



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

KÁSSIO RICARDO GARCIA LUCAS

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE SISTEMAS  
AGRÍCOLAS:  
UMA REFLEXÃO SOBRE INDICADORES DE QUALIDADE DO  
SOLO**

---

Londrina  
2020

**KÁSSIO RICARDO GARCIA LUCAS**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE SISTEMAS  
AGRÍCOLAS:  
UMA REFLEXÃO SOBRE INDICADORES DE QUALIDADE DO  
SOLO**

Tese apresentada ao Programa de PósGraduação em  
Agronomia como parte das exigências para a  
obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador: Dr. Maurício Ursi Ventura  
Co-orientadora: Dra. Marília I. S. Folegatti Matsuura

Londrina  
2020

KÁSSIO RICARDO GARCIA LUCAS

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE SISTEMAS  
AGRÍCOLAS:  
UMA REFLEXÃO SOBRE INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO**

Tese apresentada ao Programa de PósGraduação em  
Agronomia como parte das exigências para a  
obtenção do título de Doutor em Agronomia.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Dr. Maurício Ursi Ventura  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Ricardo Ralisch  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Maria de Fátima Guimarães  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Henrique Debiasi  
Embrapa Soja

---

Amanda Nunes Pit  
Universidade Norte do Paraná - UNOPAR

Londrina, 11 de setembro de 2020.

*DEDICATÓRIA*  
*À pesquisa científica nacional.*  
*À natureza.*  
*A Mata Atlântica*  
*(em especial)*

## AGRADECIMENTO

A Deus, por todas as oportunidades e por me conceder força e determinação nos momentos necessários.

Ao meu orientador Dr. Maurício Ursi Ventura e minha co-orientadora Dra. Marília Folegatti Matsuura primeiramente por me aceitarem como orientado e coorientado, posteriormente por tornar possível a realização desta pesquisa, por toda atenção, confiança e paciência ao longo de todas as etapas, por todo valioso conhecimento que me forneceu, mas sobretudo por sua amizade.

Ao Prof. Dr. Ricardo Ralisch, ao Dr. Henrique Debiasi, ao Dr. Julio Cezar Franchini dos Santos e ao Dr. Geraldo Stachetti Rodrigues pelo enorme auxílio, dedicação e paciência, com os quais tornou possível a realização deste trabalho, e o enriqueceu enormemente de inúmeras maneiras, também agradeço por toda atenção, confiança e paciência, por todo valioso conhecimento, sobretudo pela amizade.

À Universidade Estadual de Londrina – UEL, por todas as oportunidades. Ao Departamento de Agronomia, a todos os funcionários e professores por dividirem seus conhecimentos. Especialmente, ao Prof. Dr. Claudemir Zucareli e a Profa. Dra. Maria de Fátima Guimarães, que juntos geriram o curso com excelência, atenção e compreensão.

À CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Unidades de Soja e Meio Ambiente, por colocar a disposição suas estruturas. Aos inúmeros pesquisadores destas Unidades que de forma direta ou indireta auxiliaram e enriqueceram com o fornecimento de informações e dados de extrema qualidade.

A todos os integrantes do laboratório de solos da Embrapa Soja, que não só foram responsáveis pelas análises de solo, mas contribuíram com seus conhecimentos, tornaram possível a conclusão e a garantia de qualidade deste estudo, sendo suas atuações extremamente marcante. Destacadamente aos técnicos Donizete Aparecido Loni e Marluci da Silva Pires, que foram enormemente prestativos e pacientes.

Aos produtores da microbacia do Ribeirão Lagosta, no município de Rolândia-PR, por dedicarem seu tempo e atenção e pela compreensão.

A meus pais que sempre me incentivaram.

A todos, o meu muito obrigado!

(...)

*Bendito seja eu por tudo quanto não sei.  
É isso tudo que verdadeiramente sou.  
Gozo tudo isso como quem sabe que há o sol.*

(...)

*Alberto Caeiro (Fernando Pessoa)*

LUCAS, Kássio Ricardo Garcia. **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de sistemas agrícolas: uma reflexão sobre indicadores de qualidade do solo.** 2020. 89 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

## RESUMO

A agricultura além de fornecer produtos requeridos à subsistência, a qualidade de vida e a saúde das pessoas, é uma importante atividade econômica a muitos países, bem como é, suas questões ambientais à manutenção de bens naturais. As problemáticas ambientais do setor são diversas e complexas, entre elas estão o consumo de insumos, a perda de biodiversidade e a qualidade do solo. Este último um dos mais importantes, por estar diretamente ligado aos demais. A qualidade do solo é identificada como um indicador primário para o manejo sustentável do planeta, devido ao seu papel crucial na sustentação dos recursos naturais. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia capaz de estimar o desempenho ambiental de produtos e serviços através da quantificação de energia e material consumidos, permitindo identificar as atividades e substâncias responsáveis por impactos ambientais dentro de um sistema, ademais de ser normatizada pela International Organization for Standardization (ISO). No entanto, por ainda ser recente seu uso ao setor agrícola, requerer aperfeiçoamentos que permitam avaliar aspectos específicos a sua finalidade. Por ainda não haver modelos padronizadas para se determinar a qualidade do solo em estudos de ACV, apesar dos esforços dos últimos anos, os principais desafios para desenvolvê-los ainda estão sendo pautados. Nos dois trabalhos presentes nesta tese, visa-se contribuir com a discussão modelos praticáveis em estudos de ACV agrícolas. Para isso, no primeiro artigo se desenvolveu um embasamento teórico dos indicadores de qualidade do solo APOIA-NovoRural selecionado para serem aplicados no contexto da ACV. Enquanto que o segundo foi desenvolvido estudos de casos para contextualizar o uso de tais indicadores e de sua contribuição às avaliações de qualidade do solo junto a ACV. A partir destes estudos se observou que a qualidade do solo mostra-se tão importante quanto os demais componentes de emissões ambientais, assim fundamentais a sustentabilidade de sistemas de produção agrícola. Nos estudos, destaca-se o uso de fertilizantes entre as atividades mais relevantes ao desempenho da maioria das categorias de impacto avaliadas. Destacadamente em categorias de Mudanças climáticas, Ecotoxicidade, Uso do solo, entre outras. Nos estudos de casos pode-se observar que as propriedades que tiveram melhores resultados nos indicadores foram as que apontaram melhor manutenção de sua fertilidade. Portanto, a manutenção da fertilidade é primordial para melhorar a disponibilidade de nutrientes no solo sem influir no aporte de fertilizante. Mostrando que os indicadores podem ser úteis para fornecer informações importantes para a gestão ambiental em todas as categorias de impacto por meio do manejo das atividades agrícolas. Estas informações se mostraram importantes, pois parâmetros como matéria orgânica, textura, estrutura, nutrientes e pH, foram, até então, os menos explorados pelos estudos sobre qualidade do solo em ACV. Além do mais, estas informações são altamente relevantes tanto à gestão da qualidade do solo e ao aporte de insumos, quanto para que se desenvolva estratégias de gestão do próprio solo. Portanto, visando contribuir ainda mais com este tema, sugere-se que se realizem novos estudos que confrontem esses resultados e auxiliem no aperfeiçoamento da questão. E como apontado pela UNEP-SETAC (United Nations Environmental Programme-Society of Environmental Toxicology and Chemistry) Life Cycle Initiative LCA, que seja considerada a inclusão de indicadores biológicos e de perda de biodiversidade pelo uso do solo.

**Palavras-chaves:** Avaliação ambiental. Manejo do solo. ACV agrícola. APOIA-NovoRural.

LUCAS, Kássio Ricardo Garcia. **Life Cycle Assessment (LCA) of agricultural systems: a reflection on soil quality indicators**. 2020. 89 p. Tesis (PhD's degree in Agronomy) – State University of Londrina, Londrina, 2020.

## ABSTRACT

Agriculture, in addition to providing products required for subsistence, quality of life and people's health, is an important economic activity for many countries, as well as its environmental issues to the maintenance of natural goods. The sector's environmental problems are diverse and complex, among which are the consumption of inputs, the loss of biodiversity and the quality of the soil. The latter one of the most important, for it is directly linked to the others. Soil quality is identified as a primary indicator for the sustainable management of the planet, due to its crucial role in sustaining natural resources. Life Cycle Assessment (LCA) is a methodology capable of estimating the environmental performance of products and services through the quantification of energy and material consumed, allowing to identify the activities and substances responsible for environmental impacts within a system, in addition to being standardized by the International Organization for Standardization (ISO). However, its use in the agricultural sector is still recent and it requires improvements that allow the evaluation of specific aspects of its purpose. Since there are still no standardized models for determining soil quality in LCA studies, despite the efforts of recent years, the main challenges to develop them are still being addressed. In the two works present in this thesis, the aim was to contribute to the discussion of practicable models in agricultural LCA studies. For this purpose, in the first article, a theoretical basis was developed for the APOIA-NovoRural soil quality indicators selected to be applied in the context of LCA, while the second was developed case studies to contextualize the use of such indicators and their contribution to soil quality assessments with LCA. From these studies it was observed that the soil quality showed to be as important as the other components of environmental emissions, thus fundamental to the sustainability of agricultural production systems. In the studies, the use of fertilizers stands out among the activities most relevant to the performance of most of the impacted categories evaluated, especially in the categories of Climate Change, Ecotoxicity, Land Use, among others. In case studies, it can be observed that the properties that had the best results in the indicators were those that showed the best maintenance of their fertility. Therefore, maintaining fertility is essential to improve the availability of nutrients in the soil without influencing the fertilizer supply, showing that the indicators can be useful to provide important information for environmental management in all impact categories through the management of agricultural activities. This information proved to be important, since parameters such as organic matter, texture, structure, nutrients and pH, were, until then, the least explored by studies on soil quality in LCA. Furthermore, this information is highly relevant both to the management of soil quality and consume of inputs, as well as to develop strategies for managing the soil itself. Therefore, in order to further contribute to this theme, it is suggested that further studies be carried out to confront these results and assist in improving the issue. And as pointed out by the UNEP-SETAC (United Nations Environmental Program-Society of Environmental Toxicology and Chemistry) Life Cycle Initiative LCA that the inclusion of biological indicators and loss of biodiversity by land use is considered.

**Keywords:** Environmental assessment. Soil management. Agricultural LCA. APOIA-NovoRural.



## LISTA DE FIGURAS

### ARTIGO A

- Figura 1** Atividades de cultivo do sistema de produção soja-trigo no desempenho ambiental em cada categoria de impacto: Uso do solo (US); Ecotoxicidade terrestre (EcT); Mudanças climáticas (MC); Toxicidade humana - não-carcinogênica (THN); Depleção fóssil (DF); Acidificação terrestre (AT); Depleção de águas (DA); Ecotoxicidade de águas (EA); Toxicidade humana – carcinogênica (THC); Formação de material particulado (FMP); Depleção de recursos minerais (DRM); Eutrofização de águas (EA); Depleção de ozônio (DO)..... 46
- Figura 2** Resultados das avaliação dos indicadores de qualidade do solo APOIANovoRural para o sistema de produção de soja-trigo..... 48
- Figura 3** Indicadores de qualidade do solo, método APOIA-NovoRural, no âmbito das categorias de impactos da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), midpoint e endpoint..... 54

### ARTIGO B

- Figura 1** Desempenho ambiental dos sistemas de produção (Propriedades x) a da microbacia Ribeirão da Lagosta em Rolândia, Paraná-BR, avaliado pela metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para treze categorias de impactos: Uso do solo (US); Ecotoxicidade terrestre (EcT); Mudanças climáticas (MC); Toxicidade humana - não-carcinogênica (THN); Depleção fóssil (DF); Acidificação terrestre (AT); Depleção de águas (DA); Ecotoxicidade de águas (EA); Toxicidade humana – carcinogênica (THC); Formação de material particulado (FMP); Depleção de recursos minerais (DRM); Eutrofização de águas (EA); Depleção de ozônio (DO)..... 67
- Figura 2** Contribuição das atividades dos sistemas de produção (Propriedades x) ao desempenho das categorias de impactos que mais impactaram. a) Ecotoxicidade terrestre (EcT) (kg 1,4-DCB). b) Mudanças climáticas (MC) (kg CO<sub>2</sub> eq. c) Toxicidade humana, não-carcinogênica (THN) (kg 1,4-DCB). d) Uso do solo (US) (m<sup>2</sup>a crop eq)..... 68

**Figura 3** Resultados das avaliações dos indicadores de qualidade ambiental do solo APOIANovoRural para as propriedades (P1; P2; P3; P4; P5; P6; P7) presente microbacia Ribeirão da Lagosta em Rolândia, Paraná-BR. Os resultados de cada indicador são expressos por valores multiatributo (0 a 1) dos índices de qualidade (IQ = índice de qualidade) e de impacto ambiental (II = índice de impacto), comparados à linha de base, definida como 0,7..... 70

## LISTA DE TABELAS

### ARTIGO A

<b>Tabela 1</b>	Principais aspectos dos métodos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e APOIA-Novorural .....	37
<b>Tabela 2</b>	Parâmetros químicos do solo do sistema de produção soja-trigo considerando dois ciclos produtivos para cada ponto, a profundidade de 0-20 cm .....	44
<b>Tabela 3</b>	Quantidade de insumos aportados pelo sistema de produção soja-trigo avaliado no estudo de validação .....	44
<b>Tabela 4</b>	Resultado da avaliação do sistema de produção soja-trigo pela metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), por categorias de impactos .....	45

### ARTIGO B

<b>Tabela 1</b>	Escopo dos sistemas de produção de cada propriedade na microbacia do Ribeirão Lagosta, no município de Rolândia, no estado do Paraná-Brasil (para dois anos agrícolas – 2015/16 e 2016/2017) .....	63
<b>Tabela 2</b>	Insumos aportados pelos sistemas de produção de cada propriedade presente na microbacia do Ribeirão Lagosta, no município de Rolândia, no estado do ParanáBrasil (para dois anos agrícolas – 2015/16 e 2016/2017) .....	64
<b>Tabela 3</b>	Categorias de impactos, com suas unidades e siglas, adotadas nas avaliações de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACVS	Avaliação do Ciclo de Vida da Sustentabilidade
AIA	Avaliação de Impactos Ambiental
AICV	Avaliação de Impactos do Ciclo de vida
APOIA	NovoRural Sistema de Avaliação Ponderada de Impacto Ambientais de Atividades do Novo Rural
ASCV	Avaliação Social do Ciclo de Vida
CCV	Custeio do Ciclo de Vida
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISSO	International Organization for Standardization
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
PCV	Pensamento do Ciclo de Vida
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
UNEP	United Nations Environment Programme

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA E FILOSOFIA, EPISTEMOLOGIA E JUSTIFICATIVA CIENTÍFICA DA TESE</b> .....	18
2.1	CRUZADA CIENTÍFICA .....	18
2.2	FILOSOFIA DA TESE .....	22
2.3	EPISTEMOLOGIA DA TESE .....	23
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	24
3.1	QUALIDADE DO SOLO .....	24
3.2	GESTÃO AMBIENTAL NA AGRICULTURA .....	25
3.3	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) .....	26
3.3.1	Conceitos, Finalidades e Perspectivas .....	26
3.4	USO DA METODOLOGIA DE ACV NA AGRICULTURA .....	28
3.4.1	Aplicabilidade e Cenário Atual .....	28
3.4.2	Desafios e Desenvolvimento Metodológico.....	29
3.5	INDICADORES APOIA-NOVORURAL .....	31
<b>4</b>	<b>ARTIGO A – PROPOSTA DE USO DE INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO (MÉTODO APOIANOVORURAL) NO CONTEXTO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)</b> .....	33
4.1	INTRODUÇÃO.....	35
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	36
4.3	RESULTADOS.....	45
4.4	DISCUSSÃO.....	48
4.5	CONCLUSÕES.....	56
<b>5</b>	<b>ARTIGO B – USO DE INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO JUNTO A METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLAS: UM ESTUDO DE CASO</b> .....	58
5.1	INTRODUÇÃO.....	60

5.2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	61
5.3	RESULTADOS .....	66
5.4	DISCUSSÃO .....	71
5.5	CONCLUSÕES .....	77
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>78</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A agricultura, além de fornecer produtos requeridos à subsistência, à qualidade de vida e à saúde das pessoas, é uma importante atividade econômica a muitos países. Assim, boa parte da agricultura têm se tornado uma grande atividade integralmente de mercado, cujas produções têm alcançado escalas industriais, dispondo de uma alta quantidade de insumos e de recursos naturais.

Apesar de ser um assunto de proporções globais, as avaliações ambientais e a busca por preservação devem ser pontuais, tomando em conta características e necessidades regionais, para então ser unificado em favor do desenvolvimento da sustentabilidade na agricultura.

Entre as principais problemáticas ambientais associadas à agricultura está a dos impactos negativos sobre a qualidade das águas, o desmatamento e a perda de biodiversidade, o uso sem critérios de fertilizantes e agrotóxicos e a degradação da qualidade do solo, este último um dos mais importantes por estar diretamente relacionado aos demais.

A qualidade do solo é identificada como um indicador primário para o manejo sustentável do planeta devido ao seu papel crucial na sustentação da produção de biomassa, ciclagem de nutrientes e carbono e manutenção da qualidade do ar e da água. Este conceito está relacionado à capacidade dos solos em fornecer serviços ecossistêmicos essenciais, como: purificação e regulação de águas; produção de alimentos, fibras e energia; e, manutenção de funções ecossistêmicas. Assim, garantir a alta qualidade dos solos é um requisito fundamental para a sustentabilidade do planeta.

A pesquisa científica aponta que para a degradação da qualidade as condições mais preocupantes são os graus avançados no aumento da acidez e na falta de nutrientes. Um monitoramento na sua qualidade deve incluir quatro parâmetros iniciais: a fertilidade; a acidez (pH); o teor de matéria orgânica; e, o teor de metais pesados.

Por ser o solo diretamente ligado aos demais recursos naturais, é necessário que ao avaliá-lo se tome em conta suas consequências ao equilíbrio da qualidade geral desses recursos, bem como à manutenção dos ecossistemas através do globo. Além do mais, muitos produtos agrícolas são *commodities*, o que requer que as avaliações de suas produções no campo sejam ligadas as avaliações ao longo de sua cadeia produtiva até o consumidor final.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) uma metodologia capaz de estimar o desempenho ambiental de produtos e serviços através da quantificação de energia e material consumidos e de suas emissões geradas, permite identificar as atividades e as substâncias do

ciclo de vida responsáveis pelos impactos ambientais em um sistema produtivo, oferecendo suporte para que ele seja aperfeiçoado e seus impactos reduzidos.

Sobre o uso da ACV na agricultura, mesmo não sua sendo a principal finalidade, o uso desta metodologia no setor agrícola tem recentemente se expandido, principalmente, no lidar com a gestão dos recursos naturais e uso do solo. Permitindo, atualmente, que sejam tratadas questões ambientais relevantes tanto às etapas de produção no campo quanto à distribuição e consumo de seus produtos, e assim, auxiliando nas tomadas de decisão tanto sobre o uso de insumos quanto aos investimentos em novas tecnologias.

Por ser ela utilizada há pouco tempo na agricultura, aperfeiçoamentos metodológicos como a inclusão de novos métodos e/ou indicadores que permitem avaliar aspectos altamente difíceis, ainda está em curso. Um dos aspectos carentes de informações é justamente a qualidade do solo.

Para a inclusão de modelos de qualidade do solo junto a estudos de ACV, ainda há a necessidade de desenvolverem-se modelos compatíveis às carências atuais metodologia. Para isto, o maior desafio à inserção de parâmetros do solo em estudos de ACV é encontrar modelos que sejam praticáveis a todos os contextos geográficos, ou, ao menos, passíveis de serem tornados praticáveis.

Portanto, espera-se que por meio dos estudos desenvolvidos nesta tese, se eleve a quantidade de informações viáveis ao debate científico sobre o tema, através da exposição teórica de sua problemática e de estudos de casos usando de métodos convencionais de avaliação de impacto ambiental (AIA) na determinação da qualidade do solo junto a ACV, diminuindo a negligência que a qualidade do solo vem sofrendo em tais estudos.

Assim, esta tese foi estruturada em dois artigos: o Artigo A criando e enquadrando a base teórica ao lado das pesquisas mais relevantes e atuais a respeito do tema proposto; e, o Artigo B submetendo a ideia do A a uma avaliação construída sobre uma base experimental.

O objetivo deste trabalho é aplicar indicadores de qualidade do solo já desenvolvidos e estabelecidos junto ao estudo de ACV, com o intuito de buscar informações que oriente novos estudos e auxilie em traçar os próximos caminhos no desenvolvimento de modelos (métodos e/ou indicadores) de qualidade do solo junto a estudo de ACV agrícola.



## 2 REVISÃO DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA E FILOSOFIA, EPISTEMOLOGIA E JUSTIFICATIVA CIENTÍFICA DA TESE

### 2.1 Cruzada Científica

Diante de batalhas e fogueiras, violência e perseguição, homens que se recordavam dos tempos clássicos adotaram a razão e, assim, acenderam a luz mais sóbria dada à humanidade. Nasce a ciência moderna. Começa a Cruzada Científica.

Thomas Woods Jr.<sup>1</sup>, em sua obra sobre a construção da civilização ocidental, com grande quantidade de materiais e sólidos argumentos, mostra que foi nos mosteiros medievais em que se aflorou o interesse pelo pensamento racional, que quando padronizado, se tornaram a estrutura básica da ciência atual. Monges eruditos encontraram nos pensamentos de Aristóteles a base necessária para construir um novo mundo, um mundo menos mistificado, composto por pessoas que pretendiam compreender os fenômenos que presenciavam em seu dia a dia, ou seja, menos metafísica, mais razão e lógica.

Tais ideias transbordam dos mosteiros e alcançam cidades, vilas e indivíduos isolados nos campos. Agora as ideias deixam de ser restritas aos monges, modestamente começa a aumentar os números de mentes a buscar respostas concisas sobre a realidade. Os monges percebem rapidamente tal moção e agem velozmente para reuni-los juntos a si, assim, origina-se o templo dos intelectuais, a Universidade. Criou-se, neste momento, uma das bases da civilização ocidental.

Uma menção é importante para firmar o motivo de a ciência e a Universidade terem nascida nos mosteiros. Ainda na obra de Thomas Woods Jr., encontra-se argumentações que afirmam que tal fenômeno só pôde acontecer devido à crença destes monges em um único Deus soberano e criador do universo, proveniente desta crença a segurança de que tudo que existe é tão concreto quanto à matéria física visível nos corpos e na natureza, regidos por atividades e leis que se repetem e apresentam um sincronismo dia após dia. Fiéis, curiosos e seguros da eternidade do ambiente ao redor, os eruditos passaram, então, a estudar os fenômenos que presenciavam diariamente. No entanto, antes que pudessem descrever e calcular fenômenos físicos e leis naturais precisava compreender a realidade, entender os próprios pensamentos, a própria vida.

Para isto, os primeiros cursos a serem oferecidos nas universidades eram o de teologia, direito, artes e, principalmente, filosofia. Este último, desde sempre, mas

---

<sup>1</sup> Como a igreja católica construiu a civilização ocidental (São Paulo: Quadrante, 2019)

principalmente com o oferecimento do conhecimento de maneira formal, consagra-se como a mãe da ciência moderna. A espada mais afiada na Cruzada Científica.

Para Ayn Rand<sup>2</sup>, a filosofia é a única disciplina que habilita os homens a lidar com problemas de ampla escala e que tem o poder de integrar e de unificar as diversas atividades humanas.

