



UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

DOUTORADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

JULIANO DA SILVA LOPES

DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS
AGRÍCOLAS E FLORESTAIS COM BASE NA
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA



SALVADOR
2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

JULIANO DA SILVA LOPES

**DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS AGRÍCOLAS E
FLORESTAIS COM BASE NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

Salvador
2018

JULIANO DA SILVA LOPES

**DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS AGRÍCOLAS E
FLORESTAIS COM BASE NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Industrial.

Orientador: Prof. PhD. Asher Kiperstok.

Salvador
2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

da Silva Lopes, Juliano
Desempenho ambiental de sistemas agrícolas e
florestais com base na Avaliação do Ciclo de Vida /
Juliano da Silva Lopes. -- Salvador, 2018.
124 f. : il

Orientador: Asher Kiperstok.
Coorientador: José Adolfo de Almeida Neto; Luciano
Brito Rodrigues.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-graduação em
Engenharia Industrial) -- Universidade Federal da
Bahia, Escola Politécnica, 2018.

1. Sistemas agrícolas e florestais. 2. ACV. 3.
Produção mais Limpa. 4. Semiárido. 5. Irecê. I.
Kiperstok, Asher. II. Luciano Brito Rodrigues, José
Adolfo de Almeida Neto. III. Título.

**DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS AGRÍCOLAS E FLORESTAIS COM
BASE NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

JULIANO DA SILVA LOPES

Tese submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Prof. Dr. Asher Kiperstok

PhD em Engenharia Química pela University of Manchester, Inglaterra, 1996.

Prof. Dr. José Adolfo de Almeida Neto

Doutor em Engenharia Agrícola pela University of Kassel, Alemanha, 1996.

Prof. Dr. Daniel Piotto

PhD em Forestry and Environmental Studies pela Yale University, Estados Unidos, 1996.

Dr. Henrique Leonardo Maranduba

Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela Universidade Estadual de Santa Cruz, Brasil, 2017.

Prof. Dr. Leonardo Sena Gomes Teixeira

Doutor em Química pela Universidade Federal da Bahia, Brasil, 2000.

Dr^a. Maria Cléa Brito de Figueirêdo

Doutora Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará, Brasil, 2009.

Salvador, BA - BRASIL
Julho/2018

AGRADECIMENTOS

A Leonardo Sena, professor, amigo e inicialmente coorientador.

A Asher Kiperstok, orientador, por acolher minha proposta e guiar a pesquisa. Obrigado a você e a sua família, pelo apoio, a amizade e pelas lições que levarei para sempre comigo.

Ao Instituto Federal da Bahia, por autorizar o meu afastamento e aos colegas que me substituíram em sala de aula.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao Programa de Formação Doutoral Docente.

À Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação do IFBA, pelo apoio e acompanhamento da qualificação.

Aos membros do TECLIM, especialmente Suzete e Lígia, pelo apoio, a infraestrutura, o carinho e cuidado diários.

Aos mestrandos/doutorandos, também, membros do TECLIM, Rodrigo Gallotti, Thaís Lopes e Lindolfo Silveira, por me acolherem inicialmente.

A Diego Medeiros pelo apoio técnico e parceria, pela capacitação e disponibilidade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, especialmente Taty e Cristiano Fontes.

A Ângela Lima e Marcelo Silva, professores do IFBA e colegas de doutorado pelo CIENAM.

Aos meus coorientadores, José Adolfo e Luciano Rodrigues pelo apoio e disponibilidade.

A Tayane, minha companheira, pelo apoio, suporte e compreensão.

A minha família, especialmente a minha mãe.

Aos meus amigos e amigas, pelo estímulo, o carinho e o apoio, especialmente Karla Ramos e família.

Aos que me permitiram entrevistá-los, agricultores do extremo Sul e de Irecê, colegas e demais profissionais que prestaram algum tipo de orientação/informação, Tadiê Barros (Fibria Celulose), Paulo Andrade e Diogo (Programa Fitossanitário de Controle da Lagarta Parda), Marcus Nascimento (Suzano), Wilson Andrade (ABAF), Tarcísio Sena (Eng. Agrônomo), Gleyson Araújo (ASPEX).

A Deus, por me guiar todos os dias.

A todas as forças positivas.

Não faz sentido que um cientista não seja relativista. O objetivo da ciência não é produzir verdade indiscutíveis, mas discutíveis.

Bruno Latour (Correio do Povo, 11/03/2017)

LISTA DE ACRÔNIMOS

ACV	Avaliação do ciclo de vida
AFOLU	Agriculture, forestry and other land use
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Cleaner production
GEE	Gases de efeito estufa
IPCC	Intergovernmental panel on climate change
LCA	Life cycle assessment
PmaisL	Produção mais limpa
UNEP	United nations environmental programme

Unidades

eq	equivalente
Gt	Gigatonelada

SUMÁRIO

RESUMO	10
ABSTRACT	12
CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
1. Introdução	13
1.1. <i>Objetivo geral</i>	16
1.1.1. <i>Objetivos específicos.....</i>	16
Referências.....	17
CAPÍTULO II - COMBINING CLEANER PRODUCTION AND LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR REDUCING THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF IRRIGATED CARROT PRODUCTION IN BRAZILIAN SEMI-ARID REGION	18
1. Introduction.....	22
2. Material and methods.....	25
2.1. <i>Combining CP and LCA</i>	25
2.1.1. <i>Pre-assessment.....</i>	26
2.1.2. <i>Assessment</i>	27
2.1.3. <i>Feasibility analysis</i>	29
2.1.4. <i>Scope</i>	29
2.1.5. <i>Inventory</i>	30
2.1.6. <i>Life cycle impact assessment.....</i>	31
2.1.7. <i>Interpretation</i>	31
3. Results and discussion	32
3.1. <i>Preliminary evaluation of CP opportunities.....</i>	33
3.1.1. <i>Tractor</i>	34
3.1.2. <i>Fertilizer</i>	34
3.1.3. <i>Seeds</i>	35
3.1.4. <i>Irrigation.....</i>	36
3.1.5. <i>Pesticide use.....</i>	37
3.2. <i>Economic evaluation and environmental impact.....</i>	37
3.2.1. <i>Financial viability.....</i>	37
3.2.2. <i>Inventory</i>	38
3.2.3. <i>Life cycle impact assessment.....</i>	40
4. Conclusions.....	44
Acknowledgements	44
References	45
Appendix A.....	50
CAPÍTULO III - DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS FLORESTAIS CONVENCIONAIS E MULTIPRODUTOS: INTEGRAÇÃO-LAVOURA-PECUÁRIA- FLORESTA COM BASE EM PRODUÇÃO MAIS LIMPA E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	64
1. Introdução	68
2. Aspectos ambientais e econômicos de florestas plantadas.....	71
3. Material e métodos.....	75
3.1. <i>Caracterização da área de estudo</i>	75
3.2. <i>Coleta de dados.....</i>	76
3.3. <i>Programa de Fomento Florestal.....</i>	77
3.4. <i>Combinando ACV e PmaisL</i>	77
3.5. <i>Unidade funcional.....</i>	78

3.6. Limites do sistema	78
3.6.1. Sistemas florestais analisados	79
3.7. Inventário	82
3.8. Operações florestais	85
3.9. Oportunidades de PmaisL e estudos de viabilidade	86
3.10. Avaliação de impacto ambiental e energética	87
3.10.1. Análise de sensibilidade.....	88
4. Resultados e discussão	89
4.1. Oportunidades de PmaisL e estudos de viabilidade	89
4.2. Inventário.....	95
4.3. Avaliação de impacto ambiental e energética	99
4.4. Análise de sensibilidade.....	101
5. Conclusões	104
Agradecimentos.....	105
Referências.....	106
Apêndice A.....	113
CAPÍTULO IV – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	122

LOPES, J. S. Desempenho ambiental de sistemas agrícolas e florestais com base na Avaliação do Ciclo de Vida. 124 f. il. 2018. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

RESUMO

A produção agrícola e florestal no Brasil se destaca em relação a outros países devido às condições edafoclimáticas brasileiras, aproveitamento de áreas degradadas e uso de tecnologias agrícola e florestal. No entanto, ocorre uma série de operações de manejo que provocam impactos ambientais, decorrentes principalmente do uso indiscriminado de fertilizantes sintéticos, combustíveis fósseis, água e energia elétrica. Conhecer o desempenho ambiental desses processos agrícolas e ambientais, possibilita identificar novas rotas de materiais e produtos para atender requisitos ambientais cada vez mais rigorosos, restringindo o uso de recursos naturais e emissões para o ambiente. Essa tese está organizada em quatro capítulos, cada um com introdução, desenvolvimento, referências e apêndices independentes. O capítulo I apresenta uma revisão abordando os principais efeitos ambientais da produção agrícola e florestal, enfocando as emissões de CO₂ para a atmosfera. O capítulo II no formato de artigo é o extrato de uma publicação no Journal of Cleaner Production avaliando o desempenho ambiental e econômico da produção de cenoura irrigada no Semiárido brasileiro. O capítulo III, também do formato de artigo, não publicado até a defesa desta tese, é um estudo do desempenho ambiental e econômico da produção de eucalipto de ciclo curto, incluindo a análise de um sistema alternativo de produção florestal integrada com lavoura e pecuária. No capítulo IV são apresentadas as considerações gerais a respeito dos dois estudos. Nesse contexto, o objetivo geral desse trabalho foi apresentar uma nova abordagem analítica para a avaliação ambiental e econômica de sistemas agrícolas e florestais, integrando Produção mais Limpa (PmaisL) e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), para fornecer informações mais detalhadas do cultivo de cenoura irrigada e da produção de eucalipto, utilizando dados coletados no local e uma análise do ciclo de vida. A utilização de PmaisL e ACV é vantajosa porque combina aspectos complementares dessas duas ferramentas, e, por ser aberta quanto ao seu processo de desenvolvimento, pode ser incrementada a partir de novos estudos que agreguem valor e potencializem os benefícios de cada um dos métodos. O uso combinado dos dois métodos mostrou-se viável à medida que a ACV identifica os principais pontos de impacto ambiental do sistema analisado, enquanto PmaisL apóia práticas que reduzem custos e o uso de insumos como água, energia, fertilizantes, sementes e pesticidas. A Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida foi realizada usando o Método do Sistema de Dados do Ciclo de Vida de Referência (ILCD, 2011), incluindo a incerteza dos dados. Os potenciais impactos ambientais do cultivo da cenoura estão relacionados ao uso de fertilizantes nitrogenados. Verificou-se também que a água e a energia elétrica consumidas durante a irrigação são demasiadamente desperdiçadas. As medidas de PmaisL forneceram maior nível de conformidade com os requisitos técnicos para o sistema estudado e provou ser mais econômica e ambientalmente eficiente do que as práticas de 'fim de tubo'. Os principais resultados para os sistemas de produto do eucalipto, incluindo uma análise de sensibilidade, mostraram que o preparo do solo, as emissões de insumos no campo e a colheita da madeira foram responsáveis pelas maiores contribuições dos impactos. Considerando a média das

entradas no sistema, a implantação de um sistema de Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta reduziria o uso dos insumos e aumentaria a receita bruta em relação ao sistema de produção convencional. O uso complementar de PmaisL e ACV mostrou que as boas práticas operacionais podem reduzir os potenciais impactos ambientais e os custos de produção dos sistemas analisados, dando suporte a uma produção mais sustentável para as condições analisadas.

Palavras-chave: Eucalipto, extremo Sul da Bahia, Semiárido, Produção mais Limpa, ACV, sustentabilidade.

LOPES, J. S. Environmental performance of agricultural and forestry systems based on Life Cycle Assessment. 124 p. il. 2018. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

ABSTRACT

Agricultural and forestry production in Brazil stands out in relation to other countries due to the country's edaphoclimatic conditions, the use of degraded areas and the use of agricultural and forestry technologies. However, the management of these resources causes environmental impacts, mainly due to the indiscriminate use of synthetic fertilizers, fossil fuels, water and electricity. Knowledge of the environmental performance of these agricultural and environmental processes enables us to identify new material and product routes to meet increasingly stringent environmental requirements, restricting the use of natural resources and emissions to the environment. This thesis is organized into four chapters, each with an independent introduction, development, references and appendices. Chapter I presents a review addressing the main environmental effects of agricultural and forestry production, focusing on CO₂ emissions into the atmosphere. Chapter II in article format is an excerpt from a publication in the Journal of Cleaner Production assessing the environmental and economic performance of irrigated carrot production in the Brazilian semiarid. Chapter III, also in article format, unpublished until the defense of this thesis, is a study of the environmental and economic performance of short-cycle eucalyptus production, including an analysis of an alternative forest production system integrated with farming and livestock. Chapter IV presents the general considerations regarding the two studies. The overall objective of this paper is to present a new analytical approach for the environmental and economic assessment of agricultural and forestry systems. This approach integrates Cleaner Production (CP) and Life Cycle Assessment (LCA) to provide more detailed crop information of irrigated carrots and eucalyptus production, using data collected on site and including a life cycle analysis. The use of CP and LCA is advantageous because it combines complementary aspects of these two tools and they are open about the development process, can be expanded from new studies that add value and enhance the benefits of each method. The combined use of both methods has proven feasible as LCA identifies the key environmental impact points of the system under analysis, while CP supports practices that reduce costs and the use of inputs such as water, energy, fertilizers, seeds and pesticides. Life Cycle Impact Assessment was performed using the Reference Lifecycle Data System Method (ILCD, 2011), including data uncertainty. Potential environmental impacts of carrot cultivation are related to the use of nitrogen fertilizers. It has also been found that water and electricity consumed during irrigation are also wasted. CP measures provided a higher level of compliance with the technical requirements for the system studied and proved to be more economical and environmentally efficient than end of pipe practices. The main results for the eucalyptus production systems, including a sensitivity analysis, showed that soil tillage, field input emissions and timber harvesting were responsible for the largest impact contributions.

Considering the average input to the system, the implementation of a Crop-livestock-forestry integration system would reduce the use of inputs and increase gross revenue compared to the conventional production system. The complementary use of CP and LCA has shown that good operating practices can reduce the potential environmental impacts and production costs of the systems analyzed, supporting more sustainable production for the conditions analyzed.

Keywords: Eucalyptus, Bahia South extreme, semi-arid, Cleaner Production, LCA, sustainability.

CAPÍTULO I

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1. Introdução

De acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014), as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) cresceram em todos os setores, exceto as emissões líquidas de CO₂ na Agricultura, Silvicultura e Outros Usos da Terra (Agriculture, Forestry and Other Land Use, AFOLU). No entanto, este setor foi responsável por 24% das emissões antropogênicas diretas de GEE em 2010, o que equivale a aproximadamente 10–12 GtCO₂ eq ano⁻¹ (IPCC, 2014). Uma gestão agrícola e florestal com base em princípios de sustentabilidade possibilita oportunidades de mitigação que podem ser implementadas imediatamente com as tecnologias em curso (IPCC, 2007). Segundo o IPCC (2007), as oportunidades para mitigar os GEE tem como base a redução das emissões do campo, principalmente devido ao uso de insumos e combustíveis fósseis, assim como aumento das remoções e emissões evitadas.

No Brasil, a produção de cenoura e eucalipto, assim como outros sistemas hortícolas e florestais, compreende uma série de operações de manejo que provocam efeitos ambientais, principalmente, relacionados a acidificação, a eutrofização e o aquecimento global. Alguns estudos de ACV em horticultura foram encontrados na literatura, no entanto, poucos estão relacionados à produção de cenoura, especialmente para as condições do semiárido brasileiro. Entre os estudos encontrados na literatura para o cultivo de cenoura, Raghu (2014) e Rööös e Karlsson (2013), porém, só avaliaram a categoria de aquecimento global.

Para condições semelhantes às dessa pesquisa, Saraiva et al. (2017) investigaram diferentes sistemas de produção de biomassa para celulose. Porém, esses autores não consideraram a produção de mudas na análise e não detalharam as operações florestais. Portanto, conhecer e analisar os impactos ambientais globais do consumo local é uma oportunidade de implementar medidas para melhorar o desempenho ambiental desses sistemas numa perspectiva de sustentabilidade.

A ACV, embora seja uma ferramenta robusta e capaz de compilar e avaliar os insumos, produtos e os potenciais impactos ambientais de uma atividade (ISO 14044, 2006), não identifica estratégias de mitigação dos potenciais impactos. A PmaisL pode atuar como abordagem estratégica integrada e preventiva para otimizar os processos de produção de

hortícola e florestal, reduzindo seus custos e aumentando o nível de conformidade dos mesmos. De acordo com Dias e Arroja (2012), uma abordagem combinando diferentes ferramentas, possibilita a avaliação de um conjunto mais amplo de impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do eucalipto, incluindo, além das operações florestais, a produção, transporte, o consumo de energia e materiais consumidos nessas operações.

Nessa pesquisa, é apresentada uma abordagem analítica inovadora para esses setores, integrando PmaisL e ACV para fornecer informações mais detalhadas sobre o desempenho ambiental de sistemas hortícolas e florestais. Os principais avanços metodológicos são: i) uso combinado de PmaisL e ACV, sendo que PmaisL possui baixo custo pois não requer softwares específicos para análise; ii) tomada de decisão com base na avaliação técnico-econômica e potenciais impactos ambientais; iii) identificação de pontos críticos dos sistemas avaliando simultaneamente diversas categorias de impacto ambiental; iv) estimativa de incertezas de primeiro e segundo planos; v) menor incerteza dos resultados a partir da utilização de dados locais. Essa abordagem permite identificar práticas operacionais que resultam em ganhos ambientais e financeiros para os sistemas analisados.

Nesse trabalho, foram avaliadas oportunidades ambientais e econômicas em duas cadeias de suprimento no Brasil. O estudo de caso da cenoura foi conduzido em uma unidade de produção familiar na região de Irecê, Semiárido baiano. O segundo estudo de caso foi conduzido no extremo Sul da Bahia, no âmbito do Programa de Fomento Florestal da Fibria Celulose, uma das maiores produtoras de eucalipto e fibra curta do mundo.

Para alcançar os objetivos propostos nesse estudo, foram obtidos dados primários por meio de entrevistas, documentos, coletas em campo e dados secundários, oriundos de relatórios, pesquisa bibliográfica e bases de dados. Os dados de Inventário do Ciclo de Vida foram tabulados em planilhas eletrônicas no Excel[®], modelados e analisados no software Simapro[®].

Na avaliação ambiental, foi adotada uma abordagem híbrida, combinando PmaisL e ACV para medir o desempenho ambiental dos sistemas de produto, identificar oportunidades de melhoria operacional e tecnológica e analisar as oportunidades que apresentam maiores ganhos ambientais e econômicos.

A PmaisL é uma abordagem preconizada pela United Nations Environmental Programme (UNEP), que proporciona a otimização de processos, redução de custos e maior nível de conformidade com as regulamentações ambientais. As medidas de Prevenção da Poluição são mais eficientes econômica e ambientalmente em relação às medidas fim de tubo

(Rahim and Raman, 2015) e contribuem para a sustentabilidade da produção agrícola e da produção florestal.

O pensamento do ciclo de vida é uma abordagem científica que auxilia iniciativas de Produção mais Limpa e apoia indicadores para a tomada de decisão. Segundo Evans et al. (2009) a ACV é o método mais completo para análise ambiental de processos e produtos, combinando métodos como a análise de insumo-produto, balanços de massa e energia e emergia (Brown e Ulgiati, 2002).

O uso de PmaisL e ACV oferece sinergias de melhoria do processo e abrangência do escopo de análise na perspectiva do ciclo de vida, possibilitando identificar novas rotas de materiais e produtos para atender requisitos ambientais que estão cada vez mais rigorosos, restringindo o uso de recursos naturais e emissões para o ambiente.

Essa pesquisa, de natureza básica e abordagem qualitativo-quantitativa, foi motivada pelo interesse do autor em realizar uma contribuição técnico-científica que auxilie e fomenta iniciativas de produção e consumo sustentáveis para os setores agrícola e florestal, em duas cadeias de suprimento relevantes do ponto de vista da geração de emprego e renda para o Estado da Bahia.

Enquanto professor-pesquisador, o autor representa o Instituto Federal da Bahia (*Campus Irecê*) no âmbito de articulação em rede, denominada Rede Baiana de Avaliação do Ciclo de Vida. A Rede ACV-BA envolve professores, pesquisadores e alunos de Instituições de Ensino e Pesquisa da Bahia e colaboradores de outros Estados. Desde o projeto de pesquisa, buscou-se uma articulação entre a Universidade Federal da Bahia, Instituto Federal da Bahia, Universidade Federal do Sul da Bahia, Universidade Estadual de Santa Cruz, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, empresas do setor florestal, Associação Baiana das Empresas de Base Florestal e produtores rurais do segmento da agricultura irrigada da região de Irecê, no Semiárido baiano.

As tendências hídricas para o nordeste brasileiro indicam severas reduções da disponibilidade da água de chuva e de superfície que agravam os efeitos das mudanças climáticas. As produções florestal e hortícola demandam, portanto, o compromisso e responsabilidade ao longo do ciclo de vida como estratégia de negócio para as empresas florestais e produtores rurais. A partir de uma lógica de percepção mais completa sobre a realidade da produção e meio ambiente apresentada neste estudo, as empresas que atuam no setor florestal poderão obter ganhos financeiros que não sejam oriundos somente do marketing das certificações, mas pela otimização dos seus processos.

O texto está organizado em capítulos com referências e apêndices independentes: Introdução geral (Cap. I); extrato de uma publicação no Journal of Cleaner Production (Cap. II); artigo com o estudo do eucalipto (Cap. III) e considerações finais (Cap. IV). A produção científica do doutoramento e as diretrizes para publicação do material que ainda não foi publicado estão discriminadas no apêndice geral.

1.1. Objetivo geral

Avaliar o desempenho econômico e ambiental e propor medidas de PmaisL em sistemas de produção hortícola e florestal.

1.1.1. Objetivos específicos

- Propor uma abordagem metodológica para integração dos métodos PmaisL e ACV;
- Aplicar a abordagem no estudo de sistema de cultivo de cenoura;
- Aplicar a abordagem no estudo de sistemas de produção florestal.

Referências

- Brown, M.T., Ulgiati, S., 2002. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems. *Journal of Cleaner Production*, 10(4), 321–334.
[http://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00043-9](http://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00043-9)
- Evans, A., Strezov, V., Evans, T.J., 2009. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 1082–1088.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, first edition. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- International Organization for Standardization (ISO), 2006. *ISO 14044: Environmental Managements - Life Cycle Assessments - Requirements and Guidelines*. International Organization for Standardization, Geneva
- Raghu, K.C., 2014. Comparative life cycle assessment of organic and conventional carrots - case: Carrots from south-savo and imported carrots from Italy. Unpublished.
<https://doi.org/10.13140/rg.2.1.2109.0726>
- Rahim, R., Raman, A.A.A., 2015. Cleaner production implementation in a fruit juice production plant. *J. Clean. Prod.* 101, 215–221.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.065>
- Röös, E., Karlsson, H., 2013. Effect of eating seasonal on the carbon footprint of Swedish vegetable consumption. *J. Clean. Prod.* 59, 63-72.
- Saraiva, A.B., Valle, R., Bosquê, A.E.S., Berglin, N., Schenck, A. V, 2017. Provision of pulpwood and short rotation eucalyptus in Bahia, Brazil – Environmental impacts based on lifecycle assessment methodology. *Biomass and Bioenergy* 105, 41–50.
<https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2017.06.004>

CAPÍTULO II

COMBINING CLEANER PRODUCTION AND LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR REDUCING THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF IRRIGATED CARROT PRODUCTION IN BRAZILIAN SEMI-ARID REGION¹

Juliano da Silva Lopes^{a, 2}, Diego Lima Medeiros^b, Asher Kiperstok^c

^a *Federal Institute of Education, Science and Technology of Bahia (IFBA), Irecê, Brazil.*

^b *Industrial Engineering Graduate Program, Federal University of Bahia (UFBA), Salvador, Brazil*

^c *Department of Environmental Engineering, Federal University of Bahia (UFBA), Salvador, Brazil*

Abstract: Agriculture is the activity that contributes most to the emission of greenhouse gases, water quality degradation, soil loss and nutrient runoff worldwide. These harmful environmental impacts are issues in irrigated agriculture in the Brazilian semi-arid region. The rational use of natural resources and the efficiency of agricultural systems can reduce the environmental impacts and are essential for a more sustainable agriculture. However, a limited amount of data concerning the environmental impacts of horticultural practices is available. To date, no evaluation of a carrot crop life cycle in Brazil could be found in the literature. The purpose of this paper is to present a methodological approach combining Life Cycle Assessment (LCA) and Cleaner Production (CP) principles in the environmental and economic evaluation of irrigated carrot farming. Life Cycle Impact Assessment was carried using the International Reference Life Cycle Data System (ILCD 2011) method, including data uncertainty. We evaluated the base scenario based on management practices widely adopted in the studied area, and the recommended scenario based on adoption of CP selected opportunities using agronomic recommendations for the carrot production system. By these means, the environmental impacts can be reduced between 15 and 70% in the evaluated categories from the base to the recommended scenario. Most environmental impacts were related to fertilizer production and field emissions. The global warming effect related to the emission of 0.12 kg CO₂ eq/kg product from the base scenario can be reduced to 0.07 kg CO₂ eq/kg product in the recommended scenario. This represents a lower value than most global warming rates for carrots found in literature. The costs of inputs were reduced by 49% in the recommended scenario. Most costs of inputs were related to fertilizers and seed purchasing. The combined use of the two methods proved feasible as LCA identifies the main hotspots of the analyzed system, while CP support practices that reduce costs and the use of inputs such as water, energy, fertilizers, seeds and pesticides. CP provided a higher level of compliance with the technical requirements for the studied system and proved to be more economically

¹ Extrato do artigo publicado: Lopes, J. Medeiros, D. L., Kiperstok, A. (2018). Combining cleaner production and life cycle assessment for reducing the environmental impacts of irrigated carrot production in Brazilian semi-arid region. **Journal of Cleaner Production**, 170, 924–939. doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.198

² Instituto Federal da Bahia, Campus Irecê. Rodovia BA 148, km 04, 1800, Vila Esperança CEP 44900-000 Irecê, Bahia, Brazil. Corresponding author. Tel.: +55 071 3283 9798. E-mail address: julianolopes@ifba.edu.br (J. S. Lopes).

and environmentally efficient than ‘end of pipe’ practices. The complementary use of CP and LCA provided better support for a more sustainable irrigated carrot production in the semiarid region of Brazil.

Keywords: Cleaner Production, Life Cycle Assessment, enviromental sustainability, Irecê, carrot, horticulture.

List of acronyms

AC	Acidification
AFOLU	Agriculture, forestry, other land use
Al	Aluminum
ANEEL	Brazilian electricity regulatory agency
BS	Base scenario
Ca	Calcium
CONAMA	Environmental national council
CP	Cleaner production
ESRI	Environmental systems research institute
ET-f	Freshwater ecotoxicity
EU-f	Freshwater eutrophication
EU-m	Marine eutrophication
EU-t	Terrestrial eutrophication
FAO	Food and agriculture organization of the united nations
Fig	Figure
GSD	Geometric standard deviation
GW	Global warming
HT-c	Human toxicity, cancer effects
HT-n	Human toxicity, non-cancer effects
IBGE	Brazilian institute of geography and statistics
IH	Water index
ILCD	International reference life cycle data system
INEMA	Institute of environment and water resources
IPCC	International panel on climate change
IR-e	Ionizing radiation to ecosystem

IR-h	Ionizing radiation to humans
ISO	International organization for standardization
LCA	Life cycle assessment
LCI	Life cycle inventory
LCIA	Life cycle impact assessment
LU	Land use
Mg	Magnesium
MAPA	Ministry of agriculture, livestock and supply
Na	Sodium
N	Nitrogen
NPK	Nitrogen, phosphorus, potassium
OD	Ozone depletion
pH	Potential of hydrogen
PM	Particulate matter
PO	Photochemical ozone formation
RD	Mineral, fossil and renewable resource depletion
RS	Recommended scenario
UNEP	United nations environment programme
UNIDO	United nations industrial development organization
USA	United states of america
WD	Water resource depletion

Units

Eq	equivalent
g	gram
ha	hectare
hp	horse-power
kg	kilogram
km	kilometer
kWh	kilowatt-hour
L	liter
m	meter
mg	milligram

MJ	mega joules
mm	millimeter
T	tonne
Tg	teragram
USD	United States dollar

1. Introduction

The Food and Agriculture Organization (FAO, 2014) estimated that greenhouse gas emissions from agriculture, forestry, other land use (AFOLU), energy use in agriculture and fisheries have doubled in the last fifty years. This increase was mainly due to the expansion of agriculture in developing countries and it could additionally rise by 30% by 2050 if no efforts are made to counter it (FAO, 2014).

In 2010, AFOLU emissions accounted for 24% of global greenhouse gases (IPCC, 2014) and have continuously increased, even though deforestation is declining, mainly due to the application of synthetic fertilizers. Nitrous oxide from this source is among the largest agricultural greenhouse gas contributions (Smith et al., 2008).

Food crops worldwide use 95% of irrigated land, consume 92% of water for irrigation and 70% of the nitrogen and phosphorus applied to agricultural land, which in turn are excessively deposited in the soil (West et al., 2014).

In 2010, global emissions of reactive nitrogen totaled 189 Tg, of which 161 Tg came from industries and agriculture (Oita et al., 2016). They calculated the nitrogen demand per capita and found that it ranges from 7 to 100 kg N per year. China, India, USA and Brazil accounted for 46% of global emissions of reactive nitrogen.

Agriculture also contributes to the degradation of water quality and water scarcity (Carpenter et al., 1998), by the use of pesticides that are harmful to local and regional biodiversity, water, soil and human health. According to Lima Junior et al. (2014), irrigation increases the yield and improves the quality of carrots, however, either a deficit or an excess of water and inadequate management affect their development. Improper management of the production system increases the cost of electricity and contaminates the water with fertilizers and pesticides. According to Figueirêdo et al. (2016), the modification of fertilization and pest management is the best way to improve the environmental performance of agricultural production.

The Irecê region, Bahia State, Brazil, is a semi-arid region where agriculture is the main economic activity. The study location is a karst³ region with large groundwater reserves (Leal and Silva, 2004). The availability of surface water is low, but its fertile soils, flat land, and underground water resources favor intensive irrigated agriculture. The groundwater in

³ Karst is the term used to describe a type of natural landscape characterized by the chemical dissolution of rocks that lead to the appearance of caves and extensive groundwater systems in rocks such as limestone, marble, and gypsum. Approximately 20-25% of the global population depends on a large extent or entirely of groundwater obtained from Karst regions (Ford and Williams, 1989).

this region is brackish and its continued use causes soil salinization (Nossa, 2011), nevertheless irrigated carrot cultivation in Irecê has been carried out on a large scale since 1990. Monitoring of groundwater conducted by Maia et al. (2010) in 1969 and 2003 showed a continuous lowering of the aquifer level in the Irecê region due to the intense exploitation of water for irrigation.

Worldwide carrot consumption is approximately 4.29 kg per person per year, making them one of the most economically valuable root vegetables (Freitas et al., 2009). Carrot production in Brazil is concentrated in the States of Minas Gerais, São Paulo, Paraná and Bahia (Freitas et al., 2009). According to the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE, 2006), the Irecê region produced 85% of the carrots in the Bahia State which represents 54% in the Northeast region of Brazil and 14% in Brazil. In this region, 5000 families cultivate irrigated carrots within an area of 6000 ha with a maximum throughput of 60 tons per hectare and production capacity of up to three annual cycles (Pineiro et al., 2010).

Cleaner Production (CP) and Life Cycle Assessment (LCA) methods were adopted in this study to assess carrot cultivation. According to the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO, 2002), CP method, which means the continuous application of an integrated environmental strategy to processes, products, and services, aims to promote production efficiency, environmental management and human development.

According to the International Organization for Standardization (ISO), a product life cycle is a compilation and evaluation of inputs, outputs and the potential environmental impacts of an activity (ISO 14044, 2006). LCA is used to evaluate environmental effects associated with any product or activity, from the raw materials extraction to the point of return of the waste (Vigon et al., 1993). It constitutes a starting point for the development of Environmental Product Declaration (Ingrao et al., 2015). In addition, LCA serves as a tool to support local policies for sustainable production and consumption patterns (Cellura et al., 2012). However, Rahim and Raman (2015) warn that an LCA study only identifies environmental impact, not mitigation strategies.

Some LCA studies in horticulture can be found in the literature, however, few are related to carrot production. The LCA food Denmark (2006) database presents only emissions of nitrogen and phosphorus compounds. However, this database does not represent the Brazilian context. Silva and Forbes (2016) examined sustainability in the horticulture industry in New Zealand and identified costs and time as the main barriers for implementing sustainable practices. Soode et al. (2015) argue that one way to combat climate change is to

reduce the impacts of isolated products. However, the carbon footprint studies of German horticultural products are limited in coverage and do not include the entire supply chain. These authors identified that products from open field crops perform better than foreign crops transported by plane or greenhouse crops, regardless of the producing country. Perrin et al. (2014) suggest a way to characterize the crop in space and time, as well as to include the complete inventory to assess impacts such as eutrophication, toxicity, and water deprivation in LCA of vegetable products. Cellura et al. (2012) applied LCA to tomatoes, cherry tomatoes, peppers, melons, and zucchinis in Italy and identified that the overuse of fertilizers and pesticides increases environmental impacts such as eutrophication, acidification, and water consumption. They found that the adoption of best practices in vegetable production reduced environmental impacts significantly.

Among the studies found in the literature for carrot cultivation, Raghu (2014) and Rööf and Karlsson (2013) only evaluated global warming. Stoessel et al. (2012) also evaluated the water footprint. On the other hand, carrot crop inventories available in life cycle databases such as Agribalyse[®] (Koch and Salou, 2015), Agri-footprint (2015) and World Food (Nemecek et al., 2015) are more complete LCA approaches and enable the evaluation of several impact categories. Stoessel et al. (2012) used LCA to evaluate the carbon and water footprints of 34 food products, including carrots, and suggest the inclusion of other environmental categories to avoid problem shifting. Raghu (2014) assessed the life cycle of carrots in Finland for different production systems: local organic, local conventionally grown and those imported from Italy.

To date, we have not found any carrot LCA study in Brazil, therefore this is an opportunity to present this research. This study stands out in relation to literature for its completeness and use of primary local data, which enables the evaluation of several impact categories. Furthermore, we did not identify any papers in the literature that combine CP and LCA approaches to evaluate agricultural products. Therefore, the purpose of this paper is to present a methodological approach combining CP and LCA to study agricultural products with the carrot case study in Brazilian semi-arid region, using primary data from the field.

2. Material and methods

The study area is located at coordinates 11° 28' 32.5" S and 41° 51' 55.1" W (Fig. 1) in the municipality of the Lapão, microregion of Irecê, Bahia State, northeastern Brazil.

