF , Belém, Brasil, 2009.

TROMMER, M.W. Avaliação do processo produtivo da cerveja com abordagem de ciclo de vida. Dissertação de Mestrado, UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste. 2014.

VAN VLIET, J.A.; SLINGERLAND, M.; GILLER, K.E; **Mineral Nutrition of Cocoa. A Review**. Wageningen University and Research Centre, Wageningen, 2015.

VAN WYLEN, G.J.; BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R.; **Fundamentos da termodinâmica**. 7ª Edição, Editora Blücher, São Paulo, 2009.

VASTOLA, A.; **The Sustainability of Agro-Food and Natural Resource Systems in the Mediterranean Basin**. Springer International Publishing, 2015.

WESSEL, M.; WOOD, G.A.R.; LASS, R.A. **Shade and nutrition. Cocoa**, Forth Edition, p. 166-194, 1985.

YIN, R.K.; **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. Bookman editora, 2015.