Se a filosofia é a mãe da ciência moderna, podemos dizer que ela também tem uma avó, a teologia. Ortega y Gasset<sup>3</sup> afirma que é necessário haver liberdade para haver filosofia, filosofia para haver ciência, ciência para haver técnica e técnica para haver produtos e serviços requeridos pelas sociedades. No entanto, Antonin-Gilbert Sertillanges<sup>4</sup>, que se dedicou a escrever obras sobre como levar uma vida intelectual, acrescenta um quesito ao raciocínio de Ortega y Gasset, diz que se necessita da teologia para que haja filosofia. Dados a origem do pensamento ocidental e da ciência moderna nos mosteiros medievais, é uma colocação concebível.

Saltando no tempo, deparamo-nos com a desunião da ciência moderna com alguns dos polos de sua origem: os monges; os mosteiros, e; a teologia. Agora a ciência passa a ser tratada quase que exclusivamente em seus templos, as Universidades, por todos os tipos de cidadãos, desde que tenham a aptidão do eruditismo. A lógica e a razão não são mais um tabu, ao menos aos membros da vida intelectual. Neste momento, passam a buscar resposta e descreverem fenômenos já observados, mas ainda não retratados, não logicamente compreendidos e cientificamente caracterizados. Agora as batalhas não se dão mais entre misticismo e metafísica contra razão e lógica, mas se dão entre fenômenos meramente observados contra a compreensão lógica e científica deles. Nasceu uma nova fase da Cruzada Científica.

A nova etapa das batalhas científicas ocorre até meados do século XVIII, quando o domínio sobre temas gerais unidos a um conhecimento vasto a um tópico específico ainda eram pré-requisitos fundamentais para a vida intelectual: físicos dominavam a filosofia, tinha amplo conhecimento sobre os avanços da biologia e dos assuntos sociais e políticos de suas regiões, bem como os filósofos auxiliavam no desenvolvimento teórico das ciências exatas e sociais, e assim por diante.

Além do aprimoramento teórico e técnico dos métodos científicos e da descrição de fenômenos hoje essenciais para o contínuo desenvolvimento da humanidade, como a

---

<sup>2</sup> O retorno do primitivismo: a revolução antiindustrial (Campinas: Vide Editorial, 2019)

<sup>3</sup> A rebelião das massas (Campinas: Vide Editorial, 2016)

<sup>4</sup> A vida intelectual (Campinas: Kirion, 2019)

energia elétrica, a astronomia, a base da ciência médica atual, para citar alguns. Em um momento há um transbordo da intelectualidade das Universidades à vida social comum, intelectuais a deixam para promover atos que iriam mudar significativamente a rumo da humanidade. Ocorre então à revolução industrial e, méritos a parte, os movimentos intelecto-culturais iluministas, que futuramente resultaria em importantes revoluções: O iluminismo britânico: a sociologia e a virtude; O iluminismo francês: a ideologia e a razão; O iluminismo americano: a política e a liberdade<sup>5</sup>; entre outros.

Como na etapa anterior, esta segunda fase alcança o seu final. A próxima vai ocorrer em campos de batalhas delimitados por fronteiras levantadas quase que exclusivamente pela própria ciência. Em tal ocasião, há pouquíssimo espaço para o misticismo e a metafísica (batalha da primeira etapa), a razão e a lógica como tabus (batalha da segunda etapa), a luta agora é travada entre intelectualidade e especialização. Esta é a fase atual da Cruzada Científica.

A ciência passa a requerer maior especialização de seus praticantes, que assim os fazem. No entanto, descuidam de seus intelectos e se dedicam exclusivamente sobre suas áreas de estudo. Os novos intelectuais não são mais capazes de compreender e debaterem sobre temas diversificados, sobre tópicos que não pertencem a sua especialidade, desprezam o conhecimento (e a cultura) que não apresentam relação com o seu ramo de estudo. Pior, se esquecem e, em alguns casos, rejeitam a filosofia. Surge o especialista. A espada mais afiada na Cruzada Científica, agora, repousa em sua bainha.

Ortega y Gasset define este novo homem da ciência (o especialista) como:

(...) o homem de ciência atual é o protótipo do homem-massa<sup>6</sup>. Nem por defeito unipessoal de cada homem de ciência, mas porque a própria ciência – raiz da civilização – converte-o automaticamente em homem-massa, faz dele um primitivo, um bárbaro moderno. (...)

No entanto, há um lado positivo decorrente deste acontecimento, com o desenvolvimento das especializações uma enorme quantidade de informações tem sido

---

<sup>5</sup> Os caminhos para a modernidade: o iluminismo britânico, francês e americano (São Paulo: É realizações editora, 2011)

<sup>6</sup>“Massa é o conjunto de pessoas a que podemos denominar de “homem médio”, é o homem que não se valoriza, que se comporta como a maioria e que se sente bem por ser idêntico aos demais. Por “Massa”, não se entende uma classe social, mas uma maneira de ser pessoal que pode surgir em todas as classes, que por isso mesmo representa o nosso tempo, sobre a qual predomina e impera.

revelada, fenômenos nunca antes imaginados surgem à luz, métodos e teorias científicas surgem a cada ano e assim por diante. Em todo momento podemos encontrar resultados satisfatórios que são produzidos por estes especialistas em seus estudos, a humanidade ainda prospera. Mas e a ciência em si? Se se necessita de (...) filosofia para haver ciência (...), e a ciência atual junto aos seus praticantes abandonaram a filosofia, ainda há ciência? Se se requer (...) ciência para haver técnicas (...), a atual prosperidade em se criar técnicas é verdadeiramente confiável?

Voltemos à filosofia, definimo-la: filosofia é ramo do conhecimento humano responsável por compreender os fenômenos que regem a vida – todos os fenômenos e vida presente no mundo – e, assim, entregar à humanidade a verdade através da realidade observada e descrita.

Portanto, a ciência que desconsidera a filosofia, ou mesmo que dela não se inicia, pode estar verdadeiramente conectada à realidade e, assim, entregar a verdade? O tempo responderá quando os frutos das técnicas atuais empregadas começarem a ser colhidos. O que podemos afirmar é que esta acontecendo um processo inalterável, a intensa especialização do homem da ciência. Mas e a própria ciência, como se desenvolverá? Vejamos o que Ortega y Gasset tem a dizer a respeito:

(...) a construção da ciência experimental, iniciada no século XVI, obrigou a um esforço de unificação. Tal foram à obra de Newton e demais homens de seu tempo. Mas o desenvolvimento da ciência experimental deu início a um trabalho de caráter oposto à unificação. Para progredir, a ciência necessitava de que seus homens se especializassem. Os homens de ciência, não ela mesmo. A ciência não se especializada. (...) Nem mesmo a ciência empírica tomada em sua integridade, é verdadeira se separada da matemática, da lógica, da filosofia. Mas o trabalho dela tem que ser – inevitavelmente – especializado. (...)

Notamos na colocação de Ortega y Gasset que o problema atual encontrado na maneira de fazer ciência não esta na ciência em si ou por ser ela realizada de modo especializado, assim deve ser. O problema está na mentalidade dos especialistas que rejeitam outras áreas de conhecimento fora do escopo de sua especialidade, pois, ainda conforme o autor: (...) O especialista “sabe” muito de um pedaço mínimo do universo; mas ignora todo o resto radicalmente. (...)

Assim, uma das possíveis consequências da Cruzada Científica atual, além do exílio mental que tais investigadores estão sujeitos – pois tomando em conta que a rejeição dos científicos a temas fora de suas especialidades siga – não somente eles, mas também seus estudos estarão suscetíveis ao isolamento técnico-científico, pois produzirão pesquisas incomunicáveis uma as outras.

Mas, há uma consequência mais grave que já pode ser observada. Lembremo-nos da definição de filosofia: o ramo do conhecimento responsável por descrever e compreender a realidade e entregar a verdade. Assim, ao desconhecê-la, ou pior, ignorá-la, os homens de ciência estão desprezando em seus trabalhos a própria realidade. O resultado desta imprudência é uma enorme quantidade de pesquisas elaborada e aplicas que propõe mudanças a técnicas, atividades, modelos, equações, etc. sem que conheçam precisamente o ambiente, os processos, as atividades do qual estão propondo que sejam alterados.

Digamos que o acontecimento é gravíssimo e pode acarretar em consequências desastrosas, chegando a comprometer a saúde humana, animal, vegetal e tudo relacionado a elas. A terceira etapa da Cruzada Científica perdura e perdurará por um prazo escondido da vista da humanidade pelo horizonte. Enquanto que suas consequências seguirão a assolar sociedades à medida que a verdade e a realidade se ausente de trabalhos científicos.

A especialização dos investigadores deve continuar, o que deve ser alterado são seus interesses e, até, desprezo por temas e questões fora do escopo de suas linhas de pesquisa – lembremos: a ciência não se especializa. Mas, mais que isto, homens de ciência deve obrigatoriamente recuperar a filosofia em seus trabalhos, pois têm o compromisso com a humanidade em estudar a realidade e entrega-lhes a verdade. Do qual é impossível sem a mãe da ciência.

Empunhemos, nós científicos, novamente a espada mais afiada nas Cruzadas Científicas.

## 2.2 Filosofia da tese

A filosofia, por mim creditada, da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) agrícola é a das ciências naturais em sua forma elementar, ou seja, compreender e descrever o meio ambiente – neste caso o agrícola – através da epistemologia.

Portanto, a filosofia dos trabalhos aqui desenvolvidos deve ser a mesma da ACV agrícola, de modo que, estenda a compreensão e a descrição realidade das atividades agrícolas

sobre o meio ambiente – aqui especificamente dos fenômenos sobre a qualidade e serviços ambientais do solo.

### 2.3 Epistemologia da tese

Segundo a epistemologia de Karl Popper<sup>7</sup> existem duas formas de ciência: Ciência teórica e Ciência empírica.

A diferença entre as duas é que a primeira apresenta e floresce conceitualmente ideais, técnicas, métodos e/ou metodologias, passíveis de serem experimentalmente postas a prova. A segunda se acarreta em aplicar os conceitos científicos estabelecidos ao longo da criação e aperfeiçoamento das ciências, em um teste que será tomado como a base experimental a desafiar teorias previamente desenvolvidas.

Vale destacar que, conforme o próprio Popper, a diferença entre Ciência teórica e Metafísica, é propriamente a capacidade da primeira em ser postas a prova por meio de uma base experimental, enquanto que a segunda ainda não esteja pronta a tal desafio. Ou nunca estará.

Nesta tese foram respeitados os conceitos epistemológicos que formam as duas ciências, de acordo com Popper. Com o Artigo A criando e enquadrando a base teórica ao lado das pesquisas mais relevantes e atuais a respeito do tema proposto, e no Artigo B submetendo a ideia do A a uma avaliação construída sobre uma base experimental.

No entanto, isto, discordando desde o início do conceito de falseabilidade<sup>8</sup> de Popper. Assim, buscou-se aqui, por meio da lógica indutiva, a verificabilidade<sup>9</sup>, ou seja, validar o raciocínio e não refutá-lo.

Aparentemente exitoso.

---

<sup>7</sup> A lógica da pesquisa científica (São Paulo: Cultrix, 2013)

<sup>8</sup> Tomar como forma lógica a possibilidade em validar as provas empíricas através do sentido negativo, ou seja: ser possível refutar, pela experiência, um sistema científico empírico.

<sup>9</sup> O oposto da falseabilidade. Produzir experiência que verifiquem um anunciado.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Qualidade do solo

A qualidade do solo é um dos três componentes da qualidade ambiental, junto à da água e do ar. No entanto, enquanto que a qualidade da água e a do ar é definida pelo grau de poluição, disponibilidades e efeitos a saúde humana, animal e aos ecossistemas naturais, a qualidade do solo não se limita a poluição, mas também a sua capacidade de funcionar dentro de ecossistemas e de seus limites de uso para sustentar a produtividade biológica (vegetal e animal) e, assim, manter a qualidade ambiental. Além do mais, a qualidade do solo é mais complexa por constituir a fase sólida além da líquida e gasosa e por ser usado para uma variedade maior de fins (ANDREWS et al., 2002; BÜNEMANN et al. 2018; DAVIDSON, 2000).

Bünemann et al. (2018), em sua revisão de literatura sobre a qualidade do solo, aponta que a multifuncionalidade dos solos e sua qualidade projetada desde a perspectiva ambiental abrangem ações com finalidades que vão desde a proteção de bacias hidrográficas até a prevenção à poluição de águas e do ar por poluentes potenciais como produtos químicos agrícolas e industriais e resíduos orgânicos. Para Vidal Legaz et al. (2017) a qualidade do solo pode ser avaliada tanto para agroecossistemas onde o principal objetivo é a produtividade, quanto para ecossistemas naturais onde os objetivos são a manutenção da qualidade ambiental e a conservação da biodiversidade.

Sendo assim, sobre a avaliação geral da qualidade do solo que esta em uso precisa-se incluir valores de referência ou de linha de base que permitam a identificação dos efeitos de manejos em que nele esta sendo praticados. No entanto, os solos reagem lentamente ao seu uso e a tais manejos, e por essa razão pode ser mais difícil detectar alterações na qualidade do solo antes de ocorrerem danos à qualidade da água e do ar (BÜNEMANN et al. 2018). Portanto, um quesito da avaliação da qualidade do solo é identificar os atributos que indicam sua capacidade operacional e assim serem utilizados como indicadores da qualidade.

Para Creamer et al. (2016) a seleção de indicadores de qualidade do solo precisa ser baseada em funções do solo e/ou serviços ecossistêmicos. Conforme Vincent et al. (2018), podem ser eles químicos, físicos e biológicos, sendo os mais adequados aqueles capazes de tomar em conta parâmetros dos três quesitos. Além do mais, o uso de informações independentes e a inclusão de resultados tanto qualitativos quanto quantitativos podem melhorar a eficiência das avaliações de qualidade (GESSNER e CHAUVET, 2002).

Não somente indicadores e métodos, mas a determinação de qualidade do solo em si segue em desenvolvimento. Apesar de a definição de certos parâmetros aparentemente já estarem estabelecidas, novos campos de avaliações têm sido propostos, como: desempenho da planta e biodiversidade acima do solo; paisagem; e, relações socioeconômicas. Para Bünemann et al. (2018) o uso de novas tecnologias será outro avanço importante para o aperfeiçoamento nas avaliações de qualidade do solo, citando algumas, destaca-se a captura de dados móveis por fotografias, abordagens de *big data* e análise de solo de alto rendimento, como espectroscopia visual e infravermelha próxima.

Portanto, fica-se claro que não só o conceito de qualidade do solo, mas também quantificá-la são atividades complexas. No qual, somente o contínuo desenvolvimento de estudos e da comunicação científica será capaz de desenvolvê-lo a um nível mínimo de coerência e de ampla aceitação.

### 3.2 Gestão Ambiental na Agricultura

O consumo é uma das principais vias de manutenção do desenvolvimento econômico. Os produtos agrícolas, diferente de outros setores econômicos, tendem a fornecer itens e serviços requeridos à subsistência, à qualidade de vida e à saúde das pessoas. No entanto, o setor não está imune ao perfil atual de mercado que tem em seus processos a necessidade de produção em tempo e escala industrial, dispondo de uma elevada quantidade de insumos e de recursos naturais.

Por outro lado, apesar de ser um assunto presente em todas as regiões do mundo, a busca por soluções deve ser pontual, respeitando as características de cada área e comunidade, então unindo os resultados em busca de um único objetivo, que é o desenvolvimento da sustentabilidade das atividades agrícolas.

Historicamente, conforme Skinner et al. (1997) e Stoate et al. (2001), a gestão ambiental na agricultura passou a ser pensada após a década de setenta, pois antes disso era vista como uma atividade isenta de degradação ambiental, sendo uma má interpretação destas atividades por serem elas operadas em meios naturais. Na década de oitenta, com a expansão da compreensão e a intensificação dos debates sobre os assuntos ambientais a todos os ramos e atividades que envolviam a humanidade, seu bem-estar e também em suas ações, observou-se a necessidade de questionar a agricultura também ambientalmente. Tópicos como boas práticas agrícolas, proteção da água, conservação do solo, desmatamento e perda de biodiversidade e uso de fertilizantes e agrotóxicos, são já de início levantadas e questionadas.



Atualmente, mesmo com a busca por atender as questões iniciais e como tecnicamente tratá-las, os tópicos explorados são os mesmos, o que diferencia o presente do passado é uma busca por uma melhor definição de conceitos e, principalmente, pelo aperfeiçoamento da gestão. German et al. (2017), ao analisar mais de 600 artigos que tratam de impactos ambientais na agricultura, observaram que apenas o reconhecimento e a descrição ambiental de externalidades não tem sido suficiente para definir se um manejo agrícola é “sustentável” ou “insustentável” em termos absolutos, pois a mesma intervenção pode ter impactos diferentes, dependendo do contexto (local, social e financeiro) em que é aplicado. Junto a isso, questões como quais indicadores ambientais devem ser considerados chaves para a agricultura e como gerenciar os aspectos econômicos e sociais no eixo de avaliação das questões ambientais, são as indagações atuais a serem desenvolvidas dentro da temática da gestão ambiental agrícola.

Unindo desafios pontuais e globais, a gestão ambiental tem a complexa tarefa de apresentar soluções específicas a casos locais, sem deixar de integrar em seus resultados soluções amplas que auxiliem as pessoas em diferentes partes do mundo a terem produtos de qualidade, bem-estar social, desenvolvimento econômico e recursos naturais garantidos as futuras gerações.

### 3.3 Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método de avaliação ambiental normatizado pela *International Organization for Standardization* (ISO), pertencente à família ISO 14040, incorporada à série 14000.

As ANBT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) determina que um estudo de ACV seja composto por quatro fases: definição de objetivos e escopo; análise de inventário; avaliação de impactos; e interpretação. No entanto, não impõe uma estratégia única para que se conduza um estudo de ACV. As organizações podem implementar o estudo de acordo com a aplicação pretendida e com suas próprias necessidades.

#### 3.3.1 Conceitos, Finalidades e Perspectivas

Na era da informação, a conscientização tem sido altamente praticada, principalmente ao se tratar de assuntos técnicos e com necessidade de explicações especializadas, assim tem sido com a importância da proteção ambiental e de seus impactos associados à manufatura e ao consumo. Desta forma, para que as informações sejam as mais

precisas possíveis, há a necessidade e o desafio de se desenvolver metodologias que melhor compreendam e lidam com os impactos ambientais.

Uma metodologia com esse objetivo é a ACV (ABNT, 2009b), uma ferramenta complexa a qual, conforme a norma ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), é possível ser aplicada para:

- identificação de oportunidades para melhoria do desempenho ambiental de produtos em diversos pontos de seu ciclo de vida;
- ampliação do nível de informação dos tomadores de decisão para gestão ambiental em organizações governamentais e não governamentais;
- seleção de indicadores de desempenho ambiental relevantes, incluindo técnicas de medição;
- marketing ambiental (por exemplo, na implantação de um esquema de rotulagem ambiental ou na elaboração de uma declaração ambiental de produto).

Contudo, por ser uma metodologia em aperfeiçoamento, ainda há desafios não superados. Segundo Yang e Heijungs (2017), os surgimentos de estudo regionalizados, que são altamente positivos por inventariar diversos sistemas de produção, não têm atendido ao intuito de fornecer inventários capazes de integrar cadeias produtivas de outros estudos.

A liberdade ao conduzir um estudo de ACV e eleger os diferentes métodos necessários para completar cada uma das suas etapas, tem comprometido o uso dos inventários que têm sido conduzidos por diferentes modelos de avaliação de impactos, muitas vezes incompatíveis entre si. Muitos destes métodos contam com avaliações genéricas em diferentes condições e, portanto, adotam-se dados de valores médios que não fornecem base adequada a estudos globais nem regionais (YANG e HEIJUNGS, 2017).

Um tema que vem sendo discutido é a inclusão de métodos econômicos e sociais à ACV com o intuito de torná-la uma ferramenta de avaliação de sustentabilidade. Para Petti et al. (2018), a ACV Social tem grande potencial para ser desenvolvida e aplicada, no entanto, ainda imatura pela falta de estudos de caso que avalie sua aplicabilidade. A inclusão de modelos econômicos também tem sido um desafio ainda não superado. Para Wood e Hertwich (2013) ainda são necessários indicadores de impacto econômico que se apliquem a várias partes interessadas e que tenham relações dinâmicas entre elas, além de serem capazes de abordar a sustentabilidade econômica em longo prazo e não apenas o custo econômico em curto prazo.

Para Onat et al. (2017), o desenvolvimento da ACV em uma metodologia de avaliação da sustentabilidade ainda tem muitas questões a serem aprofundadas. Estudos sobre o conceito, práticas e direções futuras para uma metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida da Sustentabilidade (ACVS) apontam que as principais deficiências estão na falta de compreensão e interação mútua de métodos e indicadores de sustentabilidade e na visão precária e reducionista ao observar os resultados conjuntos da avaliação da ACV ambiental, ACV social e parâmetros econômicos (STEFANOVA et al., 2015; ONAT et al., 2017).

Assim posto, nota-se que a ACV segue em aperfeiçoamento, e que seu uso atrelado a métodos já estabelecidos é um dos mais importantes caminhos para o seu progresso, seja modelos de avaliações sociais, econômicas e, principalmente, ambientais.

### 3.4 Uso da Metodologia de ACV na Agricultura

Frequentemente, a avaliação ambiental de sistemas de produção agrícola tem focado somente em efeitos individuais, apesar de se tratarem de atividades que tendem a impactarem grande amplitude. Por não integrarem sistemas por inteiro, essas avaliações têm sido pouco eficientes para se indicar novas estratégias de produção.

A ACV, por ser uma metodologia que estima o desempenho ambiental através da quantificação de energia e materiais consumidos e das emissões geradas (ABNT, 2009b), deve ser designada a estudos que pretendam conectar todos os impactos encontrados dentro de um sistema de produção. Conforme Ruviano et al. (2012), os estudos de ACV na produção agrícola são relevantes para toda a cadeia produtiva, e inclusive aos produtores, dos quais, muitos que não contam com um sistema de gestão ambiental estão se deparando com dificuldades de encontrar novas técnicas de manejo que elevem a eficiência de suas produções.

Apesar do aumento no número de pesquisas a aplicar a ACV no setor agrícola e dos importantes resultados alcançados, por não ser o principal âmbito de afinidade da metodologia, ainda é um setor que requer um expressivo aprimoramento metodológico, considerando-se ter sido esta uma ferramenta criada inicialmente para o setor industrial.

#### 3.4.1 Aplicabilidade e Cenário Atual

O avanço na sustentabilidade ambiental dos sistemas agrícolas ainda depende de uma definição e do desenvolvimento de métodos de avaliação que permitam ser utilizados em diferentes domínios. Atualmente o Pensamento do Ciclo de Vida (PCV) é reconhecido como

uma prática de grande importância para que os sistemas de produção e consumo de alimentos enfrentem os desafios atuais relacionados à sustentabilidade e direcionem pesquisas que propõem atender tal intuito (NOTARNICOLA et al., 2017). De fato, o pensamento e as diferentes metodologias baseadas no ciclo de vida, como Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Custeio do Ciclo de Vida (CCV), Avaliação Social do Ciclo de Vida (ASCV) e a Avaliação do Ciclo de Vida da Sustentabilidade (ACVS) podem apoiar a transição à sustentabilidade dos padrões atuais de produção e consumo, quanto a isto a literatura científica a respeito tem prosperado (van den WERF et al., 2015; NEMECEK et al., 2016).