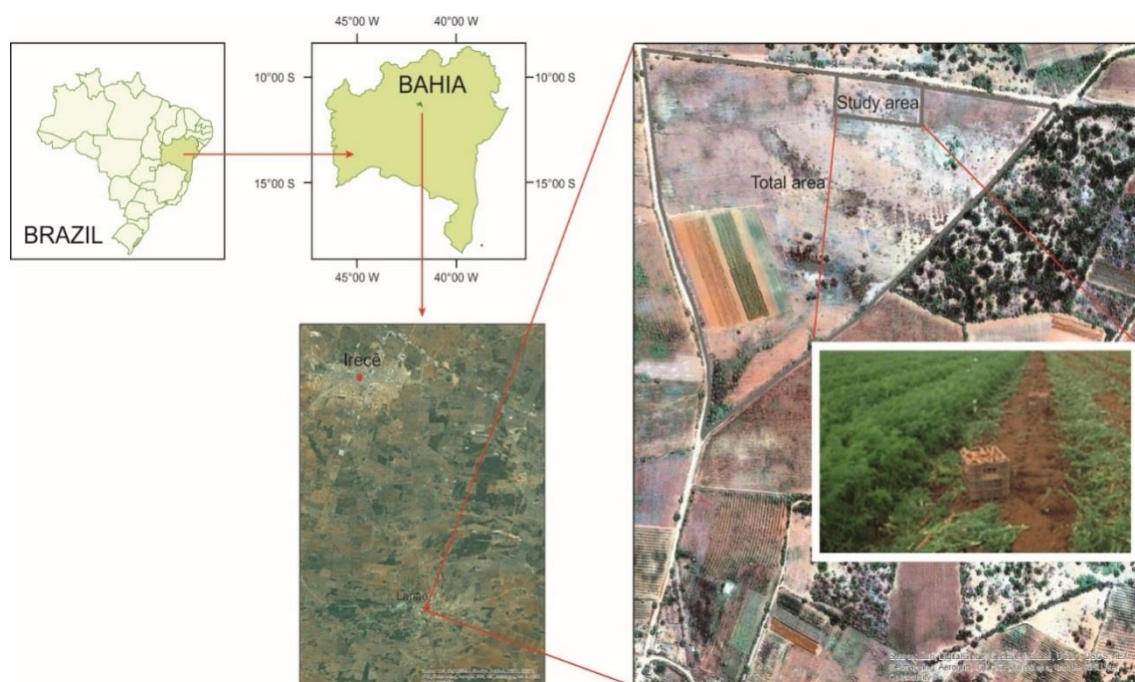


Fig. 1. Study area located in Lapão, Bahia State, Brazil.
Source: Environmental Systems Research Institute (ESRI, 2016).

The predominant biome in this study area is the *caatinga*⁴. The climate is described as BSh⁵ according to the Köppen classification (Kottek et al., 2006): semi-arid, sub-humid, dry in the winter and very hot and rainy in summer, with average annual temperatures of 23–24 °C. According to Nossa (2011), the annual precipitation varies from 500-700 mm with a mean of 653 mm and the soil is classified as Cambisol.

2.1. Combining CP and LCA

In this study, our methodological approach combined CP and LCA principles in the assessment of irrigated carrot. Two production scenarios were evaluated. The first was based on practices adopted in the study area in the data collection period (base scenario - BS). The second was based on CP selected opportunities to implement on carrot crop for the study area

⁴ Caatinga is an exclusive Brazilian biome and the largest one in the northeast of the country. The term "caatinga" means white forest, characterized by small trees of thin stems and shrubs that lose their leaves seasonally (FAO, 2015).

⁵ According to the World Map of Köppen-Geiger, the climate classification is based on the Main climate (B = arid), Precipitation (S = steppe) and Temperature (h = very arid) (Kottek et al., 2006).

(recommended scenario - RS). CP was adopted to make the environmental diagnosis of carrot production and to identify the opportunities for environmental improvement of the process. Although CP considers technical, economic and environmental evaluation, the environmental impact was further assessed by LCA method. As a result, we identified LCA to be a robust method of improving CP decision making. LCA was used to evaluate the environmental impact of selected CP opportunities among the measures identified. In Fig. 2 the steps followed in this study, combining CP and LCA are presented. For a better understanding, the steps in each method are described separately. The CP method was used as recommended by UNIDO (2002), followed by the LCA according to ISO 14044 (2006).

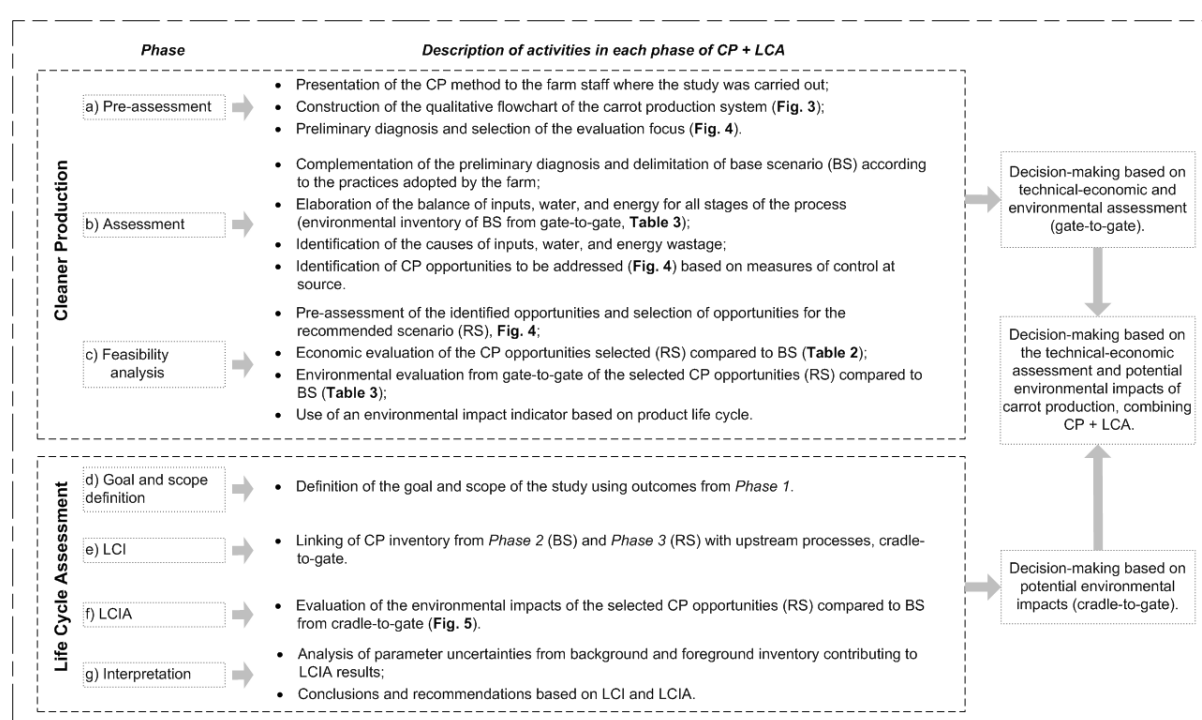


Fig. 2. Methodological approach combining CP and LCA.

2.1.1. Pre-assessment

Initially, a visit was made to get to know the background of the farm and the process flow, to understand the carrot production process, agricultural management operations, the layout of the facilities and other farm activities. Through technical visits, in which the researchers met the owner of the farm and the workers, the whole crop cycle was studied, from soil preparation to harvest, to better understand all the stages of production (Fig. 3).

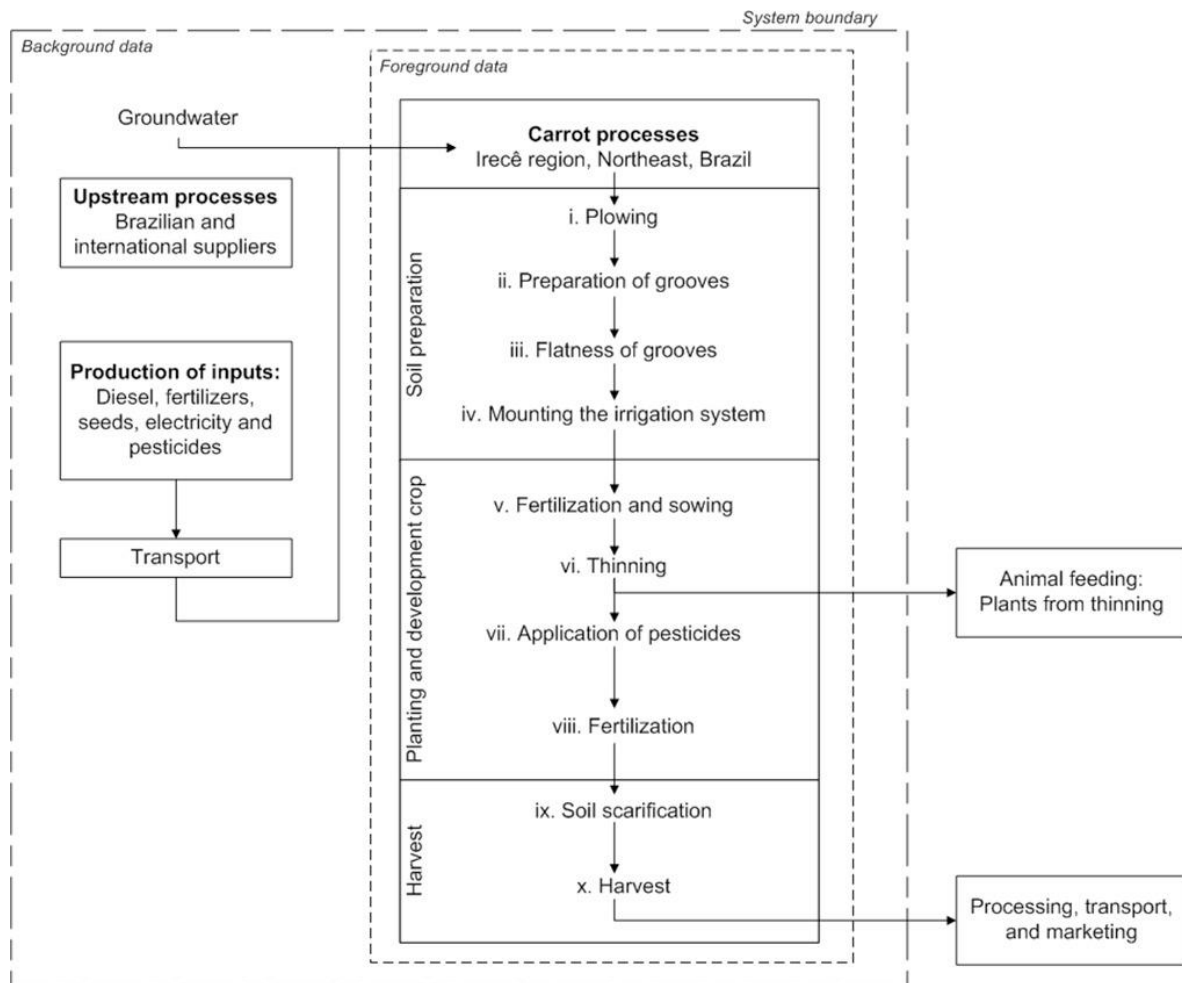


Fig. 3. Flowchart of carrot production stages.

2.1.2. Assessment

At this phase, a preliminary diagnosis was completed and the environmental inventory was made including the balance of inputs, water and energy. The opportunities of CP practices to be addressed, based on measures of control of waste at the source were identified. These field data were collected from May to July 2014 and August to September 2015.

The information on diesel consumption of the agricultural tractor was obtained from the workers on the farm. Fertilizer information was also obtained from the workers and was based on sample collection in the field which underwent soil macronutrient laboratory analysis. For the recommended scenario, recommendation of agronomic practices were considered. Seed information was also obtained from workers for the base scenario and CP selected opportunities, using agronomic recommendations, for the recommended scenario. After the germination of the seeds, still some small plants are eliminated manually to standardize the planting forming a more uniform stand of plants. These discarded plants are collected in the field to feed animals. Electricity consumption of the irrigation system was

obtained from an electricity meter and, for the recommended scenario, it was estimated based on the pump power and operation time.

The water index for the town of Irecê was calculated according to the method of Thornthwaite and Mather (1955) (Table A.1). This index reflects the water balance. Water is a limiting factor for agricultural production and the water index relates the availability of water to the soil through precipitation and irrigation with appropriate practices. The irrigation water consumption data were obtained from the owner of the farm, who provided technical information about the water well. The water demand for irrigation in the recommended scenario was estimated based on agronomic coefficients, Irecê's regional data and carrot cultivation technical data (Table A.1). The water consumption was quantified for irrigation and pesticide dilution.

The information concerning the actual use of pesticides was obtained from the workers. Recommendations were based on CP selected opportunities using Ministry of Agriculture, Livestock and Supply advices. However, only the *Afalon* herbicide and the *Amistar Top* fungicide used for growing carrots are registered in the Ministry of Agriculture, Livestock and Supply (MAPA, 2016). The unregistered pesticides were considered to be the same amount in both scenarios. The pesticide compositions were based on the technical specification (Table A.2). Nitrogen, phosphorus, heavy metals and pesticide emissions into the air, water, and soil compartments were calculated based on the regional soil, plant and climate data according to the method of Nemecek and Schnetzer (2012) for estimating direct emissions of Life Cycle Inventory (LCI) of agricultural production systems (Table A.3).

Harvesting and product information were obtained from local workers and agronomists. The leaves which are removed from the roots of the carrot during the harvest are collected to feed cattle and sheep. Losses of this biomass were not considered in the product system because they represent less than 1% of the total mass. Consequently, the total inputs and outputs of the product system were attributed to the main product (harvested carrots). The phases of post-harvest, transport, and marketing were not included in this study.

Prices of inputs such as diesel, fertilizers, seeds and pesticides were collected from local suppliers. There is one water pump connected to an electricity meter that provided data for electricity consumption. The amount and price of electricity was based on the bill payed to the electricity supplier. Water extraction and pollutant emissions are not priced in the Irecê region, therefore they were not included in the cost analysis.

The pre-assessment and assessment phases of CP for the carrot crop were used to identify areas for improvement and recommend more efficient management practices.

Understanding the cost and physical balances enabled the identification of opportunities for environmental and economic improvement strategies.

2.1.3. Feasibility analysis

At this phase, the feasibility of implementing the identified CP opportunities was analyzed. CP opportunities were selected based on the following criteria defined in preliminary assessment: implementation based on changes in operational practices and immediate return time without the initial need for financial investment. The selected CP opportunities were evaluated technically based on the agronomic recommendations for the carrot. The CP selected opportunities were assessed through cost and environmental aspects and compared with the base scenario.

The farm evaluated in this study is a family farm that does not have permanent employees and does not have administrative expenses and taxes in relation to the object of the study. Therefore, costs with taxes, labor and administration were not discounted from gross revenue. Gross revenue was estimated based on a harvest of 111,000 kg, marketed in 20 kg bags. The price considered for each bag was 3.50 USD. Technical assistance is provided by input suppliers and public agencies, therefore, these costs were disregarded. Net revenue is gross revenue minus input costs. The economic benefits and input costs were demonstrated. A more detailed cost analysis of the selected opportunities (reduction in excessive use of fertilizers, seeds, irrigation and pesticides) was performed. The recommended scenario payback was estimated by dividing the cost of the investment by the annual savings that can be obtained with the recommended practices. Price and costs are given in USD using the quotation of 3.42 Reais per dollar in June 2nd 2016. The detailed cost data can be found in Table A.4.

In addition, the environmental analysis of CP selected opportunities, including non-priced flows such as water extraction and pollution emissions, was carried out for the recommended scenario using LCA.

2.1.4. Scope

The LCA study was conducted based on ISO 14044 (2006) and the ILCD (EC-JRC, 2010) guidelines. The analysis was from cradle-to-gate of the farm and the reference flow of the study was 1 kg of harvested carrots.

The production system (Fig. 3) considered plowing, fertilizing, sowing, irrigation,

application of pesticides and harvesting, for both scenarios. The farm has 26 ha and the study area covered one ha, with a productivity of $111,000 \text{ kg (ha year)}^{-1}$, including three cycles of 90–120 days each. Both scenarios were considered having a continuous production with the same yields.

The carrot production stages presented in Fig. 3 start with the displacement of a 62 hp compact tractor and agricultural equipment to a distance of 0.87 km from the field. Over the three annual crops, the machinery is displaced at least 42 times. Plowing is performed with a three discs plow coupled to the tractor (i) and preparation of the grooves is made with a trencher coupled with three discs (ii). Leveling is done with a mechanical rotary hoe that fragments and homogenizes the soil into smaller clods (iii). Then the irrigation system is assembled (iv). The main line of water distribution and micro perforated hoses are distributed manually. The well that supplies the water has a depth of 80 m and is 200 m away. Fertilizers are applied manually in the field (v). During the sowing (v), a planter coupled to the tractor is used. Then the field is irrigated. The carrot seeds are placed directly in the crop area rather than by transplanting seedlings. After the germination phase, excess plants are removed manually (vi) to ensure uniform spacing between plants. In the control step of pests and diseases (vii), pesticides are applied manually by a worker using a backpack pump sprayer. During the development of the carrot, two more fertilizations are made with potassium chloride (viii). In the pre-collection step (ix), the tractor is used to break up the soil to facilitate manual harvesting (x). The harvested product is transported to a packing house, where it is washed, sorted, packed into bags of 20 kg and transported to the resale or final consumer center. However, these processes were not considered in this study.

2.1.5. *Inventory*

The LCA inventory was based on the mass and energy balance of the farm from gate-to-gate, as presented in Section 3.2.2. The datasets for the production and transportation of raw materials were obtained from the global LCI database ecoinvent[®] (Wernet et al., 2016), using the allocation default version 3.1 (Moreno-Ruiz et al., 2014) with electricity data from the Brazilian energy matrix.

The carbon captured by plants was not considered in this study because it was assumed that the net carbon balance is neutral in a short cycle crop (Downie et al., 2014). Change in land use was also not considered because the area has previously been used for irrigated agricultural production. It was considered that the production of root growth

stimulant, infrastructure (e.g. irrigation hose, pump machine, and tractor) and packages represented less than 1% of the environmental impacts, so these processes were not included. Some plants lost in thinning as well as those lost during harvesting are used to feed animals, therefore the cut-off criteria was applied (Fig. 3). The transport of material inputs considered global average distances of ecoinvent[®] market datasets (Moreno-Ruiz et al., 2013).

2.1.6. Life cycle impact assessment

The potential environmental impact assessment method used in this study was the ILCD 2011 (EC-JRC, 2012) version 1.07. The GW, global warming, category was used to compare the results with those of the literature. Simapro[®] 8 was used for calculating the assessment of the LCIA.

2.1.7. Interpretation

The interpretation of LCA results used the following approaches: contribution analysis, comparative analysis, uncertainty and discernibility analysis. The contribution analysis identifies the share of a certain process or life cycle stage in a certain impact category. The comparative analysis presents the LCA results for different product alternatives. The discernibility analysis combines the comparative analysis and the uncertainty analysis (Heijungs and Kleijn, 2001).

For the assessment of uncertainty, the Monte Carlo method was used considering a confidence interval of 95%, 10000 runs and lognormal distributions for the inputs and outputs. The squared geometric standard deviation of the foreground inventory was calculated according to the uncertainty estimates of Goedkoop et al. (2016), based on basic uncertainty and pedigree matrix (Weidema and Wesnaes, 1996). In addition, the uncertainty factors contained in the background data from ecoinvent[®] v3.1 inventory database for inputs and transport production chains were also considered.

3. Results and discussion

Cleaner Production and Life Cycle Assessment methods are useful to identify green supply chains of production and consumption. The combination of CP and LCA adopted in this study showed that the farmer can reduce the impacts of his agricultural production by applying better operational practices. A simultaneous application of CP and LCA supports decision making, based on technical, economic and environmental assessment, based on internationally recognized methodological principles that can be associated with environmental labeling. By means of an Environmental Product Declaration producers can communicate the environmental performance of their supply chains to consumers. This allows them to choose more environmental friendly products. In the environmental assessment here used, CP focuses on the production aspects, while LCA allows broader considerations that include upstream processes of the production chain.

The CP main focus is the continuous improvement of the process through opportunities to reduce waste generation allowing economic gains which can provide immediate returns. LCA focuses on the environmental diagnosis of products and permits a sensitivity analysis that seek for more eco-efficient scenarios. For this reason it has been used to support Environmental Product Declarations and strategic planning. Practices suggested using a CP approach can be enriched by more rigorous methods of evaluation of environmental impacts. As this work presents, LCA supports CP with a broader identification and quantification of the environmental effects of raw material consumption and pollutants emission. Thus, the combination of the two provides a broader and better-informed assessment. A combined application of CP and LCA methods is summarized in Table 1.

Table 1
Comparison of the main aspects of CP and LCA methods.

Aspects	CP	LCA	CP and LCA
Process qualitative diagnose	●	○	●
Process quantitative diagnose	●	●	●
Waste estimation	●	●	●
Improvement scenarios and mitigation strategies	●	○	●
Cost analysis	●	○	●
Environmental impact analysis	○	●	●
Environmental and economic benefits	●	○	●
Product function	○	●	●
Gate-to-gate coverage	●	●	●
Cradle-to-gate coverage	○	●	●
Emissions of substances into the environment	○	●	●
Environmental impacts associated with the production of inputs, transport and waste treatment	○	●	●
Environmental certifications and more sophisticated models for information systematization	○	●	●

CP is a practical method and involves an organization's human resources through a so called eco-team that, after developing an environmental diagnosis, identifies opportunities with technical and economic feasibility to reduce potential environmental impacts. As a result, CP is more effective than the LCA in terms of pointing out specific solutions for environmentally related problems of the organization. These solutions may involve the Triple Bottom Line framework - economic, social and environmental sustainability. Other life cycle methods such as Life Cycle Costing and Social Life Cycle Assessment have been used, together with the LCA, to make up the Life Cycle Sustainability Assessment. However, despite CP having a more limited scope compared to life cycle methods, its advantage is the practicality of implementation in the company, the elaboration of improvement scenarios and the generation of benefits prioritizing viable opportunities.

Moreover, CP and LCA combined promote process and product sustainability. A sustainable and resilient society is expected to have an effective control of environmental impacts to avoid overexploitation of resources and excess of pollution.

3.1. Preliminary evaluation of CP opportunities

The results of the study indicated the overuse of inputs in the base scenario due to low production efficiency, which could be improved through technological and behavioral changes on the part of the farmer. The existing production practices do not support an acceptable environmental performance.

According to United Nations Environment Programme (UNEP) ⁶, in the preliminary evaluation, one defines the criteria for selecting CP opportunities: implementation based on changes in operational practices and immediate return time without the initial need for financial investment. Application of CP in the studied farm identified opportunities for cost and environmental optimization that were proposed for the recommended scenario. These, mainly focused on pollution prevention practices and techniques (Fig. 4).

⁶ Document entitled Understanding Cleaner Production, undated. Available at: <<http://www.unep.fr/scp/cp/understanding/industries.htm>> (accessed 26.05.2017).

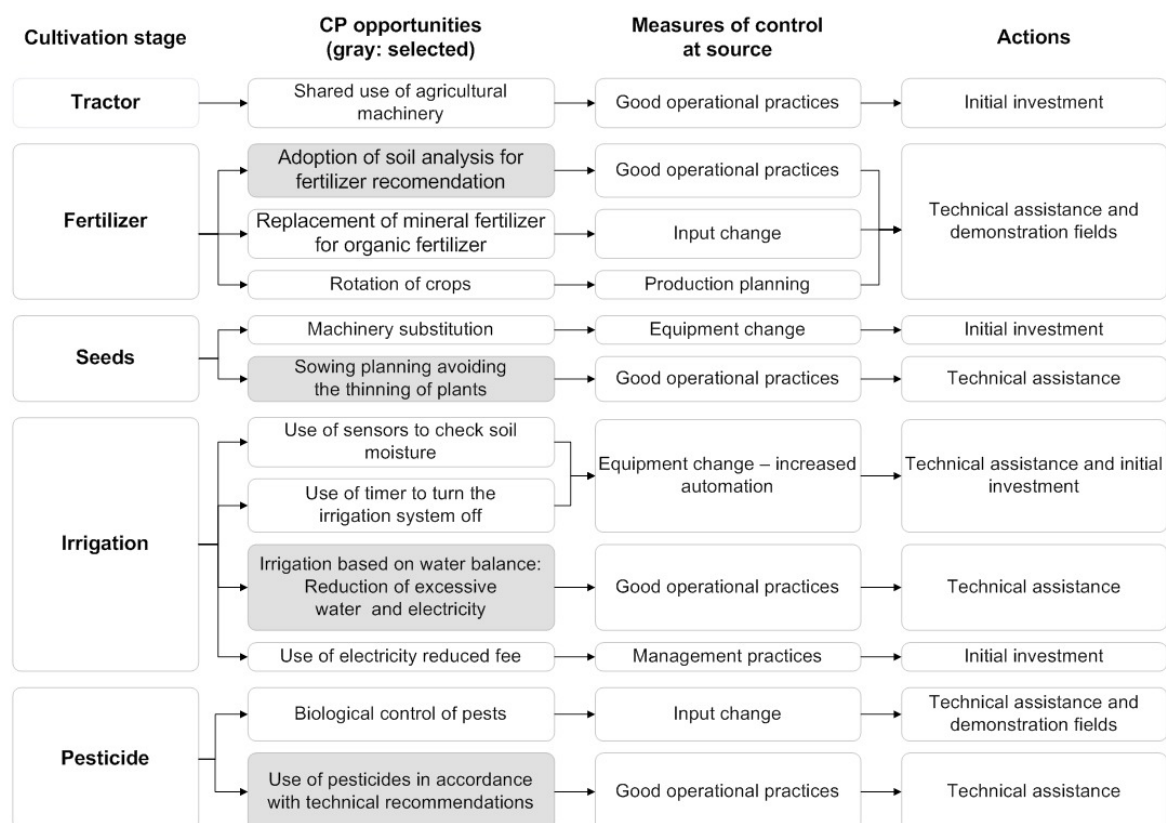


Fig. 4. Summary of cleaner production opportunities identified and selected for carrot cultivation.

Note: Measures of control at source according to LaGrega et al. (1994).

Next, a brief description of the identified CP opportunities is made, grouped according to the first column of Fig. 4. Further details on the economic feasibility and environmental impacts are described in the following section, only the selected opportunities, highlighted in Fig. 4.

3.1.1. Tractor

The study showed that the tractor and other machines used in the cultivation of carrots are mostly idle. The shared use of machinery, through associations and cooperatives, is an opportunity with economic and environmental benefits. However, it was not prioritized because it requires an initial investment.

3.1.2. Fertilizer

From the chemical soil analysis shown in Table A.5, it was found that the farm's soil has an almost alkaline pH, a high phosphorus content, lacking the presence of exchangeable aluminum and a low percentage of organic matter. The calcareous soils of the Irecê region presented by Nossa (2011) showed similar characteristics to those in this study. Based on the

soil analysis, we observed excessive fertilizer use in BS and recommended smaller amounts for RS with fewer environmental impacts. RS can avoid a loss of 49% of the fertilizer used in BS.

Recommendations included: Soil quality analysis in each of the production cycles, production planning, incorporation of organic matter into the soil with crop rotation using legumes and animal manure application. Application of these recommendations lead to the improvement of the soil quality and a significant reduction of environmental impacts. On the farm where the study was carried out, cattle and sheep are raised that produce manure that could be treated for use after a more detailed analysis. Food plants such as corn, beans, and vegetables are grown in the farm and could serve for a crop rotation. However, the owner of the farm does not understand these practices to be effective. These two opportunities were not selected because they require demonstration in the field, which was not the object of this study. On the other hand, the use of fertilizers based on soil analysis and other agronomic recommendation can be implemented with immediate return.

NPK commercial formulations have rapid release and absorption in the ionic form. The application of ammonia-based fertilizers acidifies the soil over the long-term. For Malavolta (1981), energy expenditure to produce these major nutrients is high. During each growing cycle lasting 90-120 days, there is much loss of nitrogen fertilizer that has quick release and overloading of phosphorus with a slow release.

The excessive use of nitrogen, phosphorus, and potassium found in this study and the use of C₃-S₁ and C₄-S₁⁷ groundwater increases the risk of soil salinization (Nossa, 2011). These results are in line with Jordan and Weller (1996) and Vitousek et al. (1997), who claim that the amount of nitrogen in the global biogeochemical cycle doubled through reactive nitrogen fixation due to the use of industrial fertilizers, burning of fossil fuels and increased use of legumes in agriculture. For Carpenter et al. (1998) and Caraco and Cole (1999), the most serious implications of these disturbances are climate change, eutrophication, acidification of aquatic and forest ecosystems, groundwater pollution and imbalances in the status of nutrients in the soil.

3.1.3. *Seeds*

Adopting a precision planter is a control measure that would reduce costs and wastes.

⁷ According to Richards (1954), these water are classified as follows:

C₃S₁ - high salinity and low sodium concentration; C₄S₁ - very high salinity and low sodium concentration. Both of them are not recommended for irrigation because they cause soil salinization.

However, changing this equipment requires a high initial investment and therefore was not here adopted. Moreover, changing the planter would not reduce diesel consumption because the tractor to which the planter is coupled would be the same. Sowing using the appropriate seed dosage, according to the technical recommendations, would reduce seed waste by an estimated 69% in this case study.

3.1.4. Irrigation

The production of 1 kg of carrots using irrigation will reduce the amount of seeds from 0.22 g in the BS to 0.07 g in the RS. The water index in the region is -25.84 , with an average annual rainfall of 653 mm, which represents 57% of potential evapotranspiration of 1147 mm per year. A water deficit is observed in every month of the year in the area of study. Because the Irecê region has low rainfall with an uneven distribution, water is a valuable resource. The exploitation of groundwater in the region requires control measures for resource preservation. The inventory shows a loss of 32% of the water used for irrigation in BS compared to the RS, mainly due to the lack of knowledge of the water demand of the soil, lack of enforcement of water use, and the low cost of electricity for the producer. The reduction in water consumption for the RS system requires operational practices such as reduced daily irrigation periods, analysis of the quality of the water used for irrigation, use of a tensiometer to monitor soil moisture, and the use of a timer device to turn off the irrigation system. In the long term, the farmer and the community should preserve local water sources using such practices. However, these measures require equipment change and initial investment. Only the water balance in the soil was estimated as an opportunity to irrigate only the amount of water required. In future work, it is recommended to compare irrigation systems for carrot cultivation, where other opportunities for reducing water consumption may be identified.

Electricity has varying tariffs, according to the Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL, 2017) depending on the time of day it is used. The “green tariff” is aimed to consumer units with irrigation and guarantees discounts of 60-90% on rural electricity tariff at times between 21:30 and 06:00. Membership of the “green tariff” requires an investment of 1100 USD for system deployment and no additional operating costs. The payback of this opportunity is not long, but we did not select it because it requires initial investment, albeit low.

The high consumption of irrigation water along with fertilizer and the use of

pesticides is a problem that requires changes to the BS. Besides the natural factors of soil salinization, observed by Akramkhanov et al. (2011), land irrigation affects groundwater quality (Bouaziz et al., 2011). Nossa (2011) obtained average values of 77.90 mg L⁻¹ and 0.17 mg L⁻¹ for nitrite and nitrate in groundwater, respectively; these values are above the maximum allowable values for human consumption according to Decree 518/2004 of the Ministry of Health and Resolution 396/2008 of the Environmental National Council (CONAMA).

3.1.5. Pesticide use

The control of the main pests of carrot such as *Agrotis ipsilon*, *Spodoptera frugiperda*, *Diabrotica speciosa*, *Epicauta atomaria*, *Aphis gossypii*, *Cavariella aegopodii*, and *Myzus persicae* requires adequate irrigation management, adequate soil preparation, and use of good quality seeds with integrated pest control (Guimarães et al., 2012). Damage caused by nematodes are minimized by crop rotation and cleaning of the equipment used in the cultivation (Reifschneider, 1984). The adoption of biological control reduces the consumption of pesticides, reduces soil and water pollution, avoids the contamination of farm workers and consumers, reduces the loss of biodiversity, and minimizes the mutation and resistance to pests and diseases. We observed that the producers were not interested in applying the technical recommendations and questioned the effectiveness of biological control of pests and diseases and organic fertilization. The adoption of biological control requires demonstration in the field.

The opportunity to reduce the use of pesticides was selected based on the manufacturers' technical recommendations. The adoption of RS would avoid 11% loss of pesticides in BS. In addition, the number of pesticides applied to carrot crop could be reduced if MAPA (2016) had a broader coverage of pesticide recommendations.

3.2. Economic evaluation and environmental impact

3.2.1. Financial viability

The economic benefit (Table 2) estimated in this study was 2127.17 USD (ha year)⁻¹, which represents a 49% reduction in the cost of inputs (BS), not including the water wastage because it comes from the well and is not purchased. Seeds represent the largest source of economic benefit for RS compared to BS, estimated at 973.69 USD (ha year)⁻¹ or 45.77% of the total benefits. Fertilizers represent 942.17 USD (ha year)⁻¹ or 44.29% of total benefits,

while electricity represents 122.87 USD (ha year)⁻¹ or 5.78%, and pesticides represent 88.42 USD (ha year)⁻¹ or 4.16%.

Table 2

Summary of the economic feasibility and environmental evaluation of recommended CP opportunities (RS).

CP selected opportunities	Unit	Environmental benefit	Economic benefit (USD) (ha year) ⁻¹	Estimated investment costs (USD) (ha year) ⁻¹	Payback period (year)
Adoption of soil analysis for fertilizer estimation	kg (ha year) ⁻¹	1,828.85	942.18	0	Immediate
Sowing planning avoiding the thinning of plants	kg (ha year) ⁻¹	16.65	973.69	0	Immediate
Irrigation based on water balance					
<i>Reduction in excessive water</i>	m ³ (ha year) ⁻¹	6080.06	-	0	Immediate
<i>Reduction in excessive electricity</i>	kWh (ha year) ⁻¹	1228.77	122.87	0	Immediate
Use of pesticides following the technical recommendations	kg (ha year) ⁻¹	2.40	88.42	0	Immediate
Total			2,354.03	0	

The use of fewer seeds in the RS led to a 22% reduction in total carrot costs of inputs compared to the BS system. The water used for irrigation comes from groundwater without cost, so the difference between BS and RS due to operating practices only impacts the cost of electricity. *Afalon* herbicide and *Amistar Top* fungicide had recommendations for smaller amounts in the cultivation of carrots and the costs were consequently lowered while the costs of unregistered pesticides for carrot cultivation were kept the same. The gross revenue from the sale of the product was 19,441.23 USD (ha year)⁻¹ for BS or RS. Selected CP (RS) options do not differ from BS in employee costs, fees, and administration.

The smaller use of fertilizers in the RS reduced total carrot costs of inputs by 21% compared to BS. Phosphorus is the most wasted nutrient at 841.90 kg (ha year)⁻¹, followed by potassium 206.22 kg (ha year)⁻¹ and nitrogen 114.40 kg (ha year)⁻¹.

3.2.2. Inventory

Table 3 shows the raw data of the mass inventory and energy use up to the harvest of carrots in the field for BS and RS production systems. The data are primary and were collected at the farm in the Irecê region where the study was conducted. The BS and RS production systems used the same tractor operations and consumed the same amount of diesel.