Estudos de ACV têm determinado que as intensificações de atividades em áreas rurais aumentam significativamente os impactos ambientais por unidade funcional, enquanto que o aumento da produção por área, sem elevar o consumo de recursos, não aumenta os impactos na mesma proporção, ainda mais se considerado a tendência na pressão por solos agrícolas pelo setor bioenergético, o urbanístico e o avanço da desertificação, de forma que o aumento na eficiência do uso do solo parece o caminho lógico.

No entanto, a metodologia atual de ACV está incompleta e não avalia alguns aspectos que são críticos para a produção sustentável de alimentos, por exemplo, a diminuição da qualidade e fertilidade do solo, aumento da erosão e a redução dos serviços ecossistêmicos devido à intensificação e perda de biodiversidade. Sendo assim, a aplicabilidade e, principalmente, a interpretação dos resultados ainda depende de sinergias entre muitos fatores que não estão sendo capturados atualmente pela ACV (MILÀ I CANALS et al., 2007; NOTARNICOLA et al., 2017).

Além do mais, para Hauschild et al. (2012) os sistemas agrícolas são tipicamente mais variáveis nos dados de inventário que outros setores, pois, em uma mesma área, com a mesma cultura, podem ser aplicadas duas substâncias diferentes para o mesmo propósito, assim como na avaliação de impactos, no qual um uso específico do solo pode mudar dramaticamente de uma região para outra. Isso tem estado presente nos inventários a comporem os bancos de dados, resultando em expressivas limitações quanto aos seus usos.

### 3.4.2 Desafios e Desenvolvimento Metodológico

Os principais desafios, segundo Notarnicola et al. (2017), estão relacionados principalmente em como os problemas ambientais são encarados e nas diferenças metodológicas com que são avaliados. Primeiramente, pela difusão do pensamento equivocado de que uma maior produção por área seja o suficiente para garantir bons

resultados em ecoeficiência, em seguida pelo fato de metodologias, como a ACV, serem ainda incompletas e não avaliarem de forma abrangente alguns aspectos que são críticos para a produção sustentável de alimentos.

Em estudos de ACV, as fases de inventário e avaliação de impactos têm sido afetadas pela diversidade de modos em que podem ser montados e avaliados, comprometendo a interpretação. Além disso, a inserção destes inventários em bases de dados e o uso deles por outros estudos os forçam a lidar com resultados alcançados por meio de recomendações globais, mas desenvolvidos para condições regionais, ou vice-versa. Isto expõe a necessidade de diretrizes específicas para inventários agrícolas, incluindo uma padronização aos inventários a comporem bases de dados (NOTARNICOLA et al., 2017).

De acordo com a revisão de estudos de ACV para produção vegetal de Perrin et al. (2014) muitos estudos falham ao apresentar a representatividade do dados de solo e clima. Quanto aos solos, em estudos de ACV têm sido tratados como parte da tecnosfera e considerado um ativo físico, ou seja, um meio de suporte na entrega de insumo, não incluídos na avaliação dos impactos os danos à sua fertilidade, estrutura, balanço hídrico e biodiversidade, sendo, o desafio atual a tal problema a inclusão do solo agrícola na ecosfera, incluindo a avaliação destes impactos junto aos seus tipos de uso (AUDSLEY, 1997; NOTARNICOLA et al., 2017).

Diante de tais obstáculos, um dos desafios atuais é o de complementar os parâmetros convencionalmente adotados nas modelagens de ACV com outro meio de mensuração do aporte de insumos e energia e modelos de emissões para apurar a compreensão do que está acontecendo no campo. No qual atualmente os resultados variam conforme os métodos escolhidos, comprometendo o uso posterior dos dados. Em relação aos impactos abarcados, é necessário abordar as ameaças ao meio ambiente que ainda não estão adequadamente abordadas, isso implica na necessidade de ampliar e melhorar a avaliação do impacto encontrando maneiras de integrar conhecimentos provenientes de outros domínios científicos na modelagem dos inventários, além de encontrar um equilíbrio entre quantidade e qualidade, bem como explorar as possibilidades de implementação de outros modelos a ACV (NOTARNICOLA et al., 2017).

Outro desafio a modelagem de inventários de ACV é a necessidade de definições mais claras entre os elementos que integram a tecnosfera e a ecosfera, assim como a definição de métodos comuns aplicados na determinação dos impactos no uso de fertilizantes e agroquímicos em geral, ainda incerto devido à oferta restrita de modelos e a falta de consenso

dentre os usuários da metodologia (FINVEDEN et al., 2009; NOTARNICOLA et al., 2017; ROSENBAUM et al., 2015). Ainda que, mesmo com modelos disponíveis, cada um apresenta limitações ao avaliar determinadas atividades, ou em ser utilizado em certa região.

Tradicionalmente, os métodos de avaliação de impactos baseiam-se principalmente em modelos ambientais genéricos, não regionais e que se concentram predominantemente em impactos relacionados à energia (ANTÓN et al., 2014). No setor agrícola, os aspectos ambientais dependem do local e estão intimamente relacionados com os recursos naturais e a qualidade dos ecossistemas, assim adquirem uma relevância ainda maior na avaliação pontual. Assim, a UNEP/SETAC *Life Cycle Initiative* tem se empenhado em um projeto com o objetivo de fornecer orientação global em construir um consenso sobre os indicadores ambientais a serem aplicados na avaliação dos impactos (JOLLIET et al., 2014).

Portanto, é de rápida percepção que há uma variedade de desafios a ser superada para que as avaliações da ACV alcance o nível de eficiência desejado, no entanto, o notável entusiasmo da comunidade científica através da quantidade de materiais publicados em todo o mundo, além da dedicação de inúmeras instituições, deixam claro o reconhecimento técnico e científico da metodologia e o seu potencial em contribuir na busca pela sustentabilidade.

### 3.5 Indicadores APOIA NovoRural

O APOIA NovoRural (Sistema de Avaliação Ponderada de Impacto Ambientais de Atividades do Novo Rural) é um método de gestão ambiental que tem o intuito de avaliar e propor adequações ambientais às atividades e gestão territorial agrícola (RODRIGUES et al., 2006).

O sistema APOIA NovoRural foi elaborado com base nos princípios fundamentais da ciência de Avaliação de Impactos Ambiental (AIA) (RODRIGUES, 2009; RODRIGUES et al., 2010), tais como:

- a) avaliar atividades rurais diversas, em distintas regiões e situações ambientais, em escala adequada ao local de estudo (assim tomando-se a decisão justa para gestão ambiental);
- b) incluir indicadores de manejo implicados com o desenvolvimento local sustentável;
- c) facilitar a detecção de pontos críticos para correção de manejo;
- d) expressar os resultados em uma forma simples e direta para agricultores e empresários rurais, tomadores de decisão e o público em geral;

e) fornecer uma medida final integrada do impacto ambiental e sustentabilidade das atividades rurais avaliadas, contribuindo para a gestão ambiental e a ecocertificação, em atendimento à demanda de produtores e de suas organizações.

O método é composto por um conjunto de indicadores construídos em matrizes escalares de ponderação. São ao total 62 indicadores em cinco dimensões de sustentabilidade: ecologia da paisagem; qualidade ambiental (atmosfera, água e solo); valores socioculturais; valores econômicos; e gestão e administração (RODRIGUES, 2009).

Os fatores de ponderação são responsáveis por determinar os índices de impacto, construídos por meio de revisão de métodos de avaliação de impactos, discussões em grupos de especialistas e workshops, seguidos de validação de campo para diferentes setores produtivos (RODRIGUES, 2009) (o conjunto completo de indicadores está disponível em Rodrigues et al. (2003)).

As matrizes de ponderação foram elaboradas para transformar as variáveis dos indicadores em índices de impacto, segundo funções de utilidade, e expressam em linhas de base cada indicador, além de serem derivadas de testes de probabilidade e de sensibilidade (GIRARDIN et al., 1999; RODRIGUES, 2009).

Rodrigues (2009) explica que o teste de probabilidade define os limites mínimo e máximo das escalas, conforme a solução numérica da variável que define o indicador. Também esclarece que no teste de sensibilidade define-se o resultado positivo ou negativo, e o significado das mudanças trazidas na atividade avaliada. Tais testes permitem que sejam elaboradas tabelas de correspondências entre os índices de impacto do indicador e os valores de utilidade, e então apresentados graficamente, expressando o índice de impacto por meio das equações de melhor ajuste que foram matematicamente executas.

Os resultados são apresentados em gráficos que expressam o impacto ambiental para cada um dos indicadores, comparando a linha de base. Posteriormente são combinados pela média dos valores de utilidade de cada dimensão considerada e ao conjunto de indicadores, compondo um diagrama síntese de sustentabilidade para a dimensão avaliada e para a área como um todo (RODRIGUES e CAMPANHOLA, 2003).

Mais informações e imagens da matriz de ponderação e do gráfico final estão presentes no artigo A desta tese.

#### 4 ARTIGO A – Proposta de uso de indicadores de qualidade do solo (método APOIA-NovoRural) no contexto da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

##### Resumo

A modernização da agricultura a tem transformado em uma atividade industrial. Essa agricultura moderna tem sido marcada por passivos ambientais originados pelo consumo de insumos e energia e pela mudança no uso do solo. Assim, surgiram-se questionamentos sobre suas problemáticas ambientais e a busca por metodologias capazes de avaliá-las efetivamente. Parte deste empenho deu-se através da adequação de metodologias desenvolvidas a outros setores, como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), criada para o setor industrial. O seu uso a agricultura é recente e com isso requerente de aperfeiçoamentos, assim, seu desenvolvimento depende da introdução de métodos e indicadores que permitem avaliar aspectos complexos, como a qualidade do solo, ainda não adequadamente endereçada pela metodologia. Portanto, o objetivo deste estudo foi desenvolver uma base de conhecimento sobre a aplicabilidade de indicadores de qualidade do solo para sistemas agrícola na tentativa de utilizá-los em estudos de ACV. Para isso avaliou-se conceitualmente e em um breve estudo de caso o uso dos indicadores de qualidade do solo APOIA-NovoRural, aplicando-o juntamente à ACV. Para o estudo de caso foi considerado um sistema de produção soja-trigo, cultivado no Paraná-Brasil tomando em conta as informações necessárias para ambas às avaliações, insumos para ACV e análises químicas do solo para os indicadores de qualidade do solo. Nos resultados da ACV observou-se que as categorias de maior impacto foram a de Ecotoxicidade terrestre (EcT), Mudanças climáticas (MC) e Uso do solo (US) devido, principalmente, as atividades relacionadas ao aporte e aplicação de insumos, como fertilizantes e sementes. Os indicadores APOIA-NovoRural apresentaram resultados variáveis conforme o parâmetro. A Matéria Orgânica (MO), em geral foi satisfatória, apesar de agronomicamente não estar adequada. Quanto aos nutrientes, potássio (K) e magnésio (Mg) apontaram resultados positivos para o índice de qualidade e insatisfatório ao de impacto, o fósforo (P) teve os índices negativos por excesso. Para o pH, índices regulares, mas ainda agronomicamente adequados, dispensando o aporte de insumos para uma correção. Para H+Al os índices de qualidade e impacto foram insatisfatórios. A Soma de bases e a CTC foram adequados aos índices de qualidade e negativos aos de impacto, enquanto que a Saturação de bases teve índices negativos de qualidade e de impacto. Assim, percebeu-se que a interação da ACV e dos indicadores APOIA-NovoRural não pode ser feita de maneira direta, mas demonstra possibilidade de contribuírem entre si. Os indicadores podem ser uma alternativa promissora para avaliar os impacto na qualidade do solo, desde que seja aplicado paralelamente a ACV e os resultados posteriormente acerbados. Sobre uma integração de indicadores e ACV é necessário que seja os indicadores traduzidos a Fatores de Caracterização (FC) e inseridos em Inventários do Ciclo de Vida (ICV). No entanto, ainda não há uma recomendação praticável para tal realização. Concluiu-se que o uso dos indicadores APOIA-NovoRural é viável de ser aplicado junto à ACV, desde que seja adotados e interpretados individualmente e, posteriormente, que seja os resultados reunidos e sintetizados a uma única finalidade, a melhoria do desempenho ambiental de atividades e propriedades rurais.

Palavras-chaves: ACV agrícolas; uso do solo; impacto ambiental; avaliação ambiental.



## Proposal for using soil quality indicators (APOIA-NovoRural method) in the context of Life Cycle Assessment (LCA)

### Abstract

The modernization of agriculture has transformed it into an industrial activity. This modern agriculture has been marked by environmental issues originated by the consumption of inputs and energy and by the change in land use. Thus, questions arose about their environmental problems and the search for methodologies capable of evaluating them effectively. Part of this commitment came about through the adaptation of methodologies developed to other sectors, such as the Life Cycle Assessment (LCA), created for the industrial sector. Its use in agriculture is recent and therefore requires improvements, thus, its development depends on the introduction of methods and indicators that allow the evaluation of complex aspects, such as the soil quality, not yet adequately addressed by the methodology. Therefore, the aim of this study was to develop a knowledge base on the applicability of soil quality indicators for agricultural systems in an attempt to use them in LCA studies. For this, the use of APOIA-NovoRural soil quality indicators was conceptually evaluated and in a brief case study, applying it together with the LCA. For the case study, was considered a soybean-wheat production system cultivated in Paraná-Brazil, taking into account the necessary information for both evaluations, inputs for LCA and chemical soil analysis for soil quality indicators. In the LCA results, it was observed that the categories with the greatest impact were Terrestrial ecotoxicity (EcT), Climate change (MC) and Land use (US), mainly due to activities related to the input and application of inputs, such as fertilizers and seeds. The APOIA-NovoRural indicators showed variable results according to the parameter. Organic matter (OM), in general, was satisfactory, although it is not agronomically adequate. As for nutrients, potassium (K) and magnesium (Mg) showed positive results for the quality index and unsatisfactory for the impact index, phosphorus (P) had negative indexes for excess. For the pH, regular indexes, but still agronomically adequate, eliminating the input of inputs for a correction. For H+Al, the quality and impact indices were unsatisfactory. The Sum of bases and CTC were adequate to the quality indexes and negative to the impact indexes, while the Base saturation had negative quality and impact indexes. Thus, it was realized that the interaction of the LCA and the APOIA-NovoRural indicators cannot be done directly, but demonstrates the possibility of contributing to each other. Indicators can be a promising alternative to assess the impacts on soil quality, as long as it is applied in parallel to LCA and the results subsequently approached. About an integration of indicators and LCA, it is necessary that the indicators be translated to Characterization Factors (CF) and inserted in Life Cycle Inventories (ICV). However, there is still no practicable recommendation for such an achievement. It was concluded that the use of the APOIA-NovoRural indicators is feasible to be applied with the LCA, as long as they are adopted and interpreted individually and, later, that the results are gathered and synthesized for a single purpose, the improvement of the environmental performance of activities and rural properties.

Key-words: Agricultural LCA; land use; environmental impact; environmental assessment.

#### 4.1 Introdução

A modernização da agricultura não somente a desenvolveu tecnologicamente, como a transformou em uma atividade de nível industrial. Uma mostra desta evolução é a sua importância na economia de países como o Brasil. A agricultura moderna, industrializada, tem sido marcada por passivos ambientais originados por elevados fluxos de insumos e energia, e pelo uso intensivo do solo.

No entanto, mais tardio que o setor industrial, segundo Stoate et al. (2001), apenas na década de mil novecentos e oitenta, a agricultura passou a ser verdadeiramente indagada sobre as questões ambientais, atentando-se, a início, a tópicos como boas práticas agrícolas, proteção da água, conservação do solo, desmatamento e perda de biodiversidade e uso de fertilizantes e agrotóxicos.

A partir destes questionamentos ambientais, logo se iniciou uma busca por metodologias que melhor identificassem seus problemas, até então pouco explorados (SKKINER et al., 1997). Uma parte deste empenho deu-se através da adequação de metodologias desenvolvidas em outros setores para serem utilizados na agricultura. Algumas destas metodologias mostraram aptidão ao setor, mas requerendo diversas adequações.

Entre as metodologias destaca-se a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que surgiu na década de 1960, desenvolvida por corporações do setor industrial preocupadas em reduzir seus custos operacionais que decidiram inventariar os consumos energéticos decorrentes da fabricação de seus produtos. A partir da década de 1980, a ACV passa a ter maior projeção e ser aplicada para as mais recentes problemáticas ambientais (SEO e KULAY, 2006), que coincidem com o avanço das questões ambientais na agricultura.

No entanto, o início de seu uso no setor agrícola foi ainda mais recente e por isso tem demandado elevada quantidade de adaptações, como a inclusão de novos métodos que permitam avaliar aspectos complexos, como a qualidade do solo.

Os solos são componente essencial da sustentabilidade de todo o ecossistema global, junto à hidrosfera e a atmosfera (Garrigues et al. 2012) . Cada um deles tem suas próprias funções e processos, além de interagirem entre si. Assim, todos esses componentes deveriam ser abordados em um único estudo ambiental. Para Creamer et al. (2016) avaliação da indicadores de qualidade do solo precisa ser baseada em funções do solo e/ou serviços ecossistêmicos, podendo ser eles químicos, físicos e biológicos.

A ACV é uma metodologia flexível o suficiente para ser capaz de incorporar uma ampla variedade de propriedades e práticas de manejo na qualidade do solo e assim avaliar

seus impactos. No entanto, há desafios muito complexos ainda sem soluções, como inclusão da variabilidade espacial e temporal das características do solo em escalas globais e a influência de fatores externos, como clima e práticas de manejo.

Mesmo com a crescente aplicação da metodologia à agricultura, a dificuldade em identificar modelos e indicadores que superem os desafios em avaliar a qualidade do solo adiou o seu desenvolvimento. Assim, a incapacidade de representar impactos na qualidade do solo permanece um dos problemas não resolvidos da ACV (REAP et al., 2008), ainda que várias sugestões em incorporá-los têm sido feitas de diferentes perspectivas, principalmente para que sejam tratadas como categoria de impacto intermediário no contexto dos impactos do uso da terra (COWELL e CLIFT, 2000; GARRIGUES et al., 2012).

Por atualmente não existirem métodos estabelecidos para que se avalie a qualidade de solo pela a ACV, espera-se que este estudo eleve a quantidade de informações viáveis ao debate científico sobre o tema, através da exposição teórica de sua problemática e com novas informações por meio de indicadores de qualidade do solo nunca antes aplicado a tal finalidade.

Portanto o objetivo deste estudo foi desenvolver uma base de conhecimento sobre a aplicabilidade de um conjunto de indicadores de qualidade do solo para sistemas de produção agrícola na tentativa de utilizá-los em estudos de ACV.

## 4.2 Materiais e Métodos

### 4.2.1 Modelo conceitual

Este trabalho propõe integrar avaliações de qualidade do solo a estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) com o propósito de melhorar o nível de informação dos impactos ambientais de sistemas de produção provenientes de atividades relacionadas ao manejo do solo e ao aporte de insumos.

Esta iniciativa embasa-se na necessidade de se estudar o uso de indicadores de qualidade do solo no desenvolvimento metodológico da ACV em estudos agrícolas (NOTARNICOLA et al., 2017). Assim, propôs-se a adoção dos indicadores de qualidade ambiental do método de avaliação de impacto ambiental (AIA) APOIA-NovoRural (RODRIGUES e CAMPANHOLA, 2003), adotando-se apenas o módulo solo. Informações detalhadas sobre o método estão presentes no item 4.2.2.1.2.

Os indicadores foram desenvolvidos sobre matrizes de ponderação que levam em conta as características químicas locais do solo. Assim, considerou-se que as condições químicas do solo podem ser tomadas como indicadores de qualidade e de suporte à gestão e melhorias no desempenho ambiental agrícola.

### 3.2.2 Metodologia de ACV e APOIA-NovoRural

As normas de execução da ACV permitem que em qualquer de suas etapas (definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação dos impactos e interpretação) sejam selecionados métodos de avaliação independentes a serem aplicados em conjunto ao estudo de ACV (ver 3.2.2.1.1).

Neste estudo, foram avaliados os indicadores de qualidade do solo do APOIA-NovoRural, brevemente descrito no tópico anterior. No entanto, a efetividade desta integração pode vir a viabilizar a participação de indicadores a avaliar outros compartimentos das atividades agrícolas junto a ACV.

Sendo assim, a interação entre a metodologia de ACV e os indicadores APOIA-Novo-Rural resulta em um novo requisito para avaliações de impactos, deixando-a mais próxima das características individuais do ambiente a ser avaliado, principalmente ao levar em conta o uso do solo e a busca por soluções práticas.

#### 4.2.2.1 Principais características e conceitos de cada metodologia

Os principais aspectos dos métodos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e APOIA-NovoRural são apresentados nos tópicos a seguir.

Tabela 1. Principais aspectos dos métodos de ACV e APOIA-NovoRural

	ACV	APOIA-NovoRural
Propósito	Promover a proteção ambiental através da avaliação de impactos associados com o ciclo de vida de produtos, técnicas e processos, tanto na manufatura quanto no consumo. <sup>a</sup>	Guiar as escolhas de atividades, tecnologias e gestões, de acordo com o potencial e restrições de uso do desenvolvimento do local e da sustentabilidade rural. <sup>c</sup>
Procedimento	Definição e objetivo de escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação. <sup>a</sup>	Consiste em um conjunto de matrizes escalares formuladas que permite a avaliação dos indicadores de desempenho ambiental de uma atividade agrícola. <sup>c</sup>
Limitações	Um conjunto limitado de pontuações ambientais para várias categorias de impacto. <sup>b</sup>	Algumas análises podem requerer dispositivos específicos e maiores recursos financeiros.
Virtudes	Fornecer informações de gestão e aperfeiçoamento de sistemas de produção e manufatura. Evita que problemas sejam compartilhados para outras questões ou áreas. <sup>b</sup>	Agrega componentes de diferentes naturezas, permite a composição de índices parciais de qualidade ambiental para diferentes dimensões ao mesmo tempo em que os índices são adicionados para a avaliação de impactos ambientais. <sup>c</sup>
Fraquezas	Processo complexo que requer tempo e uma quantidade de dados considerável. <sup>b</sup>	Requer tempo e recurso para coleta de amostras e análises em laboratórios. <sup>c</sup>

Fontes: <sup>a</sup>ABNT (2009a: 2009b); <sup>b</sup>Herman et al. (2007); <sup>c</sup>Rodrigues e Campanhola (2003).

#### 4.2.2.1.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

As normativas ANBT NBR ISO 14040 e a 14044 (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b) determinam que um estudo de ACV deva ser composto por quatro fases: definição de objetivos e escopo; análise de inventário; avaliação de impactos; e interpretação. As normas não definem métodos únicos para se conduzir a ACV, pode-se implementar estudos de acordo com a aplicação pretendida e com suas próprias necessidades.

Mesmo com os avanços no desenvolvimento da metodologia ainda existem desafios a enfrentar, como a regionalização de modelos de emissões e fatores de caracterização para a avaliação de impactos. A conciliação da ACV com outros métodos já estabelecidos pode vir a trazer o aprimoramento que a ACV tem necessitado.

A necessidade em examinar se a metodologia de gestão ambiental permite o aprimoramento do produto avaliado é somente uma das razões para a necessidade de padronização. O propósito geral de uma norma é fornecer assistência às organizações que desejam implementar ou aprimorar um sistema de gestão ambiental e, assim, melhorar o desempenho do que está sendo avaliado (ABNT, 2015). Para isso, deve estar claro o que é definido como desempenho e melhoria (NAWROCKA e PARKER, 2009).

Como uma ferramenta de gestão ambiental, a ACV pode ser utilizada para identificar aspectos ambientais significativos dos produtos e serviços, declaração e rotulagem ambiental, comunicação ambiental, entre outros. Com isso, permite que sejam realizadas avaliações de impactos ambientais, avaliação de sustentabilidade, análise de fluxo de materiais e substâncias, avaliação de risco de produtos químicos, entre outras (ABNT, 2009a).