Table 3

Gate-to-gate inventory of 1 kg of carrot production.

Flows	Unit	Base scenario (BS)	Recommended scenario (RS)	Squared geometric standard deviation (GSD ²)	Source
Input					
Heat, diesel	MJ	1.16E-01	1.16E-01	1.05	Collected
Nitrogen fertilizer, as N	kg	3.29E-03	2.26E-03	1.05	Collected
Phosphate fertilizer, as P ₂ O ₅	kg	1.09E-02	3.32E-03	1.05	Collected
Potassium fertilizer, as K ₂ O	kg	5.15E-03	3.29E-03	1.05	Collected
Inert filler of fertilizer	kg	1.46E-02	8.57E-03	1.05	Collected
Carrot seed	kg	2.18E-04	6.76E-05	1.05	Collected
Electricity, low voltage, Brazilian grid	kWh	3.44E-02	2.34E-02	1.50	Collected
Water, in ground	kg	1.70E-01	1.16E-01	1.05	Collected
Pesticide, mancozeb	kg	3.46E-05	3.46E-05	1.05	Collected
Pesticide, benzimidazole compound	kg	3.42E-06	2.07E-06	1.05	Collected
Pesticide, unspecified	kg	4.06E-05	3.36E-05	1.05	Collected
Occupation, annual crop, irrigated, intensive	m ² . year	9.01E-02	9.01E-02	1.20	Collected
Output					
Ammonia, air	kg	1.58E-04	1.10E-04	1.21	Calculated
Dinitrogen monoxide, air	kg	1.16E-04	7.74E-05	1.42	Calculated
Nitrogen oxides, air	kg	2.45E-05	1.50E-05	1.42	Calculated
Water, air	kg	3.41E-02	2.31E-02	1.24	Calculated
Phosphorus, river	kg	8.59E-05	8.26E-05	1.52	Calculated
Cadmium, river	kg	2.57E-08	2.56E-08	1.80	Calculated
Chromium, river	kg	2.01E-06	2.01E-06	1.80	Calculated
Lead, river	kg	2.07E-06	2.04E-06	1.80	Calculated
Mercury, river	kg	6.40E-09	6.30E-09	1.80	Calculated
Nitrate, ground water	kg	2.38E-02	1.29E-02	1.51	Calculated
Phosphorus, ground water	kg	6.31E-07	6.31E-07	1.52	Calculated
Water, ground water	kg	1.36E-01	9.25E-02	1.05	Calculated
Cadmium, ground water	kg	4.50E-10	4.49E-10	1.80	Calculated
Chromium, ground water	kg	1.91E-07	1.91E-07	1.80	Calculated
Lead, ground water	kg	5.37E-09	5.29E-09	1.80	Calculated
Mercury, ground water	kg	1.16E-11	1.14E-11	1.80	Calculated
Arsenic, soil	kg	2.30E-06	7.72E-07	1.52	Calculated
Cadmium, soil	kg	4.57E-06	1.52E-06	1.52	Calculated
Chromium, soil	kg	4.37E-05	1.32E-05	1.52	Calculated
Lead, soil	kg	2.09E-05	5.72E-06	1.52	Calculated
Mercury, soil	kg	5.05E-08	1.26E-08	1.52	Calculated
Azoxystrobin, soil	kg	5.41E-06	3.24E-06	1.51	Calculated
Difenoconazole, soil	kg	3.42E-06	2.07E-06	1.51	Calculated
Lambda-cyhalothrin, soil	kg	3.47E-06	3.47E-06	1.51	Calculated
Linuron, soil	kg	2.43E-05	1.95E-05	1.51	Calculated
Mancozeb, soil	kg	3.46E-05	3.46E-05	1.51	Calculated

Flows	Unit	Base scenario (BS)	Recommended scenario (RS)	Squared geometric standard deviation (GSD ²)	Source
Metalaxyl-M, soil	kg	2.16E-06	2.16E-06	1.51	Calculated
Methomyl, soil	kg	4.32E-06	4.32E-06	1.51	Calculated
Thiamethoxam, soil	kg	9.91E-07	9.91E-07	1.51	Calculated

During each production cycle, three fertilizations were applied to the study area as follows: NPK⁸ 10-50-00 for the foundation, NPK 20-00-20 for the first cover and NPK 00-00-60 for the second cover. The BS production system used 1828.85 kg (ha year)⁻¹ more fertilizer per hectare year than RS.

In the BS production system, thinning was done after germination to remove the excess carrot plants. The use of a precision planter in RS eliminated the need for thinning. The planter is coupled to the tractor and displaces only the amount of seeds required for the crop.

The use of electricity is associated with the consumption of water for irrigation. The BS production system loses 1228 kWh (ha year)⁻¹ of electricity from water pumping compared to RS. The BS production system loses 6080 m³ (ha year)⁻¹ due to the lack of knowledge of soil water demand compared to RS. The BS production system uses 0.93 kg (ha year)⁻¹ more active ingredients in pesticides than RS. Note that in the MAPA (2016), only azoxystrobin, difenoconazole, and linuron are registered for growing carrots.

The emissions from the BS production system were higher than the RS due to larger amounts of fertilizers and pesticides applied in the field. On the other hand, chromium emissions to the river and to groundwater (both derived from mineral fertilizers) and lambda-cyhalothrin, mancozeb, metalaxyl-M, methomyl, and thiamethoxam emissions to the soil (derived from active ingredients of pesticides) were kept the same. The BS production system had the same manual RS harvesting process and the productivity was the same for BS and RS.

3.2.3. Life cycle impact assessment

Fig. 5 shows the environmental impacts of BS and RS production system. The BS production system is more striking than the RS in all the environmental categories evaluated (Fig. 5). The data of Fig. A.1 show that there was a significant difference between BS and RS

⁸ Mixing or fertilizer formula is expressed in percentage of nitrogen, phosphorus, and potassium, representing, respectively, the minimum guaranteed formulas total nitrogen (expressed as N), soluble phosphorus (expressed as P₂O₅) and soluble potassium (expressed as K₂O).

for the following categories: global warming (GW), particulate matter (PM), acidification (AC) and terrestrial eutrophication (EU-t). In relation to the other categories, there was no significant difference between BS and RS (Fig. A.1).

Therefore, RS presented greater environmental benefits compared to BS, and better environmental performance based on the potential environmental impacts analyzed. Field emissions stood out in the categories non-cancer effects (HT-n), cancer effects (HT-c), terrestrial eutrophication (EU-t), freshwater eutrophication (EU-f), marine eutrophication (EU-m), freshwater ecotoxicity (EF-t) and land use (LU). The production of fertilizers stood out at global warming, ozone depletion (OD), particulate matter, ionizing radiation to humans (IR-h), ionizing radiation to ecosystem (IR-e), photochemical ozone formation (PO), acidification, water resource depletion (WD) and mineral, fossil and renewable resource depletion (RD) categories. The low impact observed for the carrot production in water resource depletion in field is attributed to increased water infiltration and thus less evaporation. Other production inputs such as pesticides, seeds, electricity and tractor diesel had little representativeness in the assessed impact categories of BS and RS.

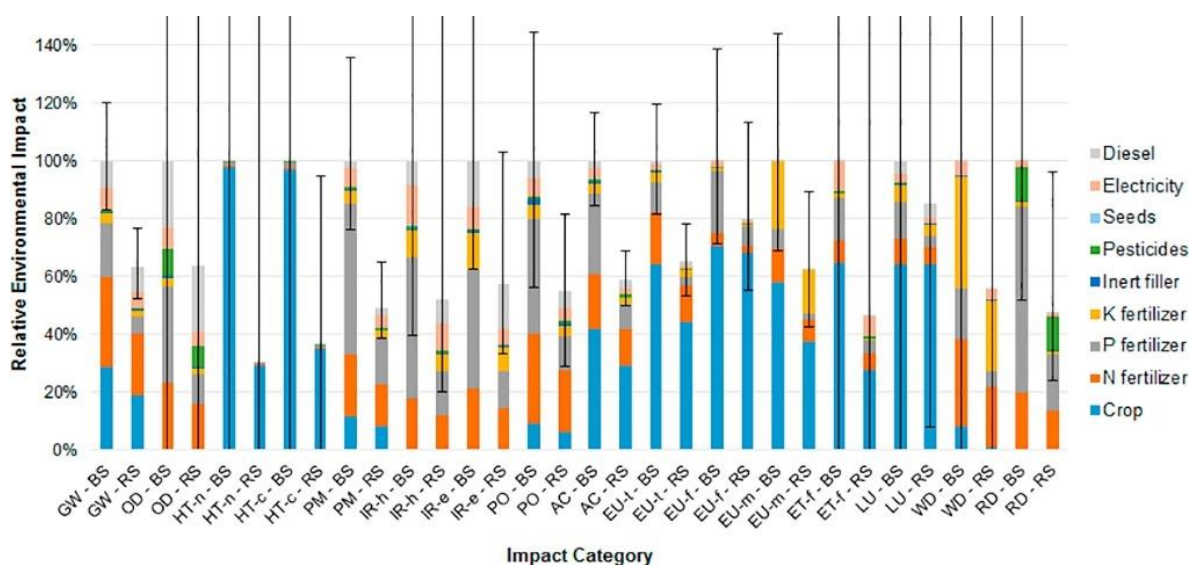


Fig. 5. Comparison of the environmental impact contributions of BS and RS carrot production including background and foreground parameter uncertainties, cradle-to-gate. Acronyms: global warming (GW), ozone depletion (OD), human toxicity, non-cancer effects (HT-n), human toxicity, cancer effects (HT-c), particulate matter (PM), ionizing radiation to humans (IR-h), ionizing radiation to ecosystem (IR-e), photochemical ozone formation (PO), acidification (AC), terrestrial eutrophication (EU-t), freshwater eutrophication (EU-f), marine eutrophication (EU-m), freshwater ecotoxicity (ET-f), land use (LU), water resource depletion (WD), mineral, fossil and renewable resource depletion (RD).⁹

⁹ O método utilizado nesta análise de erro aumentou a incerteza, uma vez que a incerteza de processos em comum aos dois processos (ex: produção de energia) é contabilizada duas vezes e em separado. O correto seria utilizar a análise de erro comparativa no Simapro que contabiliza o percentual de vezes em que o impacto do processo A é maior que o do processo B. Se maior que 95%, a diferença entre processo e é considerada significativa. Essa figura compõe o extrato de um artigo

The black bars show the uncertainty with 95% confidence interval and the absolute results are presented in Tables A.6 and A.7. The parameter uncertainty of LCI database increases the total uncertainty of the LCIA results significantly (Fig. A.2), then the upper limit of OD, HT-n, HT-c, IR-h, IR-e, ET-f, LU, WD, RD categories are not completely visible in Fig. 5. If no uncertainty of upstream processes from LCI database were considered, the discernibility of environmental impacts of BS would be even higher than RS (Fig. A.3).

Table 4 presents carrot GW available in literature. This category was chosen because it is a global impact category. Out of twenty impacts on GW of carrots presented in Table 4, the organic carrot cultivated in Finland had the lowest impact. In the production of Finnish organic carrots, cattle manure and leguminous plants serve as a source of nitrogen, which generates silage as a co-product and contributes to the storage of carbon in the soil (Raghu, 2014). If no carbon sequestration were considered, the Finnish organic carrot would have more impact than the conventional one.

According to LCA food Denmark (2006), the Danish organic carrot had a larger impact than conventional carrot cultivation as there is no product avoided or carbon sequestration. The Brazilian carrot produced in the Irecê region improved the global warming impact from twelfth (BS) to seventh (RS) lowest impact. This means that other actions should be implemented in order to keep lowering the GW of Brazilian carrot.

Table 4
Comparison of carrot global warming from cradle-to-gate of the farm.

Source	kg CO ₂ eq/kg product	Country
LCA food Denmark (2006)		
Conventional	0.058	Denmark
Organic	0.110	Denmark
Ecoinvent [®] 3.2 (Stoessel et al., 2012)		
Carrot 335	0.348	Global
Paris	0.067	Global
Röös and Karlsson (2013)		
Conventional ^a	0.110	Sweden
Conventional ^a	0.230	Sweden from Netherlands
Conventional ^a	0.310	Sweden from Italy
Raghu (2014)		
Organic ^{a,b}	0.004	Finland
Conventional ^{a,b}	0.142	Finland
Conventional, imported ^{a,b}	0.280	Finland from Italy
Agri-footprint (2015)		
Conventional	0.091	Netherlands
Conventional	0.068	Belgium
Agribalyse [®] (Koch and Salou, 2015)		
Conventional	0.067	France

publicado, e, para manter a fidedignidade à publicação reproduzida aqui na íntegra, optou-se por manter como fora publicado. No entanto, a análise de erro comparativa do Simapro foi apresentada no apêndice – Figs. A.1. e A.3.

Source	kg CO ₂ eq/kg product	Country
Organic	0.060	France
World Food (Nemecek et al., 2015)		
Conventional	0.171	China
Conventional	0.155	Israel
Conventional	0.092	Netherlands
Conventional	0.186	Rest of World
This study		
Conventional	0.119	Brazil (BS)
Conventional with CP	0.071	Brazil (RS)

^aThese product life cycles covered from cradle-to-gate of the market.

^bThese product life cycles included packaging.

Source: IPCC (2007) 100 years impact method.

In the absence of carrot LCA studies in Brazil, we compared the results with other Brazilian agriculture products from the semi-arid region. In the BS system, water is consumed at a rate of 170 L (kg year)⁻¹. This is close to the 198 L of water to produce and export 1 kg of melon in the Brazilian semi-arid region (Figueirêdo et al., 2014). The adoption of the control measures suggested for water leads to a reduction in electricity consumption, resulting in environmental and economic gains for the farmer. For other crops such as peanuts, 90% of the impact on water resource depletion occurs in the field (Ridoutt and Pfister, 2010), unlike in the case of BS and RS.

The global warming of BS and RS (Table 4) were 0.12 and 0.07 kg CO₂-eq kg⁻¹ of the product, respectively. As in Figueirêdo et al. (2016), the best way to improve the environmental performance of irrigated carrot production in the Brazilian semi-arid region is to adjust the BS by modifying the fertilization. The production and use of fertilizers and pesticides are responsible for the largest impacts of BS. As noted by Figueirêdo et al. (2016), further improvements in green manuring and efficiency of fertilization contribute to minimizing nutrient loss.

4. Conclusions

The study showed that application of CP strategies can give significant contribution to the reduction of environmental impacts in carrot production in the conditions observed in Irecê region, karstic area in northeastern semi-arid Brazil. Reduction in the environmental categories considered in this LCA work was between 15% and 70%. It was estimated that the recommended scenario is capable of reducing greenhouse gas emissions from 0.12 kg to 0.07 kg CO₂ eq/kg of carrot produced with the implementation of simple CP options, at low or no cost, with only operational changes. However, other CP measures that present environmental and economic gains need to be better analyzed as they involve medium and long term investments. The CP selected opportunities could lead to a 49% reduction in the total cost of inputs and the costs of implementing these measures could be recovered in only one production cycle. It can be considered that further opportunities, involving higher investment costs, may give significant contributions to achieve better economic and environmental results.

The carrot is a perishable product with high price volatility therefore the proposed solutions should ensure an improvement in productivity. The study results demonstrate the low economic and environmental efficiency of the production of carrots, as practiced today in studied farm, resulting in economic losses and a strong pressure on natural resources. However, CP and LCA tools can help the environmental management and cost reduction in agricultural production and support a bio-economy aimed at accelerating the transition towards equitable, sustainable, post fossil-carbon societies. For future work, we recommend the use of regionalized background data, as well as impact assessment models to reduce uncertainty in the results of environmental impact and facilitate decision making.

Acknowledgements

The authors thank the Higher Education Personnel Improvement Coordination (CAPES), National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), Pre Consultants and ecoinvent[®] on behalf of ACVBrasil. We also thank the farm families who have shared their data, and the peer reviewers for their constructive comments and feedback on the manuscript.

References

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [National Electric Energy Agency], 2017. Tarifas consumidores [Consumer rates]. Available at: <http://www.aneel.gov.br/tarifas-consumidores/-/asset_publisher/zNaRBjCLDgbE/content/descontos/654800?inheritRedirect=false> (accessed 14.06.16).
- Agri-footprint, 2015. Part 2: Description of data. Second edition. Blonk Agri Footprint BV, Gouda.
- Akramkhanov, A., Martius, C., Park, S.J., Hendrickx, J.M.H., 2011. Environmental factors of spatial distribution of soil salinity on flat irrigated terrain. *Geoderma* 163, 55–62. doi:10.1016/j.geoderma.2011.04.001
- Bouaziz, M., Matschullat, J., Gloaguen, R., 2011. Improved remote sensing detection of soil salinity from a semi-arid climate in Northeast Brazil. *Comptes Rendus Geosci.* 343, 795–803. doi:10.1016/j.crte.2011.09.003
- Caraco, N.F, Cole. J.J., 1999. Human impact on nitrate export: an analysis using major world rivers. *Ambio*, 28 pp. 167–170.
- Carpenter S.R, Caraco N.F, Correll D.L, Howarth R.W, Sharpley A.N, Smith V.H., 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*. 8, 559–568.
- Cellura, M., Ardente, F., Longo, S., 2012. From the LCA of food products to the environmental assessment of protected crops districts: A case-study in the south of Italy. *J. Environ. Manage.* 93, 194–208. doi:10.1016/j.jenvman.2011.08.019
- Downie, A., Lau, D., Cowie, A., Munroe, P., 2014. Approaches to greenhouse gas accounting methods for biomass carbon. *Biomass and Bioenergy* 60, 18–31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.009>
- Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2016. Available at: <<http://www.esri.com/>> (accessed 15.01.16).
- European Commission (EC) Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) - General guide for life cycle assessment - Detailed guidance. Luxembourg.
- European Commission (EC) Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2012. Characterisation factors of the ILCD recommended life cycle impact assessment methods. Luxembourg.
- Figueirêdo, M.C.B., Boer, I.J.M., Kroeze, C., Barros, V.D.S., Sousa, J.A., Aragão, F.A.S., Gondim, R.S., Potting, J., 2014. Reducing the impact of irrigated crops on freshwater availability: The case of Brazilian yellow melons. *Int. J. Life Cycle Assess.* 19, 437–

448. doi:10.1007/s11367-013-0630-0

- Figueirêdo, M.C.B, Potting, J., Serrano, L.A.L., Bezerra, M.A., Barros, V.S., Gondim, R.S., Nemecek, T., 2016. Environmental assessment of tropical perennial crops: the case of the Brazilian cashew. *J. Clean. Prod.* 112, 131-140. doi:10.1016/j.jclepro.2015.05.134
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2014. Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks. 1990-2011 Analysis. Rome, Italy.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2015. Global forest resources assessment 2015 – Country report. Brazil. Available at: <<http://www.fao.org/documents/card/en/c/6261857f-c0da-4f72-98fd-a18e9ca50509/>> (accessed 21.04.17).
- Ford, D.C.; Williams, P.W. Karst geomorphology and hidrology. London, England, Unwin Hyman, 1989. 601p.
- Freitas, FC. L., Almeida, M.E.L., Negreiros, M.Z., Honorato, A.R.F., Mesquita, H.C., Silva, S.V.O.F., 2009. Períodos de interferência de plantas daninhas na cultura da cenoura em função do espaçamento entre fileiras [Periods of weed interference in carrot in function of spacing between rows]. *Planta Daninha*. v. 27, n. 3, 473-480. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582009000300007>
- Goedkoop M, Oele M, Leijting J, Ponsioen T, Meijer, 2016. Introduction to LCA with SimaPro. PRé, Amersfoort.
- Guimarães, J. A., Michereff Filho, M., Moura, A.L., Carvalho, A. D. F, 2012. Reconhecimento e manejo das principais pragas da cenoura [Recognition and management of the main pests of the carrot], Brasília, Distrito Federal.
- Ingrao, C., Matarazzo, A., Tricase, C., Clasadonte, M.T., Huisinigh, D., 2015. Life Cycle Assessment for highlighting environmental hotspots in Sicilian peach production systems. *J. Clean. Prod.* 92, 109–120. doi:10.1016/j.jclepro.2014.12.053
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [Brazilian Institute of Geography and Statistics], 2006. Censo agropecuário. Available at: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/protabl.asp?c=818&z=t&o=19&i=P>> (accessed 14.06.16).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, first edition. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- International Organization for Standardization (ISO), 2006. ISO 14044: Environmental managements - life cycle assessments - requirements and guidelines. International Organization for Standardization. Geneva.
- Heijungs, R., Kleijn, R., 2001. Numerical approaches towards life cycle interpretation five examples. *Int. J. Life Cycle Assess.* 6, 141-148. doi:10.1007/BF02978732
- Jordan, T.E., Weller, D.E., 1996. Human contributions to terrestrial nitrogen flux. *BioScience*, 46.
- Koch, P., Salou, T., 2015. Agribalyse[®]: Rapport Méthodologique, first ed. ADEME, France.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, 259-263. doi:10.1127/0941-2948/2006/0130
- LaGrega, M.D., Buckingham, P.L., Evans, J.C., 1994. Pollution prevention. In: *Hazardous Waste Management*, McGraw Hill Inc, Singapore City. 1146 pp.
- LCA food Denmark, 2006. LCA Food Database. Available at: <www.lcafood.dk> (accessed 22.01.17).
- Leal, L.R.B., Silva, H.P., 2004. Modelização da dinâmica hidrológica e instrumentos para a gestão do sistema aquífero rio das bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré – região semi-árida do estado da Bahia [Modeling of the hydrological dynamics and instruments for the management of the aquifer system of the hydrographic basins of the Verde and Jacaré rivers - semi-arid region of the state of Bahia], Salvador, Bahia.
- Lima Junior, J.A., Pereira, G.M., Geisenhoff, L.O., Silva, W.G., Souza, R.O.R.M.E., Vilas Boas, R.C., 2014. Economic viability of a drip irrigation system on carrot crop. *Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*. 57, 15-21. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2013.060>
- Maia, P.H.P., Dias Neto, B. Corrêa-Gomes, L.C, 2010. Análise geológica e estrutural das fissuras e subsidências no carste de Lapão [Geological and structural analysis of fissures and subsidence in the karst of Lapão], São Luís, MA. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. São Luís, Maranhão.
- Malavolta, E., 1981. Manual de química agrícola – adubos e adubação [Manual of agricultural chemistry - Fertilizers and fertilizing]. São Paulo.
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) [Ministry of Agriculture, Livestock and Supply], 2016. AGROFIT. Available at: <<http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit>> (accessed 14.06.16).
- Moreno-Ruiz, E., Lérová, T., Bourgault, G., Wernet, G., 2014. Documentation of changes implemented in ecoinvent[®] Data 3.1. Ecoinvent[®] Centre, Zurich.

- Moreno-Ruiz, E., Weidema, B.P., Bauer, C., Nemecek, T., Vadenbo, C.O., Treyer, K., Wernet, G., 2013. Documentation of changes implemented in ecoinvent[®] Data 3.0. The Ecoinvent[®] Centre, St. Gallen.
- Nemecek, T., Bengoa, X., Lansche, J., MOURON, P., Riedener, E., Rossi, V., Humbert, S. 2015. Methodological guidelines for the life cycle inventory of agricultural products, third edition. Quantis and Agroscope, Lausanne and Zurich.
- Nemecek, T., Schnetzer, J., 2012. Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems Data v3.0. Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART.
- Nossa, T.C.B., 2011. Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre - Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP [Evaluation of the vulnerability of the karst aquifer Salitre, Bahia state, through hydrochemical, isotopic and COP methodology] (Unpublished doctoral thesis). Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brazil.
- Oita, A., Malik, A., Kanemoto, K., Geschke, A., Nishijima, S., Lenzen, M., 2016. Substantial nitrogen pollution embedded in international trade. *Nature geoscience* (9)111-115. doi:10.1038/ngeo2635
- Perrin, A., Basset-Mens, C., Gabrielle, B., 2014. Life cycle assessment of vegetable products: A review focusing on cropping systems diversity and the estimation of field emissions. *Int. J. Life Cycle Assess.* 19, 1247–1263. doi:10.1007/s11367-014-0724-3
- Pinheiro, J.B., Carvalho, A.D.F., Vleira, J.V., 2010. Manejo do nematoide das galhas (*Meloidogyne spp.*) em cultivos de cenoura na região de Irecê - BA [Management of the nematode of the plant branches (*Meloidogyne spp.*) In carrot crops in the region of Irecê, Bahia state], Brasília, Distrito Federal.
- Raghu, K.C., 2014. Comparative life cycle assessment of organic and conventional carrots - case: Carrots from south-savo and imported carrots from Italy. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/rg.2.1.2109.0726>
- Rahim, R., Raman, A.A.A., 2015. Cleaner production implementation in a fruit juice production plant. *J. Clean. Prod.* 101, 215–221. doi:10.1016/j.jclepro.2015.03.065
- Reifschneider, F.J.B., 1984. Doenças fúngicas e bacterianas da cenoura-sintomatologia e controle [Fungal and bacterial diseases of carrot-symptomatology and control], Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington, DC.
- Ridoutt, B.G., Pfister, S., 2010. A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. *Glob. Environ. Chang.* 20, 113–120.
- Röös, E., Karlsson, H., 2013. Effect of eating seasonal on the carbon footprint of Swedish

- vegetable consumption. *J. Clean. Prod.* 59, 63-72.
- Silva, T.A., Forbes, S.L., 2016. Sustainability in the New Zealand horticulture industry. *J. Clean. Prod.* 112, 2381–2391. doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.078
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., Smith, J., 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture, *Philosophical Transactions of the Royal Society B.* 363. doi: 10.1098/rstb.2007.2184
- Soode, E., Lampert, P., Weber-Blaschke, G., Richter, K., 2015. Carbon footprints of the horticultural products strawberries, asparagus, roses and orchids in Germany. *J. Clean. Prod.* 87, 168–179. doi:10.1016/j.jclepro.2014.09.035
- Stoessel, F., Juraske, R., Pfister, S., Hellweg, S., 2012. Life cycle inventory and carbon and water food print of fruits and vegetables: Application to a Swiss retailer. *Environ. Sci. Technol.* 46, 3253–3262. doi:10.1021/es2030577
- Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., 1955. *The water balance*. Centerton, NJ.
- United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), 2002. *Manual on the development of cleaner production policies - Approaches and instruments*. Vienna, Austria.
- Van Dijk, A., den Haan, P., van den Hoven, R. Bos., 1999. Can WARMAP save the Aral Sea? *Land Water International*, 93 (2).
- Vigon, B.W., Tolle, D.A., Cornaby, B.W., Latham, H.C., Harrison, C.L., Boguski, T.L., Hunt, R.G., Sellers, J.D. , 1993. *Life Cycle Assessment: Inventory guidelines and principles*, EPA, Cincinnati, Ohio.
- Vitousek, P.M., Aber, J.D., Howarth, R.D., Likens, G.E., Matson, P.A., Schidler, D.W., 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 7 (3).
- Weidema, B., Wesnaes, M., 1996. Data quality management for life cycle inventories - An example of using data quality indicators. *Journal of Cleaner Production.* 4, 167-174.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent[®] database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1–13.
- West, Paul C., Gerber, J.S., Engstrom, P.M., Mueller, N.D., Brauman, Kate A., Carlson, K. M., Cassidy, E.S., Johnston, M., MacDonald, G.K., Ray, D.K., Siebert, S., 2014. Leverage points for improving global food security and the environment. *Science.* 345(6194), 325–328. doi:10.1126/science.1246067

Appendix A

Table A.1.

Estimated water consumption for irrigation.

The water demand required by the RS production system was based on technical factors and indications for simplified management of carrot irrigation. Temperature data and Irece precipitation from the Institute of Environment and Water Resources (INEMA, 2014) were used to calculate the reference evapotranspiration (ET_o [mm/ month]) using the Blaney-Criddle method (Eq. 1)).

$$ET_o = ((0.46 * T) + 8.13) * P \quad (\text{Eq. 1})$$

where T is the average temperature and P is the mean daily percentage of annual daytime hours.

The calculation of crop evapotranspiration (ET_c [mm/month]) used the ET_o and the crop coefficient (K_c) (Eq. 2) (Marouelli et al., 2007c), each cultivation stage (Table A.1.1).

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (\text{Eq. 2})$$

The real amount of water necessary (LRN [mm]) needed for irrigation was calculated using Eq. 3. The irrigation interval (IR [days]) was calculated based on K_c , soil texture and depth of the roots (Marouelli et al., 2001b, 2007c).

$$LRN = ET_c * IR \quad (\text{Eq. 3})$$

A 65% efficiency (E_i) was adopted for the calculation of the total water required for irrigation blade (LTN [mm]) (Eq. 4) (Marouelli et al., 2007c). The requested leaching fraction (LR) depends on the electrical conductivity of water (Marouelli et al., 2007c). Unaware of the electrical conductivity of the water used LR was disregarded.

$$LTN = 100 * LRN / (E_i * (1 - LR)) \quad (\text{Eq. 4})$$

Irrigation time (T_i [i]) was calculated based on the intensity LTN and water application intensity (I_a [mm/h]) (Eq. 5). The I_a was calculated based on the flow of issuers and their spacing. The calculation of T_i considered the duration of each growth phase of the carrot, Table A.1.2 (Marouelli et al., 2007).

$$T_i = 60 * LTN / I_a \quad (\text{Eq. 5})$$

The water index (*IH*) for the town of Irecê was calculated according to the method of Thornthwaite and Mather (1955) where *EXC* is the water surplus and *DEF* is the water deficit (Eq. 6).

$$IH = \frac{100 * EXC - 60 * DEF}{ETP} \quad (\text{Eq. 6})$$

Table A.1.1.

Crop coefficient (Kc) for the different development stages of carrots, cultivated under sprinkler irrigation system.

Stage	Kc	Length of each stage (days)
Initial	0.95–1.05	25-35
Vegetative	0.95–1.05	20-25
Root thickening	1.05–1.15	25-35
Finalization	0.95–1.10	15-25

Source: Marouelli et al. (2007c, 1996a).

Table A.1.2.

Total irrigation time registered and total irrigation time required by season, according to the calculations provided by Embrapa (2014).

Operation	Irrigation time by season (h)					
	Current practice base scenario			Embrapa's Recommendation		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
Pre-sowing irrigation	5	5	5	0.44-0.48	0.39-0.43	0.40-0.44
Irrigation – germination	30	30	30	0.88-0.97	0.78-0.86	0.80-0.88
Irrigation – growth	160	160	160	15.73-17.23	14.03-15.37	7.50-17.60
Irrigation – finalization	120	120	120	9.42-10.91	11.55-10.70	10.68-12.37

References

- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) [Brazilian Agricultural Research Enterprise], 2014. Sistema de produção. Available at: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Cenoura/Cenoura_Daucus_Carota/irrigacao.html> (accessed 25.06.14).
- Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA) [Institute of Environment and Water Resources], 2014. Available at: <<http://www.inema.ba.gov.br/>> (accessed 08.06.14).
- Marouelli, W.A., Silva, W.L.C., Silva, H.R., 1996a. Manejo da irrigação em hortaliças [Management of irrigation in vegetables]. 5. ed. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI: EMBRAPA-CNPq, 1996. 72p.
- Marouelli, W.A., Silva, W.L.C., Silva, H.R., 2001b. Irrigação por aspersão em hortaliças: qualidade da água, aspectos do sistema e método prático de manejo [Sprinkler irrigation in vegetables: water quality, system aspects, and practical management method]. Brasília, Distrito Federal.
- Marouelli, W.A., Oliveira, R.A., Silva, W.L.C., 2007c. Irrigação da cultura da cenoura [Irrigation of the carrot crop], Brasília, Distrito Federal.
- Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., 1955. The water balance. Centerton, NJ.

Table A.2.
Pesticides used in the carrot crop, trade mark and active ingredient.

Pesticides	Unit or concentration	Purpose	BS	RS
Ridomil Gold MZ (Acililalaninato/Dithiocarbamate Group) ^a	kg	Fungicide	6.00	6.00
<i>Mancozeb</i>	640 g Kg ⁻¹		3.84	3.84
<i>Metalaxyl-M</i>	40 g Kg ⁻¹		0.24	0.24
Amistar Top (Estrobilurina-Triazol Group) ^b	L	Fungicide	3.00	1.80
<i>Azoxystrobin</i>	200 g L ⁻¹		0.60	0.36
<i>Difenoconazole</i>	125 g L ⁻¹		0.38	0.23
Afalon (Urea Group) ^c	L	Herbicide	6.00	4.80
<i>Linuron</i>	450 g L ⁻¹		2.70	2.16
Karate Zeon 50 CS (Pyrethroid Group) ^d	L	Insecticide	3.00	3.00
<i>Lambda-cyhalothrin</i>	100 g L ⁻¹		0.30	0.30
Engeo Pleno (Neonicotinoid and Pyrethroid) ^e	L	Insecticide	0.75	0.75
<i>Thiamethoxam</i>	141 g L ⁻¹		0.11	0.11
<i>Lambda-cyhalothrin</i>	106 g L ⁻¹		0.08	0.08
Lannate BR (Oximebmethyl carbamate) ^f	L	Insecticide	2.25	2.25
<i>Methomyl</i>	215 g L ⁻¹		0.48	0.48

^a<http://www3.syngenta.com/country/pt/pt/produtos/Documents/rotulo/rotulo-ridomil-gold-mz-pepitem.pdf> (accessed 19.05.16)

^b<http://www3.syngenta.com/country/br/pt/produtosemarcas/controle-de-pragas-urbanas-e-de-jardim/produtos/Pages/AmistarTop.aspx> (accessed 19.05.16)

^chttp://www.adapar.pr.gov.br/arquivos/File/defis/DFI/Bulas/Herbicidas/afalonsc__1.pdf (accessed 19.05.16)

^dhttp://www3.syngenta.com/country/pt/pt/produtos/Proteccao_de_culturas/Insecticidas/Pages/KarateZeon.aspx (accessed 19.05.16)

^e<http://www.servicos.syngenta.com.br/PRODUTOS/ProductDetails.aspx?idProduct=2286> (accessed 19.05.16)

^fhttp://www.dupont.com.br/content/dam/assets/products-and-services/crop-protection/assets/pt_BR/LannateBR_Bula.pdf (accessed 19.05.16)

Table A.3.

Emissions from agriculture are based on Nemecek and Schnetzer (2012) report.

Emissions	Base scenario (BS)	Recommended scenario (RS)
Ammonia (NH₃) - Air		
We used AGRAMMON model with the global geographic scope of application.		
In our case study there was no application of organic fertilizer in the field (i.e. compost, manure, etc.). The NH ₃ emissions from applied mineral fertilizers are calculated by constant emission factors for each group of fertilizer based on Table 2.6 of Nemecek and Schnetzer (2012),		
$N = A * E$		
where:		
N = emission NH ₃ -N [kg N (ha year) ⁻¹]	17.560	12.17
A = amount of nitrogen mineral fertilizer [kg N (ha year) ⁻¹]	365.05	250.65
E = emission factor of 4% to multinutrient fertilizers (NPK fertilizers).	4.00%	4.00%
Nitrate (NO₃) - Ground Water		
We used SQCB-NO ₃ model,		
$N = 21.37 + [P / (c * L)] * [(0.0037 * S) + (0.0000601 * N_{org}) - (0.00362 * U)]$		
where:		
N = leached NO ₃ - N [kg N (ha year) ⁻¹]	2637.42	1437.10
P = precipitation + irrigation [mm year ⁻¹]	2542.40	2,300.35
c = clay content [%]	16.92	16.92
L = rooting depth [m]	0.35	0.35
S = nitrogen supply through fertilizers [kg N ha ⁻¹]	365.05	250.65
N _{org} = nitrogen in organic matter [kg N ha ⁻¹]	4816.67	4816.67
U = nitrogen uptake by crop [kg N ha ⁻¹]	80.00	80.00
and N _{org} is calculated by the formula,		
$N_{org} = [(C_{org} / 100) * V * Db] / (rC / N * rN_{org})$		
where:		
C _{org} = carbon content [%]	0.87	0.87
V = soil volume [m ³ ha ⁻¹]	5000.00	5000.00
Db = bulk density [kg (m ³) ⁻¹]	1300.00	1300.00
rC/N = C/N ratio [dimensionless]	10.00	10.00
rN _{org} = ratio of N _{org} to N _{tot} (total soil nitrogen) [dimensionless]	0.85	0.85
Phosphorous (P) - Ground Water		
P leaching to the ground water was estimated as an average leaching, corrected by P-fertilization,		
$Pg_w = Pg_{wl} * F_{gw}$		
where:		
Pg _w = quantity of P leached to ground water [kg (ha year) ⁻¹]	0.07	0.07
Pg _{wl} = average quantity of P leached to ground water for a land use category [kg (ha year) ⁻¹]	0.07	0.07
F _{gw} = correction factor for fertilisation by slurry (dimensionless)	1.00	1.00

Emissions	Base scenario (BS)	Recommended scenario (RS)
-----------	--------------------	---------------------------

Phosphorous (P) – Run-off to Surface Water

Run-off to surface water was calculated in a similar way to leaching to ground water,

$$Pro = Prol * Fro$$

where:

Pro = quantity of P lost through run-off to rivers [kg P (ha a) ⁻¹]	0.70	0.34
---	------	------

Prol = average quantity of P lost through run-off for a land use category [kg P (ha a) ⁻¹]	0.18	0.18
--	------	------

Fro = $1 + 0.2/80 * P_{2O_5min} + 0.7/80 * P_{2O_5sl} + 0.4/80 * P_{2O_5man}$

where:

P _{2O₅min} = quantity of P _{2O₅} contained in mineral fertilizers [kg ha ⁻¹]	1210.30	368.40
--	---------	--------

P _{2O₅sl} = quantity of P _{2O₅} contained in slurry or liquid sewage sludge [kg ha ⁻¹]	0.00	0.00
--	------	------

P _{2O₅man} = quantity of P _{2O₅} contained in solid manure [kg ha ⁻¹]	0.00	0.00
---	------	------

Phosphorous (P) – Emissions Through Water Erosion to Surface Water

P emissions through erosion of particulate phosphorous to surface water,

$$Per = Ser * Pcs * Fr * Ferw$$

where:

Per = quantity of P emitted through erosion to rivers [kg P (ha a) ⁻¹]	8.84	8.84
--	------	------

Ser = quantity of soil eroded [kg (ha a) ⁻¹]	25,000.00	25,000.00
--	-----------	-----------

Pcs = P content in the top soil [kg P kg soil ⁻¹]	0.00	0.00
---	------	------

Fr = enrichment factor for P [dimensionless]	1.86	1.86
--	------	------

Ferw = fraction of the eroded soil that reaches the river [dimensionless]	0.20	0.20
---	------	------

Nitrous Oxides (N₂O) – Air

Calculations of N₂O emissions are based on the IPCC method. Direct emissions of N₂O and indirect or induced emissions are included. In the case of indirect N₂O emission, nitrogen is first emitted as NH₃ or NO₃⁻ and subsequently converted to N₂O,

$$N_2O = 44/28 * (0.01 * (N_{tot} + N_{cr}) + 0.01 * 14/17 * NH_3 + 0.0075 * 14/62 * NO_3^-)$$

where:

N ₂ O = emission of N ₂ O [kg N ₂ O ha ⁻¹]	12.93	7.92
---	-------	------

N _{tot} = total nitrogen in mineral and organic fertilizers [kg N ha ⁻¹]	365.05	250.65
---	--------	--------

N _{cr} = nitrogen contained in the crop residues [kg N ha ⁻¹]	0.00	0.00
--	------	------

NH ₃ = losses of nitrogen in the form of ammonia [kg NH ₃ ha ⁻¹]	17.56	12.17
--	-------	-------

NO ₃ ⁻ = losses of nitrogen in the form of nitrate [kg NO ₃ ⁻ ha ⁻¹]	2637.43	1437.10
--	---------	---------

Emissions	Base scenario (BS)	Recommended scenario (RS)
Nitrogen oxides (NOx) - Air		
During denitrification processes in soils, nitrous oxide (NOx) may also be produced. These emissions were estimated from the emissions of N ₂ O,		
$\text{NOx} = 0.21 * \text{N}_2\text{O}$		
where:		
NOx = emission of NOx [kg NOx ha ⁻¹]	2.71	1.66
N ₂ O = emission of N ₂ O [kg N ₂ O ha ⁻¹]	12.93	7.92
Nutrient Inputs in Agricultural Soils		
This data is presented in the manuscript method and result section.		
Release of Fossil CO₂ after Urea Applications		
The N source of the fertilizer is ammonium nitrate, so this is not applicable.		
Heavy Metals to Agricultural Soil, Surface Water and Ground Water		
The heavy metal emissions were calculated by SALCA-heavy metal for Cadmium (Cd), Chromium (Cr), Lead (Pb) and Mercury (Hg). Heavy metal emissions into ground water are calculated with constant leaching rates as,		
$\text{Mleach}_i = \text{mleach}_i * A_i$		
where:		
Mleach _i = agricultural related heavy metal i emission [mg (ha year) ⁻¹]	Cd = 49.93; Cr = 21,184.84; Pb = 595.63 and Hg = 1.29	Cd = 49.80; Cr = 21,154.94; Pb = 587.18 and Hg = 1.27
mleach _i = average amount of heavy metal emission [mg (ha.year) ⁻¹]	Cd = 50.00; Cr = 21,200.00; Pb = 600.00 and Hg = 1.30	Cd = 50.00; Cr = 21,200.00; Pb = 600.00 and Hg = 1.30
A _i is calculated by the formula,		
$A_i = \text{Magro}_i / (\text{Magro}_i + \text{Mdeposition}_i)$		
where:		
A _i = allocation factor for the share of agricultural inputs in the total inputs for heavy metal i	Cd = 1.00; Cr = 1.00; Pb = 0.99 and Hg = 0.99	Cd = 1.00; Cr = 1.00; Pb = 0.98 and Hg = 0.98
Magro _i ¹⁰ = total input of heavy metal from fertilizers of agricultural production [mg (ha year) ⁻¹]	Cd = 510,000.00; Cr = 5,100,000.00; Pb = 2,550,000.00 and Hg = 6307.50	Cd = 171,347.00; Cr = 1,713,470.00; Pb = 856,735.00 and Hg = 2081.87
Mdeposition _i = total input of heavy metal from atmospheric deposition [mg (ha year) ⁻¹]	Cd = 700.00; Cr = 3650.00; Pb = 18,700.00 and Hg = 50.00	Cd = 700.00; Cr = 3650.00; Pb = 18,700.00 and Hg = 50.00
Heavy metal emissions through erosion (surface water) are calculated as follows,		

¹⁰ For each fertilizer analyzed, the concentration of heavy metals reported by the manufacturer *Heringer* was considered document sent to the authors.

Emissions	Base scenario (BS)	Recommended scenario (RS)
$\text{Merosion}_i = \text{ctot}_i * B * a * f_{\text{erosion}} * A_i$		
where:		
Merosion _i = agricultural related heavy metal emissions through erosion [mg (ha year) ⁻¹]	Cd = 2851.19; Cr = 223,040.37; Pb = 229,884.18 and Hg = 710.47	Cd = 2843.48; Cr = 222,725.55; Pb = 226,623.48 and Hg = 699.30
ctot _i = total heavy metal content in the soil [mg kg ⁻¹]	Cd = 0.00; Cr = 0.03; Pb = 0.02 and Hg = 0.00	Cd = 0.00; Cr = 0.03; Pb = 0.02 and Hg = 0.00
B = amount of soil erosion [kg (ha year) ⁻¹]	Cd = 25,000.00; Cr = 25,000.00; Pb = 25,000.00 and Hg = 25,000.00	Cd = 25,000.00; Cr = 25,000.00; Pb = 25,000.00 and Hg = 25,000.00
a = accumulation factor 1.86 [dimensionless]	Cd = 1.86; Cr = 1.86; Pb = 1.86 and Hg = 1.86	Cd = 1.86; Cr = 1.86; Pb = 1.86 and Hg = 1.86
f erosion = erosion factor 0.2 [dimensionless]	Cd = 0.20; Cr = 0.20; Pb = 0.20 and Hg = 0.20	Cd = 0.20; Cr = 0.20; Pb = 0.20 and Hg = 0.20
A _i = allocation factor (calculated for heavy metals to ground water) [dimensionless]	Cd = 1.00; Cr = 1.00; Pb = 0.99 and Hg = 0.99	Cd = 1.00; Cr = 1.00; Pb = 0.98 and Hg = 0.98
The balance of all inputs into the soil (fertilizers, pesticides, seed and deposition) and outputs from the soil (exported biomass, leaching and erosion), multiplied by the allocation factor is calculated as an emission to agricultural soil (Msoil _i [mg (ha year) ⁻¹]).	Cd = 507,102.76; Cr = 4,855,948.90; Pb = 2,321,197.53 and Hg = 5601.30	Cd = 168,465.39; Cr = 1,470,107.37; Pb = 643,377.21 and Hg = 1397.69
$\text{Msoil}_i = (\Sigma \text{inputs}_i - \Sigma \text{outputs}_i) * A_i$		
Arsenic (As) emissions were considered going to the soil by the lack of a specific estimation model [mg (ha year) ⁻¹].	225,000.00	85,673.50
Pesticides to Agricultural Soil	-	-
All pesticides applied for crop production were assumed to end up as emissions to the soil.		
Carbon dioxide (CO₂) - from the Air	-	-
The CO ₂ from the atmosphere used for photosynthesis was not considered, as it is assumed to be released in a short period of time with no actual carbon sequestration.		
Land Use	-	-
It was considered “occupation, an annual crop, irrigated, intensive” in the study. The land transformation was not considered as there is not enough information about the previous uses of the land.		

Reference

Nemecek, T., Schnetzer, J., 2012. Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems Data v3.0. Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART.

Table A.4.
Cost of inputs in BS and RS carrot production systems.

Priced inputs	Amount		Environmental benefit	Cost (USD)		Annual savings
	BS	RS		BS	RS	
CP selected opportunities						
Reduction in excessive fertilizer	3765.00	1936.15	1828.85	1752.45	810.28	942.18
Fertilizer NPK 10-50-00 (kg)	2415.00	736.80	1678.20	1279.95	390.50	889.45
Fertilizer NPK 20-00-20 (kg)	600.00	884.85	-284.85	210.00	309.70	-99.70
Fertilizer NPK 00-00-60 (kg)	750.00	314.50	435.50	262.50	110.08	152.43
Reduction in excessive seeds	24.15	7.50	16.65	1412.29	438.60	973.69
Carrot seed (kg)	24.15	7.50	16.65	1412.29	438.60	973.69
Irrigation based on water balance						
Reduction in excessive water	18,900.00	12,835.44	6080.06	-	-	-
Ground water (m ³)	18,900.00	12,835.44	6080.06	-	-	-
Reduction in excessive electricity	3822.75	2594.03	1228.72	382.28	259.40	122.87
Electricity, low voltage (KWh)	3822.75	2594.03	1228.72	382.28	259.40	122.87
Reduction in excessive pesticides	21.00	18.60	2.40	551.98	463.56	88.42
Herbicide <i>Afalon</i> (L)	6.00	4.80	1.20	122.82	98.26	24.56
Fungicide <i>Ridomil Gold MZ</i> (kg)	6.00	6.00	-	171.90	171.90	
Fungicide <i>Amistar Top</i> (L)	3.00	1.80	1.20	159.66	95.80	63.86
Insecticide <i>Karate Zeon 50 CS</i> (L)	3.00	3.00	-	50.01	50.01	-
Insecticide <i>Lannate BR</i> (L)	2.25	2.25	-	16.45	16.45	-
Insecticide <i>Engeo Pleno</i> (L)	0.75	0.75	-	31.14	31.14	-
Remaining inputs						
Diesel (L)	286.14	286.14	-	228.91	228.91	-
Total				4327.91	1973.88	2354.03

Table A.5.

Chemical soil analysis results of the study area.

Local	Water pH	P mg/dm ³	K mg/dm ³	Ca cmol _c /dm ³	Mg cmol _c /dm ³	Ca+Mg cmol _c /dm ³	Al cmol _c /dm ³	Na cmol _c /dm ³	Orga nic matte r g/kg
Study area	6.5	8.0	172.0	12.0	2.2	14.1	0.0	0.0	17.0

Table A.6.

Life cycle impact results of base scenario (BS), cradle-to-gate.

Impact category	Unit	Total	Confidence interval (95%)		Contribution per subprocess								
			2.5%	97.5%	Crop	N fertilizer	P fertilizer	K fertilizer	Inert filler	Pesticides	Seeds	Electricity	Tractor
GW	kg CO ₂ eq	1.19E-01	1.01E-01	1.45E-01	3.47E-02	3.79E-02	2.26E-02	3.95E-03	5.77E-04	6.85E-04	5.49E-05	9.53E-03	1.11E-02
OD	kg CFC-11 eq	8.73E-09	-2.27E-09	2.16E-08	0.00E+00	2.06E-09	2.86E-09	2.67E-10	9.58E-11	8.04E-10	7.06E-12	6.31E-10	2.01E-09
HT-n	CTUh	1.36E-06	-1.36E-05	1.68E-05	1.33E-06	6.92E-09	1.50E-08	1.30E-09	1.48E-10	9.63E-10	3.20E-10	2.72E-09	4.14E-10
HT-c	CTUh	1.40E-07	4.53E-09	2.80E-07	1.36E-07	9.81E-10	2.76E-09	1.63E-10	2.55E-11	3.40E-11	3.41E-12	3.57E-10	8.57E-11
PM	kg PM _{2.5} eq	9.17E-05	7.01E-05	1.25E-04	1.07E-05	1.95E-05	4.81E-05	3.78E-06	4.60E-07	1.05E-06	4.46E-08	5.62E-06	2.45E-06
IR-h	kBq U ₂₃₅ eq	9.16E-03	3.62E-03	2.98E-02	0.00E+00	1.65E-03	4.46E-03	8.45E-04	5.85E-05	1.00E-04	4.07E-06	1.26E-03	7.82E-04
IR-e	CTUe	3.24E-08	2.03E-08	5.49E-08	0.00E+00	7.01E-09	1.32E-08	4.13E-09	2.74E-10	2.70E-10	1.83E-11	2.54E-09	5.01E-09
PO	kg NMVOC eq	2.63E-04	1.48E-04	3.81E-04	2.44E-05	8.26E-05	1.03E-04	1.30E-05	4.76E-06	3.06E-06	3.17E-07	1.69E-05	1.52E-05
AC	molc H ⁺ eq	1.18E-03	9.98E-04	1.38E-03	4.96E-04	2.20E-04	3.31E-04	3.74E-05	5.70E-06	1.40E-05	9.05E-07	4.07E-05	3.17E-05
EU-t	molc N eq	3.49E-03	2.85E-03	4.17E-03	2.24E-03	6.43E-04	3.62E-04	1.14E-04	1.72E-05	8.70E-06	3.60E-06	6.55E-05	4.09E-05
EU-f	kg P eq	1.22E-04	8.71E-05	1.69E-04	8.66E-05	5.07E-06	2.64E-05	1.10E-06	7.66E-08	3.24E-07	1.07E-08	2.44E-06	2.97E-07
EU-m	kg N eq	9.26E-03	6.38E-03	1.33E-02	5.39E-03	1.08E-03	6.24E-04	2.15E-03	1.79E-06	2.11E-06	3.64E-07	8.38E-06	4.29E-06
ET-f	CTUe	3.22E+00	-2.02E+01	2.73E+01	2.09E+00	2.57E-01	4.69E-01	3.78E-02	4.62E-03	2.59E-02	2.57E-03	3.26E-01	1.02E-02
LU	kg C deficit	5.59E-01	-1.46E-01	1.27E+00	3.60E-01	4.88E-02	7.10E-02	3.23E-02	3.46E-03	9.23E-04	4.64E-04	1.63E-02	2.57E-02
WD	m ³ water eq	3.53E-04	-1.84E-02	1.95E-02	2.85E-05	1.08E-04	6.06E-05	1.36E-04	2.87E-06	-8.86E-08	-2.04E-08	1.67E-05	2.54E-07
RD	kg Sb eq	1.04E-05	5.38E-06	2.04E-05	0.00E+00	2.08E-06	6.68E-06	1.68E-07	3.25E-08	1.23E-06	5.13E-09	1.70E-07	3.19E-08

Table A.7.

Life cycle impact results of recommended scenario (RS), cradle-to-gate.

Impact category	Unit	Total	Confidence interval (95%)		Contribution per subprocess								
			2.5%	97.5%	Crop	N fertilizer	P fertilizer	K fertilizer	Inert filler	Pesticides	Seeds	Electricity	Tractor
GW	kg CO ₂ eq	7.69E-02	6.35E-02	9.27E-02	2.31E-02	2.60E-02	6.88E-03	2.53E-03	3.38E-04	5.76E-04	1.71E-05	6.47E-03	1.11E-02
OD	kg CFC-11 eq	5.58E-09	-1.56E-09	1.37E-08	0.00E+00	1.41E-09	8.71E-10	1.71E-10	5.61E-11	6.39E-10	2.19E-12	4.28E-10	2.01E-09
HT-n	CTUh	4.14E-07	-9.06E-06	9.86E-06	4.00E-07	4.75E-09	4.58E-09	8.29E-10	8.68E-11	9.30E-10	9.93E-11	1.84E-09	4.14E-10
HT-c	CTUh	5.13E-08	-3.01E-08	1.33E-07	4.93E-08	6.74E-10	8.39E-10	1.04E-10	1.49E-11	2.89E-11	1.06E-12	2.43E-10	8.57E-11
PM	kg PM _{2.5} eq	4.53E-05	3.56E-05	5.96E-05	7.43E-06	1.34E-05	1.46E-05	2.42E-06	2.69E-07	9.10E-07	1.39E-08	3.81E-06	2.45E-06
IR-h	kBq U ₂₃₅ eq	4.79E-03	1.84E-03	1.44E-02	0.00E+00	1.14E-03	1.36E-03	5.40E-04	3.42E-05	8.56E-05	1.26E-06	8.53E-04	7.82E-04
IR-e	CTUe	1.86E-08	1.08E-08	3.34E-08	0.00E+00	4.82E-09	4.01E-09	2.64E-09	1.60E-10	2.31E-10	5.67E-12	1.72E-09	5.01E-09
PO	kg NMVOC eq	1.45E-04	7.63E-05	2.15E-04	1.62E-05	5.67E-05	3.13E-05	8.28E-06	2.78E-06	2.59E-06	9.83E-08	1.14E-05	1.52E-05
AC	molc H ⁺ eq	6.94E-04	5.90E-04	8.11E-04	3.43E-04	1.51E-04	1.01E-04	2.39E-05	3.33E-06	1.22E-05	2.81E-07	2.76E-05	3.17E-05
EU-t	molc N eq	2.28E-03	1.87E-03	2.73E-03	1.55E-03	4.41E-04	1.10E-04	7.28E-05	1.01E-05	7.34E-06	1.12E-06	4.44E-05	4.09E-05
EU-f	kg P eq	9.78E-05	6.74E-05	1.39E-04	8.33E-05	3.48E-06	8.04E-06	7.03E-07	4.48E-08	2.72E-07	3.32E-09	1.66E-06	2.97E-07
EU-m	kg N eq	5.77E-03	3.95E-03	8.30E-03	3.46E-03	7.40E-04	1.90E-04	1.38E-03	1.05E-06	1.77E-06	1.13E-07	5.69E-06	4.29E-06
ET-f	CTUe	1.50E+00	-1.32E+01	1.62E+01	9.00E-01	1.77E-01	1.43E-01	2.42E-02	2.70E-03	2.45E-02	7.99E-04	2.21E-01	1.02E-02
LU	kg C deficit	4.76E-01	4.51E-02	9.15E-01	3.60E-01	3.35E-02	2.16E-02	2.07E-02	2.02E-03	7.98E-04	1.44E-04	1.10E-02	2.57E-02
WD	m ³ water eq	1.96E-04	-7.50E-03	8.05E-03	3.46E-06	7.42E-05	1.84E-05	8.69E-05	1.68E-06	4.56E-08	-6.33E-09	1.13E-05	2.54E-07
RD	kg Sb eq	4.96E-06	2.49E-06	1.00E-05	0.00E+00	1.43E-06	2.03E-06	1.07E-07	1.90E-08	1.22E-06	1.59E-09	1.16E-07	3.19E-08

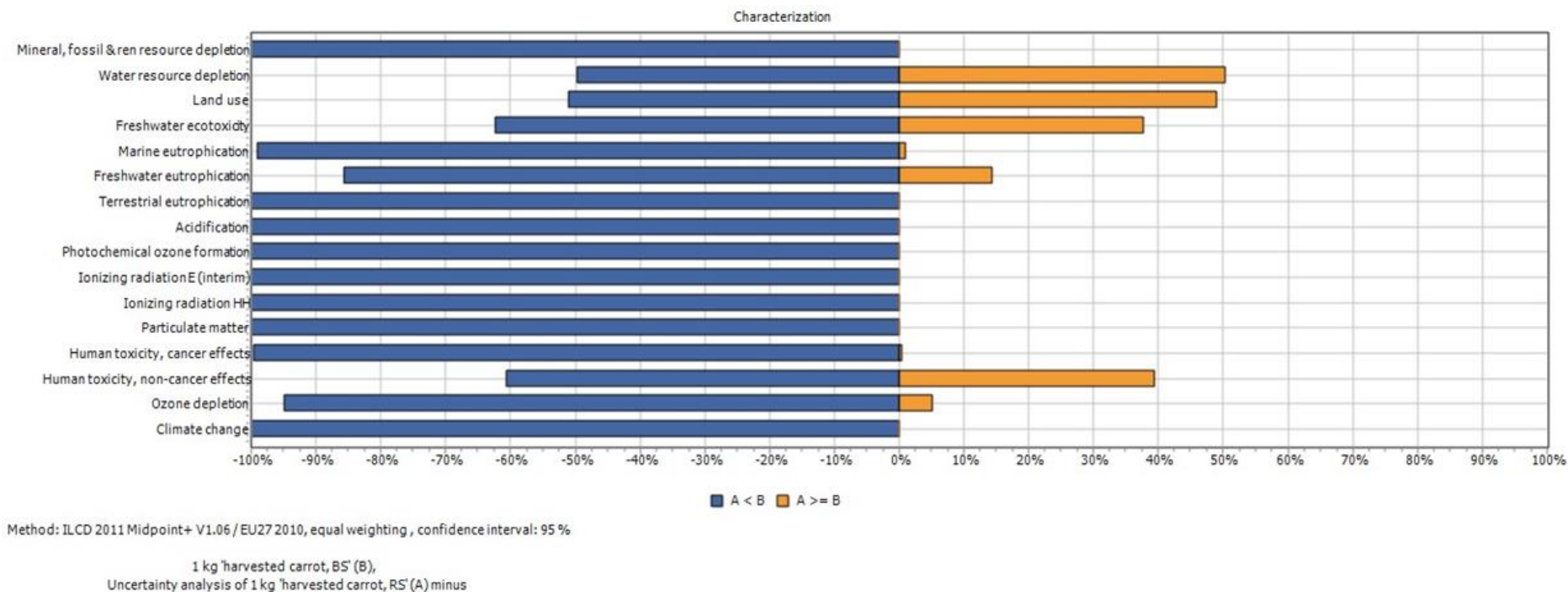


Fig. A.1. Comparative life cycle impact results of base scenario (BS) and recommended scenario (RS), including background and foreground parameter uncertainties of cradle-to-gate.

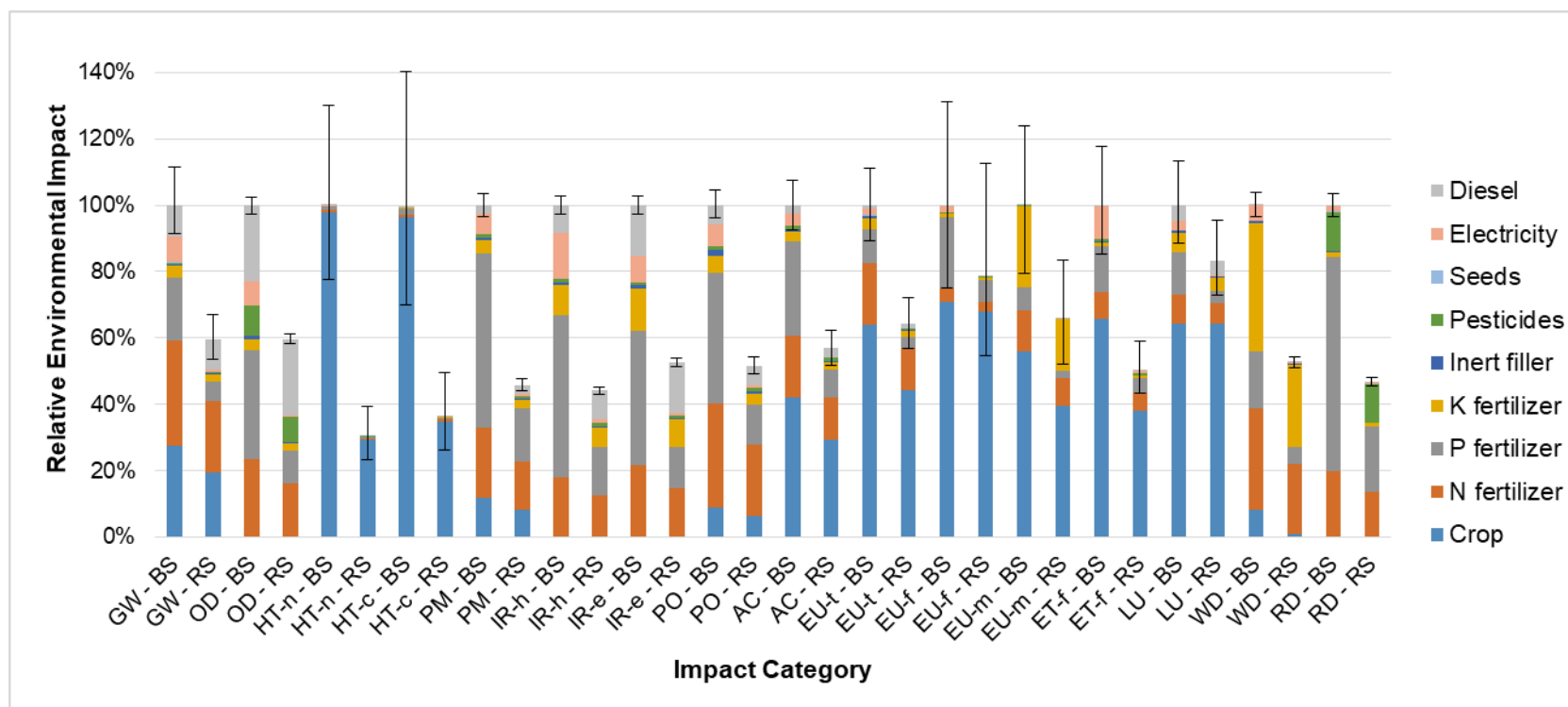


Fig. A.2. Comparison of the environmental impacts of BS and RS carrot production, including only foreground parameter uncertainties cradle-to-gate.

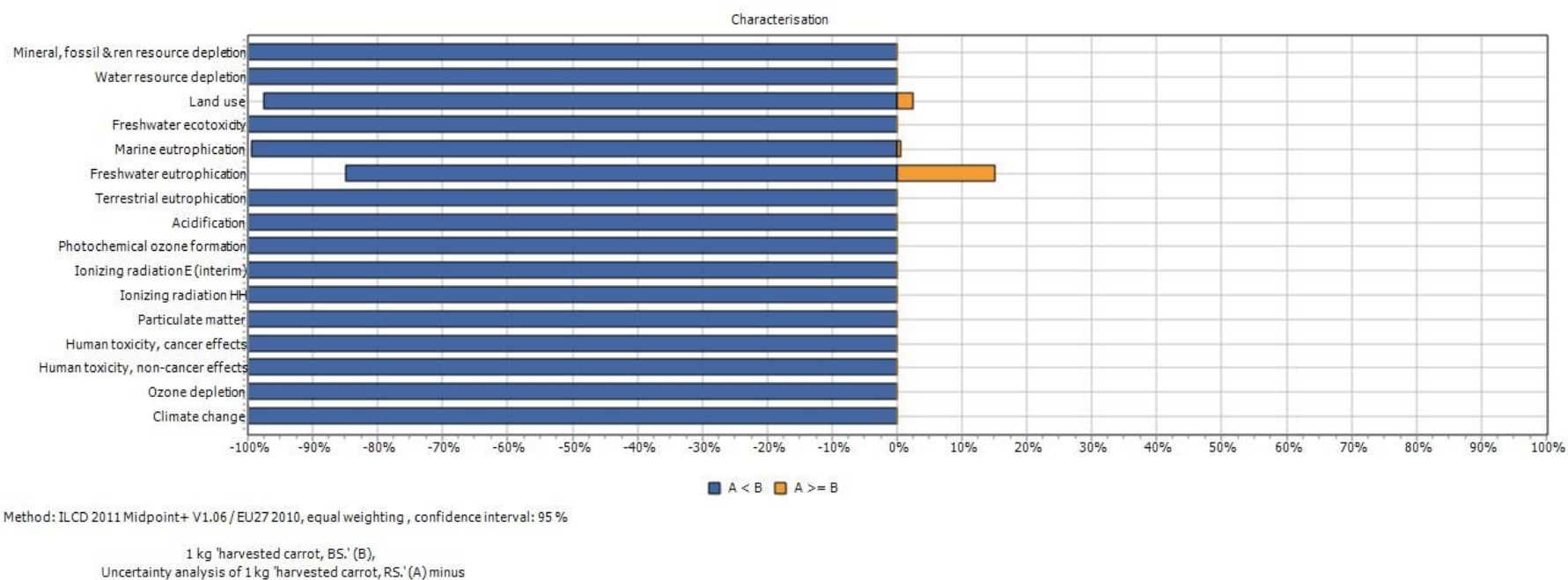


Fig. A.3. Comparative life cycle impact results of base scenario (BS) and recommended scenario (RS), including foreground parameter uncertainties cradle-to-gate.

CAPÍTULO III

DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS FLORESTAIS CONVENCIONAIS E MULTIPRODUTOS: INTEGRAÇÃO-LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA COM BASE EM PRODUÇÃO MAIS LIMPA E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Resumo: O objetivo deste artigo é avaliar o desempenho econômico e ambiental de uma nova abordagem analítica que integra Produção mais Limpa (PmaisL) e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em dois sistemas produtivos. Foram quantificados os inventários a partir de dados locais dos sistemas de produção de uma empresa de eucalipto de ciclo curto para fornecimento à indústria de celulose, incluindo todas as operações desde o preparo de mudas até a colheita. Foram avaliados os seguintes sistemas de produção: i) sistema convencional: Implantação + Reforma (S1); ii) sistema convencional: Implantação + Brotação (S2) e iii) Sistema multiprodutos: Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta (S3). A adoção de medidas de PmaisL no S3 reduziu o uso de insumos em 35% e aumentou a receita bruta em relação ao S1. Os processos que mais contribuíram para as categorias de impacto analisadas foram a preparação do solo, emissões dos insumos do campo e a colheita mecanizada. No entanto, a inclusão do sequestro do carbono biogênico resultou em $-783 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$ de madeira para o S1. O sistema S2 apresentou menores impactos comparado ao S1. O S3 apresentou um melhor perfil ambiental para a maioria das categorias de impacto analisadas em função de uma menor produtividade do eucalipto nesse sistema e apresentou um melhor retorno financeiro em relação ao S1 e S2. A implementação das medidas de PmaisL no S3 teria um payback imediato. Este estudo mostrou que a estratégia de PmaisL da silvicultura do eucalipto é uma opção economicamente viável para aumentar o sequestro líquido de CO_2 da produção florestal. A combinação de PmaisL, como estratégia de melhoria contínua da produção através de identificação de oportunidades para reduzir as perdas do processo, e a ACV, como uma ferramenta robusta para quantificar os impactos ambientais, mostrou-se efetiva fornecendo informações para tomada de decisão em nível de processo, sem perder a visão mais ampla acerca do desempenho ambiental da cadeia produtiva dos sistemas analisados.

Palavras-chave: Eucalipto, extremo Sul, Produção mais Limpa, ILPF, eucalipto, ACV, sustentabilidade.

Abstract: The purpose of this paper is to evaluate the economic and environmental performance of a new analytical approach integrating Cleaner Production (CP) and Life Cycle Assessment (LCA) in two productive systems. Inventories were quantified from local data from the production systems of a short-cycle eucalyptus company to supply the pulp industry, including all operations from seedling preparation to harvesting. The following production systems were evaluated: i) conventional system: Implementation + Reform (S1); ii) conventional system: Implementation + Sprouting (S2) and iii) Multi-product system: Crop-livestock-forestry integration (S3). Adoption of CP measures in S3 reduced input use

by 35% and increased gross revenue over S1. The processes that most contributed to the impact categories analyzed were soil preparation, field input emissions and mechanized harvesting. However, the inclusion of biogenic carbon sequestration resulted in -783 kg CO₂ eq/m³ of wood for S1. The S2 system had lower impacts compared to S1. S3 presented a better environmental profile for most of the impact categories analyzed due to lower eucalyptus productivity in this system and presented a better financial return compared to S1 and S2. Implementation of CP measures in S3 would have an immediate payback. This study showed that the eucalyptus forestry CP strategy is an economically viable option to increase net CO₂ sequestration of forest production. The combination of CP for continuous production improvement through identifying opportunities to reduce process losses and LCA as a robust tool to quantify environmental impacts has been effective in providing decision-making information without losing the broader view of the environmental performance of the production chain of the systems analyzed.

Keywords: ILPF, South extreme, Cleaner Production, eucalyptus, LCA, sustainability.