Isso a torna uma metodologia versátil, podendo ser integrada por métodos e ferramentas específicas aos setores a que se pretende aplica-la, possibilitando, até mesmo requerendo, sua interação com medições ou avaliações complementares.

#### 4.2.2.1.2 APOIA-NovoRural

O APOIA-NovoRural (Sistema de Avaliação Ponderada de Impacto Ambiental de Atividades Rurais) é um método de gestão ambiental que avalia atividades rurais, assim como possibilita a adequação tecnológica das atividades e sua gestão territorial (RODRIGUES et al. 2003; RODRIGUES et al., 2006). Permite promover programas de desenvolvimento rural em escala de país a setores e cadeias produtivas agrícolas, sistemas de produção e próximos a áreas de proteção ambiental (BUCHINELLI et al. , 2007; RODRIGUES et al. , 2007; RODRIGUES et al., 2008).

Assim, o sistema APOIA-NovoRural foi elaborado conforme as principais premissas da ciência de Avaliação de Impactos Ambiental (AIA) (RODRIGUES, 2009; RODRIGUES et al., 2010):

a) avaliar atividades rurais diversas, em distintas regiões e situações ambientais, em escala adequada ao local de estudo (assim tomando-se a decisão justa para gestão ambiental);

b) incluir indicadores de manejo implicados com o desenvolvimento local sustentável;

c) facilitar a detecção de pontos críticos para correção de manejo;

d) expressar os resultados em uma forma simples e direta para agricultores e empresários rurais, tomadores de decisão e o público em geral;

e) fornecer uma medida final integrada do impacto ambiental e sustentabilidade das atividades rurais avaliadas, contribuindo para a gestão ambiental e a ecocertificação, em atendimento à demanda de produtores e de suas organizações.

O sistema é formado por conjuntos de indicadores construídos em matrizes escalares de ponderação, pensados para que seja possível avaliar sistematicamente as atividades. O conjunto é formado por um total de 62 indicadores, conforme cinco dimensões de sustentabilidade: ecologia da paisagem; qualidade ambiental (atmosfera, água e solo); valores socioculturais; valores econômicos; e gestão e administração (RODRIGUES, 2009).

Por ser a ACV uma metodologia quantitativa, visou-se, então, a integrá-la com a dimensão de qualidade ambiental, e, conforme os detalhes presentes no item 4.2.3, apenas o módulo solo. De forma analítico-quantitativa o método avalia os efeitos das atividades em cada um de seus indicadores, sendo, portanto, o local rural sua escala espacial de análises.

Os fatores de ponderação são responsáveis por determinar os índices de impacto, construídos por meio de revisão de métodos de avaliação de impactos, discussões em grupos de especialistas e workshops, seguidos de validação de campo para diferentes setores produtivos (RODRIGUES, 2009). O conjunto completo de indicadores do método e suas unidades de medição, pesquisadas no campo e em análises laboratoriais, estão disponíveis em Rodrigues et al. (2003).

As matrizes de ponderação são construídas para transformar as variáveis dos indicadores em índices de impacto, segundo funções de utilidade (escala normalizada de 0 a 1, com o valor da linha de base de conformidade ambiental padronizado em 0,7) e expressam

linhas de base para cada indicador e foram derivadas em testes de probabilidade e de sensibilidade (BISSET, 1987 citado por RODRIGUES et al., 2003; GIRARDIN et al., 1999).

Rodrigues (2009) explica que o teste de probabilidade define os limites mínimo e máximo das escalas, além de seu valor de conformidade (0,7), conforme a solução numérica da variável que define o indicador. Também esclarece que no teste de sensibilidade é definida a direção do indicador, positivo ou negativo, e o significado das mudanças trazidas sobre a atividade avaliada, segundo relação quantitativa com o desempenho estabelecido na linha de base.

Tais testes permitem que sejam elaboradas tabelas de correspondências entre os índices de impacto do indicador e os valores de utilidade, e então apresentados graficamente. Assim, expressando o índice de impacto em valores de utilidade, por meio das equações de melhor ajuste que foram matematicamente executas.

Os resultados expressam o impacto ambiental para cada um dos indicadores, comparando a linha de base, definida como valor 0,7. Posteriormente são combinados pela média dos valores de utilidade de cada dimensão considerada e ao conjunto de indicadores, compondo um diagrama síntese de sustentabilidade para a dimensão avaliada e para a área como um todo (RODRIGUES, 2009). Finalmente, elabora-se relatório de gestão ambiental para tomada de decisão.

A diferenciação entre índice de qualidade (ou desempenho ambiental) e impacto (ou alteração percentual) é: qualidade - correspondência entre valores de utilidade e estado do ambiente, ou objetivos de sustentabilidade esperados; impacto (para os indicadores que têm dois índices) - correspondência entre alteração da situação antes à depois (sendo que inalterado = 0,7, sem impacto no indicador).

Conforme Rodrigues et al. (2009) as matrizes de ponderação apresentam construção variável para cada indicador, incluindo dados comparativos da situação prévia e posterior à implantação da atividade. Sendo também aplicados como fatores de ponderação para causa e níveis de dano dos impactos observados e escalas de variação percentual dos impactos. Assim, os distintos indicadores têm suas implicações adequadamente avaliadas, conforme os dados quantitativos específicos que os explicam. Para detalhes sobre a construção do sistema e das matrizes de ponderação, ver Rodrigues et al. (2003).

As informações requeridas para preenchimento das matrizes de ponderação para os indicadores relacionados com a qualidade do solo são obtidas com análises instrumentais de campo e laboratório.

Os indicadores aqui selecionados do APOIA-NovoRural são: 1) Matéria orgânica (MO); 2) pH; 3) Fósforo (P); 4) Potássio-trocável (K); 5) Ca e Mg trocável; 6) H+Al – acidez potencial; 7) Soma de bases; 8) Capacidade de troca catiônica (CTC); 9) Saturação por bases.

#### 4.2.3 Critério para a seleção da metodologia de ACV

Uma metodologia confiável de gestão ambiental deve ser uma metodologia padronizada, especialmente pela NBR ISO 14000 (NAWROCKA e PARKER, 2009), por ser ela uma normatização global, como é a metodologia de ACV.

A necessidade em examinar se a metodologia de gestão ambiental permite o aprimoramento do produto avaliado é somente uma das razões para necessidade de padronização. O propósito geral de uma norma é fornecer assistência às organizações que desejam implementar ou aprimorar um sistema de gestão ambiental e, assim, melhorar o desempenho do que está a ser avaliado (ABNT, 2015).

Como uma ferramenta de gestão ambiental a ACV pode ser utilizada para identificar aspectos ambientais significativos dos produtos e serviços, declaração e rotulagem ambiental, comunicação ambiental, entre outros. Como isso, permite que sejam realizadas avaliações de impactos ambientais, avaliação de sustentabilidade, análise de fluxo de materiais e substâncias, avaliação de risco de produtos químicos, entre outras (ABNT, 2009a). Isso a torna uma metodologia versátil, podendo ser integrada a métodos e ferramentas específicas diversas.

#### 4.2.4 Critério para a seleção dos indicadores APOIA-NovoRural

Conforme estabelecido pela OECD (1999), para que os indicadores ambientais sejam eficazes devem atender os seguintes critérios de seleção:

- relevância política: questões políticas, em vez de orientada por dados (embora fosse necessário que os indicadores fossem relevantes para a política, o próprio contexto da política tinha que ser explicitado);
- solidez analítica: baseada em ciência sólida;
- facilmente interpretada: informação essencial comunicada aos usuários;
- mensuráveis: dados que podem ser coletados e medidos de forma realista, levando em conta considerações espaciais e temporais.



Para a escolha dos indicadores, deve-se considerar ainda sua relevância a proposta, sua fundamentação teórica e sua capacidade de mensurabilidade, assim como a disponibilidade de dados e a capacidade de ser replicado para o território nacional.

Conforme Rodrigues (2009), os indicadores selecionados para este estudo visam atender os modelos de avaliação ambiental conforme os princípios da OECD (1999). Além do mais os indicadores do APOIA-NovoRural apresentam em seus resultados, como recomenda de OLDE et al., 2018, um forte caráter para implementação e contribuição para mudanças nos sistemas avaliados.

#### 4.2.5 Combinações consistentes de avaliações

A iniciativa em aplicar uma metodologia de gestão ambiental que resulta em um estudo não garante que a atividade avaliada projete o caminho justo ao seu aperfeiçoamento. É bastante plausível que a melhoria possa vir a ser alcançada por fatores não medidos ou que coexistam no sistema, e assim não percebido pela metodologia. De fato, a correlação entre metodologia de gestão ambiental e a melhora do desempenho não necessariamente indica que a melhoria não teria sido a mesma sem tal metodologia (SEKAHAN, 1992 citado por NAWROCKA e PARKER, 2009).

Para Nawrocka e Parker (2009) a correlação avaliação/melhora individualmente talvez não mostre conformidade, mas certamente gera argumento, particularmente se o estudo é acoplado à teoria sobre como os sistemas de gerenciamento ambiental devem melhorar o desempenho. Um argumento mais forte pode ser feito se houver uma correlação entre desempenho, sistema e funcionamento do mecanismo específico que se espera ter efeito.

Se o intuito da metodologia é melhorar o desempenho ambiental, é útil examinar somente os mecanismos que devem afetar melhoria buscada. Assim, é necessário considerar não apenas a questão de que há correlação entre a implementação da metodologia e a melhoria do desempenho ambiental, mas de como o desempenho ambiental é definido para cada atividade avaliada, apoiado por estudos de diferentes fatores que podem contribuir com os resultados da metodologia.

Conforme a NBR ISO 14001 (ABNT, 2015) não existe um método único para determinar aspectos ambientais significativos. No entanto, avaliações complementares podem fornecer resultados consistentes e estabelecer critérios operacionais aos resultados, relacionados a questões ambientais, questões legais e as preocupações de partes interessadas.

Em avaliações ambientais de atividades agrícolas é fundamental que sejam considerados aspectos ambientais, tais como clima, regime hídrico e tipo de solo, pois todos estes fatores estão diretamente ligados a ações dos insumos no ambiente.

Outro ponto importante a ser considerado é a aptidão do local em suportar a atividade, assim como a necessidade de insumos e serviços requeridos para que a debilidade ou carência do ambiente natural possa ser suprida de uma maneira ambientalmente aceitável, como exemplo, conhecer o estado da fertilidade do solo e adequar a dose de fertilizante para que atenda as necessidades da cultura, sem que excedam e tornem-se emissões ao ambiente. São muitos fatores a serem considerados, no qual o uso de uma única metodologia pode não ser o suficiente.

Seguindo esta ideia, enquanto a ACV define os impactos dos insumos em suas adequadas categorias de impactos, os indicadores do APOIA-NovoRural indicam os efeitos na qualidade do solo pelo sistema de produção avaliado.

#### 4.2.5.1 Combinando a ACV com indicadores do APOIA-NovoRural

A combinação de metodologias, como indicadores de qualidade do solo com a ACV, gera benefícios como a expansão dos limites do sistema. Para Hermann et al. (2007) o uso de novos indicadores junto a ACV é um ponto de partida para ampliar seus limites de avaliações e sua atuação na tecnosfera, permitindo que fatores antes não diretamente considerados passem a ser abarcados em um mesmo estudo.

Tais combinações têm sido encontradas em certa medida na literatura, onde dados de inventários de ACV podem ser agregados em categorias de impacto para serem usados como indicadores de desempenho. Para Zobel et al. (2002), este tipo de combinação pode ser vantajoso porque padroniza o procedimento para formato e qualidade de dados e, assim, aumentar a transparência, a reprodutibilidade e a credibilidade dos inventários e cenários.

A inclusão dos indicadores de qualidade do solo à ACV é dada por meio da associação do valor indicado pelos indicadores ao sistema avaliado. Assim, por meio da ACV identificar os insumos e processos a contribuir com cada categoria de impacto aos resultados dos indicadores. Vincular esses resultados irá indicar as atividades e consumo de insumos recomendados para a melhoria do desempenho ambiental de sistemas de produção.

#### 4.2.6 Estudo de validação

Para o estudo de validação, adotou-se os dados de solo e um estudo de ACV de um sistema de produção de soja-trigo cultivados na microbacia do Ribeirão Lagosta, no município de Rolândia-PR, Brasil, considerando dois ciclos produtivos, 2015/2016 e 2016/2017. As coletas de solo foram realizadas em três pontos, com profundidade de 0-20 cm, tabela 2, aplicando nos indicadores a média entre eles.

Tabela 2. Parâmetros químicos do solo do sistema de produção soja-trigo considerando dois ciclos produtivos para cada ponto, a profundidade de 0-20 cm

Análises de parâmetros químicos												
Pontos	P	C org.	pH	Al	H+Al	Ca+Mg	Ca	Mg	K	S. Bases	CTC	V
	mg dm <sup>-3</sup>	g dm <sup>-3</sup>	CaCl <sub>2</sub>	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>								%
Primeira amostragem												
P1	123	16,46	5,53	0,0	46,2	93,2	79,5	13,7	8,8	102,0	148,25	69
P2	108	14,60	5,79	0,0	40,8	94,7	80,9	13,7	9,6	104,3	145,15	72
P3	165	16,21	5,57	0,0	49,3	81,2	70,1	11,1	6,5	87,7	137,10	65
Média	132	15,76	5,63	0,0	45,5	89,7	76,9	12,9	8,3	98,1	143,50	68
Segunda amostragem												
P1	226	16,68	5,39	0,0	49,6	91,1	78,0	13,1	6,8	97,9	147,60	66
P2	65	13,43	5,28	0,0	49,1	78,0	68,2	9,8	6,0	84,0	133,20	63
P3	200	17,95	5,51	0,0	46,3	86,4	71,8	14,6	6,0	92,4	138,80	67
Média	164	16,02	5,39	0,0	48,4	85,2	72,7	12,5	6,3	91,5	139,87	65

Extratores: P, K = Mehlich 1; Ca, Mg, Al = KCl 1M; (H+Al) = SMP; Carbono orgânico = método colorimétrico; pH = CaCl<sub>2</sub> 0,01 M

Para a ACV, o escopo atende as seguintes informações:

- Sistema de produto: processos de produção de grãos, insumos e óleo diesel;
- Função: produzir grãos de soja e trigo.
- Unidade de referência: 1 ha por dois anos, nos quais se processou um ciclo completo do sistema de produção (4.500 kg de soja e 2.640 kg de trigo por ano);
- Fronteiras do sistema de produto: adotou-se uma abordagem *cradle-to-gate* (do berço à porteira), para as produções de grãos, insumos agrícola e diesel.

O inventário é detalhado na tabela 3.

Tabela 3. Quantidade de insumos aportados pelo sistema de produção soja-trigo avaliado no estudo de validação

Semeadura	Insumos								
	Fertilizantes e Corretivos		Herbicidas		Inseticidas		Fungicidas		
	kg/ha								
Sementes	480	Calcário	90	2,4-D	2,42	Imidacloprid	0,225	Azoxistrobina	0,01
		Ureia	77,4	Glifosato	8,28	Lambda-Cialotrina	0,053	Benzovindiflupir	0,126
		SSP	40,2	Metsulfurom metílico	0,0048	Lefenurom	0,015	Fludioxonil	0,005
		KCl	130			Tiametoxam	0,0705	Metalaxil-M	0,004
						Tiodicarbe	0,315	Protiocanazol	0,144
								Tebuconazol	0,372
								Trifloxistrobina	0,260

Total	10,7	Total	0,679	Total	0,921
-------	------	-------	-------	-------	-------

As emissões por fertilizantes foram estimadas para cada sistema de produção conforme Nemecek e Schnetzer (2011), Canals (2003) e IPCC (2006), para amônia para a atmosfera; lixiviação de nitrato para águas subterrâneas; fósforo através de erosão para águas superficiais; N<sub>2</sub>O e NO<sub>x</sub> para atmosfera; CO<sub>2</sub> fóssil após a aplicação de calcário; metais pesados para solos agrícolas, águas superficiais e águas subterrâneas; e CO<sub>2</sub> para atmosfera. As emissões de CO<sub>2</sub> por mudança do uso da terra foram determinadas conforme Novaes et al. (2017).

### 4.3 Resultados

#### 4.3.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A tabela 4 apresenta os resultados da avaliação do sistema de produção soja-trigo pela metodologia de ACV. As categorias de impactos estão ordenadas por valor de seus impactos de forma decrescente, assim nota-se que as categorias que mais impactaram, por valor de unidade, foram destacadamente a de Ecotoxicidade terrestre (EcT), Mudanças climáticas (MC) e Uso do solo (US).

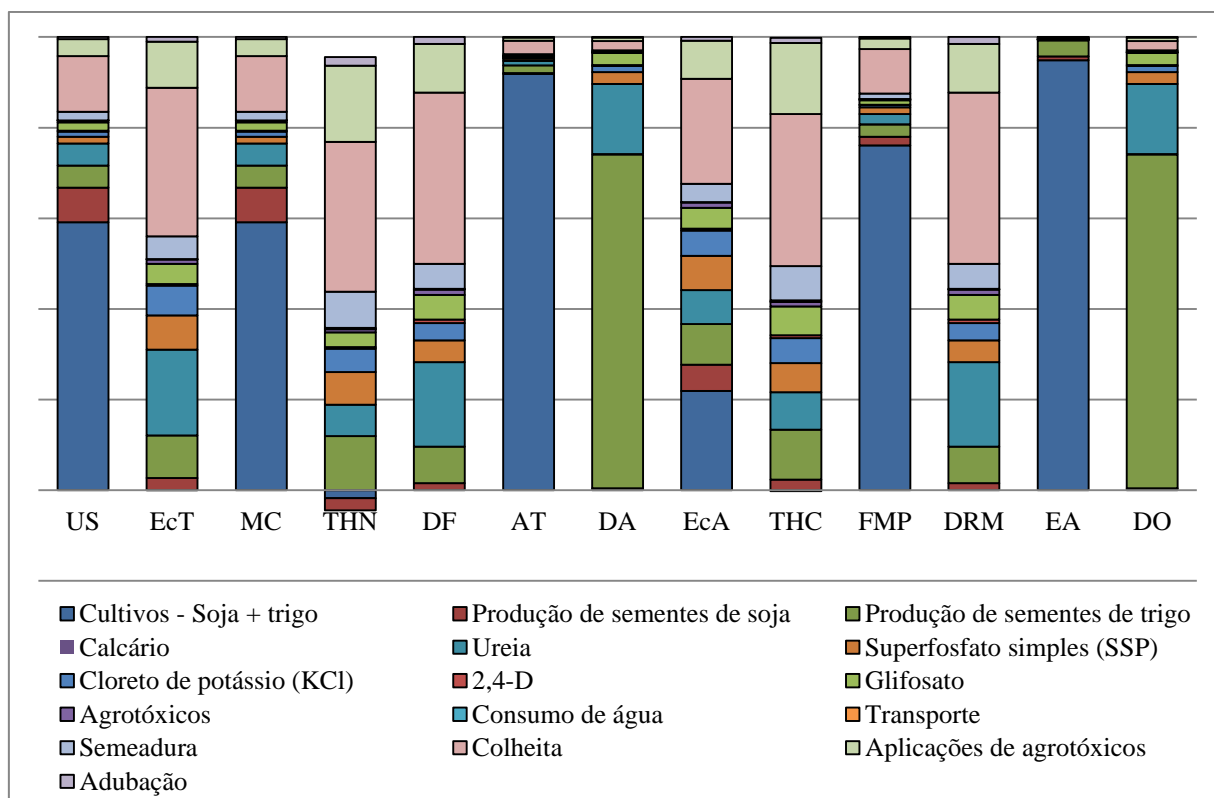
Tabela 4. Resultado da avaliação do sistema de produção de soja-trigo pela metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), por categorias de impactos

Categorias de impactos	Unidades	Siglas	Emissões
Uso do solo	m <sup>2</sup> a crop eq	US	1,15E+04
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	EcT	7,31E+03
Mudanças climáticas	kg CO2 eq	MC	5,49E+03
Toxicidade humana - não-carcinogênica	kg 1,4-DCB	THN	2,40E+03
Depleção fóssil	kg oil eq	DF	5,53E+02
Acidificação terrestre	kg SO2 eq	AT	1,37E+02
Depleção de águas	m <sup>3</sup>	DA	9,22E+01
Ecotoxicidade de águas	kg 1,4-DCB	EcA	7,16E+01
Toxicidade humana – carcinogênica	kg 1,4-DCB	THC	6,78E+01
Formação de material particulado	kg PM2.5 eq	FMP	2,04E+01
Depleção de recursos minerais	kg Cu eq	DRM	1,40E+01
Eutrofização de águas	kg P eq	EA	1,63E+00
Depleção de ozônio	kg CFC11 eq	DO	1,12E-01

A figura 1 mostra quais atividades do sistema de produção que mais contribuiram para o desempenho ambiental de cada categoria de impacto. No caso da categoria de US é a produção de sementes de soja, operações como a colheita e o uso de fertilizantes, principalmente a ureia.

Nas categorias de EcT e MC foram as relacionadas às operações agrícolas, e as de uso de fertilizantes, principalmente, o de ureia, e de produção de sementes. Enquanto que na categoria de US, foram as produções de sementes de trigo e soja, respectivamente.

Figura 1. Atividades de cultivo do sistema de produção soja-trigo no desempenho ambiental em cada categoria de impacto: Uso do solo (US); Ecotoxicidade terrestre (EcT); Mudanças climáticas (MC); Toxicidade humana - não-carcinogênica (THN); Depleção fóssil (DF); Acidificação terrestre (AT); Depleção de águas (DA); Ecotoxicidade de águas (EA); Toxicidade humana – carcinogênica (THC); Formação de material particulado (FMP); Depleção de recursos minerais (DRM); Eutrofização de águas (EA); Depleção de ozônio (DO)



As atividades relacionadas ao uso de fertilizantes e ao do solo também foram relevantes a outras categorias, para o uso de fertilizantes às categorias de Toxicidade Humana - não-carcinogênica (THN), Depleção Fóssil (DF), Depleção de Recursos Minerais (DRM), Toxicidade Humana - carcinogênica (THC) e Ecotoxicidade de Águas (EcA) com contribuição da ureia, SSP e KCl, respectivamente, e na categoria de THN, pelo SSP, ureia e KCl, respectivamente. Aos relacionados ao uso do solo, destaque para as atividades de produção de sementes.

Assim, verificou-se que as atividades relacionadas ao solo aparecem com destaque no desempenho ambiental de cada categoria de impacto, principalmente as atividades relacionadas ao uso de fertilizantes.

#### 4.3.2 Indicadores APOIA-Novorural

Os indicadores APOIA-Novorural foram utilizados para avaliar as análises das amostras de solo. A figura 2 apresenta o gráfico resultante da avaliação e os parâmetros presente nos indicadores.

Primeiramente, aponta-se que ao utilizar-se a média dos pontos, os indicadores não apresentaram total eficiência, isto, devido ao cálculo de médias e a aproximação de casa dentro da ordem de grandeza. Assim, notou-se pequenas variações no valor da Saturação de bases calculada pela média com as apresentadas pelos indicadores. Diferentemente do observado nas avaliações por ponto (sem médias), onde não houve a mínima diferenciação em tais valores, observando uma total eficiência dos indicadores. No entanto, decidiu-se utilizar as médias, pois além da variação ser pequena, a obtenção dos resultados junto à interpretação unida a ACV é mais adequada ao objetivo deste estudo, que é principalmente o de apresentar resultados e elaborar uma discussão sobre o uso de indicadores de qualidade do solo junto a ACV.