Lista de acrônimos

ABAF	Associação Baiana das Empresas de Base Florestal
AC	Acidificação
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AFOLU	Agriculture, Forestry and Other Land Use
ASPEX	Associação dos Produtores de Eucalipto do Sul e Extremo Sul da Bahia
B	Boro
CED	Cumulative Energy Demand
CERFLOR	Programa Brasileiro de Certificação Florestal
CO ₂	Dióxido de Carbono
CP	Cleaner production
Cu	Cobre
EROEI	Energy Returned on Energy Invested
ET-f	Ecotoxicidade
EU-f	Eutrofização aquática
EU-m	Eutrofização marinha
EU-t	Terrestrial eutrophication
Fig	Figura
FSC®	Forest Stewardship Council
GEE	Gases de Efeito Estufa
GW	Aquecimento global

HT	Toxicidade humana
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
ILPF	Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
K	Potássio
LCA	Life Cycle Assessment
LU	Uso da terra
MAP	Mono-Amônio-Fosfato
MS	Matéria seca
N	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
NH ₃	Amônia
NO ₃ ⁻	Nitrato
NO _x	Número de oxidação
NPK	Nitrogênio-Fósforo-Potássio
P	Fósforo
PFF	Programa de Fomento Florestal
pH	Potencial de Hidrogênio
PIB	Produto Interno Bruto
PmaisL	Produção Mais Limpa
PO	Oxidação fotoquímica
PO ₄ ⁻	Fosfato
RD	Depleção abiótica
S	Enxofre
SO ₂	Dióxido de Enxofre
UNEP	United Nations Environmental Programme
Zn	Zinco

Unidades

°C	Grau Celsius
cm	Centímetro

eq	Equivalente
ha	Hectare
Kg	Quilograma
km	Quilômetro
L	Litro
m	Metro
m ³	Metro cúbico
MJ	Megajoule
mm	Milímetro
R\$	Real
S1	Sistema convencional: implantação + reforma
S2	Sistema convencional: implantação + brotação
S3	Sistema multiprodutos: Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)
t	Tonelada
USD	United States dollar

1. Introdução

Em 2015, os plantios de eucalipto totalizaram 5.6 milhões de hectares da área de árvores plantadas no Brasil, com uma produtividade média anual de $36 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, a maior média em relação a outros países. A área plantada de *Eucalyptus* representou 72% do total de plantios florestais brasileiros e teve um crescimento de 3% ao ano. Outros 1.6 milhão de hectares foram cultivados com *Pinus* e o restante com outras espécies (IBÁ, 2016).

O sistema de cultivo do eucalipto adotado no Brasil possui a menor rotação (período entre o plantio e a colheita das árvores) do mundo (IBÁ, 2016). Em razão das tecnologias florestais adotadas e das condições edafoclimáticas brasileiras, pode ser colhido entre cinco e sete anos para produção de celulose e atingir produtividade superior a $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Baesso et al., 2010).

Segundo Briceño-Elizondo et al. (2006), ciclos¹¹ de cultivo mais curtos e de maior intensidade podem contribuir para mitigar os efeitos da mudança climática ao sequestrar o CO_2 durante o crescimento. Entretanto, Gonçalves et al. (2013) alertam que apesar dos ganhos de produtividade do eucalipto no Brasil, há uma série de riscos associados à resistência de microorganismos aos produtos utilizados no controle de pragas e doenças em plantações de eucalipto de alto rendimento e curta rotação. Além disso, Watt et al. (2005) verificaram que as concentrações de carbono, nitrogênio e fósforo foram reduzidas pela perturbação do solo durante a colheita, embora essas reduções tenham sido relativamente pequenas.

Economicamente, é vantajoso remover maiores quantidades de resíduos florestais quando o interesse é a produção de energia, pois a biomassa proveniente das operações florestais pode ser valorizada para a produção de energia nas centrais de biomassa, seja pela combustão direta dos resíduos ou de materiais agregados como briquetes. No entanto, os resíduos oriundos do corte e descascamento são importantes econômica e ambientalmente pela capacidade de repor nutrientes ao solo e a produção de biomassa no solo é significativamente maior quando há maiores níveis de retenção de resíduos (Dighton et al., 2012). De acordo com Herrero et al. (2014), o manejo florestal pode determinar o papel ecológico e tecnológico dos sistemas florestais. As características dos plantios, as condições

¹¹ Período de tempo de exploração de um povoamento florestal, desde o plantio de mudas até a reforma da área.

do local e o mercado a que é destinada a produção florestal devem determinar um equilíbrio entre essas duas funções.

Ferez et al. (2015) comparando sistemas convencionais de reflorestamento florestal no Brasil com sistemas de reflorestamento baseados em plantios comerciais com uso intensivo de insumos, verificaram que os sistemas intensivos, em ciclos de seis anos, estocam e sequestram mais carbono abaixo e acima do solo, comparados aos sistemas convencionais de reflorestamento. Um nível mais alto de recursos disponíveis nos plantios intensivos proporcionam um melhor resultado em termos de estoque de carbono, comparado a baixa efetividade do controle mecânico limitado de plantas daninhas e os baixos níveis de nutrientes disponíveis nos sistemas convencionais. Por outro lado, os ciclos mais curtos de cultivo são questionados devido aos seus efeitos negativos sobre os níveis de nutrientes do solo e uso da água (Weih e Dimitriou, 2012; Morales et al., 2015).

Independentemente do intervalo entre rotações, a produção de eucalipto, assim como de outros sistemas agropecuários e florestais, compreende uma série de operações de manejo que provocam impactos ambientais, impactos estes, decorrentes principalmente da liberação de CO₂, NO_x, SO₂, oriundos do uso de combustíveis fósseis, que contribuem para o aquecimento global e acidificação. Os nutrientes liberados durante o uso de fertilizantes provocam eutrofização. O N₂O liberado a partir de fertilizantes nitrogenados também contribui para o aquecimento global (Saraiva et al., 2017; Morales et al., 2015).

Segundo Morales et al. (2015), práticas de manejo mais intensivas implicam em maior número de operações que prejudicam o solo. Em alguns estudos, foi modelado um intervalo ótimo para essas rotações (Diaz-Balteiro e Rodriguez, 2006; Giménez et al., 2013; Silva e Ribeiro, 2006) bem como avaliado a influência dos métodos de colheita sobre o solo e a ciclagem de nutrientes (Hytönen e Moilanen, 2014). Foote et al. (2015) verificaram que nos Estados Unidos a colheita florestal diminuiu os teores de nitrogênio e carbono e a matéria orgânica do solo. Uma maior retenção de biomassa acima do solo minimiza as perdas de nitrogênio do solo e ajuda a manter a produtividade em longo prazo (Araujo et al., 2004).

Balvanera et al. (2006) identificaram relações positivas entre os fatores relacionados ao manejo do solo como ciclagem de nutrientes, controle da erosão, a regulação da biodiversidade e estabilidade do ecossistema. A melhoria da prestação dos serviços ecossistêmicos relacionados à biodiversidade, também está relacionada com o manejo florestal. Segundo Brockerhoff et al. (2013), é cada vez mais evidente a importância da biodiversidade no funcionamento dos ecossistemas, situação que se torna mais importante no

caso dos plantios florestais localizados na região da Mata Atlântica, como ocorre no estado da Bahia.

Em médio e longo prazos, os sistemas florestais também estão vulneráveis às mudanças climáticas, e a produtividade e o comércio do eucalipto poderão ser negativamente afetados por essas mudanças (Baesso et al., 2002; Booth, 2013). No entanto, as mudanças climáticas poderão afetar o setor florestal (Perez-Garcia et al., 2002) e a produção de eucalipto (Gonçalves et al., 2013) ao mesmo tempo em que o papel das florestas na mitigação das mudanças climáticas se torna cada vez mais reconhecido (FAO, 2010).

Em estudos de ACV de eucalipto para diferentes condições de clima, solo e manejo, Morales et al. (2015) e González-García et al. (2009a) concluíram que a fase de colheita é a principal responsável pelos impactos ambientais. A adubação e o transporte florestal também foram identificados como as atividades mais impactantes devido ao consumo de fertilizante e diesel.

Em condições brasileiras, Saraiva et al. (2017) investigaram diferentes sistemas de produção de biomassa para celulose, no entanto, a produção de mudas e um maior detalhamento das operações florestais não foram considerados. Estudos de ACV e pegada de carbono de produtos a partir do eucalipto incluíram o cultivo do eucalipto na avaliação, dentre os quais, Silva et al. (2012), Silva et al. (2015a) e Morales et al. (2015).

Segundo Silva et al. (2015a), a ACV identifica os pontos de maior impacto ambiental dos sistemas analisados e pode ser aplicada em práticas de PmaisL, como estratégia para prever e controlar os encargos ambientais das atividades e produtos das empresas. No entanto, os estudos de ACV identificam apenas o impacto ambiental, não estratégias de mitigação.

A PmaisL proporciona a otimização de processos, redução de custos e maior nível de conformidade com as regulamentações ambientais, se mostrando mais eficiente econômica e ambientalmente, em relação às medidas fim de tubo (Rahim e Raman, 2015). A PmaisL consiste na aplicação contínua de uma estratégia integrada e preventiva aplicada a processos, produtos e serviços, em busca de benefícios econômicos e socioambientais, saúde e segurança (UNEP, 1998).

A abordagem combinando diferentes ferramentas, à medida que a ACV apoia a PmaisL na avaliação ambiental, possibilita a avaliação de um conjunto mais amplo de aspectos ambientais ao longo do ciclo de vida do eucalipto, incluindo, além das operações florestais, a produção, o transporte e o consumo de energia e materiais utilizados nessas operações (Dias; Arroja, 2012). Essa abordagem foi empregada por Lopes et al. (2018) em

um estudo da produção de cenoura irrigada. Esses autores concluíram que o uso combinado de PmaisL e ACV identifica alternativas economicamente viáveis para redução dos impactos ambientais da produção agrícola.

Verificou-se na literatura estudos de ACV e pegada de carbono de produtos a partir do eucalipto, incluindo parcialmente a produção de eucalipto na avaliação, a partir de dados secundários, dentre os quais, Silva et al. (2012), Silva et al. (2015a) e Morales et al. (2015). Essa pesquisa apresenta o primeiro estudo completo da produção florestal de eucalipto em condições tropicais, utilizando uma abordagem inovadora a partir de dados primários. Essa abordagem integrando PmaisL e ACV traz avanços metodológicos, além de fornecer informações mais detalhadas sobre o desempenho ambiental da produção de eucalipto de ciclo curto, identificando práticas operacionais para os sistemas analisados que proporcionam ganhos ambientais e financeiros.

Nesse sentido, este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho ambiental e econômico e propor melhorias em sistemas de produção de eucalipto no extremo Sul da Bahia, com base no uso combinado de PmaisL e ACV.

2. Aspectos ambientais e econômicos de florestas plantadas

As florestas plantadas são definidas como florestas predominantemente compostas de árvores estabelecidas pelo plantio de espécies nativas ou introduzidas. O conceito de florestas plantadas é mais amplo do que o conceito de plantios florestais, e compreende a arborização de áreas até então não classificadas como floresta ou de áreas classificadas como florestas, após incêndios ou tempestades (FAO, 2010).

Em 2015, as florestas plantadas ocuparam cerca de 289 milhões de hectares, o que representa 7% da área de florestas em todo mundo. A maior parte desta área está na Ásia Oriental, Europa e América do Norte. O setor florestal contribui com cerca de USD 600 bilhões anuais para o PIB (Produto Interno Bruto) global e fornece emprego para mais de 50 milhões de pessoas (FAO, 2015).

De acordo com Brockerhoff et al. (2013), as florestas plantadas compensam parcialmente a perda de florestas nativas e apoiam a manutenção da biodiversidade e a função ecológica das florestas naturais. Brockerhoff et al. (2013), estimaram que até o final do século XXI, cerca de 30% da área de floresta natural restante no mundo se perderá em razão de uma demanda crescente de madeira, celulose e combustível, combinada com o crescimento populacional e uma quantidade finita de terras disponíveis para a produção de

alimentos. Segundo Hinchey et al. (2011), os plantios florestais são uma fonte promissora de biomassa celulósica para diferentes usos finais. A biomassa também tem sido importante para o fornecimento global de energia, sendo um dos principais contribuintes para a matriz energética em muitas economias emergentes e em desenvolvimento (Bailis et al., 2013). No Brasil, de acordo com a ANEEL (2017), dos 14,195,172 kW de capacidade instalada de geração de energia a partir de biomassa, 21% são oriundos de florestas.

O Brasil detém a segunda maior área florestal do mundo e teve a sua área de florestas plantadas aumentada em 36% entre os anos de 1990 e 2015 (FAO, 2014). As florestas plantadas no Brasil totalizaram 7.7 milhões de hectares em 2015, representando 91% da madeira produzida para fins industriais no país. O setor de árvores plantadas no Brasil teve um PIB de R\$ 69 bilhões em 2015, representando 1% do PIB brasileiro e 6% do PIB industrial. O saldo da balança comercial aumentou 15% em relação ao ano de 2014, encerrando o ano com um recorde de USD 7.7 bilhões, sendo metade das exportações para a Europa e China (IBÁ, 2016).

Da área total de árvores plantadas no Brasil (Fig. 1), 34% pertence às empresas do segmento de celulose e papel e, 29% aos proprietários independentes e fomentados (pequenos e médios produtores) que investem em plantios florestais para comercialização da madeira in natura. O segmento de siderurgia a carvão vegetal representa 15% da área plantada, painéis de madeira e pisos laminados, 7%, produtos sólidos de madeira, 4% e outros 3% completam a distribuição dos plantios florestais (IBÁ, 2016).

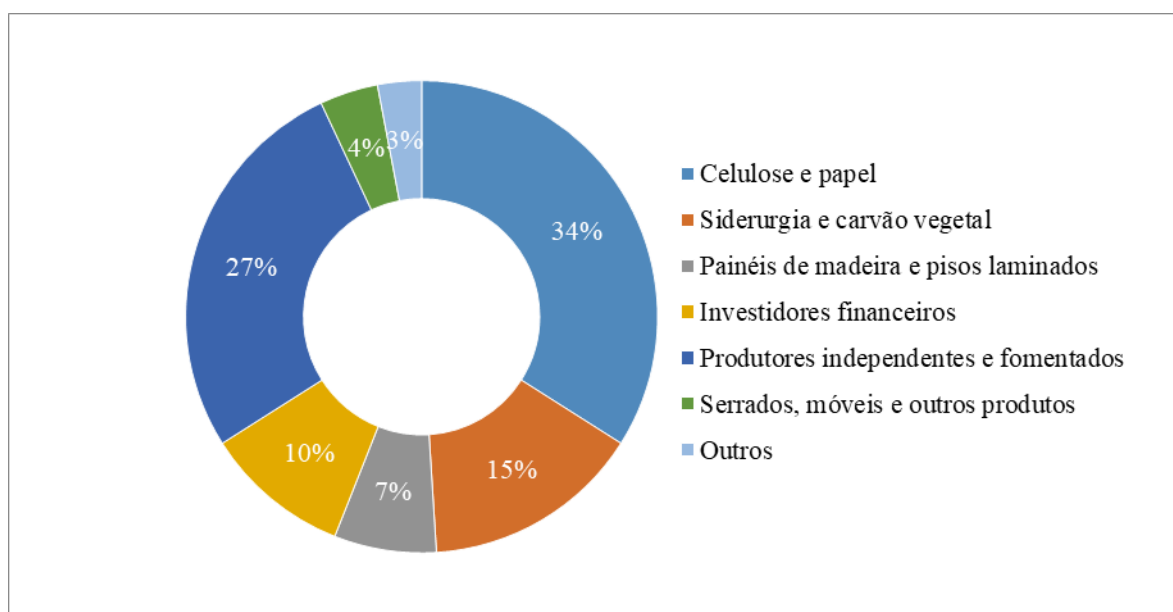


Fig. 1. Composição por segmento da área de florestas plantadas no Brasil. Adaptado de IBÁ (2016).

O estado da Bahia possui uma participação importante na produção florestal do Brasil (IBÁ, 2016). Segundo a ABAF (2015), no ano de 2014 estes plantios atingiram cerca de 710 mil hectares, dos quais 94% foram cultivados com eucalipto, 1% com pinus e 5% com outras espécies florestais. A Bahia juntamente com os estados de Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul, possuem a maior concentração de plantios de eucalipto no Brasil (IBÁ, 2016). De acordo com a ABAF (2015), em 2014, o plantio de eucalipto na Bahia ocupou uma área de 617 mil hectares, crescendo 3% em relação a 2013, com uma produtividade média anual de $42 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, o maior índice do mundo.

O PIB do setor florestal da Bahia atingiu R\$ 9 bilhões em 2014, apresentando um crescimento de 6.5% comparado ao ano anterior, representando 5% do PIB do estado da Bahia. O número de empregos mantidos pelo setor é de aproximadamente 40 mil empregos diretos e 101 mil indiretos. As exportações do setor totalizaram USD 2 bilhões em 2014, o que representou 15% das exportações do setor florestal brasileiro (ABAF, 2015). As empresas florestais também foram responsáveis pela preservação voluntária de 80 mil hectares, o que representou 17% da área preservada no estado (ABAF, 2015). Por outro lado, a maior parte das áreas de reflorestamento do estado da Bahia se localiza na Mata Atlântica (Fig. 2), o que requer maior atenção e responsabilidade por parte deste setor.



Fig. 2. Distribuição geográfica das florestas plantadas de eucalipto no estado da Bahia.
Adaptado de IBÁ (2016).

A Mata Atlântica é um conjunto de ecossistemas associados, tendo a floresta ombrófila densa, ou floresta tropical úmida, como o ecossistema mais significativo deste bioma, exigindo medidas rigorosas de controle em relação a expansão florestal nessa região. Segundo a FAO (2010), vem ocorrendo uma redução da área de floresta natural para as funções produtivas, o que reflete uma maior dependência das florestas plantadas para uso múltiplo e, conseqüentemente, uma maior pressão da expansão de plantios florestais.

A extensão dos recursos florestais é a primeira medida de manejo florestal na perspectiva de sustentabilidade ambiental, a qual está relacionada a manutenção dos recursos florestais adequados para os diversos tipos de florestas e características, incluindo a manutenção de outras áreas arborizadas fora das florestas plantadas. Dessa forma, é possível apoiar os objetivos sociais, econômicos e ambientais relacionados às florestas e silvicultura.

Durante a pesquisa de campo, observou-se que a madeira para fins energéticos pode vir a ampliar as florestas plantadas na Bahia. De acordo com a Associação dos Produtores de Eucalipto do Sul e Extremo Sul da Bahia (ASPEX)¹², há uma forte demanda por biomassa florestal para queima direta. Essa demanda se localiza principalmente na China, o que implicaria em deslocamento do consumo, com impactos relacionados ao transporte e a queima.

Com relação a organização dos produtores florestais do Sul e extremo Sul da Bahia, a Direção da ASPEX informou que possui 90 produtores de eucalipto associados, distribuídos em 10 municípios, totalizando 17,575 ha de eucalipto plantados. Em média, esses associados comercializam 70% da sua produção através de contratos com a empresa Veracel. Do total contratado, os associados podem comercializar até 3% livremente fora do contrato. Todos os associados da ASPEX são certificados duplamente pelo Forest Stewardship Council e pelo Programa Brasileiro de Certificação Florestal.

As florestas plantadas têm atendido a uma parte crescente da demanda por madeira (FAO, 2010), mas, apesar dos benefícios das plantações de madeira industrial, os impactos ambientais e a pressão sobre os recursos naturais das plantações monoespecíficas precisam ser reduzidos (FAO, 2010).

Uma alternativa para melhorar o desempenho ambiental dos sistemas florestais, é a adoção do sistema de Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), cujos princípios são descritos pela EPAMIG (2010) e Souza et al. (2007). Segundo Macedo et al. (2014), de modo geral, considera-se que as opções de sistemas agroflorestais com eucalipto, quando

¹² Jesus, G.A., ASPEX. Comunicação pessoal, Setembro, 2016.

confrontadas com os respectivos monocultivos, proporcionam ganhos ambientais e econômicos. Além de reduzir os custos de implantação e manutenção das florestas plantadas, reduz-se a pressão ambiental dos plantios florestais, ao tempo que proporciona a diversificação da produção e obtenção de renda com o cultivo de espécies agrícolas, durante o período de crescimento da floresta na mesma unidade de área.

Segundo Santana et al. (2014), maiores espaçamentos entre linhas como ocorre nos sistemas de ILPF, tem sido promissores sem reduzir significativamente a produtividade com a vantagem de reduzir o número de linhas por hectare e por facilitar outras operações mecanizadas.

O aumento do espaçamento permite a introdução de outras espécies e favorece o aumento de matéria seca da madeira por árvore em razão de seu maior crescimento em diâmetro. Ao contrário, espaçamentos reduzidos proporcionam maior produção de biomassa por unidade de área, em razão de se ter um maior número de indivíduos. A madeira colhida pode secar alinhada na parte central das entrelinhas, sem danificar as brotações e, conseqüentemente, a segunda rotação.

Nesse sentido, uma avaliação quantitativa com uma percepção mais completa sobre a realidade da produção florestal de eucalipto em condições tropicais foi apresentada neste estudo. Os resultados dos sistemas analisados, poderão auxiliar as empresas que atuam no setor florestal na identificação de pontos críticos da produção florestal, além de oportunidades ambientais e financeiras que não sejam oriundas somente do marketing das certificações, mas pela otimização dos seus processos.

3. Material e métodos

3.1. Caracterização da área de estudo

O extremo Sul da Bahia, Brasil, onde o estudo foi conduzido, abrange treze municípios, uma área de 18,536 km², e concentra 51% da área plantada de eucalipto do estado da Bahia (IBGE, 2015). O clima dessa região é tropical, quente e úmido com predominância de cobertura vegetal de floresta. A temperatura média anual varia entre 22 °C e 24 °C, e as temperaturas máximas e mínimas, chegam a 38 °C e 8 °C, respectivamente.

O período úmido se concentra de outubro a dezembro, na porção noroeste da bacia hidrográfica, e de dezembro a fevereiro para a área restante. A precipitação média anual está em torno de 1400 mm ano⁻¹, variando desde níveis próximos a 1000 mm ano⁻¹, em sua porção mais ocidental, até níveis superiores a 1600 mm ano⁻¹ (INEMA, 2012).

3.2. Coleta de dados

O primeiro contato com representantes do setor florestal da Bahia foi feito com a Associação Baiana das Empresas de Base Florestal (ABAF), com quem foram realizadas duas reuniões. A ABAF é afiliada da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). No segundo momento, foi realizada uma visita ao extremo Sul da Bahia dividida em duas etapas. A primeira etapa, para participar da Semana da Cadeia Produtiva Florestal da região Sul e extremo Sul da Bahia, evento organizado pela Associação dos Produtores de Eucalipto do Sul e Extremo Sul da Bahia (ASPEX). Durante o evento, foi visitada uma indústria de celulose e feitos contatos com produtores, indústrias de papel, celulose, madeireiras, empresas, órgãos públicos, fornecedores de materiais e insumos.

Na segunda etapa da visita, foram visitadas algumas fazendas de produtores de eucalipto que possuem contratos com as empresas Fibria Celulose e Suzano Papel e Celulose, além de um viveiro de mudas encontros com representantes da madeireira Lyptus, empresa na época pertencente à Fibria Celulose.

A Fibria Celulose é uma companhia de produção florestal, papel e celulose, a maior produtora mundial de celulose de fibra curta do mundo (Fibria, 2016), com uma base florestal total de 969 mil hectares, incluindo as áreas destinadas à conservação ambiental (Fibria, 2017a) e três unidades industriais no Brasil localizadas em Jacareí – São Paulo, Três Lagoas – Minas Gerais e Aracruz – Espírito Santo (Fig. 3).

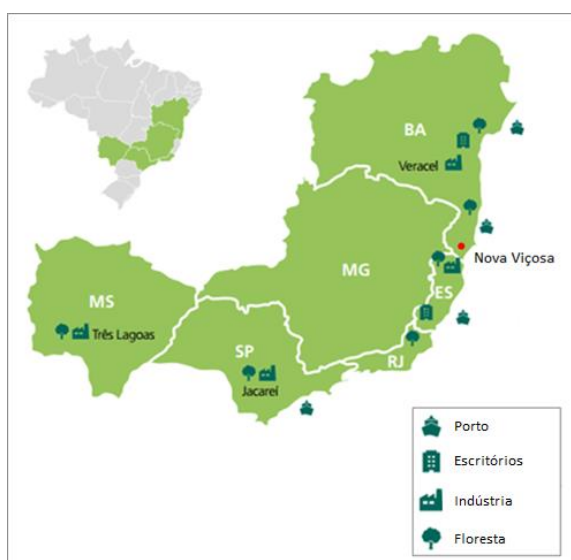


Fig. 3. Área de atuação da Fibria Celulose. Adaptado de Fibria Celulose (2016).

Este estudo abrange o sistema de produção adotado pela Fibria na área de atuação da unidade Aracruz. Embora o sistema de produção adotado seja o mesmo para as áreas de

fomento, próprias e arrendadas, este estudo foi delimitado ao sistema de produção do Programa de Fomento Florestal (PFF). Os dados foram coletados na unidade Florestal da Fibria Celulose no município de Nova Viçosa, Estado da Bahia, Brasil (Fig. 3).

3.3. Programa de Fomento Florestal

Além das áreas próprias e arrendadas, a Fibria desenvolve o Programa de Fomento Florestal em parceria com produtores florestais em suas três unidades industriais. O PFF fornece ao produtor fomentado, os recursos operacionais¹³, financeiros, assistência técnica, medição da área para formação florestal e posteriormente adquire a sua produção. Em 2015, o PFF da unidade Aracruz operou com 1853 contratos, totalizando 54,800 ha de eucalipto, e produziu 3,223,261 m³ de madeira (37% do seu abastecimento) (Fibria, 2017b).

As áreas de fomento que não fazem parte do escopo das certificações de manejo florestal Forest Stewardship Council (FSC®) e do Programa Brasileiro de Certificação Florestal (CERFLOR), são auditadas pelos critérios do Controlled Wood e Fontes Controversas, contemplando questões legais, ambientais, sociais, condições socioeconômicas e perfil das áreas adjacentes (Barros, 2016).

De acordo com Barros (2016), o fomento florestal caracteriza-se pela produção de matéria-prima para a indústria de celulose por parte dos produtores florestais, que recebem uma contrapartida de recursos financeiros e operacionais para custear a sua produção florestal. O produtor florestal se obriga a vender para a empresa, que se obriga a comprar toda a produção florestal da área contratada. Os preços são previamente fixados, pagos por metro cúbico com casca e reajustados duas vezes por ano de acordo com o Índice Nacional de Preços ao Consumidor, que é uma medida inflacionária do país.

O volume de madeira é apurado de acordo com o inventário florestal. Descontam-se desses valores, os recursos financeiros e operacionais fornecidos pela empresa, exceto as despesas com mudas e assistência técnica que fazem parte dos recursos operacionais. A madeira de origem de queimadas, outros sinistros ou fora da especificação é comprada pela empresa com um desconto de 30% sobre o preço pago pela madeira que está de acordo com as especificações.

3.4. Combinando ACV e PmaisL

¹³ De acordo com o contrato de fomento florestal (Fibria, 2016), recursos operacionais são mudas, fertilizantes, formicidas e herbicidas necessários à formação da floresta, os quais serão convertidos em m³ de madeira, tomando como base seu custo, a área contratada e o preço da madeira com casca na data da emissão da Nota Fiscal.

O método de PmaisL foi utilizado com base nas recomendações da UNIDO (2002) para fazer o diagnóstico ambiental e identificar oportunidades de melhoria ambiental dos sistemas silviculturais analisados. A aplicação da estratégia de PmaisL incluiu a avaliação ambiental e econômica das oportunidades ambientais identificadas. A ACV foi aplicada com base nas diretrizes ISO 14044 (2006) e recomendações do ILCD (EC-JRC, 2010). O uso conjunto da ACV e PmaisL seguiu as recomendações de Lopes et al. (2018). Segundo esses autores, o uso combinado destas ferramentas mostrou-se efetivo, à medida que a ACV identifica os pontos de maior impacto ambiental do sistema analisado, enquanto PmaisL apoia práticas que reduzem os custos de produção, o uso de água, energia, fertilizante e pesticida.

3.5. Unidade funcional

A unidade funcional adotada no presente estudo foi 1 m³ de madeira de eucalipto sem casca/ha por ciclo de 12 anos. A seleção da unidade funcional está de acordo com outros estudos de ACV (González-García et al., 2009a, Dias e Arroja, 2012), onde uma unidade funcional baseada em volume foi considerada. Os dados dos insumos foram padronizados para um hectare.

3.6. Limites do sistema

Neste estudo, foram incluídas as operações realizadas durante as etapas de produção de mudas, serviços iniciais de abertura de estradas, carregadores, aceiros, limpeza do terreno, preparo do solo, plantio, desenvolvimento florestal, manutenção e colheita da madeira (Fig. 4).

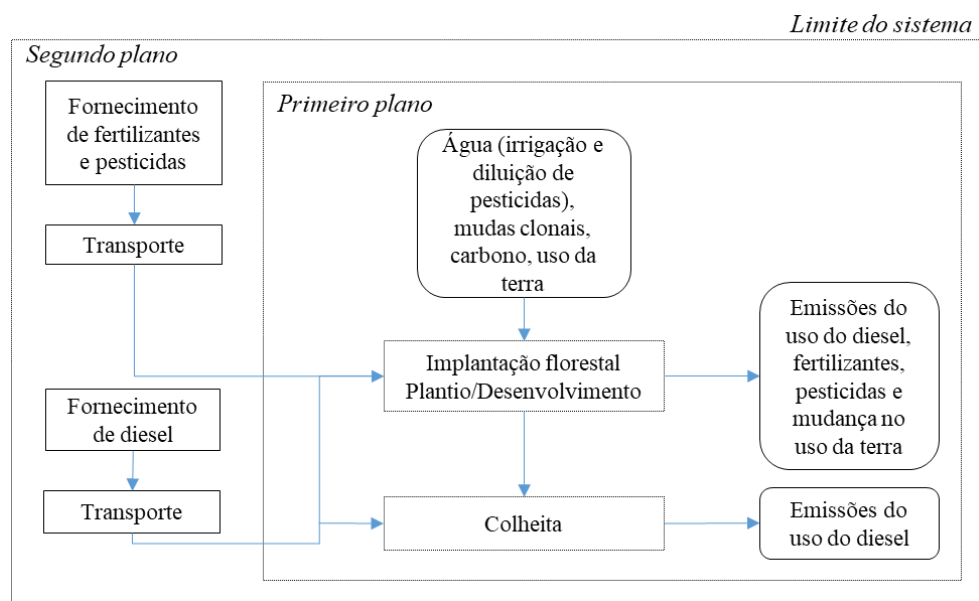


Fig. 4. Limites do sistema.

Considerou-se nos limites do sistema, a produção, transporte, uso de combustíveis, fertilizantes, pesticidas, transportes internos das máquinas, equipamentos florestais, veículos utilizados para o transporte de máquinas, extração e baldeio.

3.6.1. Sistemas florestais analisados

De acordo com a Fibria (2016), os plantios florestais da companhia são predominantemente formados por híbridos do cruzamento de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, selecionados por apresentarem melhor adaptação às condições edafoclimáticas locais. O sistema silvicultural é definido pelo tipo de manejo pelo qual se conduz a floresta de eucalipto. Este sistema vai ser determinado e utilizado de acordo com os produtos que se deseja obter da floresta. Nesse estudo, foram avaliados dois sistemas adotados nas áreas de plantio e um sistema alternativo integrando a produção florestal com lavoura e pecuária. Em todos os sistemas analisados considerou-se o ciclo de 12 anos.

a) Sistema convencional: implantação + reforma (S1)

Objetiva a produção de madeira com diâmetro relativamente reduzido e maior produtividade de biomassa por hectare, destinada a produção de celulose. O primeiro corte ocorre em média aos seis anos de idade rente ao solo, deixando o resíduo da colheita na linha de plantio que foi colhida, havendo um novo plantio nas entrelinhas seguido de um novo corte após seis anos. O espaçamento adotado é de 3 m x 3 m com 1111 plantas por hectare.

b) Sistema convencional: implantação + brotação (S2)

Consiste no corte das árvores a cerca de 15 cm do solo aos seis anos de idade e condução dos brotos das cepas para uma nova rotação que será colhida com seis anos. Na brotação, menos operações são realizadas porque não há um novo plantio, implicando em uma redução de insumos, porém, a produtividade é cerca de 10% menor. O espaçamento adotado é de 3 m x 3 m com 1111 plantas por hectare.

c) Sistema multiprodutos: Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) (S3)

Nesse sistema, assim como no S2, ocorre a condução de brotação na segunda rotação. O espaçamento é de 3.0 m x 1.5 m + 9 m com a mesma densidade de plantas dos sistemas anteriores. Consiste no desbaste sistemático de plantas (80% das plantas na primeira rotação) para favorecer o desenvolvimento das árvores remanescentes (20%) na segunda rotação no 12º ano, destinadas a serraria ou laminação, com diâmetro mínimo de 25 cm, cujo preço de mercado é o dobro em relação a madeira para celulose. O Incremento Médio Anual da madeira equivalente aos 20% (222 plantas) é aproximadamente 30% menor a partir do 7º ano e estabiliza até o final do ciclo. Portanto, há um rendimento menor dessa madeira quando se compara a mesma área no S2. No entanto, o diâmetro médio é aproximadamente o dobro, que, nesse caso é de interesse para o sistema multiprodutos onde o preço é maior.

Nesse sistema, foi avaliado o uso integrado de milho, pastagem, engorda de boi e eucalipto para usos múltiplos, com base no modelo de ILPF descrito por EPAMIG (2010) e Souza et al. (2007), que funciona conforme a Figura 6.

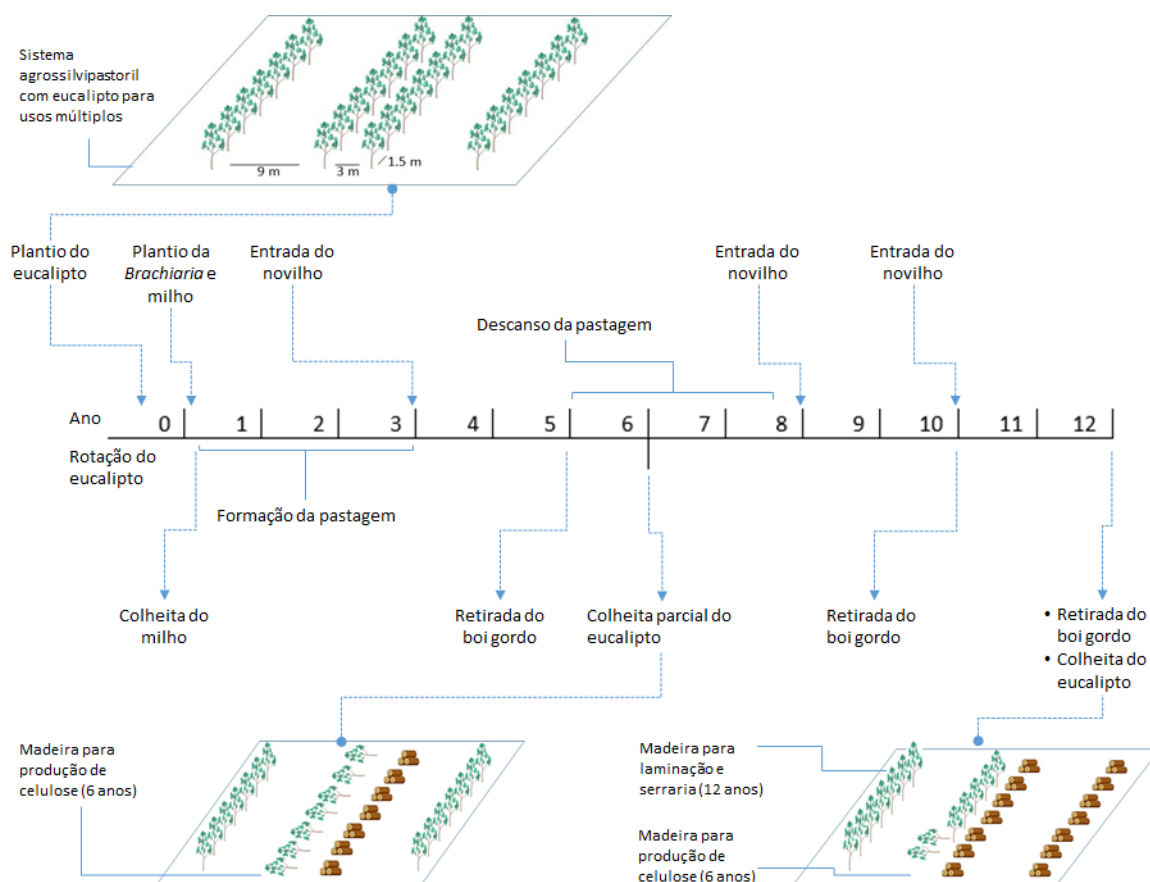


Fig. 6. Sistema multiprodutos: ILPF.

Ano 0 – Implantação do eucalipto com espaçamento de $(3.0 \times 1.5) + 9$ m para a população com densidade de $1111 \text{ plantas ha}^{-1}$.

Ano 1 – Plantio de milho nas entrelinhas do eucalipto, com espaçamento de 0.50 m, permitindo 14 linhas de milho, sobrando uma linha de cada lado da linha do eucalipto. Em seguida, a gramínea *Brachiaria* (10 kg ha^{-1}) é distribuída sobre a palhada do milho.

Ano 2 – Desenvolvimento do eucalipto e formação da pastagem.

Ano 3 – Introdução de 1.5 unidade animal ha^{-1} , considerando a média entre inverno e verão. Consideraram-se novilhos adquiridos com seis arrobas e ganho médio de peso de 0.5 arroba por mês. A área ocupada com pastagem é cerca de 0.5 ha, resultando em um ganho de peso equivalente a 4.5 arrobas ano^{-1} . Exceto, no período de descanso da pastagem, a cada dois anos os bois gordos são retirados e substituídos por novilhos (Souza et al., 2007).

Ano 4 – Engorda de novilhos e desenvolvimento do eucalipto.

Ano 5 – Retirada de bois gordos.

Ano 6¹⁴ – Colheita de 80% do eucalipto, o que equivale a 888 plantas destinadas a produção de celulose. Essas plantas irão brotar durante a segunda rotação. Os 20% restantes serão destinados a serraria.

Pousio da pastagem.

Ano 7 – Desenvolvimento do eucalipto.

Ano 8 – Entrada de novilhos.

Ano 9 - Engorda de novilhos e desenvolvimento do eucalipto.

Ano 10 – Entrada de novilhos e retirada de bois gordos.

Ano 11 – Engorda de novilhos e desenvolvimento do eucalipto.

Ano 12 – Retirada dos bois gordos, colheita do eucalipto para celulose (80% da rebrota aos seis anos), laminação e serraria (20% da primeira rotação aos 12 anos), encerrando o ciclo com dois eventos de colheita do eucalipto.

3.7. Inventário

Os dados do sistema silvicultural da Fibria Celulose correspondem ao inventário de materiais e energia previstos no contrato do Programa de Fomento Florestal celebrado entre a companhia e produtores rurais. A Fibria Aracruz opera em 155 municípios dos estados da Bahia, Minas Gerais e Espírito Santo. A distância média entre a base florestal e a unidade industrial localizada em Aracruz, no estado do Espírito Santo é de 233 km (Fibria, 2017b).

Esta etapa se iniciou com uma visita a unidade florestal da Fibria em Nova Viçosa, Bahia (coordenadas 17°53'46.3" S, 39°50'19.8" W), entre setembro e outubro de 2016 e os dados foram obtidos através de observação direta e entrevista a Barros (2016).

Foram visitados dois produtores (Fig. 5), um em fase de preparo solo e outro em fase de colheita. Diversas reuniões para obtenção de dados complementares foram realizadas com os técnicos do Programa Fitossanitário de Controle da Lagarta Parda, na Agência de Defesa Agropecuária da Bahia na cidade de Teixeira de Freitas.

¹⁴ Período médio de colheita de acordo com a Fibria Celulose (2016).
Fibria Celulose, 2016. Resumo do Plano de Manejo Florestal, Aracruz [Aracruz, Summary of the Forest Management Plan]. Disponível em http://www.fibria.com.br/shared/Resumo%20Plano%20de%20Manejo%20Florestal_Unidade%20Aracruz_Final_Site.pdf / Acessado em 14 de junho de 2017.



Fig. 5. Entrevista com produtor de eucalipto.

O Inventário do Ciclo de Vida consistiu no balanço de massa e energia do berço-ao-portão. Os dados da produção e transporte de matérias-primas foram obtidos da base de dados global de Inventário de Ciclo de Vida ecoinvent[®] (Wernet et al., 2016), utilizando a versão Alloc Rec (Moreno-Ruiz et al., 2014) com dados de eletricidade da matriz energética brasileira. As distâncias, tipo de veículo e consumo de diesel por operação foram obtidos na área de estudo (Tabela A.2). Os dados de consumo de diesel das máquinas, equipamentos agrícolas e caminhões foram obtidos na Fazenda de um produtor rural de eucalipto, parceiro do Programa de Fomento Florestal da Fibria. A mudança de uso da terra não foi considerada porque a maior parte das áreas de estudo, segundo Barros (2016), vem sendo utilizadas para o cultivo de eucalipto há mais de 30 anos.

Os dados da produção de mudas foram obtidos de Silva (2012). De acordo com Saraiva et al., (2017) os impactos relacionados ao transporte de trabalhadores é desprezível e foi desconsiderado nesse estudo.

As composições de pesticidas foram baseadas na especificação técnica dos fabricantes (Tabela A.1). As informações técnicas dos fertilizantes foram do fabricante Heringer, fornecedora da companhia e distante 412 km da área considerada no estudo. O inventário das emissões dos metais pesados dos fertilizantes e pesticidas para o ar, água e solo foi elaborado com base em dados locais de solo, planta e clima, delimitados ao Sul/extremo Sul da Bahia, de acordo com Nemecek e Schnetzer (2012). O transporte (menos de 1% dos impactos) das cinzas incluídas no sistema S3, entre a fábrica de celulose e as áreas de cultivo foi excluído pelo critério de corte.

Iniciativas relacionadas a Agricultura, Silvicultura e Outros Usos da Terra (AFOLU - Agriculture, Forestry and Other Land Use) (IPCC, 2014) adotam o balanço de carbono que

considera o carbono assimilado pelos sistemas agroflorestais. O balanço de carbono do caule do eucalipto que fica acima do solo ao longo do seu ciclo foi estimado com base no IPCC (2006):

$$C = V * D * CF * \frac{44}{12}$$

Onde:

C = sequestro de carbono (tCO₂)

V = incremento médio anual de madeira (m³ ha⁻¹)

D = densidade do eucalipto (t m³)

CF = fração de carbono da matéria seca (t C⁻¹)

44/12 = fator de conversão de C para CO₂

A biomassa dos galhos, cascas, folhas e raízes não foi incluída na análise como subprodutos. Assumiu-se que o carbono biogênico desses compartimentos permanece no sistema florestal contribuindo para melhorar as condições do solo. Essa perspectiva está de acordo com outros estudos como Berg e Lindholm (2005) e Dias e Arroja (2012).

De acordo com o IPCC (2006), considerou-se que a biomassa do capim *Brachiaria* e do milho decai e regenera ao longo do ano, fazendo com que a biomassa se estabilize em longo prazo, não havendo a necessidade de se considerar o balanço de carbono desses processos.

Com relação a mudança direta no uso da terra, as normas ISO 14040 e 14044 não fazem menção. De acordo com o ILCD, não há disposições amplamente aceitas sobre o uso da terra na Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (EC-JRC, 2010).

As fases de transformação da madeira em celulose e comercialização não foram incluídas neste estudo. Os preços dos insumos e da madeira estão previstos no contrato de fomento. A água utilizada durante o plantio é extraída de mananciais, não havendo cobrança pelo uso.

De acordo com EC-JRC (2010), na maioria dos estudos de ACV de bens e produtos simples, o inventário da função específica deve ser isolado, visto que o interesse reside no Inventário do Ciclo de Vida de apenas uma das cofunções. Assim, nesse estudo a multifuncionalidade foi resolvida repartindo-se as quantidades das entradas e saídas individuais entre as cofunções. A alocação mássica foi utilizada para comparar os sistemas de madeira para celulose e madeira para serraria ou laminação, 80% e 20%, respectivamente. De acordo com a ISO 14044 (2006), ratificado pela EC-JRC (2010), a alocação deve ser

realizada em conformidade com a relação física causal entre os diferentes produtos e funções. No caso das cofunções madeira e carne, como não há uma relação entre as propriedades da madeira e carne, foi adotado o procedimento de alocação de subdivisão de sistemas para evitar o particionamento de cargas. As madeiras do sistema S3 possuem valores de mercado distintos e por isso considerou a alocação econômica para comparar esses sistemas, excluindo o sistema da produção de carne bovina e, conseqüentemente, os sistemas da produção de milho e capim. Nesse estudo, considerou-se como carne, a carne fresca extraída após o abate bovino.

Desconsideraram-se do inventário os transportes dos trabalhadores, a produção de bens de capital, infraestrutura de máquinas e equipamentos (Dias e Arroja, 2012; Saraiva et al., 2017) e o uso de lubrificantes.

3.8. Operações florestais

Na análise do processo de produção do eucalipto, foram descritas as operações do sistema silvicultural, com o respectivo balanço de materiais e energia, desde a produção de mudas, implantação e manutenção florestal até a colheita.

a) Implantação florestal

A implantação florestal compreende os serviços iniciais de limpeza mecanizada da área, nivelamento do terreno, abertura de estradas, carregadores e aceiros. São serviços de intenso uso de máquinas e equipamentos agrícolas e florestais, realizadas na primeira rotação e posteriormente é feita a manutenção das estradas.

Em seguida, é feito o controle químico de plantas e insetos, principalmente formigas, seguido pelo preparo do solo com as operações de subsolagem, coveamento e adubação de fundação. As mudas são levadas ao campo e imersas em uma calda com água e fertilizante Mono-Amônio-Fosfato (MAP) para serem plantadas. São realizadas cerca de duas irrigações para estabelecimento das plantas e o replantio com cerca de 15% das mudas. No sistema S2, essas operações são reduzidas, uma vez que os serviços iniciais foram realizados e as plantas serão conduzidas para brotação, dispensando um novo plantio.

b) Manutenção/Desenvolvimento

A manutenção florestal visa garantir a sanidade e o desenvolvimento florestal com alta produtividade na colheita. Além da manutenção das estradas, são feitas capinas químicas, controle de insetos ao longo da rotação, controle químico de plantas nas linhas e entrelinhas de plantio, adubação de manutenção com NPK e aplicação de calcário. As operações dessa etapa são semelhantes nos sistemas S1 e S2.

c) Colheita florestal

A colheita compreende as operações que ocorrem na área plantada, desde a preparação e extração da madeira até o local de transporte para a área de estoque e processamento (Fig. 7). As operações são semelhantes em todos os sistemas analisados, exceto no S3, onde os deslocamentos das máquinas de colheita são mais curtos em função de uma menor quantidade de linhas de plantio.



a. Corte do eucalipto. Foto: Barros (2016).



b. Resíduos florestais após a colheita. Foto: Própria.



c. Vista do mosaico florestal. Foto: Barros (2016).



d. Extração e empilhamento de madeira. Foto: Própria.

Fig. 7. Colheita do eucalipto no extremo Sul da Bahia.

A colheita na Fibria é realizada por meio de diferentes sistemas utilizando o harvester e o forwarder. O harvester (Fig. 7a) corta, derruba, desgalha, descasca e traça o eucalipto em uma única operação. O forwarder (Fig. 7d) retira as toras de madeira do interior do plantio (extração) e as leva os carregadores na margem da estrada, formando pilhas que posteriormente serão carregadas e transportadas.

3.9. Oportunidades de PmaisL e estudos de viabilidade

As oportunidades de PmaisL identificadas foram descritas e, na ausência de dados em função de delimitações do estudo, algumas oportunidades ambientais foram caracterizadas qualitativamente, porém, não foram quantificadas ambiental e economicamente. Já as oportunidades ambientais consideradas na análise de sensibilidade, foram selecionadas com base em critérios técnicos e econômicos, nas medidas de controle (LaGrega et al., 1994) e necessidade de investimento financeiro compatível com os atuais custos de implementação destas medidas.

Os benefícios econômicos e os custos de insumos foram demonstrados. Uma análise mais detalhada dos custos das oportunidades selecionadas (redução no uso excessivo de fertilizantes, calcário, pesticidas e diesel) foi realizada. O payback foi calculado dividindo o custo do investimento pelo benefício econômico que pode ser obtido com as práticas recomendadas. Os preços e os custos se baseiam no contrato realizado entre produtor florestal atualizados até maio de 2018. Os dados detalhados sobre os custos podem ser encontrados na Tabela A.4.

Os impostos e administração não foram incluídos no custo de produção da madeira, enquanto as despesas com mão de obra foram incluídas. Os custos de produção referem-se a soma de recursos financeiros e recursos operacionais aplicados pela Fibria. A receita bruta foi estimada com base no volume de madeira com casca multiplicado pelo preço corrente em maio de 2018 (R\$ 60.00 m³) para madeira com casca destinada a celulose. A receita líquida é a receita bruta menos os recursos operacionais e financeiros disponibilizados pela Fibria Celulose.

3.10. Avaliação de impacto ambiental e energética

A avaliação de impacto ambiental foi conduzida com base na ISO 14044 (2006) e ILCD (EC-JRC, 2010). O método de avaliação dos potenciais impactos ambientais utilizado foi o ILCD 2011 midpoint versão 1.07. De acordo com EC-JRC (2012), para o nível de ponto médio há uma maior quantidade de categorias de impacto diferenciadas e os resultados são mais exatos e precisos em comparação com as áreas de proteção no nível de ponto de final.

Na avaliação comparativa dos sistemas de produção, utilizando o Simapro[®] 8.5, foram incluídas as seguintes categorias de impacto ambiental recomendadas no nível de ponto médio, de acordo com o pacote de métodos ILCD 2011 (EC-JRC, 2010): aquecimento global (GW), toxicidade humana (HT), oxidação fotoquímica (PO), acidificação (AC), eutrofização terrestre (EU-t), eutrofização aquática (EU-f), eutrofização marinha (EU-m), ecotoxicidade

(ET-f), uso da terra (LU) e depleção abiótica (RD). A demanda de energia acumulada foi avaliada com o método Cumulative Energy Demand (CED), de acordo com Jungbluth e Frischknecht (2007). O conceito de retorno energético, Energy Returned on Energy Invested (EROEI), foi usado com base no conteúdo energético de 1 m³ de madeira dividido pelo CED.

3.10.1. Análise de sensibilidade

O transporte e descarregamento da madeira, por se tratar de operações cujos impactos variam em função da distância de cada área de plantio até a fábrica, foi incluído apenas na análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade também considerou a influência da alocação econômica nos impactos ambientais dos dois tipos de madeira de eucalipto oriundos do sistema S3. Para definir os fatores de alocação econômicos, obteve-se inicialmente os fatores de alocação mássica que foram multiplicados pelos preços dos produtos, tendo como base os valores de mercado de junho de 2018 (Tabela 1).

Tabela 1

Alocação mássica e econômica para o sistema multiprodutos para produção de madeira para celulose e serraria considerando o ciclo de 12 anos.

1 ha	Número de plantas	Rendimento (m ³ ha ⁻¹)			Alocação mássica (%)	Preço (R\$ m ⁻³)	Total (R\$ ha ⁻¹)	Alocação econômica (%)
		Rotação 1	Rotação 2	Total ILPF				
20%	222	44.8	28.2	73.0	17.7	120	8762.9	30
80%	888	179.2	161.3	340.5	82.3	60	20,428.8	70
100 %	1111	224	189.5	413.5	100.0		29,191.7	100

4. Resultados e discussão

Na avaliação preliminar realizada durante o diagnóstico ambiental (Fig. 8) foram identificadas oportunidades de PmaisL aplicáveis a área de estudo com base em critérios técnicos e econômicos. Em seguida, selecionou-se as medidas possíveis de serem implementadas no menor prazo e com retornos ambiental e econômico. Essas medidas foram incluídas no sistema S3 e apresentadas na Avaliação de Impacto Ambiental (seção 4.4). As demais oportunidades identificadas devem considerar estudos de viabilidade técnico-econômica mais detalhados que não fazem parte do escopo deste estudo.

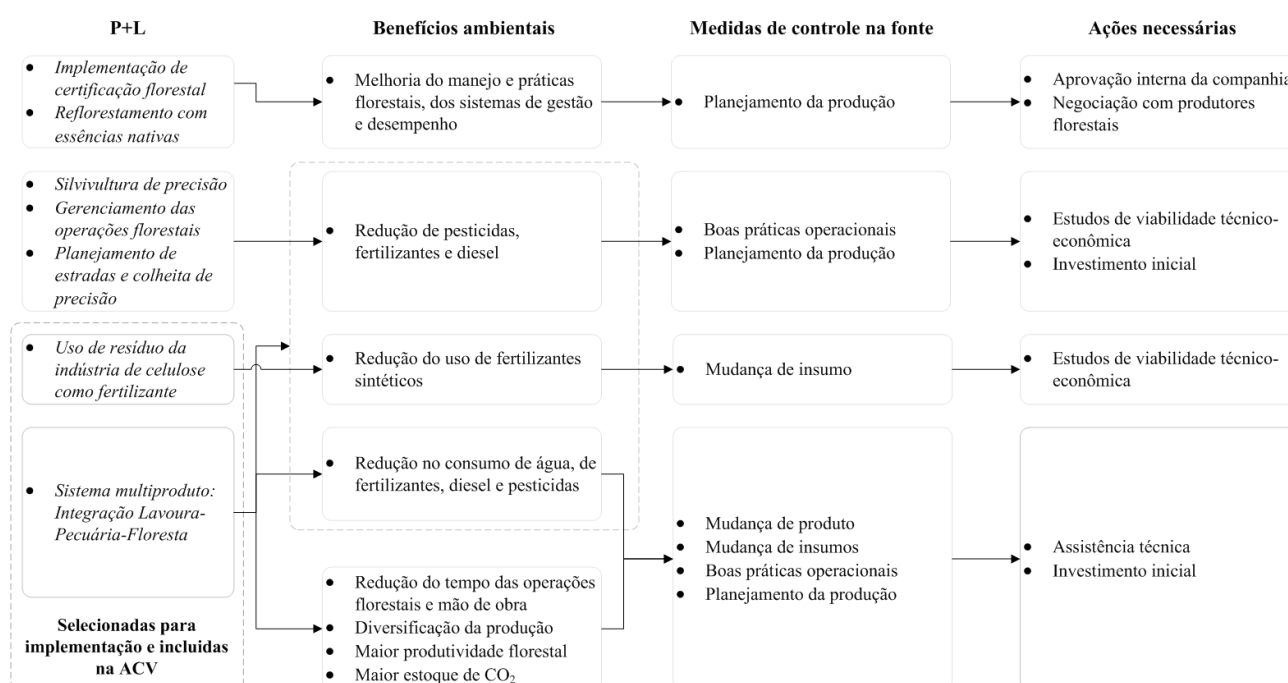


Fig. 8. Resumo das oportunidades de PmaisL identificadas e selecionadas para a produção de eucalipto no sistema S3 (ILPF). Nota: Medidas de controle na fonte de acordo com LaGrega et al. (1994).

Em seguida é apresentada uma análise das oportunidades de PmaisL identificadas nos sistemas analisados na avaliação preliminar. Mais detalhes sobre a viabilidade econômica e os impactos das oportunidades consideradas para implementação são descritos na seção seguinte.

4.1. Oportunidades de PmaisL e estudos de viabilidade

a) Silvicultura de precisão

As tecnologias de controle e monitoramento eletrônico das operações florestais permitem o constante alinhamento de plantio, adubação, correção do solo e aplicação de pesticidas, reduzindo a quantidade de insumos devido a melhor uniformidade de distribuição. Na ausência de informações sobre a viabilidade técnica e econômica desses sistemas, essa medida foi considerada apenas na avaliação preliminar qualitativa.

b) Gerenciamento das operações florestais

O volume de calda de pesticidas pode ser reduzido em até 25%, por meio da adoção de sistemas dosadores de precisão. O ajuste do pH da água utilizada na diluição dos pesticidas é também uma medida que deve ser considerada. Cada pesticida possui uma faixa ideal de absorção de acordo com o pH da solução, que via de regra, é desprezado no momento da aplicação. A não observação desse aspecto implica em maior quantidade de produto sendo aplicada por uma baixa eficiência do mesmo. A implementação dessa medida requer ensaios de campo para avaliar a eficiência dos pesticidas utilizados em diferentes faixas de pH e, portanto, considerou-se apenas na avaliação preliminar.

c) Planejamento de estradas e colheita de precisão

O traçado das estradas quando executado o mais próximo das linhas de curva de nível, circulando a fazenda, maximiza a colheita e o transporte interno. Para a implementação dessa medida, é necessário a definição de pontos de extração determinados com base em modelos que otimizem a distância média. O planejamento desses pontos deve ser realizado antes da abertura de estradas. Observou-se em campo que frequentemente as atividades de colheita e transporte são realizadas sem essa otimização, implicando em maior tempo para execução e maior consumo de diesel.

A adoção dessas medidas implica, segundo Ruas et al. (2014), em uma maior confiabilidade nas informações das atividades dos operadores; comparativo entre o planejado e o realizado; redução do transporte a partir de mapas de navegação; gerenciamento da frota de tratores; redução das filas de caminhões e otimização do uso dos transbordos. A adoção dessa medida requer a aquisição de softwares e testes em campo, investimentos financeiros e aceitação por parte da empresa.

d) Implementação do FSC® (Forest Stewardship Council) e CERFLOR (Programa

Brasileiro de Certificação Florestal

Segundo a WWF (2015), o Brasil é hoje o país com maior área de florestas e o maior número de produtos certificados pelo FSC®. No entanto, Araujo et al. (2009) verificaram que não há incentivos de mercado para a adoção da certificação florestal e que as empresas não são melhor remuneradas por certificarem sua produção. Por outro lado, estes autores concluíram que a certificação florestal proporciona confiança pública, melhoria do manejo e práticas florestais, melhoria dos sistemas de gestão e desempenho e melhor comunicação pública. Esses benefícios associados a outras medidas se traduzem em oportunidades econômicas e ambientais que precisam de uma análise mais detalhada.

Foi verificado nesse estudo que os produtores do Programa de Fomento Florestal não são obrigados a adotar programas de certificação florestal. No entanto, alguns, por iniciativa própria já adotam essas diretrizes e estão se habilitando para implementar a certificação. Essa medida não apresenta retornos ambientais e financeiros diretos, por isso foi considerada apenas na avaliação preliminar.

e) Reflorestamento com essências nativas

No Programa de Fomento Florestal, opcionalmente o produtor pode receber mudas de essências nativas para plantio equivalente a 3.5% do total de mudas de eucalipto previstas em contrato. A sugestão é que o reflorestamento com essas essências nativas seja obrigatório. Essa é uma medida que implica em alterações contratuais no Programa de Fomento Florestal a serem analisadas por parte da empresa.

f) Uso de resíduo da indústria de celulose como fertilizante

O uso de cinzas como fonte de nutriente para a planta é recomendado principalmente em solos mais pobres, fazendo-se a complementação do fósforo e potássio (Hytönen; Moilanen, 2014). De acordo com Saraiva et al. (2017), as cinzas produzidas em fábricas de celulose são comumente utilizadas como fertilizante. As cinzas produzidas na fábrica da Fibria poderiam substituir 9% do nitrogênio, 24% do fósforo, 26% do potássio e 47% do enxofre. Devido a uma limitação do modelo de cálculo (Nemecek e Schnetzer, 2012), as emissões das cinzas para o solo não foram consideradas. Saraiva et al. (2017) consideraram que as cinzas resultariam nas mesmas emissões de campo de NO_3^- , N_2O , NH_3 e PO_4^- por kg de nitrogênio e fósforo minerais aplicados.

g) Sistema multiprodutos: Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta

O sistema ILPF (S3) é uma alternativa de produção discutida na literatura para outras culturas, que melhora o desempenho ambiental dos sistemas florestais analisados. Além de incluir a criação de gado, no ILPF não é necessário reformar a área na segunda rotação do eucalipto. A produção de madeira para outros mercados (fracionamento da colheita conforme Figs. 9 e 10) além da celulose, possibilita um maior ganho econômico para o produtor florestal, que também deixa de depender da venda de um único produto com comprador e preço predefinidos.

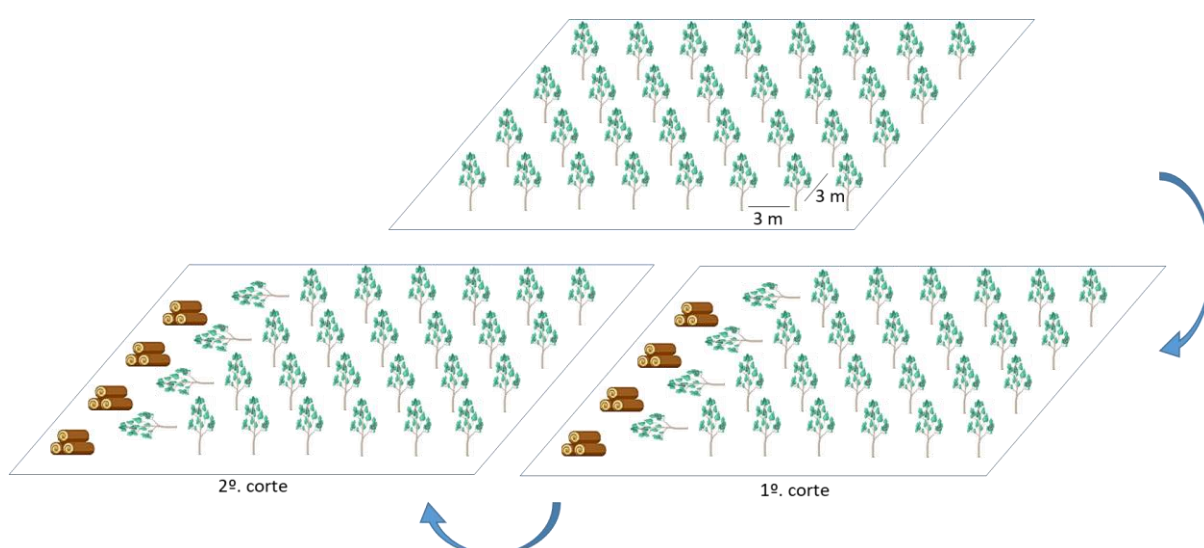


Fig. 9. Esquema de plantio e colheita do eucalipto nos sistemas convencionais.

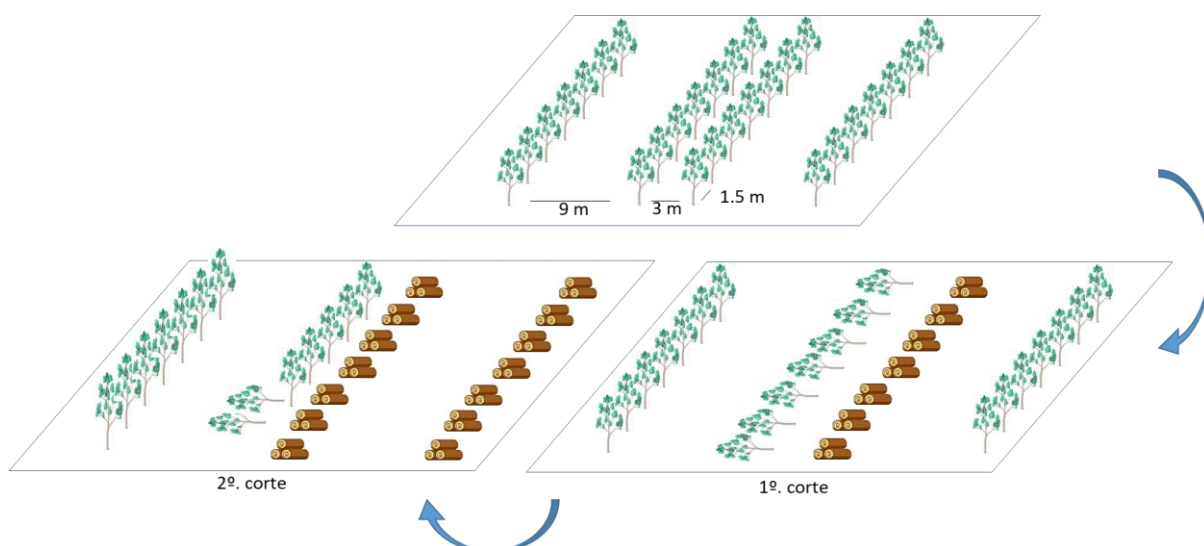


Fig. 10. Esquema de plantio e colheita do eucalipto no sistema de multiproduto.

No ILPF (Fig. 10) as linhas de plantio são reduzidas de 33 para 16 e, conseqüentemente, o tempo de operações florestais, o uso de máquinas, a quantidade de

diesel, pesticidas, água e mão de obra. O menor uso de máquinas implica em melhores condições físicas para o solo, permitindo em clima mais seco, um maior desenvolvimento de sistemas radiculares pivotantes para melhor absorção de água em camadas mais profundas do solo. Essa perspectiva de redução de diesel e fertilizantes que relacionada a acidificação, aquecimento e eutrofização, contribui para amenizar os efeitos das mudanças climáticas, e, segundo Baesso et al. (2002) e Booth (2013), em médio e longo prazos afetarão negativamente a produção e comercialização do eucalipto. A redução do número de linhas também reduz o tempo e o diesel consumidos na colheita mecanizada que, segundo Morales et al. (2015) e González-García et al. (2009a) corroborados por esse estudo, é um ponto crítico, sendo responsável pela maior parte das contribuições dos impactos ambientais da produção de eucalipto.

De modo geral, os resultados desse estudo indicaram oportunidades de melhoria contínua do sistema florestal, que reduzem a quantidade de resíduos e permitem ganhos econômicos imediatos (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2

Resumo da avaliação econômica e ambiental entre sistemas de produção.

Oportunidade	Unidade	Benefício ambiental		Benefício econômico (R\$) (ha ano) ⁻¹		Estimativa do custo de investimento (R\$) (ha ano) ⁻¹	Payback (ano)
		S1 para S2	S1 para S3	S1 para S2	S1 para S3		
Água ¹⁵	m ³ (ha ano) ⁻¹	15.31	17.19	-	-	0.00	Imediato
Redução de fertilizante (NPK e micronutrientes)	kg (ha ano) ⁻¹	46.15	219.23	87.22	414.34	0.00	Imediato
Redução de calcário	t (ha ano) ⁻¹	0.20	0.20	7.00	7.00	0.00	Imediato
Redução de pesticida						0.00	Imediato
<i>Glifosato</i>	L (ha ano) ⁻¹	2.00	10.16	333.74	360.38	0.00	
<i>Evidence</i>	kg (ha ano) ⁻¹	0.50	0.50	21.60	21.60	0.00	
<i>Fordor</i>	kg (ha ano) ⁻¹	0.10	0.18	53.50	96.30	0.00	
Redução de diesel	L (ha ano) ⁻¹	242.59	327.78	921.86	1245.58	0.00	Imediato
Total				1424.92	2145.20	0.00	

Tabela 3

Resumo da avaliação econômica e ambiental das oportunidades de PmaisL.

Descrição	S1	S2	S3
Custo de produção da madeira (R\$ ha ⁻¹)	9974.7	8317.2	7485.5
Receita bruta da venda da madeira (R\$ ha ⁻¹)	26,880.0	20,940.0	29,191.7
Receita bruta da venda do boi (R\$ ha ⁻¹) ¹⁶			3672.0
Receita total (R\$ ha ⁻¹)	26,880.0	20,940.0	32,863.7

¹⁵ Considerou-se a água utilizada para diluir os pesticidas e irrigação das mudas de eucalipto, oriunda de rio ou subterrânea e, portanto, não cobrada pelo uso.¹⁶ Considerou-se o preço de R\$ 136.00 por arroba de boi gordo, conforme cotação da Scot Consultoria para o mês de junho de 2018, referente ao mercado do Sul da Bahia (<https://www.noticiasagricolas.com.br/cotacoes/boi>).

No sistema S3, há uma redução média de 33% dos insumos. Há uma maior redução do pesticida Fordor (90%), seguida pelo Glifosato (63%) e Evidence (50%). A água também possui uma redução considerável de cerca de 46% e os fertilizantes de 28%. No S2, a redução média dos insumos foi de 20%.

Os benefícios econômicos (Tabela 2) estimados nesse estudo foram de R\$ 1424.92 ha⁻¹ e R\$ 2145.20 ha⁻¹, para os sistemas S2 e S3, respectivamente. Esses resultados representam uma economia de 17% (S2) e 28% (S3) nos custos de produção (Tabela 3), não incluindo o desperdício de água que provém de poços ou rios não sendo cobrado o consumo. O diesel representa um benefício econômico de R\$ 1245.58 ha⁻¹ ou 58% do total de benefícios (S3) e R\$ 974.97 ha⁻¹ ou 65% do total de benefícios (S2), respectivamente. Em S2, os pesticidas representam um benefício econômico de R\$ R\$ 333.74 ha⁻¹ ou 29% e os fertilizantes, R\$ 87.22 ha⁻¹ ou 6%. Em seguida, para S3, os pesticidas representam um benefício econômico de R\$ 360.38 ha⁻¹ ou 22% e os fertilizantes, R\$ 414.34 ha⁻¹ ou 19%.

No sistema S1, a receita bruta total foi de R\$ 26,880 ha⁻¹, no S2, R\$ 20,940 ha⁻¹ e no S3, R\$ 32,863.7 ha⁻¹. A receita do S3 foi 9% a mais que S1. Embora o Incremento Médio Anual da madeira para serraria seja menor no S3, o preço desse produto é o dobro da madeira para celulose. Incluindo a receita com a venda dos bois, a diferença de receita entre S3 e S1 foi de 22%.