Portanto, conforme o gráfico da figura 2 para indicadores de matéria orgânica (MO) observa-se que o resultado foi em geral satisfatório, tanto para os índices de impacto quanto ao de qualidade, indicando uma estabilidade na qualidade deste parâmetro no período em que esteve instalado o sistema de produção, apesar de agronomicamente não estarem adequados. Assim, poderia ser melhorado, através de práticas agrícolas como o uso de sistemas de produção diversificados e a inclusão de espécies de cobertura certamente contribuiriam para a redução de impactos que envolvem a transformação do carbono no ambiente.

Para o pH, verificou-se o índice de qualidade, desvio da neutralidade, um pouco abaixo da linha base, devido aos valores indicados pelas análises apontarem certa acidez, no entanto, ainda são agronomicamente adequados, permitindo que haja um bom desenvolvimento do sistema de produção avaliado. Já o índice de impacto foi diretamente positivo, devido à melhoria do parâmetro no período entre as análises. Com estes resultados, dispensa-se momentaneamente a necessidade do aporte de insumos corretivos.

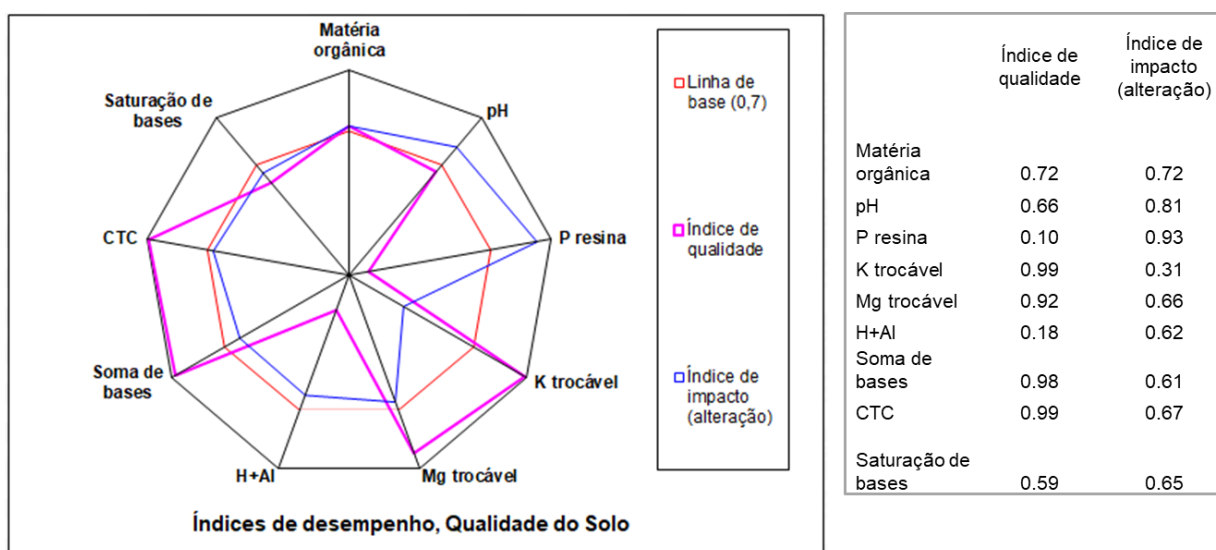
Quanto ao P, o resultado foi muito negativo em relação ao índice de qualidade, isso devido à altíssima concentração do nutriente no solo. Já o índice de impacto apesar de estar acima da linha base (0,7), mostra-se distância do mais adequado (1,0), afetado, também, pela elevada quantidade do nutriente no local. Portanto, a necessidade da suspensão do fornecimento deste nutriente se faz imediata.

O indicador de K apontou resultado positivo para o índice de qualidade enquanto que o de impacto foi insatisfatório, ou seja, apesar de uma boa disponibilidade, houve uma diminuição entre o período das análises. Quanto ao Mg os resultados são semelhantes ao de K, com um índice de impacto um pouco menos negativo.

Para o parâmetro de H+Al, verificou-se índice de qualidade insatisfatório, bem como os índices de impacto que também foi negativo. Para a Soma de bases e a CTC, os resultados foram adequados aos índices de qualidade e negativos aos de impacto, isto devido a certa acidez presente. A Saturação de bases confirma essa deficiência ao apontar resultados negativo para os índices de qualidade e de impacto.

A despeito do aceitável teor de disponibilidade de alguns nutrientes e da acidez adequadamente justa ao sistema de produção que, geralmente, é o desenvolvido na área avaliada, observa-se uma considerável capacidade produtiva dos solos estudados, apesar de não estar expressando sua melhor condição.

Figura 2. Resultado das avaliações dos indicadores de qualidade do solo APOIA-NovoRural o sistema de produção de soja-trigo



#### 4.4 Discussão

##### 4.4.1 Estudo de validação

Nos resultados da ACV, notou-se que as principais categorias que impactaram estão relacionadas à qualidade e o uso do solo e de fertilizantes. Assim percebe-se que o aperfeiçoamento na eficiência das atividades de produção de grãos e de sementes que lidam

diretamente com estes recursos é fundamental para a melhora do desempenho ambiental a respeito das categorias relacionadas ao uso do solo.

Em categorias como a de Ecotoxicidade terrestre (EcT), observa-se que o solo é um importante compartimento de emissão, sendo esta categoria, uma das mais impactante no estudo de caso. A categoria de Mudanças climáticas (MC) também foi influenciada pelas atividades que empregam fertilizantes. No geral, percebe-se que a qualidade do solo, bem como sua manutenção, é fundamental à diminuição de impactos e a melhora do desempenho ambiental de sistemas de produção.

Os indicadores APOIA-NovoRural, primeiramente, mostraram que as propriedades químicas do solo aqui verificadas não impedem o desenvolvimento do sistema de produção adotado na área em estudo, no entanto, tampouco estão justamente adequadas a índices ideais de qualidade. Também indicou que mesmo havendo uma melhora no índice de qualidade não foi o suficiente para garantir índice de impacto satisfatório. No entanto, os índices presentes no estudo de validação estão coerentes com os critérios agronômicos de qualidade do solo e são suficientes para a produção de grãos, mas, podendo ser melhorados.

Voltando aos resultados da ACV, percebe-se que as atividades de produção de sementes foram expressivas. Isso aconteceu pelo fato de que os inventários de produção de sementes consideram as culturas em monocultivos, em sistemas de produção a interação de cultivos pode beneficiar a produção, como a adoção da soja que tende a diminuir a necessidade do aporte de fertilizante nitrogenado, assim como seus aspectos e impactos ambientais (MATSUURA et al. 2017).

Por meio dos indicadores APOIA-NovoRural, nota-se que houve bons índices de impactos no pH do solo, condizentes com os critérios agronômicos de qualidade do solo. Enquanto que na CTC, os índices de impactos foram insatisfatórios e os de qualidade, satisfatórios.

Estes dois parâmetros contribuem para a disponibilidade do N no solo e sua adsorção, o que pode minimizar emissões do nutriente ao ambiente. No entanto, o valor de pH é aceitável, e a suspensão do aporte de corretivos pode representar mais benefícios ambientais.

A categoria de Acidificação terrestre (AT) determina o impacto da acidificação por modelos de caracterização que tomam em conta a alteração na acidez do solo através da deposição atmosférica de substâncias inorgânicas, como sulfatos, nitratos, e fosfatos (GOEDKOOP e SPRIENSMA, 1999; GOEDKOOP et al., 2009; HAYASHI et al. 2004).



Estes modelos consideram os danos causados ao ecossistema calculando a ação e a capacidade de acidificação de substâncias por meio de curvas de dose-resposta em ocorrência potencial, derivada de equações de regressão (GOEDKOOOP et al., 2009). Para isso, usa a soma de base (SB) como indicador para expressar a acidez, e assim passível de contribuição entre os métodos.

Ao verificar-se pelos indicadores APOIA-NovoRural o desempenho dos parâmetros que influenciam a SB (H+Al, Mg, K) e a própria SB, observou-se que o H+Al teve, em geral, os índices de impacto relativamente insatisfatórios, porém os de qualidade, insatisfatórios. Para o K, o índice de qualidade foi satisfatório, enquanto que o de impacto foi insatisfatório, indicando uma deterioração deste parâmetro durante as avaliações. Os mesmo foi observado para o Mg, no entanto, com variações menores.

A categoria de AT no estudo de ACV parece ter notado as mesmas informações apontadas pelos indicadores, uma das menos impactantes por unidade, do qual se deve atribuir a maior parte de seu desempenho as substâncias atmosféricas depositadas no solo.

Os métodos de caracterização da categoria de Eutrofização de águas (EA) avaliam substâncias eutrofizantes contendo P ou N, em quantidades equivalentes. Consideram várias vias das quais os compostos podem entrar no compartimento de água. No caso de áreas agrícolas, as principais ocorrem pelo fornecimento de fertilizantes (minerais e orgânicos), deposição de outros insumos e deposição atmosférica em solo e em águas (POTTING e HAUSCHILD, 2005).

Para estas emissões, a ACV considera a superfície agrícola como uma área de produção tecnificada (tecnosfera) e seus parâmetros relevantes à avaliação, no caso do solo, tais como: textura, inclinação, uso, entre outros (GOEDKOOOP et al., 2009). No Brasil, devido ao seu clima e os tipos de solo, as emissões de lixiviação de P para águas subterrâneas e em *run-off* para águas superficiais são desconsideradas devido à baixa mobilidade de fósforo em tais circunstâncias (NOVAIS e SMYTH, 1999).

Além do mais os indicadores APOIA-Novo Rural mostram que no estudo de caso o índice de impacto de P foi inadequado, bem como, os de qualidade, extremamente satisfatório. Isto devido ao valor exuberante de concentração do nutriente na área avaliada. Portanto, mesmo que P não lixivie nas condições dos solos brasileiros, sabe-se que o escoamento superficial que resulta na deposição de partículas do solo com P adsorvido em águas superficiais, pode acarretar em problemas de eutrofização. Tal ação deve ser melhor avaliada.

No caso da ACV, notou-se que o N foi o nutriente mais relevante à categoria de EA nas condições avaliadas. E, percebe-se que além das atividades de cultivos (para grãos e sementes) associadas ao uso de fertilizantes, o consumo de combustíveis como para transporte e colheita contribui relevantemente para a categoria. Assim, além do uso de fertilizantes a deposição atmosférica é uma importante via de compostos eutrofizantes, segundo Goedkoop et al. (2009).

Para as categorias de Toxicidade humana: não-carcinogênica (THN); e, carcinogênica (THC), os métodos de caracterização tomam em conta a persistência ambiental (destino), o acúmulo na cadeia alimentar humana (exposição) e a toxicidade (efeito) de produtos e substâncias químicas aportadas por sistemas produtivos (GOEDKOOOP et al., 2009).

As avaliações da ACV mostraram que as atividades dependentes de combustíveis fósseis, aplicação de agrotóxicos e fertilizantes, e principalmente, a colheita são as principais a contribuir com estas categorias.

Quanto ao uso de fertilizantes, as principais substâncias que favoreceram os impactos de THN e THC são os metais pesados. Os indicadores APOIA-NovoRural apontam para uma necessidade de adequação do parâmetro de H+Al. Corrigido este parâmetro, pode-se favorecer o aproveitamento dos fertilizantes e o N fixado pela soja, diminuindo a necessidade de aplicação constante de fornecimento e de operações requeridas pela atividade.

As demais categorias (uso do solo, depleções, entre outras) são indiretamente ou pouco influenciadas por parâmetros químicos do solo. No entanto, um solo em condições adequadas de fertilidade possibilita um melhor aproveitamento dos insumos, evitando que frações alcancem o ambiente e se tornem emissões. Assim, com a redução da necessidade de novas aplicações de insumos, diminui-se a frequência de operações, as emissões e consumo de recursos naturais e minerais, bem como a depleção de tais recursos.

Ainda que a interação da ACV e os indicadores APOIA-NovoRural não possam ser comparados diretamente, as informações que cada uma demonstra uma efetiva possibilidade de contribuir entre si, já que ambas buscam o aperfeiçoamento ambiental de atividades e sistemas de produção agrícola.

Para que essa contribuição seja possível devem ser adotadas interpretações como foi feito neste estudo, utilizando os resultados dos indicadores APOIA-NovoRural como complemento a avaliação da ACV. Isso até que as informações de qualidade do solo integrem

inventários de ACV, ou seja, transformados em fluxos elementares (fluxo de insumo e energia) (seção 4.4.2).

#### 4.4.2 Conceitos metodológicos do uso dos indicadores APOIA-NovoRural junto a ACV

A metodologia de ACV e os indicadores APOIA-NovoRural têm em comum o fato de serem metodologias de gestão ambiental. No entanto, suas funções e aplicabilidade diferem quanto ao propósito em que foram desenvolvidas, na forma em que mensuram e avaliam os impactos e em como requerem e processam informações e danos.

Pode-se dizer que, reconhecendo os limites de cada metodologia, tais distinções são positivas, pois enquanto a ACV contabiliza, transforma e distribui os impactos ambientais dos insumos e energia em categorias de impacto, os indicadores APOIA-NovoRural realizam um diagnóstico da situação real da qualidade do solo em que se consta um sistema de produção.

Tomando em conta o estudo de validação deste trabalho percebe-se que os indicadores contribuem efetivamente com informações para gestão do consumo de fertilizantes e que podem ser aplicados a tomadas de decisões conforme as características do solo e de sistemas de produções. Enquanto que a ACV avalia e determina os impactos dos insumos aportados. Juntas, as metodologias podem diagnosticar o problema e fornecer informações para mitigá-los de maneira apropriada ao local.

Os Indicadores APOIA-NovoRural foram desenvolvidos para serem aplicados circunstancialmente, requerendo dados locais (pontuais), enquanto que a ACV foi desenvolvida para ser aplicada universalmente. Não impedida de ser empregada estritamente, mas até então, composta por métodos de amplo espectro de atuação (para avaliar sistemas de produção de cadeias produtivas longas, compostas principalmente por fluxos de insumos e energia espalhados pelo globo).

Deve-se ressaltar que essa diferenciação escalonar tem a contribuir com ambas as metodologias, principalmente a ACV, pois viabiliza o encontro de avaliações em níveis de pequenas propriedades com informações de produção de insumos, elaborados com dados coletados em várias regiões. O encontro de estes diferentes níveis escalonares de informações é essencial para que no futuro seja possível que cadeias inteiras de produtos agrícolas, principalmente commodities, sejam avaliadas ambientalmente de forma efetiva.

Uma das maneiras de superar a diferença de espectro escalonar de atuação de métodos pode ser por meio de que todas as informações levantadas seja introduzidas no

Inventário de Ciclo de Vida (ICV) e então, colocados no âmbito de avaliação das categorias de impactos Vidal Legal et al. (2017).

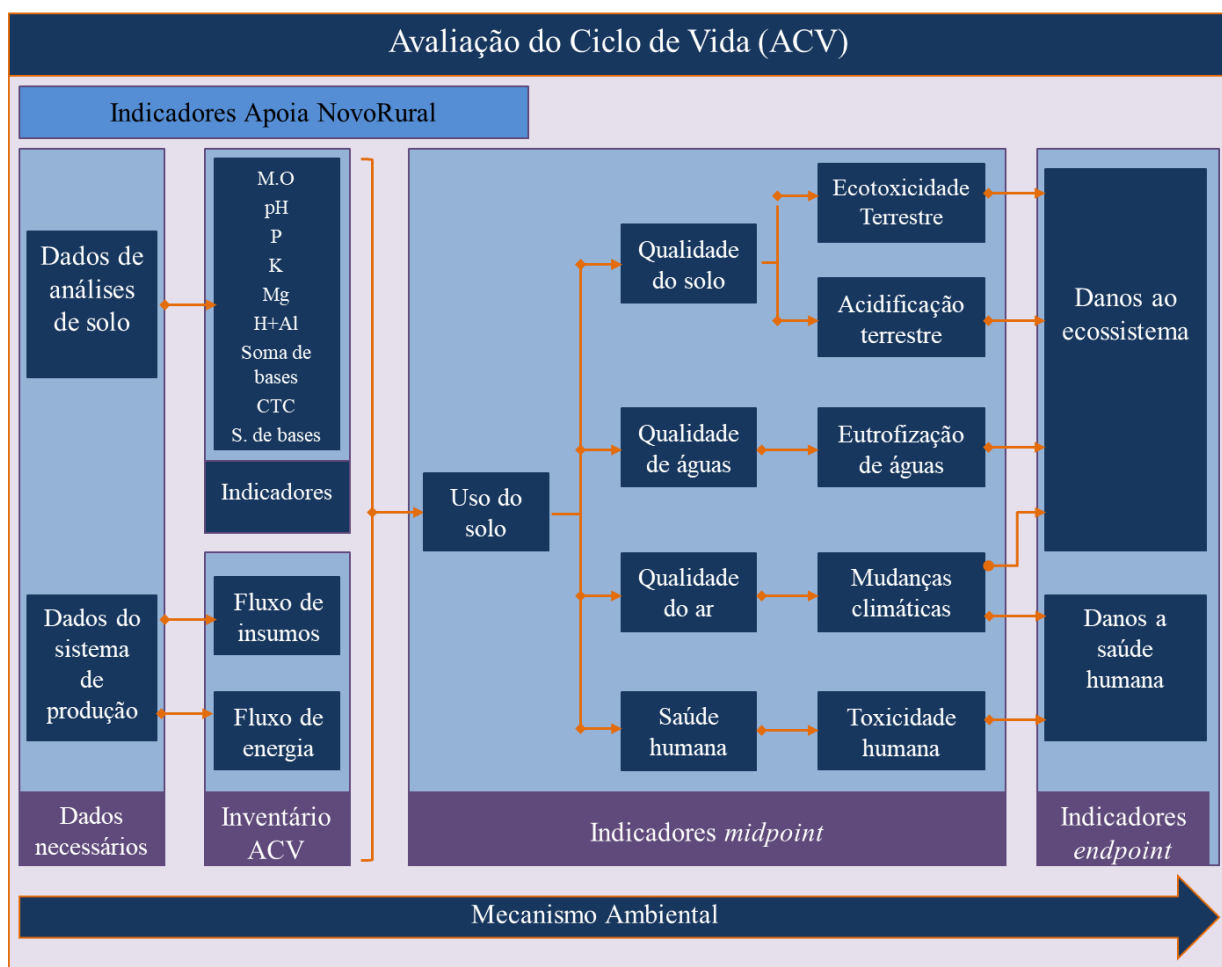
Mas independente de como os dados são avaliados, primeiramente deve-se compreender o que é a qualidade do solo para o contexto da ACV. Para Jolliet et al. (2004), a qualidade do solo na ACV tem sido enquadrada nos impactos de uso do solo e do ecossistema, representando uma categoria *midpoint* – considerada o ponto médio na cadeia causa-efeito (mecanismo ambiental) de uma determinada categoria de impacto (ex.: mudança climática; eutrofização, toxicidade humana; etc.); anterior ao *endpoint*, no qual fatores de caracterização podem ser calculados para refletirem a importância relacionada a uma emissão ou extração em um ICV (BARE et al., 2000) – que contribui para danos aos recursos naturais e ambientais bióticos e abióticos. Do qual pode ser efetivamente representada por diferentes parâmetros dependendo do propósito e do sistema de produção avaliado (MILÀ i CANALS et al. 2007).

Lindeijer et al. (2002) descrevem o uso do solo em ACV como a deterioração dos habitats da vida não humana, bem como, a degradação de sua qualidade e influência prejudicial a importantes sistemas de suporte à vida, como ciclo da água e do carbono.

Para Joensuu e Saarinen (2017) cada uma das questões de qualidade do solo representa um indicador de impacto *midpoint* separado, que podem conjuntamente formarem um método de avaliação de qualidade do solo. Por sua vez, o indicador de qualidade do solo é visto como uma subcategoria para um método de avaliação de impacto *midpoint* de uso da terra. Posteriormente integrado a diferentes indicadores *endpoint* - atributo ou aspecto do ambiente natural, da saúde humana ou dos recursos, identificando uma questão ambiental que causa preocupação (ABNT, 2009b) – tais como escassez de recursos e danos à diversidade dos ecossistemas.

Seguindo a recomendação de Garrigues et al. (2012), os indicadores do método APOIA-NovoRural seriam aplicados junto a indicadores *midpoint* de uso do solo como dentro de uma abordagem de ACV, definido pelo ILCD handbook (EC-JRC 2011). A figura 3 mostra uma representação, adaptada de Garrigues et al. (2012), do uso de indicadores APOIA-NovoRural no contexto de um estudo de ACV.

Figura 3. Indicadores de qualidade do solo, método APOIA-NovoRural, no âmbito das categorias de impactos da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), *midpoint* e *endpoint*



Adaptado: Garrigues et al. (2012)

Entretanto, para que dados possam ser inseridos em ICVs, devem ser traduzidos em fluxos elementares – fluxos de entrada de insumos ou energia do sistema avaliado que têm sido extraídos do ambiente sem transformação humana prévia – que deixam o sistema e são lançados no ambiente sem transformação humana subsequente (MILÀ i CANALS et al. 2007). Existe uma enorme dificuldade quanto a essa tradução pela complexidade em determinar como as propriedades e funções do solo influenciam nas funções do sistema (ex., produtividade e uso do solo) refletidos em uma unidade(es) funcional(ais) (GARRIGUES et al. 2012).

Para que os parâmetros sejam adotados como fluxos devem estar, ou ser transformados em fatores de caracterização (FC), geralmente elaborado por um indicador. No entanto, somente essa adequação não é suficiente para garantir análises de qualidade. Segundo Vidal Legal et al. (2017), em uma revisão sobre indicadores de qualidade do solo aplicado a

ACV, encontrou que os de melhor aplicabilidade, por mais facilmente poderem ser adequados como FC, foram os que tiveram menor relevância científica e compreensibilidade. Já os que não têm aplicabilidade como FC, foram os que tiveram maior relevância científica e compreensibilidade.

A qualidade do solo pode ser expressa por parâmetros e ações de causa-efeito mais relevantes ao solo, como: as propriedades químicas, física e biológicas; as funções do solo; e, os processos que podem degradar o solo (como: erosão, compactação) (GARRIEGUES et al., 2012). Todas estas informações são de difícil inclusão em ICVs.

Para Vidal Legaz et al. (2017), em consequência da dificuldade em desenvolver indicadores de qualidade do solo, capazes de serem inseridos em ICVs, para evitar que sejam negligenciados, tais parâmetros devem ser avaliados separadamente por métodos convencionais de AIA. Para Garriegues et al. (2012), fatores que afetam a fertilidade do solo devem ser avaliados separadamente e considerados posteriormente. Isto devido aos desafios não superados na criação de indicadores específicos a ACV, além do mais, modelos promissores podem surgir fora de seu campo e trabalhos adicionais que podem permitir o uso deste tipo de modelos.

Assim como realizado e observado neste estudo, o desafio subjacente na seleção dos indicadores de qualidade do solo está na viabilidade e na difusão de seu uso junto à metodologia de ACV. A ACV é uma abordagem sistêmica e os sistemas agrícolas estão globalmente interconectados, assim, os métodos usados para cada impacto devem ser válidos para qualquer contexto geográfico. Ainda não existe nenhum método padronizado de uso universal, mantendo o desafio em encontrar uma forma de avaliação que tome em conta um nível suficiente de descrição das relações complexas entre propriedades do solo e um conjunto simplificado, mas abrangente, que definitivamente quantifique os impactos na qualidade do solo.