4.2. Inventário

Na Tabela 4 são apresentados os dados brutos do inventário de massa e energia da produção de eucalipto para os sistemas analisados, desde a produção de mudas até a colheita.

Tabela 4

Inventário portão ao portão para produção em diferentes sistemas de cultivo para 1 ha/ano.

Fluxos	I ^a	R ^b	I ^a	B ^c	I ^a	B ^c	Unidade	(GSD ²) ¹⁷	Fonte
Entrada	S1 (I+R)		S2 (I+B)		S3 (ILPF)				
Transformation, from pasture, man made, extensive	1.00		1.00		1.00		ha	2.01	Coletado
Transformation, from forest, intensive, normal		1.00		1.00		1.00	ha		Coletado
Transformation, to forest, intensive, normal	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	ha	2.01	Coletado
Occupation, forest, intensive, normal	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.50	ha a	1.51	Coletado
Carbon dioxide, in air	370.00		349.00		342.00		ton	1.22	Estimado
Irrigation {BR} market for Alloc Rec, U	37,124,74		21,812.37		19,937.37		L	1.07	Coletado
Calcareous marl {GLO} market for Alloc Rec, U	2000.00		1800.00		1800.00		kg	1.09	Coletado
Nitrogen fertiliser, as N {GLO} market for Alloc Rec, U	152.52		143.76		131.06		kg	1.09	Coletado
Phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅ {GLO} market for Alloc Rec, U	210.74		194.47		149.27		kg	1.09	Coletado
Potassium chloride, as K ₂ O {GLO} market for Alloc Rec, U	307.44		291.42		216.41		kg	1.09	Coletado
Borax, anhydrous, powder {GLO} market for Alloc Rec, U	6.00		5.70		5.70		kg	1.09	Coletado
Copper sulfate {GLO} market for Alloc Rec, U	3.00		2.85		2.85		kg	1.09	Coletado
Sulfur {GLO} market for Alloc Rec, U	90.00		85.50		45.33		kg	1.09	Coletado
Zinc monosulfate {GLO} market for Alloc Rec, U	3.00		2.85		2.85		kg	1.09	Coletado
Glyphosate {RoW} production Alloc Rec, U	9.95		8.69		3.53		kg	1.09	Coletado
Pesticide, unspecified {RoW} production Alloc Rec, U	0.93		0.51		0.46		kg	1.09	Coletado
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {GLO} market for Alloc Rec, U	1717.33		1590.92		1587.18		tkm	2.24	Coletado
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO} market for diesel, burned in agricultural machinery Alloc Rec, U	70,012.94		61,368.84		58,333.38		MJ	1.12	Estimado
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO} market for diesel, burned in agricultural machinery Alloc Rec, U ¹⁸	141,686.92		131,752.48		127,913.57		MJ	1.12	Estimado
Saída (emissões para o ar)									
Ammonia	7.40		6.98		6.37		kg	1.32	Calculado
Dinitrogen monoxide	12.10		11.93		11.68		kg	1.48	Calculado
Nitrogen dioxide	2.54		2.50		2.45		kg	1.48	Calculado
Fossil carbon dioxide	953.34		858.00		858.00		kg	1.30	Calculado

¹⁷ Squared geometric standard deviation.^a Implantação^b Reforma^c Brotação¹⁸ Referente ao transporte e descarregamento, considerados na análise de sensibilidade.

Saída (emissões para a água subterrânea)

Nitrate	509.52	497.84	480.91	kg	1.58	Calculado
Phosphorus	0.14	0.14	0.14	kg	1.58	Calculado
Cadmium	88.60	87.70	84.54	mg	1.58	Calculado
Chromium	40,464.72	40,309.12	39,709.49	mg	1.58	Calculado
Copper	6216.68	6143.08	5900.04	mg	1.58	Calculado
Lead	320.98	303.48	249.08	mg	1.58	Calculado
Zinc	34,537.94	33,243.86	29,153.52	mg	1.58	Calculado

Saída (emissões para a água superficial)

Phosphorus	0.44	0.43	0.41	kg	1.58	Calculado
Cadmium	0.08	0.08	0.08	mg	1.58	Calculado
Chromium	6.98	6.96	6.86	mg	1.58	Calculado
Copper	10.32	10.20	9.79	mg	1.58	Calculado
Lead	2.04	1.93	1.58	mg	1.58	Calculado
Nickel	5.32	5.20	4.79	mg	1.58	Calculado
Zinc	11.18	10.77	9.44	mg	1.58	Calculado

Saída (emissões para o solo)

Cadmium	10,802.28	9965.28	7640.47	mg	1.53	Calculado
Chromium	114,009.24	103,227.80	71,240.65	mg	1.53	Calculado
Copper	24,823.10	22,728.40	17,061.75	mg	1.53	Calculado
Lead	13,569.74	12,601.32	9757.20	mg	1.53	Calculado
Nickel	26,096.44	24,191.29	18,891.59	mg	1.53	Calculado
Zinc	180,362.80	167,253.73	130,556.99	mg	1.53	Calculado
Imidacloprid	0.70	0.35	0.35	kg	1.80	Estimado
Isoxaflutole	0.15	0.08	0.04	kg	1.80	Estimado
Glyphosate	9.92	8.68	3.65	kg	1.80	Estimado
Mirex	0.03	0.01	0.01	kg	1.80	Estimado

Saída (produto final)

Madeira de eucalipto sem casca	448.00	425.60	413.50	m ³	-	Coletado
--------------------------------	--------	--------	--------	----------------	---	----------

Os resultados desse estudo (Tabela 4) com base nos dados coletados em campo, mostraram uma maior demanda de recursos naturais para S1 e S2. Materiais, combustíveis, eletricidade e calor foram mais demandados para o sistema de referência S1, onde há um novo plantio a cada rotação/ciclo. Consequentemente, mais operações florestais implicam em maior demanda por combustíveis fósseis, responsável pela maior parte dos impactos.

As operações são semelhantes em todos os sistemas, exceto o sistema de produção do boi considerado em S3. O sistema S3 em relação ao S1 reduziu o consumo de água (46%) utilizada nas irrigações de plantio, replantio e caldas de pesticidas, fertilizantes (28%), pesticidas (25%), diesel (17%) e calcário (10%). Em S2, houve redução no consumo de fertilizantes (24%), pesticidas (20%), água (9%) e diesel (5%).

Em cada rotação, os fertilizantes aplicados são semelhantes entre os sistemas, sendo a mistura fertilizante NPK 10-22-14 utilizada para a adubação de fundação e NPK 10-00-30 durante o desenvolvimento e manutenção das plantas. Esses materiais fertilizantes contêm micronutrientes como enxofre, boro, cobre e zinco. Em todos os sistemas, o nutriente mais consumido é o potássio (K_2O), seguido pelo fósforo (P_2O_5) e nitrogênio (N). No S3, a demanda por esses nutrientes é menor. Porém, em termos quantitativos, não foi observado uma fertilização intensiva, considerando que esses materiais são utilizados ao longo de 12 anos em cada sistema.

A produção florestal do S1 ($448 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) foi maior, enquanto no S2 e S3 houve uma ligeira redução. No S2 a produção ($425 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) do eucalipto é cerca de 10% menor em relação ao S1. No S3 ($413 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), cujo objetivo é produzir não só madeira para celulose como para serraria, faz-se necessário priorizar o diâmetro de madeira destinada a serraria, o que implica em uma menor produtividade de biomassa por hectare. No entanto, enquanto a madeira para celulose é comprada por R\$ 60.00 m^{-3} , paga-se o dobro pela madeira para serraria.

As emissões do S1 foram maiores do que S2 e S3 devido a uma maior quantidade de fertilizantes e pesticidas aplicados nesse sistema. Exceto as emissões de fósforo e cádmio para a água, houve uma redução para todas as emissões, tanto no S2 como no S3.

Conforme pode ser observado nos resultados (Tabela 4), as florestas plantadas de eucalipto em regiões tropicais funcionam como mecanismo de sequestro de carbono ao longo do ciclo. A relevância ambiental desse estoque de carbono (González-García et al., 2009a), pode ser verificada em todos os sistemas, destacando-se o sistema de referência ($370 \text{ t CO}_2 \text{ eq/ha}$). No S3 houve um menor estoque de carbono em função do tipo da madeira e

dimensões desejadas, o que está de acordo com Herrero et al. (2014) que, além desses parâmetros, menciona que a idade e o manejo também influenciam no sequestro de carbono. Os resultados positivos de estoque de carbono desse estudo, estão de acordo com Ferez et al. (2015), que observaram um maior sequestro de carbono em sistemas silviculturais mais intensivos. No entanto, Morales et al. (2015) alertam que práticas de manejo mais intensivas implicam em maior número de operações que prejudicam o solo. O manejo adequado do solo com base em práticas conservacionistas pode reduzir esses efeitos negativos. A proteção de nascentes, delimitação de áreas de preservação e reserva legal, recuperação de áreas degradadas também são ações importantes que foram observadas em algumas áreas visitadas durante esse estudo.

4.3. Avaliação de impacto ambiental e energética

Os potenciais impactos ambientais dos sistemas analisados são apresentados na Figura 11.

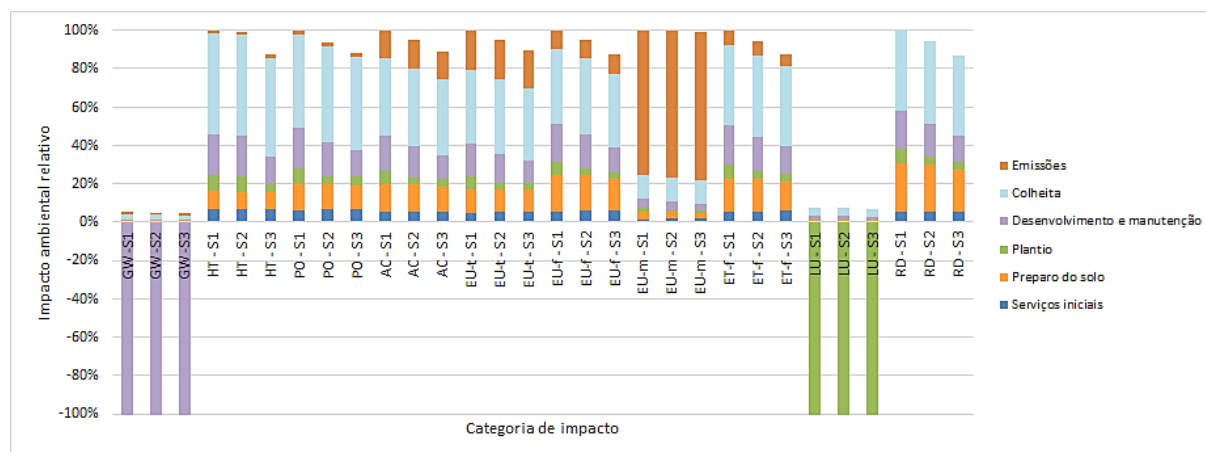


Fig. 11. Contribuição dos potenciais impactos ambientais por subprocesso dos sistemas de primeiro e segundo planos para S1, S2 e S3, berço-ao-portão do produtor. Siglas: aquecimento global (GW), toxicidade humana (HT), oxidação fotoquímica (PO), acidificação (AC), eutrofização terrestre (EU-t), eutrofização aquática (EU-f), eutrofização marinha (EU-m), ecotoxicidade (ET-f), uso da terra (LU) e depleção abiótica (RD).

Com base nos resultados (Fig. 11), o sistema S2 reduziu o impacto ambiental em sete das dez categorias de impacto analisadas: toxicidade humana (-0.60%), oxidação fotoquímica (-6.31%), acidificação (-5.29%), eutrofização terrestre (-4.97%), eutrofização aquática (-4.91%), ecotoxicidade (-5.67%) e depleção abiótica (-5.83%). Nas demais categorias houve um aumento do impacto: aquecimento global (0.88%), eutrofização marinha (0.87%) e uso da terra (6.76%). No caso de GW, esse aumento foi benéfico porque o resultado do impacto foi negativo, então no S2 o estoque de carbono biogênio é ligeiramente maior. Em S2 o incremento médio anual de madeira é menor com o mesmo nível de entrada

de nitrogênio que o S1. Com isso, o resultado para EU-m, cujo fator de caracterização tem como base as emissões de nitrogênio foi superior ao S1.

O sistema S3 (Fig. 11) também reduziu os impactos em oito das dez categorias de impacto ambiental analisadas: toxicidade humana (-12.82%), oxidação fotoquímica (-11.72%), acidificação (-11.36%), eutrofização terrestre (-10.45%), eutrofização aquática (-12.53%), ecotoxicidade (-12.87%), depleção abiótica (-13.22%) e eutrofização marinha (-0.95%). Houve um aumento dos impactos para as categorias aquecimento global (1.18%) e uso da terra (10.61%). Além de reduzir os impactos para a maioria das categorias analisadas, no S3 há uma diversificação da produção e aumento da renda por unidade de área, o que representou vantagens econômicas e ambientais para esse sistema.

Nos três sistemas analisados, a colheita, preparo do solo e desenvolvimento e manutenção, impactaram mais na maior parte das categorias analisadas (HT, PO, AC, EU-t, EU-f, ET-f e RD). As operações de colheita e preparo do solo consomem grandes quantidades de diesel o que explica esses resultados. Morales et al. (2015) e González-García et al. (2009a) também verificaram que a etapa de colheita contribui com a maior parte dos impactos. Os métodos de colheita afetam o solo e a ciclagem de nutrientes (Hytönen e Moilanen, 2014) e, nesse sentido as medidas de PmaisL analisadas apresentadas na seção 4.1, como planejamento de estradas e silvicultura de precisão podem contribuir para reduzir os impactos da etapa de colheita.

As emissões da combustão de combustíveis fósseis, em maior quantidade de máquinas utilizadas na colheita contribuem para categorias de impacto como GW, AC e PO. Durante o desenvolvimento e manutenção dos plantios florestais ocorre o sequestro de CO₂. Portanto, para GW essa etapa influencia mais no resultado cujo impacto é negativo. As emissões de substâncias eutrofizantes como N₂O ou NO³⁺ associadas à aplicação de fertilizantes contribuíram mais nas categorias de EU-m e GW.

Houve dificuldade de comparar diretamente os nossos resultados com outros estudos de ACV porque as condições de cada estudo são diferentes. Autores como Morales et al. (2015), González-García et al. (2009a) e Silva et al. (2015a) consideraram algum produto obtido da madeira como unidade funcional, o que também dificulta uma comparação direta. Em condições semelhantes a desse estudo, Saraiva et al. (2017) verificaram que o impacto da produção de eucalipto para celulose foi de 47 kg CO₂ eq t MS⁻¹ não incluindo o sequestro de carbono biogênico. Neste estudo, desconsiderando o sequestro de carbono biogênico, os resultados foram de 49.4 kg CO₂ eq m⁻³ (S1), 47.3 kg CO₂ eq m⁻³ (S2) e 45.1 kg CO₂ eq m⁻³ (S3).

Desconsiderando o sequestro de CO₂, fez-se também uma análise ambiental-econômica para os sistemas analisados com uma abordagem diferente, utilizando o critério de receita por impacto gerados, onde o sistema S3 apresentou um melhor perfil. Para cada kg de CO₂ eq são gerados R\$ 1.21 (S1), R\$ 1.04 (S2) e R\$ 1.40 (S3). Incluindo o estoque de carbono, os resultados foram -784 kg CO₂ eq m⁻³ (S1), -791 kg CO₂ eq m⁻³ (S2) e -793 kg CO₂ eq m⁻³ (S3).

O balanço energético para os sistemas analisados é demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5

Balanço energético para a produção de 1 m³ de madeira de eucalipto.

Sistema de produto	Unidade	Entrada	Saída	Saldo	EROEI
S1	MJ m ³	8582.4	500	8082.4	17.16
S2	MJ m ³	8582.4	469	8113.4	18.30
S3	MJ m ³	8582.4	437	8145.4	19.64

Os sistemas de produto apresentaram balanços energéticos positivos com melhor saldo energético para o S3. A demanda de energia acumulada de um produto ou sistema caracteriza o uso de energia direta e indireta ao longo do ciclo de vida. Tanto a energia renovável como a energia fóssil estão incluídas. Essa é uma avaliação importante nos sistemas florestais, a fim de garantir que não seja consumida mais energia do que é produzida. O EROEI pode variar consideravelmente em função do local e das tecnologias adotadas. Na ausência estudos similares para esse parâmetros, não foi possível fazer uma análise comparativa dos resultados da Tabela 5.

4.4. Análise de sensibilidade

a) Consideração do transporte da madeira

Os resultados da avaliação de impacto ambiental do berço-ao-portão incluindo o transporte e o descarregamento da madeira na análise de sensibilidade são mostrados na Figura 12.

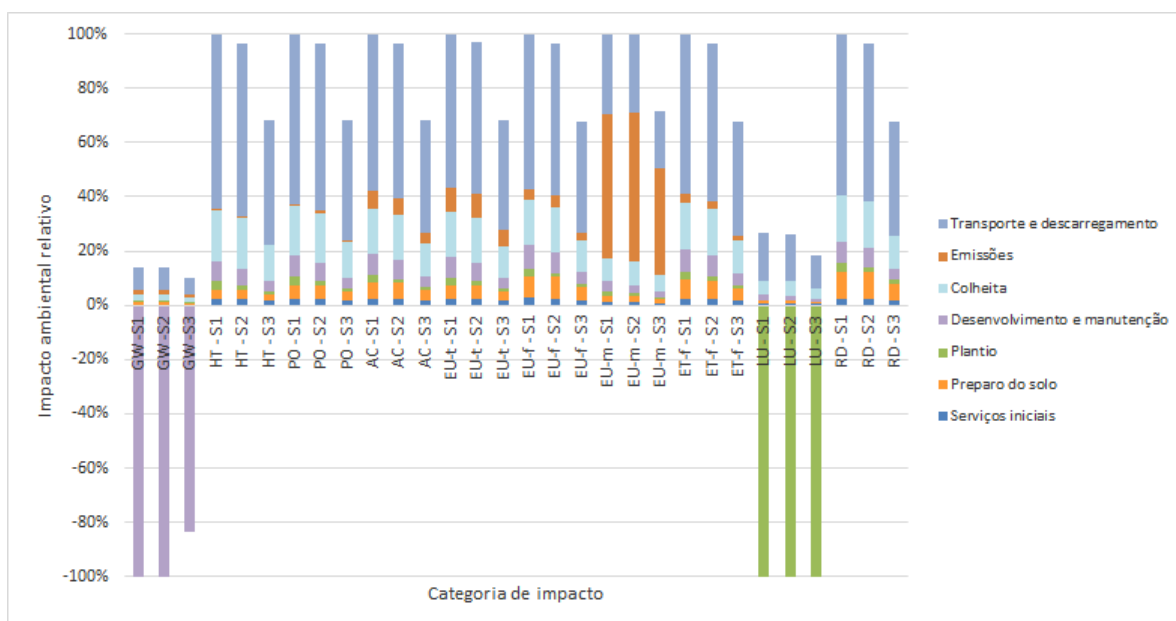


Fig. 12. Contribuição dos potenciais impactos ambientais por subprocesso dos sistemas de primeiro e segundo plano para S1, S2 e S3, berço-ao-portão do produtor. Siglas: aquecimento global (GW), toxicidade humana (HT), oxidação fotoquímica (PO), acidificação (AC), eutrofização terrestre (EU-t), eutrofização aquática (EU-f), eutrofização marinha (EU-m), ecotoxicidade (ET-f), uso da terra (LU) e depleção abiótica (RD).

O transporte e descarregamento da madeira no limite do sistema, aumentou os impactos ambientais de todas as categorias de impacto ambiental analisadas para todos os sistemas. Exceto em GW e LU, o S3 se beneficiou em relação a S2 e S1 porque o volume de madeira transportada é menor e, consequentemente, o consumo de diesel foi reduzido consideravelmente. O impacto do transporte secundário da madeira é devido as emissões de combustíveis fósseis no transporte da madeira desde a área de produção até a unidade industrial da Fibria que se localiza a 233 km.

Os resultados para categorias de impacto ambiental analisadas mostram as diferenças entre S2 e S3 em relação a S1: aquecimento global (1.12%; -26.55%), toxicidade humana (-3.60%; -31.71%), oxidação fotoquímica (-3.53%; -31.63%), acidificação (-3.32%; -31.86%), eutrofização terrestre (-3.22%; -31.66%), eutrofização aquática (-3.24%; -32.31%), eutrofização marinha (0.05%; -28.50%), ecotoxicidade (-3.45%; -32.24%), uso da terra (8.29%; -18.30%) e depleção abiótica (-3.49%; -32.32%).

O sequestro de carbono biogênico foi reduzido principalmente no S3 (-530 kg CO₂ eq m⁻³), o que prejudicaria o perfil ambiental desse sistema numa possível análise de crédito de carbono, no caso da inclusão do transporte na avaliação de impacto ambiental. Em S1 e S2 os resultados foram -722 kg CO₂ eq m⁻³ e -729 kg CO₂ eq m⁻³, respectivamente. Numa possível análise de crédito de carbono os resultados de sequestro de carbono observados nesse estudo são promissores.

b) Alocação econômica para S3

Na Figura 13 são apresentados os resultados da avaliação de impacto ambiental comparando a alocação econômica do sistema multiprodutos (S3).

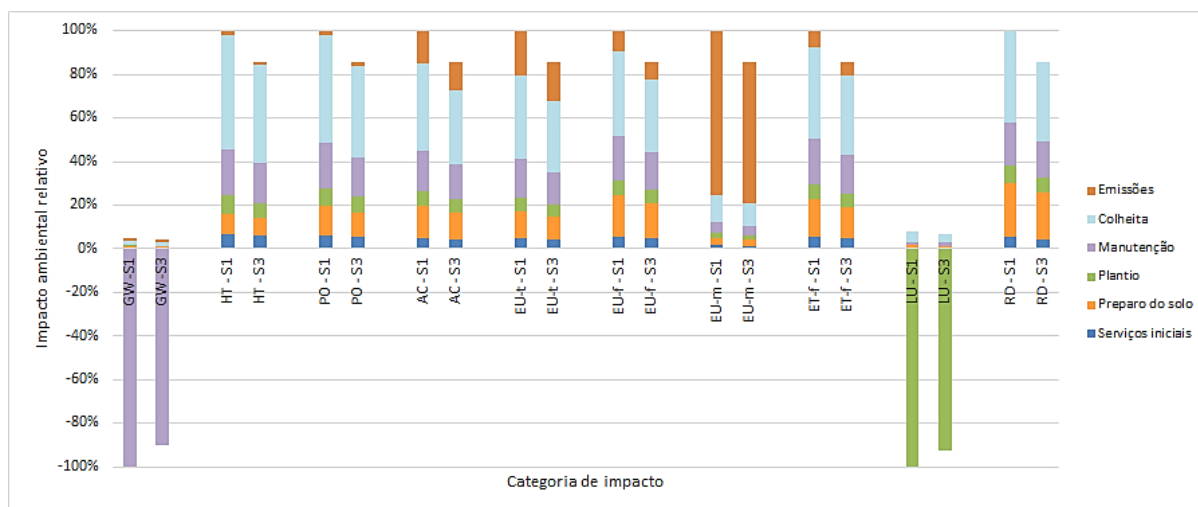


Fig. 13. Potenciais impactos ambientais por subprocesso dos sistemas de primeiro e segundo planos para S1 e S3 (alocação econômica), berço-ao-portão do produtor. Siglas: aquecimento global (GW), toxicidade humana (HT), oxidação fotoquímica (PO), acidificação (AC), eutrofização terrestre (EU-t), eutrofização aquática (EU-f), eutrofização marinha (EU-m), ecotoxicidade (ET-f), uso da terra (LU) e depleção abiótica (RD).

Na alocação mássica a madeira para serraria representou 18% e a madeira para celulose 82%. Utilizando a alocação econômica esses resultados passaram para 30% e 70%, respectivamente, demonstrando que, com base nesse critério, no sistema S3 o produto principal (madeira para celulose) apresentou um perfil ambiental melhor que o S1 para as categorias de impacto ambiental analisadas.

5. Conclusões

Nesse estudo foi modelada a cadeia de suprimento para a produção de madeira de eucalipto, em condições que representam mais de 50% da produção desse segmento no Estado da Bahia, na perspectiva de PmaisL e Avaliação do Ciclo de Vida. Os resultados mostraram que o sistema multiprodutos associado a melhorias ambientais apresentou um perfil ambiental e econômico melhor que os sistemas convencionais adotados na região e condições de estudo analisados. Considerando o impacto para todas as categorias analisadas neste estudo, o preparo do solo, as emissões dos fertilizantes, pesticidas e a colheita florestal, corresponderam a 12%, 14% e 33%, respectivamente, sendo, portanto, considerados desse ponto de vista como pontos críticos na cadeia produtiva do eucalipto.

Outras questões como a silvicultura de precisão, um melhor gerenciamento das operações florestais e um melhor planejamento de estradas e da colheita podem resultar em benefícios ambientais e econômicos. O sistema de preparo do solo pode ser melhorado e as estradas podem ser melhor planejadas para direcionar a água das chuvas para o interior dos talhões.

Assim como o balanço energético, o balanço de carbono mostrou-se positivo em uma situação em que não foi considerada a mudança de uso da terra de floresta natural para plantada nos últimos 20 anos. Nessa situação, o impacto da produção de madeira de eucalipto para o aquecimento global é negativo com amplas possibilidades de comercialização de créditos de carbono. Conclui-se que as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida da produção do eucalipto são compensadas pela captura de carbono da etapa florestal.

Além de quantificar os potenciais impactos ambientais, a abordagem híbrida de PmaisL e ACV mostrou-se efetiva no apoio à tomada de decisão com base em uma avaliação técnica, econômica e ambiental. A Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta mostrou-se promissora em termos de diversificação de produtos como os diferentes tipos de madeira, carne e cultivos alimentícios e, nesse sentido, precisa ser mais investigada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Pre Consultants e ecoinvent®, em nome da ACVBrasil. Agradecemos também, aos produtores florestais, ABAF e Fibria Celulose.

Referências

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [National Electric Energy Agency], 2017. Matriz de energia elétrica [Electric power matrix]. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm> / Acessado 16 outubro 2017.
- Araujo, M., Kant, S., Couto, L., 2009. Why Brazilian companies are certifying their forests? *For. Policy Econ.* 11, 579–585. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2009.07.008>
- Araujo, M., Kant, S., Couto, L., 2009. Why Brazilian companies are certifying their forests? *For. Policy Econ.* 11, 579–585. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2009.07.008>
- Araujo, M.M.F.C., Müller, M.D., Neves, J.C.L., Barcellos, D.C., 2004. Eucalypt Wood: With or Without Bark? *Biomassa Energ.* 1, 405–412.
- Balvanera, P., B., A., Pfisterer, Buchmann, N., He, J.-S., Nakashizuka, T., Raffaelli, D., Schmid, B., 2006. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecol. Lett.* 9, 1146–1156. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00963.x>
- Berg, S., Lindholm, E.-L., 2005. Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden. *J. Clean. Prod.* 13, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.09.015>
- Booth, T.H., 2013. Eucalypt plantations and climate change. *For. Ecol. Manage.* 301, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.004>
- Briceño-Elizondo, E., Garcia-Gonzalo, J., Peltola, H., Kellomäki, S., 2006. Carbon stocks and timber yield in two boreal forest ecosystems under current and changing climatic conditions subjected to varying management regimes. *Environ. Sci. Policy* 9, 237–252. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.12.003>
- Brockhoff, E.G., Jactel, H., Parrotta, J.A., Ferraz, S.F.B., 2013. Role of eucalypt and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystem services. *For. Ecol. Manage.* 301, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.018>
- Brown, M.T., Ulgiati, S., 2002. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems. *J. Clean. Prod.* 10, 321–334. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00043-9)
- Dias, A.C., Arroja, L., 2012. Environmental impacts of eucalypt and maritime pine wood production in Portugal. *J. Clean. Prod.* 37, 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.056>
- Diaz-Balteiro, L., Rodriguez, L.C.E., 2006. Optimal rotations on Eucalyptus plantations including carbon sequestration—A comparison of results in Brazil and Spain. *For. Ecol. Manage.* 229, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.005>
- Dighton, J., Helmisaari, H.-S., Maghirang, M., Smith, S., Malcolm, K., Johnson, W., Quast, L., Lallier, B., Gray, D., Setälä, H., Starr, M., Luiro, J., Kukkola, M., 2012. Impacts of forest post thinning residues on soil chemistry, fauna and roots: Implications of residue removal in Finland. *Appl. Soil Ecol.* 60, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.02.023>

- EPAMIG, 2010. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. *Inf. Agropecuário* 31, 1–128.
- Evans, A., Strezov, V., Evans, T.J., 2009. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 1082–1088. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008>
- Ferez, A.P.C., Campoe, O.C., Mendes, J.C.T., Stape, J.L., 2015. Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic forests in Brazil. *For. Ecol. Manage.* 350, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.015>
- Foote, J.A., Boutton, T.W., Scott, D.A., 2015. Soil C and N storage and microbial biomass in US southern pine forests: Influence of forest management. *For. Ecol. Manage.* 355, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.036>
- Giménez, J.C., Bertomeu, M., Diaz-Balteiro, L., Romero, C., 2013. Optimal harvest scheduling in Eucalyptus plantations under a sustainability perspective. *For. Ecol. Manage.* 291, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.045>
- Gonçalves, J.L. de M., Alvares, C.A., Higa, A.R., Silva, L.D., Alfenas, A.C., Stahl, J., Ferraz, S.F. de B., Lima, W. de P., Brancalion, P.H.S., Hubner, A., Bouillet, J.-P.D., Nouvellon, Y., Epron, D., 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *For. Ecol. Manage.* 301, 6–27. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>
- González-García, S., Berg, S., Moreira, M.T., Feijoo, G., 2009. Evaluation of forest operations in Spanish eucalypt plantations under a life cycle assessment perspective. *Scand. J. For. Res.* 24, 160–172. <https://doi.org/10.1080/02827580902773462>
- Herrero, C., Juez, L., Tejedor, C., Pando, V., Bravo, F., 2014. Importance of root system in total biomass for Eucalyptus globulus in northern Spain. *Biomass and Bioenergy* 67, 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.04.023>
- Hytönen, J., Moilanen, M., 2014. Effect of harvesting method on the amount of logging residues in the thinning of Scots pine stands. *Biomass and Bioenergy* 67, 347–353. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.05.004>
- Lopes, J., Medeiros, D.L., Kiperstok, A., 2018. Combining cleaner production and life cycle assessment for reducing the environmental impacts of irrigated carrot production in Brazilian semi-arid region. *J. Clean. Prod.* 170, 924–939. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.198>
- Morales, M., Aroca, G., Rubilar, R., Acuña, E., Mola-Yudego, B., González-García, S., 2015. Cradle-to-gate life cycle assessment of Eucalyptus globulus short rotation plantations in Chile. *J. Clean. Prod.* 99, 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.085>
- Rahim, R., Raman, A.A.A., 2015. Cleaner production implementation in a fruit juice production plant. *J. Clean. Prod.* 101, 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.065>
- Saraiva, A.B., Valle, R., Bosquê, A.E.S., Berglin, N., Schenck, A. V, 2017. Provision of pulpwood and short rotation eucalyptus in Bahia, Brazil – Environmental impacts based on lifecycle assessment methodology. *Biomass and Bioenergy* 105, 41–50. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2017.06.004>
- Silva, D.A.L., Lahr, F.A.R., Varanda, L.D., Christoforo, A.L., Ometto, A.R., 2015. Environmental performance assessment of the melamine-urea-formaldehyde (MUF)

- resin manufacture: a case study in Brazil. *J. Clean. Prod.* 96, 299–307.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.007>
- Silva, M.L. da, Ribeiro, C.A.Á.S., 2006. Estabelecimento de rotação econômica para uma floresta regulada. *Rev. Árvore* 30, 65–73. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000100009>
- Souza, Á.N., Oliveira, A.D., Scolforo, J.R.S., Rezende, J.L.P., Mello, J.M., 2007. Viabilidade econômica de um sistema agroflorestal. *Cerne* 13, 96–106.
- Watt, M.S., Coker, G., Clinton, P.W., Davis, M.R., Parfitt, R., Simcock, R., Garrett, L., Payn, T., Richardson, B., Dunningham, A., 2005. Defining sustainability of plantation forests through identification of site quality indicators influencing productivity—A national view for New Zealand. *For. Ecol. Manage.* 216, 51–63.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.064>
- Associação Baiana das Empresas de Base Florestal (ABAF) [Association of Forestry Companies of Bahia], 2015. Relatório ABAF 2015. [ABAF Report 2015]. Disponível em: <http://www.abaf.org.br/categoria/publicacoes/> / Acessado 16 outubro 2017.
- Bailis, R., Rujanavech, C., Dwivedi, P., de Oliveira Vilela, A., Chang, H., de Miranda, R.C., 2013. Innovation in charcoal production: A comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. *Energy Sustain. Dev.* 17, 189–200.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.10.008>
- Balvanera, P., B, A., Pfisterer, Buchmann, N., He, J.-S., Nakashizuka, T., Raffaelli, D., Schmid, B., 2006. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecol. Lett.* 9, 1146–1156. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00963.x>
- Barros, T.S. Fibria Celulose S.A. Comunicação Pessoal, Outubro de 2016.
- Berg, S., Lindholm, E.-L., 2005. Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden. *J. Clean. Prod.* 13, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.09.015>
- Booth, T.H., 2013. Eucalypt plantations and climate change. *For. Ecol. Manage.* 301, 28–34.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.004>
- Briceño-Elizondo, E., Garcia-Gonzalo, J., Peltola, H., Kellomäki, S., 2006. Carbon stocks and timber yield in two boreal forest ecosystems under current and changing climatic conditions subjected to varying management regimes. *Environ. Sci. Policy* 9, 237–252.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.12.003>
- Brockerhoff, E.G., Jactel, H., Parrotta, J.A., Ferraz, S.F.B., 2013. Role of eucalypt and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystem services. *For. Ecol. Manage.* 301, 43–50.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.018>
- Dias, A.C., Arroja, L., 2012. Environmental impacts of eucalypt and maritime pine wood production in Portugal. *J. Clean. Prod.* 37, 368–376.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.056>
- Diaz-Balteiro, L., Rodriguez, L.C.E., 2006. Optimal rotations on Eucalyptus plantations including carbon sequestration—A comparison of results in Brazil and Spain. *For. Ecol. Manage.* 229, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.005>

- Dighton, J., Helmisaari, H.-S., Maghirang, M., Smith, S., Malcolm, K., Johnson, W., Quast, L., Lallier, B., Gray, D., Setälä, H., Starr, M., Luiro, J., Kukkola, M., 2012. Impacts of forest post thinning residues on soil chemistry, fauna and roots: Implications of residue removal in Finland. *Appl. Soil Ecol.* 60, 16–22.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.02.023>
- Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) [Agricultural Research Company of Minas Gerais], 2010. Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta [Livestock Forestry Integration]. *Inf. Agropecuário* [Agricultural report] 31, 1–128.
- European Commission (EC) Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) - General guide for life cycle assessment - Detailed guidance. Luxembourg.
- European Commission (EC) Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2012. Characterisation factors of the ILCD recommended life cycle impact assessment methods. Luxembourg.
- Ferez, A.P.C., Campoe, O.C., Mendes, J.C.T., Stape, J.L., 2015. Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic forests in Brazil. *For. Ecol. Manage.* 350, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.015>
- Fibria Celulose. Central de Indicadores. [Indicator Central]. 2017b. Disponível em: <http://www.fibria.com.br/r2015/central-de-indicadores/gestao-florestal.html> / . Acessado 20 de outubro de 2017.
- Fibria Celulose. Institucional. [Institutional]. 2017a. Disponível em: <http://www.fibria.com.br/institucional/quem-somos/> / . Acessado 20 de outubro de 2017.
- Fibria Celulose. Resumo do Plano de Manejo Florestal 2016, Aracruz. [Aracruz, Summary of the Forest Management Plan]. Disponível em: http://www.fibria.com.br/shared/Resumo%20Plano%20de%20Manejo%20Florestal_Unidade%20Aracruz_Final_Site.pdf / . Acessado 4 de junho de 2017.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2010. Global Forest Resources Assessment 2010 – Main Report. Brazil. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e.pdf> / Acessado 15 de outubro de 2017.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2014. Global Forest Resources Assessment 2015 – Country Report. Brazil. Available at: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/6261857f-c0da-4f72-98fd-a18e9ca50509/> / Accessed 15 october 2017.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2015. World deforestation slows down as more forests are better managed. Disponível em: <http://www.fao.org/news/story/en/item/326911/icode/> / Acessado 15 de outubro de 2017.
- Foote, J.A., Boutton, T.W., Scott, D.A., 2015. Soil C and N storage and microbial biomass in US southern pine forests: Influence of forest management. *For. Ecol. Manage.* 355, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.036>
- Giménez, J.C., Bertomeu, M., Diaz-Balteiro, L., Romero, C., 2013. Optimal harvest scheduling in Eucalyptus plantations under a sustainability perspective. *For. Ecol. Manage.* 291, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.045>

- Gonçalves, J.L. de M., Alvares, C.A., Higa, A.R., Silva, L.D., Alfenas, A.C., Stahl, J., Ferraz, S.F. de B., Lima, W. de P., Brancalion, P.H.S., Hubner, A., Bouillet, J.-P.D., Nouvellon, Y., Epron, D., 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *For. Ecol. Manage.* 301, 6–27. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>
- González-García, S., Berg, S., Moreira, M.T., Feijoo, G., 2009. Evaluation of forest operations in Spanish eucalypt plantations under a life cycle assessment perspective. *Scand. J. For. Res.* 24, 160–172. <https://doi.org/10.1080/02827580902773462>
- Herrero, C., Juez, L., Tejedor, C., Pando, V., Bravo, F., 2014. Importance of root system in total biomass for *Eucalyptus globulus* in northern Spain. *Biomass and Bioenergy* 67, 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.04.023>
- Hinchee, M., Rottmann, W., Mullinax, L., Zhang, C., Chang, S., Cunningham, M., Pearson, L., Nehra, N., 2011. Short-rotation woody crops for bioenergy and biofuels applications. *Biofuels Glob. Impact Renew. Energy, Prod. Agric. Technol. Adv.* 139–156. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7145-6_8
- Hytönen, J., Moilanen, M., 2014. Effect of harvesting method on the amount of logging residues in the thinning of Scots pine stands. *Biomass and Bioenergy* 67, 347–353. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.05.004>
- Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) [Brazilian Tree Industry], 2016. Relatório Anual [Annual Report]. Available at: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf / Accessed 16 October 2017.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [Brazilian Institute of Geography and Statistics], 2015. Cidades: silvicultura e extração vegetal 2015 [Cities: forestry and vegetable extraction 2015]. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/temas.php?lang=&codmun=290080&idtema=160&search=bahia|alcobaca|extracao-vegetal-e-silvicultura-2015> / Acessado 14 de junho de 2016.
- Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2012 [Institute of Environment and Water Resources]. Programa Monitora. [Monitora Program]. Disponível em: http://www.inema.ba.gov.br/wp-content/files/wfd_123xyz--caracterizacao-rpga-vol1.pdf /. Acessado 14 de junho de 2016.
- International Organization for Standardization (ISO), 2006. ISO 14044: Environmental Managements - Life Cycle Assessments - Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization, Geneva
- IPCC, 2006. Intergovernmental Panel on Climate Change. 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. (eds). Kanagawa: IGES, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html> / Acessado 20 de outubro de 2017.
- Jungbluth, N., Frischknecht, 2007. Cumulative energy demand. Implementation of life cycle impact assessment methods. ecoinvent report n°. 3, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- LaGrega, M.D., Buckingham, P.L., Evans, J.C., 1994. Pollution prevention. In: *Hazardous Waste Management*, McGraw Hill Inc, Singapore City. 1146 pp.