Além das dificuldades apresentadas anteriormente a respeito do uso de indicadores em ICV, ainda há uma dificuldade em definir quais propriedades do solo devem ser priorizadas para a inserção em estudos de ACV, conforme suas funções e aplicações (GARRIEGUES et al. 2012). Assim, definir a qualidade do solo para fins de ACV pode ser consideravelmente complexo.

Outros desafios em que reside a dificuldade em padronizar tal avaliação estão no fato de que os métodos têm de ser aplicáveis em todos os contextos regionais possíveis, superando diferenças inerentes de variabilidade nas características de solo, de suas interações

com cada contexto climático e na diversidade de práticas de manejo (BRANDÃO e MILÀ I CANALS, 2013; JOENSUU e SAARINEN, 2017). Esses empecilhos gerados pelas condições únicas dos ambientes são as razões fundamentais a impedirem que os impactos de qualidade do solo sejam traduzidos em FCs e em unidade(es) funcional(ais).

No início do uso da ACV não se considerava informações espaciais e temporais em suas avaliações de impactos, tornando-a uma abordagem de estado estável e pouco dinâmica a tais aspectos (POTTING e HAUSCHILD, 2006). Mas, com o desenvolvimento da metodologia, a regionalização tem sido abordada como um dos principais tópicos a ser superado, evoluindo de *site-generic* (sem informação espacial) e *site-dependent* (alguma diferenciação espacial) ao *site-specific* (diferenciação espacial detalhada).

No entanto, os impactos na qualidade do solo, um dos aspectos mais fortemente dependentes da variabilidade local, ainda não se encontrou uma forma de avaliação *site-specific*, quando, deveria ser na pior das hipóteses, *site-dependent* (GARRIEGUES et al. 2012).

Quanto a esses aspectos, os indicadores APOIA-NovoRural se mostram como uma alternativa promissora para geração de resultados essenciais à manutenção da qualidade do solo e à atuação do sistema produtivo sobre ele em nível de propriedade. Por considerar parâmetros de grande importância no que se refere às emissões (como matéria orgânica), podem fornecer informações chaves para a tomada de providência que permita adequar técnicas de manejo com o propósito de mitigar impactos.

Deste modo, percebe-se que método APOIA-NovoRural utilizado separadamente pode contribuir com informações fundamentais a gestão do solo e ambiental, além de complementar a avaliação da ACV.

#### 4.5 Conclusões

O solo e sua qualidade, além de desempenharem um papel decisivo a produção agrícola, mostram-se como um dos mais importantes componentes de emissões ambientais. Neste trabalho foi amplamente discutido o quanto os parâmetros de qualidade do solo contribuem com importantes aspectos ambientais da agricultura, e conseqüentemente nos impactos que esses aspectos veem a se tornar, destacadamente, nas categorias de mudanças climáticas, ecotoxicidade, uso do solo, eutrofização, entre outras.

Através do estudo de caso, verificou-se que os indicadores de qualidade do solo APOIA-NovoRural são passíveis de serem aplicados junto à metodologia de ACV. Para isso, sugere-se a aplicação e interpretação individual das metodologias.

No entanto, quanto ao uso integrado dos indicadores a ACV, ainda existem desafios complexos e sem solução aparentes, tais como: traduzir os resultados das avaliações dos indicadores em fatores de caracterização e fluxos de materiais e energia para que possam atender a unidade(es) funcional(ais) e integrá-los a ICVs e, assim, serem avaliados em conjunto com todos os demais dados; e mantendo-se viáveis para todos os contextos geográficos.



## 5 ARTIGO B - Uso de indicadores de qualidade do solo junto a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em sistemas de produção agrícolas: um estudo de caso

### Resumo

Atualmente a agricultura vem tendo de lidar com problemáticas ambientais complexas, entre elas: o desmatamento e a perda de biodiversidade; o consumo excessivo de insumos; e, o uso e manutenção da qualidade do solo. Este último é identificado como um fator chave ao manejo sustentável do planeta. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é considerada uma das melhores metodologias para quantificar os potenciais impactos ambientais a partir de uma perspectiva de sistema de produção. No entanto, até o momento não é efetiva em avaliar a qualidade do solo por ainda não ter integrada modelos de avaliação que sejam recomendáveis. A fim de contribuir com o desenvolvimento desta temática, o objetivo deste estudo foi avaliar o uso dos indicadores de qualidade do solo presentes no método APOIA-NovoRural no contexto da ACV em estudos de caso. O APOIA-NovoRural é um método de gestão e avaliação ambiental que avalia atividades rurais possibilitando sua adequação tecnológica e sua gestão territorial. O estudo avaliou sete sistemas de produção em sete propriedades entre dois anos agrícolas. As coletas de amostras solo foram feitas para parâmetros químicos presentes nos indicadores. Para a ACV foi considerado todas as suas etapas, adotando o método ReCiPe para a avaliação dos impactos, com apoio do software SimaPro. Por atualmente não existir modelos normatizados para avaliarem a qualidade do solo em estudos de ACV, adotou-se neste estudo a recomendação de utilizar métodos convencionais de avaliação ambientais buscando por informações que possam contribuir à discussão sobre o assunto, e o desenvolvimento de modelos apropriados a metodologia. Portanto, nos resultados das avaliações da ACV observamos que as categorias de impactos mais afetadas pelos sistemas de produção foram Ecotoxicidade Terrestre (EcT), Mudanças Climáticas (MC), Toxicidade Humana não-carcinogênica (THN) e Uso do solo (US). Quanto às atividades que se destacaram foram às relacionadas à operação de máquinas, produção de sementes e o uso de fertilizantes, estes, destacadamente nas categorias que mais impactaram. Os resultados das avaliações dos indicadores variaram expressivamente por sistema de produção, no entanto, apontaram problemas de manutenção da fertilidade em todas as propriedades avaliadas. Assim, notou-se que o principal aspecto a ser considerado nos indicadores APOIA-NovoRural é fornecer informações a gestão do solo por meio da adequação dos parâmetros, contextualizando com precisão as atividades e aporte de insumos a condição da área a ser avaliada. As propriedades que tiveram melhores resultados nos indicadores de qualidade do solo foram as que tiveram os melhores índices gerais de fertilidade. Assim, a adequação da fertilidade pode melhorar a disponibilidade de nutrientes sem alterar ou até mesmo a diminuir a quantidade de fertilizante a ser aportado. Portanto, os indicadores APOIA-NovoRural são úteis para fornecer informações importantes para a gestão ambiental de atividades de produção agrícola e inter-relacionar-se com a ACV. Este estudo mostra a necessidade de se aprofundar nestas avaliações, visando obter um padrão para aplicação de indicadores de qualidade do solo junto da metodologia de ACV em sistemas de produção agropecuário.

Palavras-chaves: Sustentabilidade agrícola; Gestão do solo; APOIA-NovoRural; Impacto ambiental.

## Use of soil quality indicators together the Life Cycle Assessment (LCA) methodology in agricultural production system: a case of study

### Abstract

Currently, agriculture has had to deal with complex environmental issues, including: deforestation and biodiversity loss; excessive consumption of inputs; and, the use and maintenance of soil quality. The latter is identified as a key factor in the sustainable management of the planet. Life Cycle Assessment (LCA) is considered one of the best methodologies for quantifying potential environmental impacts from a production system perspective. However, so far it is not effective in assessing soil quality because it has not yet integrated recommended assessment models. In order to contribute to the development of this theme, the objective of this study was to evaluate the use of soil quality indicators present in the APOIA-NovoRural method in the context of LCA in case studies. APOIA-NovoRural is a method of environmental management and assessment that evaluates rural activities enabling their technological adaptation and territorial management. This study evaluated seven production systems on seven properties between two agricultural years. The collect of soil samples were made for chemical parameters present in the indicators. For LCA, all of its steps were considered, adopting the ReCiPe method for assessing impacts, with the support of the SimaPro software. As there are currently no standardized models for assessing soil quality in LCA studies, the recommendation was adopted in this study to use conventional methods of environmental assessment looking for information that can contribute to the discussion on the subject, and the development of appropriate models to methodology. Therefore, in the results of the LCA assessments, we observed that the categories of impacts most affected by the production systems were Terrestrial ecotoxicity (EcT), Climate change (MC), Human toxicity - non-carcinogenic (THN) and Land use (US). As for the activities that stood out were those related to the operation of machines, seed production and the use of fertilizers, these, especially in the categories that had the greatest impact. The results of the evaluations of the indicators varied significantly by production system, however, they pointed out problems in maintaining fertility in all the evaluated properties. Thus, it was noted that the main aspect to be considered in the APOIA-NovoRural indicators is to provide information on soil management by adjusting the parameters, accurately contextualizing the activities and inputs the condition of the area to be evaluated. The properties that had the best results in the soil quality indicators were those that had the best overall fertility rates. Thus, the adequacy of fertility can improve the availability of nutrients without changing or even decreasing the amount of fertilizer to be added. Therefore, the APOIA-NovoRural indicators are useful to provide important information for the environmental management of agricultural production activities and to interrelate with the LCA. This study shows the need to deepen these evaluations, aiming to obtain a standard for the application of soil quality indicators along with the LCA methodology in agricultural production systems.

Key-words: Sustainable agriculture; Soil management; APOIA-NovoRural; Environmental impact.

## 5.1 Introdução

A agricultura, ademais de sua reconhecida importância para a saúde e a economia global, ainda deve mostrar que é capaz de ser sustentável. Tal premissa há tempos vem sendo imposta devido ao fato de que a agricultura substitui vegetações nativas e consome recursos naturais. Assim, tem que enfrentar problemáticas ambientais complexas, tais como: redução da qualidade das águas; desmatamento e perda de biodiversidade; consumo excessivo de insumos; e, degradação da qualidade do solo.

Para Doran (2002), a qualidade do solo é identificada como um indicador primário podendo ser ele químico, físico e biológico e, portanto, fundamentais para o manejo sustentável do planeta, devido ao seu papel crucial na sustentação da produção de biomassa, ciclagem de nutrientes e carbono e manutenção da qualidade do ar e da água. Além do mais, os recursos naturais estão globalmente interligados e requerem que os impactos que sofrem sejam avaliados tanto em escalas locais quanto globais.

Desta forma, fazem-se necessárias abordagens que integrem métodos capazes de determinar e alocar os impactos de sistemas de produção específicos (em nível de produto) sobre os recursos naturais, tal como o solo. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é considerada uma das melhores ferramentas para quantificar os potenciais impactos ambientais a partir de uma perspectiva de sistema de produção (ABNT, 2009b; HELLWEG e MILLÀ i CANALS, 2014; VIDAL LEGAZ et al., 2017).

Quanto aos impactos da qualidade do solo em estudos de ACV, no momento não são efetivamente avaliados, mesmo tendo sido realizadas várias sugestões sobre diferentes perspectivas de como avaliá-los. Portanto, ainda não estão estabelecidos métodos ou indicadores, ou até mesmo estratégias, que sejam recomendáveis (GARRIGUES et al., 2013; JOENSUU e SAARINEN, 2017).

Udo de Haes (2006) indica que diante da falta de ferramentas capazes de serem inseridas diretamente nas avaliações de ACV e da dificuldade em desenvolvê-las, devem tais parâmetros ser avaliados separadamente por métodos convencionais de análise ambiental. Do qual, nesses estudos, não será a qualidade do solo negligenciada por completo.

Partindo-se da premissa de evitar-se que a qualidade do solo seja negligenciada em estudos de ACV agrícola, espera-se que este estudo contribua com informações relevantes sobre o uso de métodos convencionais de Avaliação de Impacto ambiental (AIA) na determinação da qualidade do solo junto a ACV, indicando quais os seguintes passos a serem tomados sobre esta problemática ambiental, referente ao setor agrícola.

Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar o uso dos indicadores de qualidade ambiental do solo, método APOIA-NovoRural, no contexto da ACV em estudos de caso.

## 5.2 Material e métodos

Nesta seção são apresentados os sistemas agrícolas avaliados, suas fontes de dados e as informações presente em seus inventários, bem como a condução de cada etapa da metodologia do ACV. Também são apresentados os parâmetros adotados pelo conjunto de indicadores de qualidade do solo, APOIA-NovoRural.

### 5.2.1 Indicadores APOIA-NovoRural

O APOIA-NovoRural é um método de gestão ambiental que avalia atividades rurais, assim como possibilita a adequação tecnológica das atividades e sua gestão territorial (RODRIGUES et al., 2010). Permite promover programas de desenvolvimento no campo em escala de país (RODRIGUES e MOREIRA VIÑAS, 2007) a setores e cadeias produtivas agrícolas e sistemas de produção (RODRIGUES et al., 2006, 2007; 2008, 2018).

De forma analítico-quantitativa, o método avalia os efeitos das atividades em cada um de seus indicadores, sendo, portanto, o local rural sua escala espacial de análises. Por meio de testes de probabilidade que definem os limites mínimo e máximo de escalas multi-atributo (0 a 1), com a linha de base modelada em 0,7, tanto para qualidade ambiental, quanto para nível de impacto (RODRIGUES, 2009).

Para este estudo foi adotado somente o módulo da dimensão qualidade do solo, assim, os indicadores selecionados são: 1) Matéria orgânica (MO); 2) pH; 3) Fósforo (P); 4) Potássio-trocável (K); 5) Ca e Mg trocável; 6) H+Al – Acidez potencial; 7) Soma de bases; 8) Capacidade de troca catiônica (CTC); 9) Saturação por bases. O conjunto completo de indicadores do método e suas unidades de medição estão disponíveis em Rodrigues et al. (2009).

### 5.2.2 Sistemas agrícolas e fonte de dados

O estudo avaliou os sistemas de produção presentes na microbacia do Ribeirão Lagosta, no município de Rolândia-PR, Brasil, por meio da metodologia de ACV e dos indicadores de qualidade do solo, realizando duas coletas de análises de solo para cada área, num total de sete propriedades.

Foram considerados os anos de 2015 e 2017 para sistemas de duas ou três culturas. Das sete áreas, quatro eram compostas por duas culturas e três por três culturas. A cultura na safra principal foi a soja (verão) e o milho (principalmente) ou o trigo na entressafra, Tópico 5.2.3.1.

Os insumos utilizados variaram por sistema de produção e estão especificados no tópico 5.2.3.2. Por ser uma avaliação prospectiva visando fomentar uma metodologia, optou-se por uma realidade com poucos envolvidos e pequena variação de contexto.

#### 5.2.2.1 Amostragem e análises de solo

As coletas de solo foram feitas em cada propriedade por meio de transectos, considerando o desnível das áreas. Amostrou-se um total de 46 pontos na microbacia, divididos entre as propriedades da seguinte maneira: Produtor 1 – 6 pontos; Produtor 2 – 6 pontos; Produtor 3 – 9 pontos; Produtor 4 – 5 pontos; Produtor 5 - 12 pontos; Produtor 6 – 3 pontos; Produtor 7 – 5 pontos. A quantidade de pontos de coleta variou conforme a topografia de cada propriedade e necessidade em alterar os números de pontos para melhor avaliar das áreas. Para todos os pontos foram realizadas coletas na profundidade de 0-20 cm.

As análises químicas realizadas foram: Carbono orgânico; pH; Fósforo (P); K-trocável; Ca e Mg trocáveis; H+Al (Acidez potencial); Soma de bases; Capacidade de troca catiônica (CTC); e Saturação de bases. Cada parâmetro foi analisado para cada ano/safra, ou seja, cada parâmetro foi analisado duas vezes. As metodologias de análises foram: P, K = extrator Mehlich 1; Ca, Mg, Al = extrator KCl 1M; H+Al = estimativa por meio do pH SMP, utilizando curvas de calibração adequadas ao solo utilizado; carbono orgânico = oxidação por dicromato de potássio e quantificação pelo método colorimétrico; pH = CaCl<sub>2</sub> 0,01 M.

Os valores a serem aplicados nos indicadores, foram os valores médios do total de pontos coletados em cada propriedade. Os valores de cada análise para cada ano e as médias adotadas são mostrados no Apêndice 1.

### 5.2.3 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

#### 5.2.3.1 Objetivo e escopo

O objetivo foi avaliar o uso dos indicadores de qualidade ambiental do solo APOIA-NovoRural com estudos de ACV. O propósito é verificar se outros métodos de AIA podem interagir com a ACV e ampliar suas avaliações, assim permitindo que seja gerado um

maior número de informações sobre as questões ambientais agrícolas. O escopo do estudo atende aos requisitos presentes na Tabela 1.

Tabela 1. Escopo dos sistemas de produção de cada propriedade na microbacia do Ribeirão Lagosta, no município de Rolândia, no estado do Paraná-Brasil (para dois anos agrícolas – 2015/16 e 2016/2017)

	Propriedades						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Sistema de produto	Processos de produção de grãos, insumos e óleo diesel						
Função	Produzir grãos de soja, milho e trigo	Produzir grãos de soja e milho	Produzir grãos de soja e milho	Produzir grãos de soja, milho e trigo	Produzir grãos de soja e milho	Produzir grãos de soja e trigo	Produzir grãos de soja e milho
	Culturas/Ano agrícola						
2015/2016	Soja/Milho	Soja/Milho	Soja/Milho	Soja/Trigo	Soja/Milho	Soja/Trigo	Soja/Milho
2016/2017	Soja/Trigo	Soja/Milho	Soja/Milho	Soja/Milho	Soja/Milho	Soja/Trigo	Soja/Milho
Unidade de referência	1 ha por dois anos, nos quais se processou um ciclo completo do sistema de produção.						
	4500 kg de soja, 6180 kg de milho e 3120 kg de trigo	4500 kg de soja e 7200 kg de milho	4500 kg de soja e 7200 kg de milho	4500 kg de soja, 6400 kg de milho e 3230 kg de trigo	4500 kg de soja, 6000 kg de milho	4500 kg de soja e 2640 kg de trigo	3960 kg de soja e 6400 kg de milho
Fonte de dados	As informações sobre os insumos e práticas agrícolas estão presentes no item 5.2.3.2. Os inventários sobre a produção de insumos e diesel advieram da base Ecoinvent v. 3.3.						
Fronteira do sistema de produto	Adotou-se uma abordagem <i>cradle to gate</i> (do berço à porteira), para as produções de grãos, insumos agrícola e diesel.						

### 5.2.3.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Os inventários foram elaborados por meio de entrevistas no qual a soja foi adotada como a cultura principal em ambos os anos agrícolas, enquanto que na entressafra houve uma variação nos cultivos, milho ou trigo. Sendo assim foram elaborados inventários do sistema de produção considerando todas as culturas no mesmo inventário em um período de dois anos agrícolas, para cada propriedade. Além do mais, foram preparados inventários individuais para os cultivos de primeira safra e da entressafra, com o intuito de identificar as atividades e insumos de cada cultura dentro do sistema de produção.

A Tabela 2 apresenta os insumos aportados em cada sistema de produção avaliado.

Tabela 2. Insumos aportados pelos sistemas de produção de cada propriedade presente na microbacia do Ribeirão Lagosta, no município de Rolândia, no estado do Paraná-Brasil (para dois anos agrícolas – 2015/16 e 2016/2017)

	Propriedades						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
	kg/ha						
<b>Semeadura</b>							
Sementes	278	140	188	290	156	408	150
<b>Fertilizantes</b>							
Calcário	2070	-	-	2070	-	900	830
Gesso	2070	-	-	-	-	-	-
Ureia	150	342	23,4	31,7	29,3	77,4	66,9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	46,2	44,6	20,7	37	18,7	40,2	99,9
K <sub>2</sub> O	90,8	1,36	6,44	113	75,2	130	138
<b>Herbicidas</b>							
2,4-D	1,9	1,34	1,69	1,94	1,34	2,42	2,68
Alquilbenzeno	-	-	1,07	-	-	-	1,07
Atrazina	-	1,24	-	-	-	-	4,15
Cletodim	-	-	0,98	-	-	-	0,398
Diclosulam	-	-	-	-	-	-	0,556
Diuron	-	-	-	-	0,414	-	-
Glifosato	1,5	5,04	10,9	7,95	5,96	8,28	7,88
Haloxifope-p-metílico	-	-	-	-	-	-	0,224
Mesotrione	-	-	-	-	0,163	-	-
Metsulfurom metílico	0,0024	-	-	0,0048	-	0,0048	-
Nicosulfuron	-	-	-	-	0,0232	-	-
Paraquat	-	-	0,84	-	0,828	-	1,66
Total	3,4	7,62	14,9	9,9	8,73	10,7	18,6
<b>Inseticidas</b>							
Abmectina	-	-	0,414	-	-	-	-
Acefato	-	-	0,315	1,25	-	-	-
Beta-ciflutrina	-	-	-	-	-	-	-
Bifenthrin	-	0,029	-	-	-	-	0,075
Clotianidina	-	-	0,084	-	-	-	-
Clorantranilprole	-	-	0,021	-	-	-	-
Fipronil	0,156	0,15	-	0,05	0,15	-	0,1
Imidacloprid	-	0,355	-	-	-	0,225	0,73
Lambda-Cialotrina	0,078	0,0424	0,188	0,162	0,148	0,053	-
Lefenurom	-	-	-	0,0075	-	0,015	-
Metomil	-	-	-	-	-	-	0,432
Teflubenzuron	-	0,186	0,186	-	-	-	0,249
Tiametoxam	0,099	0,0564	0,247	0,3	0,162	0,0705	-
Tiodicarbe	-	0,0000269	-	-	-	0,315	0,315
Total	0,333	0,819	1,45	1,76	0,461	0,679	1,9
<b>Fungicidas</b>							
Azoxistrobina	-	0,252	2,09	0,126	0,232	0,252	0,451
Benzovindiflupir	-	0,126	0,126	0,063	-	0,126	0,09
Carbendazim	-	-	-	-	-	-	-

Ciproconazol	-	-	0,672	-	0,928	-	0,464
Difeconazol	-	-	0,21	0,105	-	-	-
Epoxiconazol	0,157	0,05	-	0,057	-	-	0,113
Fludioxonil	-	-	-	0,00375	-	0,01	-
Flutriafol	-	-	0,155	-	-	-	0,155
Fluxapiroxade	-	-	-	0,0701	-	-	-
Mancozeb	2,25	-	-	-	-	-	-
Metalaxil-M	-	-	-	0,0015	-	0,004	-
Piraclostrobina	0,421	0,148	-	14,1	0,015	-	0,228
Propiconazol	-	-	0,21	0,105	-	-	-
Protioconazol	-	-	-	-	-	0,144	0,14
Tebuconazol	-	-	-	0,248	-	0,372	-
Tiofanato Metílico	0,045	0,135	-	0,045	0,135	-	0,09
Tirame	-	-	-	-	-	-	-
Trifloxistrobina	-	-	-	0,124	-	0,26	0,012
Total	2,87	0,711	3,46	15,1	1,31	0,927	1,74
<hr/>							
Outros							
Óleo mineral	0,96	1,03	7,84	0,96	0,96	-	3,36

#### 4.2.3.3 Emissões e Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

As emissões por fertilizantes foram estimadas para cada sistema de produção conforme Nemecek e Schnetzer (2011), Canals (2003) e IPCC (2006), para amônia para a atmosfera; lixiviação de nitrato para águas subterrâneas; fósforo através de erosão para águas superficiais; N<sub>2</sub>O e NO<sub>x</sub> para atmosfera; CO<sub>2</sub> fóssil após a aplicação de calcário; metais pesados para solos agrícolas, águas superficiais e águas subterrâneas; e CO<sub>2</sub> para atmosfera. As emissões de CO<sub>2</sub> por mudança do uso da terra foram determinadas conforme Novaes et al. (2017).