- LaGrega, M.D., Buckingham, P.L., Evans, J.C., 1994. Pollution prevention. In: Hazardous Waste Management, McGraw Hill Inc, Singapore City. 1146 pp.
- Lopes, J., Medeiros, D.L., Kiperstok, A., 2018. Combining cleaner production and life cycle assessment for reducing the environmental impacts of irrigated carrot production in Brazilian semi-arid region. *J. Clean. Prod.* 170, 924–939. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.198>
- Macedo, R.L.G., Venturin, N., Venturin, R.P., Vale, R.S., Vale, F.A.F. Sistemas integrados de produção agroflorestal [Integrated agroforestry systems]. In: Vale, A. et al. (Org.). Eucaliptocultura no Brasil [Eucalyptus in Brazil]. Viçosa: UFV, 2014. p. 241-261.
- Morales, M., Aroca, G., Rubilar, R., Acuña, E., Mola-Yudego, B., González-García, S., 2015. Cradle-to-gate life cycle assessment of Eucalyptus globulus short rotation plantations in Chile. *J. Clean. Prod.* 99, 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.085>
- Moreno-Ruiz, E., Léová, T., Bourgault, G., Wernet, G., 2014. Documentation of changes implemented in ecoinvent® Data 3.1. Ecoinvent® Centre, Zurich.
- Nemecek, T., Schnetzer, J. Methods of Assessment of Direct Field Emissions for LCIs of Agricultural Production Systems Data v3.0. Agroscope ReckenholzTanikon Research Station ART. 2012.
- Rahim, R., Raman, A.A.A., 2015. Cleaner production implementation in a fruit juice production plant. *J. Clean. Prod.* 101, 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.065>
- Rahim, R., Raman, A.A.A., 2015. Cleaner production implementation in a fruit juice production plant. *J. Clean. Prod.* 101, 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.065>
- Ruas, R.A.A., Dezordi, L.R., Fernandes, H.C., Leite, E.S., Vieira, G.R. Silvicultura de precisão na eucaliptocultura. In: VALE, A. et al. (Org.). Eucaliptocultura no Brasil. Viçosa: UFV, 2014. p. 263-282.
- Santana, R.C., Fontan, I.C.I., Oliveira, S.L. Implantação, manutenção e produtividade dos povoamentos [Plant implantation, maintenance and productivity]. In: Vale, A. et al. (Org.). Eucaliptocultura no Brasil [Eucalyptus in Brazil]. Viçosa: UFV, 2014. p. 161-186.
- Saraiva, A.B., Valle, R., Bosquê, A.E.S., Berglin, N., Schenck, A. V, 2017. Provision of pulpwood and short rotation eucalyptus in Bahia, Brazil – Environmental impacts based on lifecycle assessment methodology. *Biomass and Bioenergy* 105, 41–50. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2017.06.004>
- Silva, D.A.L. Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil. 2012. 207 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Silva, D.A.L., Lahr, F.A.R., Varanda, L.D., Christoforo, A.L., Ometto, A.R., 2015. Environmental performance assessment of the melamine-urea-formaldehyde (MUF) resin manufacture: a case study in Brazil. *J. Clean. Prod.* 96, 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.007>

- Silva, M.L. da, Ribeiro, C.A.Á.S., 2006. Estabelecimento de rotação econômica para uma floresta regulada. *Rev. Árvore* 30, 65–73. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000100009>
- Souza, Á.N., Oliveira, A.D., Scolforo, J.R.S., Rezende, J.L.P., Mello, J.M., 2007. Viabilidade econômica de um sistema agroflorestal. *Cerne* 13, 96–106.
- UNEP. United Nations Environment Programme. International Declaration on Cleaner Production. 1998. Disponível em: <http://www.unep.fr/scp/cp/network/pdf/english.pdf> / . Acessado 20 de outubro de 2017.
- UNIDO. United Nations Industrial Development Organization. Manual on the Development of Cleaner Production Policies - Approaches and Instruments. Vienna: 2002.
- Watt, M.S., Coker, G., Clinton, P.W., Davis, M.R., Parfitt, R., Simcock, R., Garrett, L., Payn, T., Richardson, B., Dunningham, A., 2005. Defining sustainability of plantation forests through identification of site quality indicators influencing productivity—A national view for New Zealand. *For. Ecol. Manage.* 216, 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.064>
- Weih, M., Dimitriou, I., 2012. Environmental Impacts of Short Rotation Coppice (SRC) Grown for Biomass on Agricultural Land. *Bioenerg. Res.* 5:535-536. DOI 10.1007/s12155-012-9230-2
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent® database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1–13.
- World Wide Found for Nature (WWF), 2017. O que é certificação florestal? [What is forest certification?]. Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/certificacao_florestal/ / Acessado 15 outubro 2017.

Apêndice A

Tabela A.1.

Pesticidas usados na produção de eucalipto, marca comercial e ingrediente ativo.

Produto comercial	Classe	Dosagem ou concentração
¹⁹ Evidence [®] 700WG (grupo Neonicotinóide)	Inseticida	0.50 kg ha ⁻¹
Imidacloprido		700.0 g kg ⁻¹
²⁰ Fordor [®] 750 WG (grupo Isoxazol)	Herbicida	0.10 kg ha ⁻¹
Isoxaflutole		750.0 g kg ⁻¹
²¹ Touchdown CS (grupo Glicina substituída)	Herbicida	3.00 kg ha ⁻¹
Sal de potássio de N-(phosphonomethyl) glycine - Glifosato potássico		620.0 g kg ⁻¹
²² Glifosato (grupo Glicina)	Herbicida	0.03 kg ha ⁻¹
Sal de Isopropilamina de N - (fosfometil) glicina		480.0 g kg ⁻¹
²³ Formicida Mirex S Atta-Kill (grupo Sulfonamidas fluoroalifáticas)	Inseticida	3.50 kg ha ⁻¹
Sulfluramida		3.0 g kg ⁻¹

Tabela A.2.

Consumo de diesel por operação.

Operação	Veículo	Partida	Chegada	Distância (km)	Consumo de Diesel (L)
Diesel	Carreta 6E-38	Candeias-BA	Posto da Mata, Nova viçosa-BA	902	257.7
Mudas	Truck 1 compartimento	Aracruz-ES	Média	233	77.7
Touchdown CS Syngenta	Truck 1 compartimento	Uberaba	Posto da Mata, Nova viçosa-BA	1,244	414.7
Fordor 750 WG Bayer	Truck 1 compartimento	Belford Roxo-RJ	Posto da Mata, Nova viçosa-BA	915	305.0
Cupinicida Evidence [®] 700WG	Truck 1 compartimento	Belford Roxo-RJ	Posto da Mata, Nova viçosa-BA	915	305.0
Formicida Mirex S Atta-Kill	Truck 1 compartimento	Rio Claro-SP	Posto da Mata, Nova viçosa-BA	1,255	418.3
Adubo	Carreta 6E-38	Viana-ES	Posto da Mata, Nova viçosa-BA	412	117.7
Madeira colhida	Bitrem	Média	Aracruz-ES	233	129.4

¹⁹ https://www.environmentalscience.bayer.com.br/-/media/PRFBrazil/Product%20Labels%20PDF/Ficha%20tecnica/Evidence%20700%20WG_Ficha%20Tecnica_.ashx

²⁰ https://www.environmentalscience.bayer.com.br/-/media/PRFBrazil/Product%20Labels%20PDF/Ficha%20tecnica/Fordor%20750%20WG_Ficha%20Tecnica_.ashx

²¹ <https://www.syngenta.com.br/product/crop-protection/herbicida/touchdown>

²² http://www.adapar.pr.gov.br/arquivos/File/defis/DFI/Bulas/Herbicidas/roundup_original.pdf

²³ https://www.agrolink.com.br/agrolinkfeto/produto/mirex-s_3275.html

Tabela A.3.

Emissions from forestry are based on Nemecek and Schnetzer (2012) report.

Emissions	S1	S2	S3
-----------	----	----	----

Ammonia (NH₃) - Air

We used AGRAMMON model with the global geographic scope of application.

In our case study there was no application of organic fertilizer in the field (i.e. compost, manure, etc.). The NH₃ emissions from applied mineral fertilizers are calculated by constant emission factors for each group of fertilizer based on Table 2.6 of Nemecek and Schnetzer (2012),

$$N = A * E$$

where:

N = emission NH ₃ -N [kg N (ha year) ⁻¹]	0.58	0.58	0.53
A = amount of nitrogen mineral fertilizer [kg N (ha year) ⁻¹]	12.71	9.36	10.92
E = emission factor of 4% to multinutrient fertilizers (NPK fertilizers).	4.00%	4.00%	4.00%

Nitrate (NO₃) - Ground Water

We used SQCB-NO₃ model,

$$N = 21.37 + [P / (c * L)] * [(0.0037 * S) + (0.0000601 * N_{org}) - (0.00362 * U)]$$

where:

N = leached NO ₃ - N [kg N (ha year) ⁻¹]	42.46	41.48	40.07
P = precipitation + irrigation [mm year ⁻¹]	1400.00	1400.00	1400.00
c = clay content [%]	14.33	14.33	14.33
L = rooting depth [m]	1.20	1.20	1.20
S = nitrogen supply through fertilizers [kg N ha ⁻¹]	56.46	55.73	54.67
N _{org} = nitrogen in organic matter [kg N ha ⁻¹]	1269.55	1269.55	1269.55
U = nitrogen uptake by crop [kg N ha ⁻¹]	58.33	58.33	58.33

and N_{org} is calculated by the formula,

$$N_{org} = [(C_{org} / 100) * V * Db] / (rC / N * rN_{org})$$

where:

C _{org} = carbon content [%]	1.38	1.38	1.38
V = soil volume [m ³ ha ⁻¹]	5000.00	5000.00	5000.00
Db = bulk density [kg (m ³) ⁻¹]	1300.00	1300.00	1300.00
rC/N = C/N ratio [dimensionless]	10.00	10.00	10.00
rN _{org} = ratio of N _{org} to N _{tot} (total soil nitrogen) [dimensionless]	0.85	0.85	0.85

Phosphorous (P) - Ground Water

P leaching to the ground water was estimated as an average leaching, corrected by P-fertilization,

$$Pg_w = Pg_{wl} * F_{gw}$$

where:

Pg _w = quantity of P leached to ground water [kg (ha year) ⁻¹]	0.03	0.03	0.03
Pg _{wl} = average quantity of P leached to ground water for a land use category [kg (ha year) ⁻¹]	0.01	0.01	0.01
F _{gw} = correction factor for fertilisation by slurry (dimensionless)	1.00	1.00	1.00

Emissions	S1	S2	S3
Phosphorous (P) – Run-off to Surface Water			
Run-off to surface water was calculated in a similar way to leaching to ground water,			
$Pro = Prol * Fro$			
where:			
Pro = quantity of P lost through run-off to rivers [kg P (ha a) ⁻¹]	0.03	0.03	0.03
Prol = average quantity of P lost through run-off for a land use category [kg P (ha a) ⁻¹]	0.03	0.03	0.03
$Fro = 1 + 0.2/80 * P_{2O_5min} + 0.7/80 * P_{2O_5sl} + 0.4/80 * P_{2O_5man}$			
where:			
P _{2O₅min} = quantity of P _{2O₅} contained in mineral fertilizers [kg ha ⁻¹]	17.56	16.20	12.44
P _{2O₅sl} = quantity of P _{2O₅} contained in slurry or liquid sewage sludge [kg ha ⁻¹]	0.00	0.00	0.00
P _{2O₅man} = quantity of P _{2O₅} contained in solid manure [kg ha ⁻¹]	0.00	0.00	0.00
Phosphorous (P) – Emissions Through Water Erosion to Surface Water			
P emissions through erosion of particulate phosphorous to surface water,			
$Per = Ser * Pcs * Fr * Ferw$			
where:			
Per = quantity of P emitted through erosion to rivers [kg P (ha a) ⁻¹]	0.00	0.00	0.00
Ser = quantity of soil eroded [kg (ha a) ⁻¹]	0.41	0.41	0.41
Pcs = P content in the top soil [kg P kg soil ⁻¹]	0.00	0.00	0.00
Fr = enrichment factor for P [dimensionless]	1.86	1.86	1.86
Ferw = fraction of the eroded soil that reaches the river [dimensionless]	0.20	0.20	0.20
Nitrous Oxides (N₂O) – Air			
Calculations of N ₂ O emissions are based on the IPCC method. Direct emissions of N ₂ O and indirect or induced emissions are included. In the case of indirect N ₂ O emission, nitrogen is first emitted as NH ₃ or NO ₃ ⁻ and subsequently converted to N ₂ O,			
$N_2O = 44/28 * (0.01 * (N_{tot} + N_{cr}) + 0.01 * 14/17 * NH_3 + 0.0075 * 14/62 * NO_3^-)$			
where:			
N ₂ O = emission of N ₂ O [kg N ₂ O ha ⁻¹]	1.09	0.99	0.97
N _{tot} = total nitrogen in mineral and organic fertilizers [kg N ha ⁻¹]	12.71	11.98	10.92
N _{cr} = nitrogen contained in the crop residues [kg N ha ⁻¹]	43.75	43.75	43.75
NH ₃ = losses of nitrogen in the form of ammonia [kg NH ₃ ha ⁻¹]	0.61	0.58	0.53
NO ₃ ⁻ = losses of nitrogen in the form of nitrate [kg NO ₃ ⁻ ha ⁻¹].	42.46	41.48	40.07
Nitrogen oxides (NOx) - Air			

Emissions	S1	S2	S3
During denitrification processes in soils, nitrous oxide (NO _x) may also be produced. These emissions were estimated from the emissions of N ₂ O,			
$\text{NO}_x = 0.21 \cdot \text{N}_2\text{O}$			
where:			
NO _x = emission of NO _x [kg NO _x ha ⁻¹]	0.21	0.21	0.20
N ₂ O = emission of N ₂ O [kg N ₂ O ha ⁻¹]	1.09	0.99	0.97
Nutrient Inputs in Agricultural Soils	-	-	
This data is presented in the manuscript method and result section.			
Release of Fossil CO₂ after Urea Applications	-	-	
The N source of the fertilizer is ammonium nitrate, so this is not applicable.			
Heavy Metals to Agricultural Soil, Surface Water and Ground Water			
The heavy metal emissions were calculated by SALCA-heavy metal for Cadmium (Cd), Chromium (Cr), Lead (Pb) and Mercury (Hg). Heavy metal emissions into ground water are calculated with constant leaching rates as,			
$\text{Mleach}_i = \text{mleach}_i \cdot A_i$			
where:			
Mleach _i = agricultural related heavy metal i emission [mg (ha year) ⁻¹]	Cd = 7.38; Cr = 3372.06; Cu = 517.72; Pb = 26.66; Hg = 0.00; Zn = 2878.16	Cd = 7.31; Cr = 3359.09; Cu = 511.76; Pb = 25.29; Hg = 0.00; Zn = 1332.68	Cd = 7.04; Cr = 3309.12; Cu = 491.67; Pb = 20.76; Hg = 0.00; Zn = 2429.46
mleach _i = average amount of heavy metal emission [mg (ha.year) ⁻¹]	Cd = 50.00; Cr = 21,200.00; Cu = 3600.00; Pb = 600.00; Hg = 1.00; Zn = 33,000	Cd = 50.00; Cr = 21,200.00; Cu = 3600.00; Pb = 600.00; Hg = 1.00; Zn = 33,000	Cd = 50.00; Cr = 21,200.00; Cu = 3600.00; Pb = 600.00; Hg = 1.00; Zn = 33,000
A _i is calculated by the formula,			
$A_i = \text{Magro}_i / (\text{Magro}_i + \text{Mdeposition}_i)$			
where:			
A _i = allocation factor for the share of agricultural inputs in the total inputs for heavy metal i	Cd = 1.00; Cr = 1.00; Pb = 0.99 and Hg = 0.99	Cd = 1.00; Cr = 1.00; Pb = 0.98 and Hg = 0.98	Cd = 1.00; Cr = 1.00; Pb = 0.98 and Hg = 0.98
Magro _i ²⁴ = total input of heavy metal from fertilizers of agricultural production [mg (ha year) ⁻¹]	Cd = 510,000.00; Cr = 5,100,000.00; Pb = 2,550,000.00 and Hg = 6307.50	Cd = 171,347.00; Cr = 1,713,470.00; Pb = 856,735.00 and Hg = 2081.87	Cd = 171,347.00; Cr = 1,713,470.00; Pb = 856,735.00 and Hg = 2081.87
Mdeposition _i = total input of heavy metal from atmospheric deposition [mg (ha year) ⁻¹]	Cd = 700.00; Cr = 3650.00; Pb = 18,700.00 and Hg = 50.00	Cd = 700.00; Cr = 3650.00; Pb = 18,700.00 and Hg = 50.00	Cd = 700.00; Cr = 3650.00; Pb = 18,700.00 and Hg = 50.00

²⁴ For each fertilizer analyzed, the concentration of heavy metals reported by the manufacturer *Heringer* was considered document sent to the authors.

Emissions	S1	S2	S3
Heavy metal emissions through erosion (surface water) are calculated as follows,			
$Merosion_i = ctot_i * B * a * f_{erosion} * A_i$			
where:			
$Merosion_i$ = agricultural related heavy metal emissions through erosion [mg (ha year) ⁻¹]	Cd = 0.01; Cr = 0.58; Cu = 0.86; Pb = 0.17 and Hg = 0.00; Ni = 0.44; Zn = 0.93	Cd = 0.01; Cr = 0.58; Cu = 0.86; Pb = 0.16 and Hg = 0.00; Ni = 0.43; Zn = 0.89	Cd = 0.01; Cr = 0.57; Cu = 0.81; Pb = 0.13 and Hg = 0.00; Ni = 0.39; Zn = 0.0.79
$ctot_i$ = total heavy metal content in the soil [mg kg ⁻¹]	Cd = 0.00; Cr = 0.03; Pb = 0.02 and Hg = 0.00	Cd = 0.00; Cr = 0.03; Pb = 0.02 and Hg = 0.00	Cd = 0.00; Cr = 0.03; Pb = 0.02 and Hg = 0.00
B = amount of soil erosion [kg (ha year) ⁻¹]	Cd = 25,000.00; Cr = 25,000.00; Pb = 25,000.00	Cd = 25,000.00; Cr = 25,000.00; Pb = 25,000.00	Cd = 25,000.00; Cr = 25,000.00; Pb = 25,000.00
a = accumulation factor 1.86 [dimensionless]	and Hg = 25,000.00	and Hg = 25,000.00	and Hg = 25,000.00
$f_{erosion}$ = erosion factor 0.2 [dimensionless]	Cd = 1.86; Cr = 1.86; Pb = 1.86 and Hg = 1.86	Cd = 1.86; Cr = 1.86; Pb = 1.86 and Hg = 1.86	Cd = 1.86; Cr = 1.86; Pb = 1.86 and Hg = 1.86
A_i = allocation factor (calculated for heavy metals to ground water) [dimensionless]	Cd = 0.20; Cr = 0.20; Pb = 0.20 and Hg = 0.20	Cd = 0.20; Cr = 0.20; Pb = 0.20 and Hg = 0.20	Cd = 0.20; Cr = 0.20; Pb = 0.20 and Hg = 0.20
The balance of all inputs into the soil (fertilizers, pesticides, seed and deposition) and outputs from the soil (exported biomass, leaching and erosion), multiplied by the allocation factor is calculated as an emission to agricultural soil (M_{soil_i} [mg (ha year) ⁻¹]).	Cd = 1.00; Cr = 1.00; Pb = 0.99 and Hg = 0.99	Cd = 1.00; Cr = 1.00; Pb = 0.98 and Hg = 0.98	Cd = 1.00; Cr = 1.00; Pb = 0.98 and Hg = 0.98
$M_{soil_i} = (\Sigma inputs_i - \Sigma outputs_i) * A_i$	Cd = 900.19; Cr = 9500.77; Cu = 2068.50; Pb = 1130.81 and Hg = 0.00; Ni = 2174.70; Zn = 15,030.23	Cd = 830.44; Cr = 8602.31; Cu = 1894.03; Pb = 1050.11 and Hg = 0.00; Ni = 2015.94; Zn = 13,937.81	Cd = 636.70; Cr = 5936.68; Cu = 1421.81; Pb = 813.10 and Hg = 0.00; Ni = 1574.29; Zn = 10878.74
Arsenic (As) emissions were considered going to the soil by the lack of a specific estimation model [mg (ha year) ⁻¹].	-	-	-
Pesticides to Agricultural Soil			
All pesticides applied for crop production were assumed to end up as emissions to the soil.	Imidacloprid = 0.18 Isoxaflutole = 0.02 Glyphosate = 1.66 Mirex = 0.02	Imidacloprid = 0.03 Isoxaflutole = 0.03 Glyphosate = 0.41 Mirex = 0.02	Imidacloprid = 0.03 Isoxaflutole = 0.03 Glyphosate = 0.72 Mirex = 0.02
Carbon dioxide (CO₂) - from the Air			
The CO ₂ from the atmosphere used for photosynthesis was not considered, as it is assumed to be released in a short period of time with no actual carbon sequestration.	370 t	349 t	342 t
Land Use			
Transformation, from pasture, man made, extensive	1 ha.y	1 ha.y	1 ha.y
Transformation, from forest, intensive, normal	1 ha.y	1 ha.y	1 ha.y
Transformation, to forest, intensive, normal	1 ha.y	1 ha.y	1 ha.y
Occupation, forest, intensive, normal	1 ha.y	1 ha.y	1 ha.y

Referência

Nemecek, T., Schnetzer, J., 2012. Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems Data v3.0. Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART.

Table A.4.

Receitas e despesas dos sistemas de produção analisados.

	Sistema		
	I	R	B
Recursos operacionais	R\$2195.7	R\$2195.7	R\$1687.4
Recursos financeiros	R\$2865.0	R\$2718.4	R\$1569.2
Total	R\$5060.6	R\$4914.1	R\$3256.6
	I+R	I+B	ILPF
Custo de produção por ha	R\$9974.7	R\$8317.2	R\$7485.5
Custo de produção por (ha ano ⁻¹)	R\$831.2	R\$693.1	R\$623.8
Receita por ha	R\$26,880.0	R\$20,940.0	R\$29,191.7
Receita (ha ano ⁻¹)	R\$2240.0	R\$1745.0	R\$2432.6
Receita por ha			R\$3672.0
Receita total por ha	R\$26,880.0	R\$20,940.0	R\$32,863.7
Benefício econômico por ha		R\$1478.0	R\$2720.8
Produção (m ³)	448.00	425.60	413.50

Tabela A.5.

Resumo dos principais dados de entrada dos sistemas analisados.

Parâmetro	Unidade	S1	S2	S3
Incremento médio anual (ciclo)	m ³	37.33	35.47	34.46
Rotações por ciclo	6 anos	2	2	2
Densidade da madeira	g cm ³	0.48	0.48	0.48
Balanço de CO ₂	t ha ⁻¹	370	349	342
Madeira destinada a celulose	%	100	100	80
Madeira destinada a serraria	%	0	0	20
Densidade de plantas	Qtd	1111	1111	1111
Espaçamento	m	3 x 3	3 x 3	(3 x 1.5) + 9
Poder calorífico do diesel	MJ	42.93	42.93	42.93
Densidade do diesel	g cm ⁻³	0.83	0.83	0.83

Table A.6.

Resultados do impacto do ciclo de vida para S1, berço-ao-portão do produtor.

Categoria de impacto	Unidade	Totalt	Serviços iniciais	Preparo do solo	Plantio	Desenvolvimento e Manutenção	Colheita	Emissões
Climate change	kg CO ₂ eq	-783,900	2,312	6,986	3,036	-824,397	17,894	10,268
Human toxicity, cancer effects	CTUh	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	kg NMVOC							
Photochemical ozone formation	eq	0,272	0,017	0,037	0,022	0,057	0,133	0,006
Acidification	molc H ⁺ eq	0,370	0,019	0,054	0,025	0,069	0,148	0,055
Terrestrial eutrophication	molc N eq	1,204	0,058	0,149	0,076	0,211	0,460	0,249
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,014	0,001	0,003	0,001	0,003	0,005	0,001
Marine eutrophication	kg N eq	0,349	0,005	0,012	0,007	0,019	0,043	0,263
Freshwater ecotoxicity	CTUe	384,165	20,750	66,136	27,594	80,075	160,851	28,760
Land use	kg C deficit	-2597,642	14,150	25,231	-2796,898	46,887	112,989	0,000
Mineral, fossil & ren resource depletion	kg Sb eq	0,006	0,000	0,001	0,000	0,001	0,002	0,000

Table A.6.

Resultados do impacto do ciclo de vida para S2, berço-ao-portão do produtor.

Categoria de impacto	Unidade	Total	Serviços iniciais	Preparo do solo	Plantio	Desenvolvimento e manutenção	Colheita	Emissões
Climate change	kg CO ₂ eq	-790,788	2,444	6,798	1,604	-830,226	18,084	10,507
Human toxicity, cancer effects	CTUh	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	0,255	0,018	0,035	0,012	0,049	0,135	0,006
Acidification	molc H ⁺ eq	0,351	0,020	0,052	0,013	0,060	0,150	0,055
Terrestrial eutrophication	molc N eq	1,144	0,061	0,144	0,040	0,184	0,464	0,250
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,013	0,001	0,002	0,000	0,002	0,005	0,001
Marine eutrophication	kg N eq	0,352	0,006	0,012	0,004	0,016	0,043	0,272
Freshwater ecotoxicity	CTUe	362,365	21,936	64,551	14,585	70,436	162,554	28,303
Land use	kg C deficit	-2773,113	14,959	24,091	-2966,456	40,109	114,185	0,000
Mineral, fossil & ren resource depletion	kg Sb eq	0,005	0,000	0,001	0,000	0,001	0,002	0,000

Table A.6.

Resultados do impacto do ciclo de vida para S3, berço-ao-portão do produtor.

Categoria de impacto	Unidade	Totalt	Serviços iniciais	Preparo do solo	Plantio	Desenvolvimento e manutenção	Colheita	Emissões
Climate change	kg CO ₂ eq	-793,139	2,459	6,468	1,637	-832,028	17,692	10,634
Human toxicity, cancer effects	CTUh	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	0,240	0,018	0,034	0,012	0,038	0,132	0,006
Acidification	molc H ⁺ eq	0,328	0,020	0,049	0,014	0,047	0,147	0,052
Terrestrial eutrophication	molc N eq	1,078	0,062	0,139	0,041	0,145	0,454	0,236
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,012	0,001	0,002	0,001	0,002	0,005	0,001
Marine eutrophication	kg N eq	0,346	0,006	0,012	0,004	0,013	0,042	0,270
Freshwater ecotoxicity	CTUe	334,710	22,066	60,294	14,882	55,610	159,035	22,823
Land use	kg C deficit	-2873,380	15,168	22,963	-3053,798	30,573	111,713	0,000
Mineral, fossil & ren resource depletion	kg Sb eq	0,005	0,000	0,001	0,000	0,001	0,002	0,000

CAPÍTULO IV

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A abordagem híbrida de PmaisL e ACV, mostrou-se viável para identificar oportunidades ambientais e econômicas, bem como medir o desempenho ambiental dos sistemas de produção de cenoura e eucalipto.

A aplicação de estratégias de PmaisL contribuiu significativamente para a redução dos impactos ambientais na produção de cenoura nas condições observadas na região de Irecê, reduziu os impactos e aumentou a receita no sistema multiproduto proposto para o eucalipto. Em ambos os estudos de caso, foram identificadas outras medidas de PmaisL que requerem maior investigação, mas, seguramente, ampliariam as oportunidades ambientais e econômicas dos sistemas analisados.

Os resultados da Avaliação de Impacto Ambiental para a produção de cenoura, mostrou que o cenário recomendado reduz as emissões de GEE e, considerando todas as categorias analisadas, o impacto pode ser reduzido entre 15 e 70%. As medidas de PmaisL cujos custos poderiam ser recuperados em um ciclo de produção de cenoura resultam também em uma redução de 49% no custo total dos insumos.

A adoção de medidas de PmaisL e a implantação de um sistema multiprodutos: Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta podem reduzir o uso de insumos em 34% na produção de eucalipto. A implantação desse sistema também pode resultar em um ganho de 22% na renda bruta. Os níveis de impacto ambiental com a adoção do ILPF também foram menores em relação sistema de referência. Os subprocessos de preparo do solo, colheita e emissões de fertilizantes e pesticidas foram os que mais contribuíram para os impactos negativos nas categorias analisadas.

O uso de uma estratégia de melhoria contínua do processo através de oportunidades para reduzir a geração de resíduos e a medição de impactos ambientais com uma ferramenta robusta como a ACV, forneceram uma informação mais ampla e completa acerca do desempenho ambiental dos sistemas analisados. Na abordagem do ciclo de vida, essa estratégia permite identificar novas rotas de materiais e produtos na perspectiva da sustentabilidade ambiental.

A silvicultura do eucalipto praticada no extremo Sul da Bahia, representa forte incentivo a economia de baixo carbono, sendo responsável por diversos produtos madeireiros e iniciativas por parte de empresas, produtores e organizações do setor florestal em uma perspectiva de sustentabilidade. As certificações voluntárias por parte dos produtores; a

criação e manutenção de um Fundo com recursos das empresas de base florestal destinado a preservação ambiental; os projetos sociais e ambientais; programas envolvendo governo, empresas e organizações do setor como a ABAF, são ações importantes de organização da cadeia produtiva florestal no Estado da Bahia. No entanto, são necessários maiores investimentos, tanto no setor florestal como na agricultura que fomentem a sustentabilidade ambiental de forma que, os biomas onde essas atividades estão inseridas, cumpram suas funções de regulação dos fluxos dos mananciais hídricos, assegurem a fertilidade, proteção do solo e controle do clima.

O sistema de multiprodutos incrementado com medidas de PmaisL, enquanto uma iniciativa de inovação para uma bioeconomia de baixo carbono, precisa ser melhor investigado no sentido de avaliar os seus efeitos sobre a biodiversidade, uso da água, proteção de áreas nativas, fornecimento de produtos madeireiros, cultivos alimentícios como mandioca, milho e feijão integrados a produção florestal, bem como os benefícios econômicos que podem ser obtidos com essa estratégi

UFBA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA

CEP: 40.210-630

Telefone: (71) 3283-9800

E-mail: pei@ufba.br

Home page: <http://www.pei.ufba.br>