As emissões de lixiviação de fósforo para águas subterrâneas e em *run-off* para águas superficiais foram desconsideradas devido a baixa mobilidade de fósforo em solo brasileiros, pois segundo Novais & Smyth (1999) além da escassez do nutriente nos solos, apenas 0,1% do total está na forma de P-solução, que pode ser convertido em formas não-lábeis pelo mecanismo de fixação e, conseqüentemente, não lixiviáveis. Bem como foi desconsiderada a emissão de fósforo adsorvido às partículas de solo perdidas por erosão, esta devido a não inclusão de modelos para determiná-la.

Para as emissões de agrotóxicos foi considerado o método *Ecoinvent*. Esse método implica que as emissões por agrotóxicos sejam consideradas integralmente ao solo, ou seja, considera-se que 100% das substâncias dos produtos aplicados o atinjam (NEMECEK e SCHNETZER, 2011). Para a avaliação dos impactos foram adotados dois métodos, o *ReCiPe Midpoint (H) V1.02/World ReCiPe H*. Desconsiderou-se as categorias de impacto não



pertinentes à natureza dos processos principais em estudo, sendo assim, as categorias adotadas, bem como suas unidades, estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3. Categorias de impactos, com suas unidades e siglas, adotadas nas avaliações de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Categorias de impactos	Unidades	Siglas
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	EcT
Mudanças climáticas	kg CO <sub>2</sub> eq	MC
Uso do solo	m <sup>2</sup> a crop eq	US
Toxicidade humana, não-carcinogênica	kg 1,4-DCB	THN
Depleção fóssil	kg oil eq	DF
Depleção de águas	m <sup>3</sup>	DA
Acidificação terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	AT
Ecotoxicidade de águas	kg 1,4-DCB	EcA
Toxicidade humana, carcinogênica	kg 1,4-DCB	THC
Formação de material particulado	kg PM2.5 eq	FMP
Depleção de recursos minerais	kg Cu eq	DRM
Eutrofização de água doce	kg P eq	EA
Depleção de ozônio	kg CFC11 eq	DO

### 5.3 Resultados

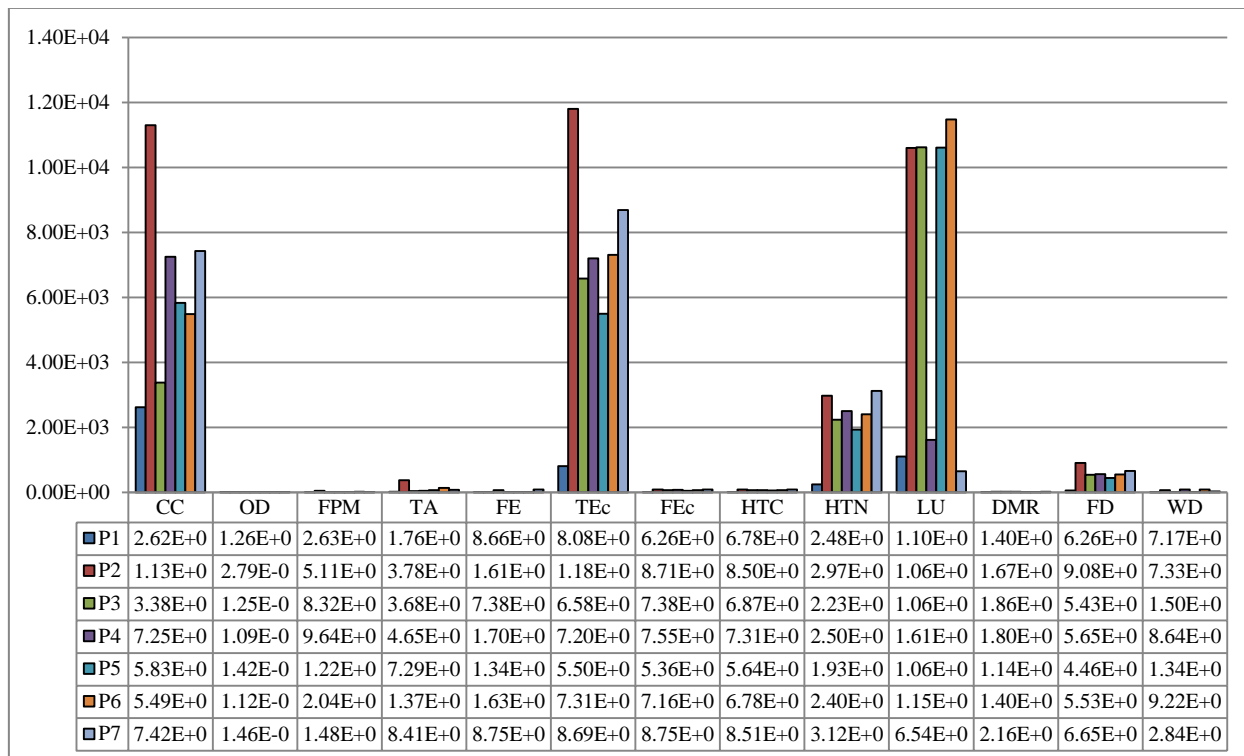
Os resultados foram averiguados separadamente por metodologia apresentados em tópicos individuais, e descritos particularmente a cada propriedade avaliada. Tal iniciativa tem o intuito de que cada caso seja mais bem verificado e compreendido, ampliando a concepção da ação das metodologias sobre as áreas e sistemas de produção, bem como os requerimentos que podem viabilizar que sejam aplicadas em novos casos.

Em seguida, o tópico 5.4 Discussões, é dedicado às concepções gerais observadas nos resultados, seus pontos concordantes e discordantes.

#### 5.3.1 Resultados das avaliações da ACV

Na Figura 1, são apresentados os resultados das avaliações da ACV para os sete sistemas de produção considerados. As categorias que mais impactaram foram as de Mudanças climáticas (MC), Ecotoxicidade terrestre (EcT), Uso do solo (US) e Toxicidade humana, não-cancarcinogênica (THN).

Figura 1. Desempenho ambiental dos sistemas de produção (Propriedades x)<sup>a</sup> da microbacia Ribeirão da Lagosta em Rolândia, Paraná-BR, avaliado pela metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para treze categorias de impactos: Uso do solo (US); Ecotoxicidade terrestre (EcT); Mudanças climáticas (MC); Toxicidade humana - não-carcinogênica (THN); Depleção fóssil (DF); Acidificação terrestre (AT); Depleção de águas (DA); Ecotoxicidade de águas (EA); Toxicidade humana – carcinogênica (THC); Formação de material particulado (FMP); Depleção de recursos minerais (DRM); Eutrofização de águas (EA); Depleção de ozônio (DO)

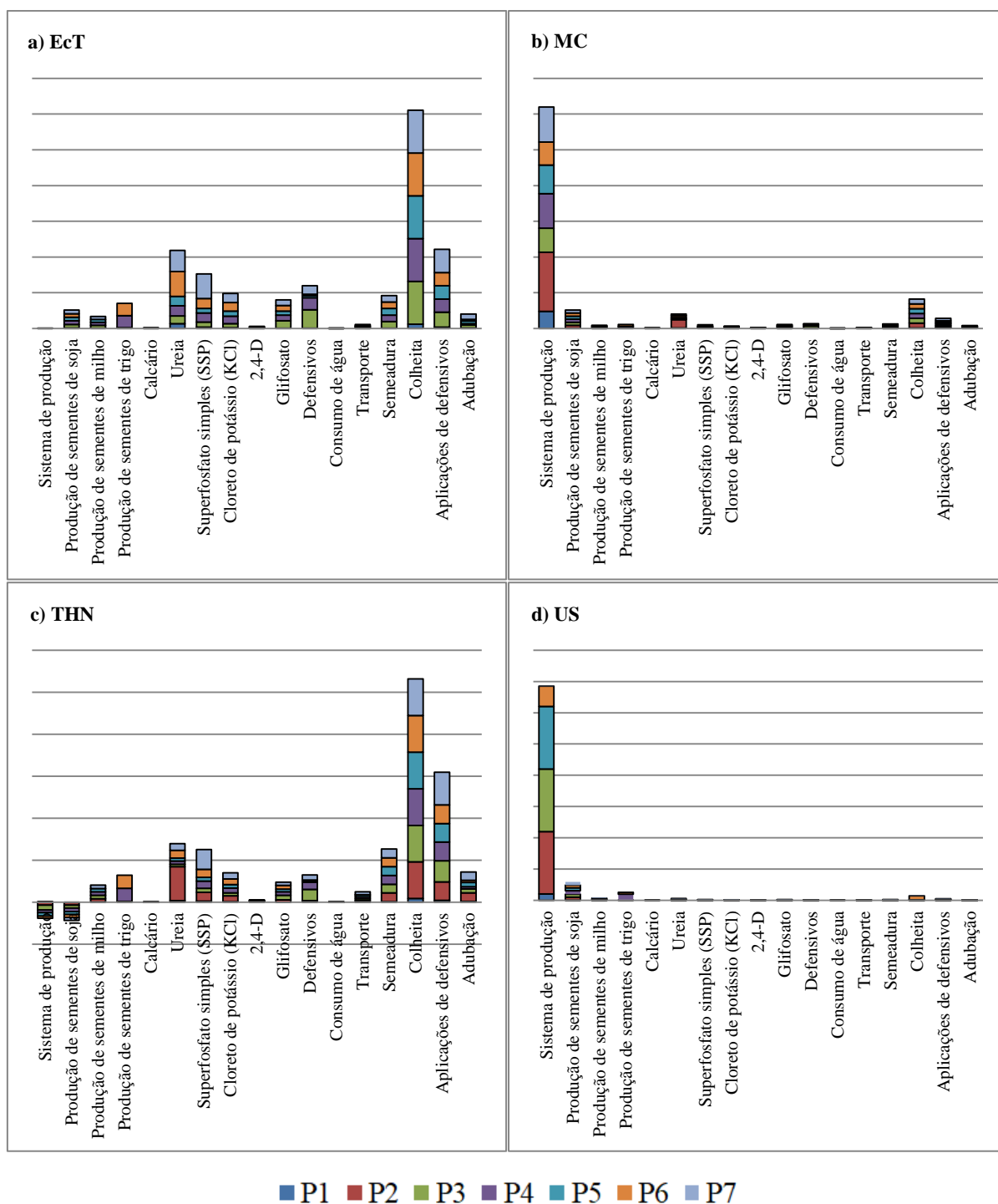


<sup>a</sup>ver Tabela 1 para identificar o sistema de produção de cada área, Tabela 2 para seus respectivos escopos e Tabela 3 para consultar a lista de insumos aportados.

A sequência das categorias mais impactantes foi, respectivamente: P1: Mudanças climáticas (MC), Uso do solo (US) e Ecotoxicidade terrestre (EcT); P2: Ecotoxicidade terrestre (EcT), Mudanças climáticas (MC) e Uso do solo (US); P3: Uso do solo (US), Ecotoxicidade terrestre (EcT) e Mudanças climáticas (MC); P4: Mudanças climáticas (MC), Ecotoxicidade terrestre (EcT) e Toxicidade humana, não-carcinogênica (THN); P5: Uso do solo (US), Mudanças climáticas (MC) e Ecotoxicidade terrestre (EcT); P6: Uso do solo (US), Ecotoxicidade terrestre (EcT), Mudanças climáticas (MC); P7: Ecotoxicidade terrestre (EcT), Mudanças climáticas (MC) e Toxicidade humana, não-carcinogênica (THN).

Na Figura 2 são mostradas as atividades que mais contribuíram para o desempenho ambiental de cada sistema de produção nas principais categorias a impactarem. Em seguida são descritos individualmente as ações das principais atividades nas categorias de impacto.

Figura 2. Contribuição das atividades dos sistemas de produção (Propriedades x) ao desempenho das categorias de impactos que mais impactaram. a) Ecotoxicidade terrestre (EcT) (kg 1,4-DCB). b) Mudanças climáticas (MC) (kg CO<sub>2</sub> eq. c) Toxicidade humana, não-carcinogênica (THN) (kg 1,4-DCB). d) Uso do solo (US) (m<sup>2</sup>a crop eq)



No geral, como pode ser notado nas Figuras 1 e 2, a maioria das propriedades avaliadas, P1, P2, P3, P5 e P6, as categorias a mais impactarem foram as de MC, US e EcT, respectivamente. Enquanto que para as P4 e P7 foram as de MC, EcT e TNH, respectivamente. Quanto às atividades, as que mais contribuíram com estas categorias de

impactos foram: Uso de fertilizantes (destacadamente Ureia); operações de máquinas (principalmente colheita); e, produção de sementes. As demais categorias também foram influenciadas por estas atividades, mas menos expressivamente.

No entanto, o uso de fertilizantes foi pertinente também as categorias de Depleção fóssil (DF), Ecotoxicidade terrestre (EcA), Toxicidade humana, câncer (THC), Formação de material particulado (FMP) e Ecotoxicidade de águas (EA), a ureia contribuiu principalmente na de Depleção de águas (DA) e o SSP na de Depleção de recursos minerais (DRM). Bem como as de adubação e colheita, que também contribuíram com as categorias de THC e DRM.

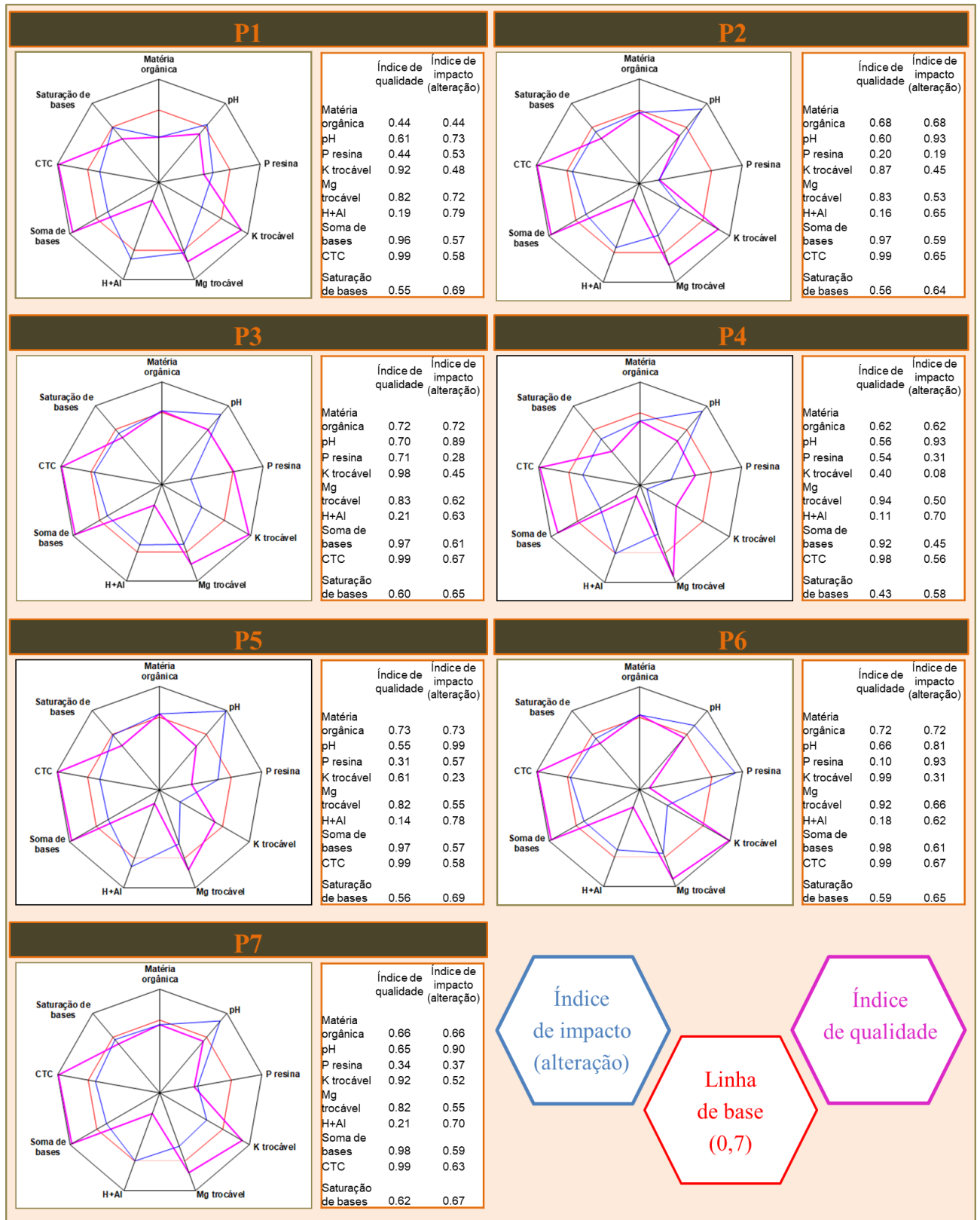
Relacionado à qualidade do solo, o uso de ureia e SSP foram às atividades que mais impactaram.

### 5.3.2 Resultados dos indicadores de qualidade do solo – APOIA-NovoRural.

Primeiramente, deve-se destacar que ao utilizar-se os valores médios dos totais de pontos, os indicadores não apresentaram total eficiência, pois, devido ao cálculo de médias e a aproximação de casa dentro da ordem de grandeza, notou-se pequenas variações no valor da Saturação de bases calculada pela média com as apresentadas pelos indicadores. Diferentemente dos observados nas avaliações por ponto (sem médias), onde não houve a mínima diferenciação em seus valores, assim, observando uma total eficiência dos indicadores. No entanto, decidiu-se utilizar as médias, pois além da variação ser pequena, a obtenção dos resultados junto à interpretação, unida a ACV, é mais adequada ao objetivo deste estudo, que é principalmente o de apresentar resultados e elaborar uma discussão sobre o uso de indicadores de qualidade do solo junto a ACV.

Na Figura 3, são apresentados os resultados dos indicadores de qualidade do solo, segundo índices do sistema APOIA-NovoRural. Importante destacar que os resultados de cada indicador são expressos por valores numéricos aos índices de qualidade e de impacto ambiental, comparados à linha de base definida como 0,7.

Figura 3. Resultados das avaliações dos indicadores de qualidade ambiental do solo APOIANovoRural para as propriedades (P1; P2; P3; P4; P5; P6; P7) presente microbacia Ribeirão da Lagosta em Rolândia, Paraná-BR. Os resultados de cada indicador são expressos por valores multiatributo (0 a 1) dos índices de qualidade (IQ = índice de qualidade) e de impacto ambiental (II = índice de impacto), comparados à linha de base, definida como 0,7



Conforme os indicadores de qualidade do solo notou-se que apenas três propriedades tiveram índices satisfatórios para MO; P3, P5 e P6. As propriedades P2, P4 e P7 ficaram próximas da linha de base, enquanto que a P1 foi a única que apresentou índices realmente baixo em relação a linha de base. Este parâmetro pode ser melhorado através de práticas agrícolas, como: sistema de produção diversificado; uso de espécies de cobertura; entre outras.

Sobre os nutrientes chamou-se a os índices de P, pois não se mostraram satisfatórios em praticamente nenhuma propriedade para ambos os índices. Destaque para a P6, que teve o pior índice de qualidade não devido a carência, mas pelo excesso do nutriente encontrado na área. Quanto aos índices de Ca e Mg apresentaram majoritariamente índices satisfatórios de qualidade e insatisfatórios para impacto, indicando uma diminuição na disponibilidade dos nutrientes.

Para os índices de pH, com exceção das propriedades P4 e P5, suas qualidades não se distanciaram muito da linha de base, e todas com índices de impacto satisfatório. Agronomicamente os valores de pH encontrados são adequados para o desenvolvimentos dos sistemas de produção desenvolvidos nas propriedades. Assim, não se faz necessário a correção do pH nas propriedades, evitando o aporte de insumos para a correção de acidez.

Para o parâmetro de H+Al, observou-se índices de qualidade insatisfatórios em todas as propriedades, bem como os de impacto, no entanto, este com duas propriedades com índices acima da linha de base: P1 e P4. Para a Soma de bases e a CTC, para todas as propriedades, os resultados foram adequados aos índices de qualidade e inadequados aos de impacto. Os índices de Saturação de bases apontaram-se insatisfatórios para todas as propriedades.

## 5.4 Discussão

### 5.4.1 Observações Gerais sobre o Desempenho Ambiental dos Sistemas de Produção nas Áreas em Estudo

De acordo com as avaliações da metodologia de ACV, Fig. 1, os sistemas de produção que se destacaram por mais impactarem foram P2, P3, P4 e P6. Devido à quantidade de insumo em seus inventários de produção. Ademais, percebeu-se que, em geral, as categorias de impactos mais afetadas pelos sistemas de produção foram Ecotoxicidade terrestre (EcT), Mudanças climáticas (MC), Toxicidade humana, não-carcinogênica (THN) e

Uso do solo (US). Matsuura et al. (2017) avaliando o sistema de produção soja-girassol no Cerrado, observaram que entre as principais categorias de impactos estavam, assim como neste estudo, as de MC e TH.

Quanto às atividades dos sistemas responsáveis pelos impactos nestas categorias, destacam-se as relacionadas a operações de máquinas, produção de sementes e o uso de fertilizantes, estes destacadamente nas categorias de EcT, MC e THN. Resultados similares foram obtidos nos estudos de Castanheira et al. (2015) e Matsuura et al. (2017). Nemecek et al. (2015), avaliando quatro sistemas de produção agrícola, que incluíam milho, observaram que as operações agrícolas e uso de fertilizantes – N, P e K – contribuíram significativamente com o desempenho ambiental deles, principalmente o uso de N (no estudo a fonte de N era a amônia). Os autores também destacaram que, para a categoria de MC, a atividade com maior impacto foi o uso de N.

Portanto, percebeu-se pelas avaliações da ACV uma expressiva importância no uso do solo e de fertilizantes e, conseqüentemente, nas atividades relacionadas à fertilidade e a manutenção da qualidade do solo com o desempenho ambiental dos sistemas de produção.

Os indicadores de qualidade do solo avaliam a Matéria Orgânica (MO) em percentual de variação de seu conteúdo no solo. Desta forma, notou-se que os resultados dos indicadores de MO foram insatisfatórios em quatro das três propriedades avaliadas. O sistema com melhor resultado nos indicadores de MO foram P3, P5 e P6. O pior foi o P1, com todos os pontos insatisfatórios. Fabricio e Salton (1999) em condições semelhantes ao das áreas deste estudo – plantio direto e sucessão soja-milho e soja-aveia – observaram um decréscimo no teor de MO, nas condições avaliadas.

Dado que a MO é fonte de carbono para a atmosfera, seu declínio indica um possível aumento na emissão de carbono, tornando tal relação importante às emissões atmosféricas e conseqüentemente a categorias de impacto como a de Mudanças climáticas. E, portanto, deveriam ser mais bem avaliados por métodos específicos a esse tipo de emissão.

Os valores de CTC mostraram que, em todas as áreas os índices de qualidade foram adequados, enquanto que os de impacto foram na maioria insatisfatórios. Diferentemente do observado nos indicadores de H+Al, que foram majoritariamente insatisfatórios e o de impacto melhores para algumas propriedades. Em geral, mesmo com índices de qualidade satisfatórios, a CTC apresentou impacto em todas as áreas, devido à presença de H+Al que eram altas. Os que tiveram índices de qualidade satisfatórios podem

melhorar estes parâmetros através de uma adequação das práticas adotadas pelos sistemas. Os piores foram as P2, P4 e P5.

A CTC, que representa a graduação da capacidade de liberação de vários nutrientes, bem manejada pode favorecer a manutenção da fertilidade por um prolongado período e reduzindo ou evitando a ocorrência de efeitos tóxicos de substâncias como H+Al e da aplicação de fertilizantes (RONQUIM, 2010). Ou seja, um importante indicador a qualidade do solo e ao aperfeiçoamento de sua gestão, bem como ao aporte de insumos e a qualidade ambiental do ambiente agrícola.

Quanto aos nutrientes, os índices de qualidade da Soma de bases foram adequados para todas as áreas, mas os de impacto foram majoritariamente inadequados. A Saturação por bases foi insatisfatório para a maioria dos índices de qualidade, com melhora em alguns pontos, indicado pelos indicadores de impacto. Os indicadores para nutrientes apontaram que, para P, todas as áreas contaram com índices expressivamente insatisfatórios, sendo a maioria das propriedades por apresentar uma diminuição em sua disponibilidade, exceto a propriedade P6 que teve um alto impacto neste parâmetro devido ao seu excesso.

Para K a maioria das áreas, P1, P2, P3, P6 e P7, indicam índices de qualidade adequados, mas pelos de impacto percebeu-se uma diminuição na disponibilidade em muitos pontos. Nestes, mesmo com a quantidade a diminuir, ainda são satisfatórios e não há necessidade em aumentar a oferta de nutriente, mas sim adequar o manejo dos sistemas de produção. Os índices de qualidade para Mg foram em todas as propriedades satisfatórios. No entanto os índices de impacto foram majoritariamente insatisfatórios, apresentando uma diminuição dos nutrientes no solo, possivelmente influenciado pela exportação de nutrientes, mais ainda em boas quantidades, não havendo necessidade de fornecimento de tais, mas adequação do manejo.

Reporta-se que a disponibilidade de nutrientes, seu aproveitamento e sua oferta e/ou reposição estão diretamente ligados à capacidade do solo em retê-los e aproveitá-los (RONQUIM, 2010). Assim, a gestão da fertilidade é tão importante para a gestão do aporte de fertilizantes para a qualidade do solo quanto às questões ambientais. Pois solos com fertilidade adequada tem a eficiência dos fertilizantes aumentadas, pois, culturas mal supridas em nutrientes retarda o desenvolvimento, deixando o solo mais tempo exposto a intempéries, além de reduzir a produção e pode reduzir o estoque de MO.

Diferentemente dos demais indicadores os índices para pH divergem em seus critérios de avaliação, o de qualidade avalia o desvio da neutralidade, enquanto que o de



impacto avalia a indução a acidez. Assim, exceto as propriedades P4 e P5, os índices de qualidades, no geral, não se distanciaram muito da linha de base, e todas com índices de impacto satisfatório. Agronomicamente os valores de pH encontrados são adequados para o desenvolvimentos dos sistemas de produção praticados. Portanto, momentaneamente, dispensa a necessidade de correção do parâmetro, e evita o aporte de insumos para a correção de acidez.

Apesar de não serem agronomicamente críticos, certos parâmetros de qualidade do solo presente nos indicadores apontam deficiência na manutenção da fertilidade, podendo comprometer o bom crescimento e desenvolvimento das culturas. Portanto pelos os indicadores de qualidade percebeu-se que as áreas que tiveram melhor aproveitamento e disponibilidade de nutrientes (já presentes ou fornecidos) foram as que tiveram ou melhoraram seus parâmetros de fertilidade.

#### 5.4.2 ACV + Indicadores de Qualidade do Solo

Para Garrigues et al. (2013), o solo, como um dos componentes do ecossistema global, é tão importante quanto a hidrosfera e a atmosfera para o seu funcionamento. Tais componentes, apesar de terem suas próprias funções e processos internos, interagem entre si. Daí a importância de que todos sejam devidamente considerados em avaliações ambientais.

Garrigues et al. (2013) também ressaltam que a ACV é uma metodologia capaz de abordar todos esses componentes. No entanto, aponta que atualmente não existe um método global normatizado para avaliar a qualidade do solo, e que inclusive as discussões ainda estão acontecendo. Como pode ser notado na revisão de Vidal Legaz et al. (2017) e no estudo de Joensuu e Saarinen (2017), que perceberam inconsistências e falhas em todos os métodos consideradas em seus estudos.

Oberholzer et al. (2012) apontam que ademais dos indicadores descritivos da qualidade do solo é imensamente reconhecida a importância de incluir indicadores relacionados à estrutura do solo, e que modelos para tal ação ainda não está estabelecida. Além do mais, indicadores biológicos do solo, apesar de estarem distantes de serem viabilizado para serem utilizados em estudos de ACV, devem ser considerados como um fator chave para se avaliar a qualidade do solo. Pois, sabe-se que a os microrganismos são de importância fundamental para os parâmetros químicos, físicos e, principalmente, aos aspectos e impactos ambientais provenientes do solo.

Sabendo que a ACV pretende abarcar em suas avaliações, preferivelmente, parâmetros e atividades que estão ou são capazes de serem transformados, por meio de Fatores de caracterização (CF), em fluxos de produtos e/ou energia, e assim integrados em Inventários do Ciclo de Vida (ICV), seguiu-se neste estudo a recomendação de Vidal Legaz et al. (2017) e do próprio Garrigues et al. (2013) que diz “devido a atual dificuldade em desenvolver indicadores de qualidade do solo capazes de serem inseridos em ICVs, que sejam tais parâmetros avaliados separadamente por métodos convencionais de Avaliação do Impacto Ambiental (AIA) e tratados separados das categorias de impactos avaliadas pela ACV.” Buscando fornecer informações que podem contribuir para a discussão sobre o assunto, e no desenvolvimento de modelos considerados apropriados.

Além do mais, os atuais métodos de ACV são incapazes de classificar as intervenções considerando se as práticas agrícolas implementadas são “boas”. Esse aspecto pode ser incluído como, por exemplo, informações qualitativas nos modelos de impacto (VIDAL LEGAZ et al., 2017).

Assim, neste estudo, além de dar um contexto de ACV aos indicadores, buscou-se que os resultados interagissem e, se possível, se complementassem. Para isso foram realizadas as avaliações de ACVs completas dos sistemas de produção, além do uso dos indicadores.

Observou-se que, enquanto a ACV faz a leitura ambiental dos sistemas de produção por meio das categorias de impactos, bem como as principais atividades a darem tais resultados às categorias, os indicadores eficientemente contribuem com informações do ambiente em que cada sistema atuou, fornecendo auxiliares que devem contribuir com a gestão no uso de insumos, operações e atividades atribuídas aos sistemas agrícolas. Similarmente, Oberholzer et al. (2012), concluíram que o uso de novos indicadores devem não somente tentar interagir com a ACV, como também devem contribuir para que consultores e produtores verifiquem a gestão atual de suas atividades e possam promover uma gestão do solo mais sustentável e adaptá-la às condições locais.

Isso por entender-se que os solos são importantes compartimentos e vias de emissão e que seu manejo e manutenção é fundamental a gestão ambiental e a sustentabilidade da agricultura.

Neste estudo, pela ACV, contabilizou-se a importância do aporte de fertilizantes ao desempenho dos sistemas em muitas das categorias de impactos consideradas. E pelos indicadores de qualidade do solo que não é somente no aporte de fertilizantes que tais problemas podem ser combatidos. Os indicadores mostraram que a manutenção da fertilidade

do solo pode ser um fator chave à redução dos impactos provenientes de emissão no uso de fertilizantes.

Pois, produtores que declaram terem utilizado fertilizantes em seus sistemas de produção percebeu-se relação expressiva destes insumos com os impactos observados pela ACV. Enquanto que os indicadores apontaram que o maior problema não está unicamente no aporte de tais insumos, mas na degradação dos fatores relacionados à fertilidade do solo, como: elevada presença de H+Al; diminuição nos teores de cátions permutáveis na CTC, como exemplos. A menor qualidade destes parâmetros indica uma interferência na disponibilidade e aproveitamento de nutrientes. Assim, sua manutenção promoveria seu melhor aproveitamento, melhorando a eficiência de fertilizações e dos próprios nutrientes já presentes no solo, sem alterar, ou até, diminuindo a necessidade de aporte de fertilizantes.

Essas informações são muito relevantes para o desenvolvimento do assunto e, mesmo, de modelo de avaliação. Pois, como apontado por Joensuu e Saarinen (2017), e ao verificar a literatura especializada, que há poucos estudos prévios sobre indicadores de qualidade do solo e uma grande variação entre os métodos adotados e resultados alcançados, não sendo-os diretamente comparáveis.

No entanto, devido ao nível de desenvolvimento e a confiabilidade dos indicadores de qualidade do solo APOIA-NovoRural, muitas informações alcançadas por este estudo são valiosas para a promoção do uso de indicadores como ferramenta de gestão junto a ACV e também ao desenvolvimento de novos indicadores.

Ademais, um importante aspecto a ser considerado presente nos indicadores APOIA-NovoRural a novas avaliações e novos indicadores é entregar os resultados por dois índices, qualidade e impacto. Fornecendo informações imprescindíveis a gestão do solo por meio da adequação justa dos parâmetros. Contextualizando com precisão a condição da área que se está avaliando.

Assim, recomenda-se que seja adotada uma ordem na aplicação das metodologias:

1º) ACV: Fornecer informações sobre quais são as categorias de impactos que são mais relevantes, e suas principais atividades;

2º) Indicadores de qualidade do solo APOIA-NovoRural: Proporcionar informações sobre a fertilidade e a disponibilidade de nutrientes, fundamentais para desenvolver estratégias de gestão do próprio solo e, mesmo, do aporte de insumos.

## 5.5 Conclusões

O presente estudo mostra a necessidade de se aprofundar nestas avaliações, visando obter um padrão para aplicação da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em sistemas de produção agropecuário. Estas informações poderão nortear a adoção de estratégias de produção que conciliem a obtenção de produtividades aceitáveis com conservação ambiental.

Assim, notou-se que a avaliação dos impactos na qualidade do solo pela ocupação agrícola é relevante para as questões ambientais na sustentabilidade de sistemas de produção. Bem como é, disponibilizar informações que auxiliem em tomadas de decisões sobre questões relacionadas à qualidade e ao impacto de seus parâmetros.

Nos casos considerados neste estudo pode-se observar que as áreas que tiveram melhores resultados nos indicadores de qualidade do solo foram as que tiveram os melhores índices de fertilidade. Assim, a manutenção da qualidade do solo pode melhorar a disponibilidade de nutrientes, sem alterar ou até mesmo a diminuir a quantidade de fertilizante aportada.

A ACV apontou o uso de fertilizantes entre as atividades que mais influenciaram o desempenho das categorias de impactos, principalmente as que mais impactaram: Mudanças climáticas (MC); Ecotoxicidade terrestre (EcT); Uso do solo (US); e, Toxicidade humana, não-carcinogênica (THN). Portanto os indicadores de qualidade do solo podem ser úteis para fornecer informações importantes para a gestão ambiental de atividades de sistemas de produção agrícola em todas as categorias de impactos, destacadamente nestas.

Assim, o uso dos indicadores de qualidade do solo APOIA-NovoRural aplicado junto à ACV podem inter-relacionar-se e fornecer importantes informações para a gestão de qualidade do solo, ao volume de insumos aportados e, de modo consequente, ao desempenho ambiental de sistemas de produção agrícola.

## 6 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A qualidade do solo reconhecida como fundamental à produção agrícola mostra-se tão importante quanto os demais componentes de emissões ambientais. Assim, fundamental a sustentabilidade de sistemas de produção.

Nos artigos aqui realizados foram amplamente discutidos as atividades e os parâmetros de qualidade do solo do qual, e como, contribuem com importantes aspectos ambientais da agricultura. O uso de fertilizantes esteve entre as atividades que mais contribuíram para o desempenho da maioria das categorias de impactado consultadas. Destacadamente em categorias de Mudanças climáticas, Ecotoxicidade, Eutrofização, entre outras.

Nos estudos de casos pode-se observar que as áreas que tiveram melhores resultados nos indicadores de qualidade do solo foram as que tiveram os melhores índices de fertilidade. Fazendo da manutenção da qualidade do solo uma importante atividade para melhorar a eficiência no uso de nutrientes presentes no solo, sem influir no aporte de insumos. Assim, apontando que os indicadores podem ser úteis para fornecer informações importantes para a gestão ambiental de atividades de sistemas de produção agrícola em todas as categorias de impactos.

Na literatura científica observou-se que apesar do longo esforço em quantificar a qualidade do solo junto a ACV as avaliações tem sido até então executadas de maneira muito limitada. Cowel e Clift (2000) foram os primeiros a proporem um caminho para que fosse avaliado em estudo de ACV a qualidade do solo, dentre os grupos que propuseram estava os de matéria orgânica, textura e estrutura e nutrientes e pH. Este último grupos, como pode ser notado na revisão de métodos de Vidal Legaz et al. (2017), o menos explorado até o momento e, assim, que modelos promissores podem surgir fora de seu campo e que trabalhos adicionais podem permitir o uso deste tipo de modelos.

Nos estudos aqui desenvolvidos, a partir da literatura – artigo A - e posteriormente no estudo de caso – artigo B -, notou-se que o uso dos indicadores de qualidade do solo APOIA-NovoRural contribui com informações relevantes quando aplicados junto à metodologia de ACV por fornecem importantes informações a gestão da qualidade do solo, ao aporte de insumos, conseqüentemente, ao desempenho ambiental de sistemas de produção agrícolas. Para isso, é recomendado que seja adotada uma ordem na aplicação das metodologias:

1º) ACV: Fornecer informações sobre quais as categorias de impactos que são mais impactantes, e devido a quais atividades do sistema;

2º) Indicadores de qualidade do solo APOIA-NovoRural: Proporcionar informações de qualidade e impacto sobre a disponibilidade de nutrientes e a fertilidade. Fundamentais para desenvolver estratégia de gestão do próprio solo e, mesmo, do aporte de insumos;

Além do mais, sugere-se que se realizem novos estudos que confrontem esses resultados e auxilie no aperfeiçoamento do uso e interação dessas metodologias. E como apontado pela UNEP-SETAC (United Nations Environmental Programme-Society of Environmental Toxicology and Chemistry) Life Cycle Initiative LCA, que seja considerada a inclusão de indicadores biológicos e de perda de biodiversidade pelo uso do solo.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14044: Gestão Ambiental – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14001: Sistemas da Gestão Ambiental - Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2015.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; MITCHELL, J. P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, n. 90, p. 25–45. 2002.
- ANTÓN, A.; TORRELLAS, M.; NUÑEZ, M.; SEVIGNÉ, E.; AMORES, M.; MUÑOS, P.; MONTERO, J. Improvement of agricultural life cycle assessment studies through spatial differentiation and new impact categories: case study on greenhouse tomato production. **Environmental Science & Technology**, n. 48, v. 16, p. 9454-9462. 2014.
- AUDSLEY, E. Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture. European Commission DG VI Agriculture. 1997.
- BARE, J. C.; HOFSTETTER, P.; PENNINGTON, D. W.; UDO DE HAES, H. A. Midpoint versus Endpoint: the sacrifices and benefits. **The international Journal of Life Cycle Assessment**, n.5, v.6, p.319-326. 2000.
- BISSET, R. Methods for environmental impact assessment: a selective survey with case studies. In: Biswas AK, Geping Q, editors. Environmental Impact Assessment for Developing Countries. London: Tycooly International; 1987. p. 3-64.
- BRANDÃO, M. MILÀ i CANALS, L. Global characterization factors to assess land use impacts on biotic production. **The international Journal of Life Cycle Assessment**, n.18, p.1243-1252. 2013.
- BUSCHINELLI, C. C. de A.; CALEGARIO, F. F.; BUENO, S. C. S.; LINO, J. S.; PASTRELLO, B. M. C.; RODRIGUES, G. S. Certificação participativa e gestão ambiental da produção integrada de morango. Proceedings of the IX Seminário Brasileiro de Produção Integrada de Frutas, Bento Gonçalves, Brasil. p. 97-101. Augusto. 2007.
- BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; de DEYN, G.; de GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; van GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – a critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, n. 120, p. 105–125. 2018.
- CANALS, L. M. Contributions to LCA methodology for agricultural systems. 2003. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona. 2003.
- CASTANHEIRA, E. G.; GRISOLI, R.; COELHO, S.; ANDREI da SILVA, G.; FREIRE, F. Life-cycle assessment of soybean-based biodiesel in Europe: comparing grain, oil and biodiesel import from Brazil. **Journal of Cleaner Production**, n. 102, p. 188–201. 2015.
- COELL, S. J., CLIFT, R. A methodology for assessing soil quantity and quality in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, n.8, p.321–331. 2000.
- CREAMER, R. E.; HANNULA, S. E.; Van LEEUWEN, J. P.; STONE, D.; RUTGERS, M.; SCHEMELZ, R.V.M.; de RUITER, P.V.C.; HENDRIKSEN, N.V.B.; BOLGER, T.; BOUFFAUD, M. L.; BUEE, M.; CARVALHO, F.; COSTA, D.; DIRILGEN, T.; FANCISCO, R.; GRIFFITHS, B. S.; Griffiths, R.; Martin, F.; da SILVA, P. M.; MENDES, S.; MORAIS, P. V.; PEREIRA, C.; PHILIPPOT, L.; PLASSART, P.; Redecker, D.; ROMBKE, J.; SOUSA, J. P.; WOUTERSE, M.; LEMANCEAU, P. Ecological network analysis reveals the

inter-connection between soil biodiversity and ecosystem function as affected by land use across Europe. **Applied Soil Ecology**, n. 97, p. 112–124. 2016.

DAVIDSON, D. A. Soil quality assessment: recent advances and controversies. **Progress in Environmental Science**, n. 2, p. 342–350. 2000.

de OLDE, E. M.; SAUTIER, M.; WHITEHEAD, J. Comprehensiveness or implementation: challenges in translating farm-level sustainability assessments into action for sustainable development. **Ecological Indicators**, n. 85, p. 1107–1112. 2018.

DORAN, J. W. Soil health and global sustainability: translating science into practice. **Agriculture Ecosystem Environmental**, n.88, v.2, p.119–127. 2002.

EC-JRC. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook- Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context. EUR 24571 EN. Publications Office of the European Union, Luxemburg. 2011.

FABRICIO, A. C.; SALTON, J. C. Alterações no teor de matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de produção. Comunicado Técnico n.7. Embrapa Agropecuária Oeste. Dourados, MS. pp 14. 1999.

FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M. Z.; EKVAL, T.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; HELLWEG, S.; KOEHLER, A.; PENNINGTON, D.; SUH, S. Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, n. 91, p. 1-91. 2009.

GARRIGUES, E.; CORSON, M. S.; ANGERS, D. A.; van der WERF, H. M. G.; WALTER, C. Development of a soil compaction indicator in life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, n. 18, p. 1316-1324. 2013.

GARRIGUES, E.; CORSON, M. S.; ANGERS, D. A.; van der WERF, H. M. G.; WALTER, C. Soil quality in Life Cycle Assessment: Towards development of an indicator. **Ecological Indicators**, n. 18, p. 434-442. 2012.

GESSNER, M. O.; CHAUVET, E. A case for using litter breakdown to assess functional stream integrity. **Ecological Applications**, n. 12, p. 498–510. 2002.

GERMAN, R. N.; THOMPSON, C. E.; BENTON, T. G. Relationships among multiple aspects of agriculture's environmental impact and productivity: a meta-analysis to guide sustainable agriculture. **Biological Reviews**, n. 92, p. 716-738. 2017.

GIRARDIN, P.; BOCKSTALLER, C.; WERF, H. van der. Indicators: tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. **Journal of Sustainable Agriculture**, v.1 3, n.4, p.5-Z1, 1999.

GOEDKOO, M.; R. SPRIENSMA. The Eco-indicator 99. A damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology report and annex. Pré Consultants, Amersfoort, The Netherlands. 1999. <http://www.pre.nl/eco-indicator99/>

GOEDKOO, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; de SCHRYVER, A.; STRUIJS, J. ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. 2008. Report I: Characterisation. 2009.

HAUSCHILD, M.; GOEDKOO, M.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; JOLLIET, O.; MARGNI, M.; De SCHRYVER, A.; HUMBERT, S.; LAURENT, A.; SALA, S.; PANT, R. Best existing practice for characterization modelling in life cycle impact assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, n. 18, v. 3, p. 683-697. 2012.

HAYASHI, K.; OKAZAKI, M.; ITSUBO, N.; INABA, A. Development of damage function of acidification for terrestrial ecosystems based on the effect of aluminum toxicity on net primary production.. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, n. 1, v. 9, p. 13-22. 2004

HELLWEG, S.; MILLÀ i CANALS, L. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. **Science**, v.344. n.6188, p.1109-1113. 2014.



HERMANN, B. G.; KROEZE, C.; JAWJIT, W. Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators. **Journal of Cleaner Production**. n. 15, p. 1787-1796. 2007.

IPCC. N<sub>2</sub>O emissions from managed soils, and CO<sub>2</sub> emissions from lime and urea application. In: IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories: Agriculture, forestry and other land use. Japan: IPCC, v. 4, p. 11.1-11.54. 2006.

JOENSUU, K.; SAARINEN, M. Applying soil quality indicators in the context of life cycle assessment in a Finnish case study. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. n. 22, p. 1339-1353. 2017.

JOLLIET, O.; FRISCHKNECHT, R.; BARE, J.; BOULAY, A.; BULLE, C.; FANTKE, P.; GHEEWALA, S.; HAUSCHILD, M.; ITSUBO, N.; MARGNI, M.; McKONE, T.; MILÀ I CANALS, L.; POSTUMA, L.; PRADO-LOPEZ, V.; RIDOUTT, B.; SONNEMANN, G.; ROSENBAUM, R.; SEAGER, T.; STRUIJS, J.; van ZELM, R.; VIGON, B.; WEISBROD, A. Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators: findings of the scoping phase. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. n. 9, p. 962-967. 2014.

JOLLIET, O.; MÜLLER-WENK, R.; BARE, J.; BRENT, A.; GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; ITSUBO, N.; PEÑA, C.; PENNINGTON, D.; POTTING, J.; REBITZER, G.; STEWART, M.; de HAES, H.; WEIDEMA, B. The LCIA midpoint-damage framework of the UNEP/SETAC life cycle initiative. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. n. 9, p. 394-404. 2004.

LINDEIJER, E.; MÜLLER-WENK, R.; STEEN, B. Impact assessment of resources and land use. In: Life-Cycle Impact Assessment: Striving Towards Best Practice. SETAC, p.11-62. 2002.

MATSUURA, M. I. S. F.; DIAS, F. R. T.; PICOLI, J. F.; LUCAS, K. R. G.; CASTRO, C.; HIRAKURI, M. H. Life cycle assessment of the soybean-sunflower production system in the Brazil Cerrado. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. n. 22, p. 492-501. 2017.

MILÀ I CANALS, L.; BAUER, C.; DEPESTELE, J.; DUBREUIL, A.; FREIERMUTH KNUCHEL, R.; GAILLARD, G.; MICHELSEN, O.; MÜLLER-WENK, R.; RYDGREN, B. Key elements in framework for land use impact assessment within LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, n. 12, p. 5-15. 2007.

NAWROCKA, D.; PARKER, T. Finding the connection: environmental management systems and environmental performance. **Journal of Cleaner Production**. n. 17, p. 601-607. 2009.

NEMECEK, T.; HAYER, F.; BONNIN, E.; CORROUÉE, B.; SCHNEIDER, A.; VIVIER, C. Designing eco-efficient crop rotation using life cycle assessment of crop combinations. **European Journal Agronomy**. n. 65, p. 40-51. 2015.

NEMECEK, T.; JUNGBLUTH, N.; MILA i CANALS, L.; SCHENCK, R. Environmental impacts of food consumption and nutrition: where are we and what is next? **The International Journal of Life Cycle Assessment**, n. 21, p. 607-620. 2016.

NEMECEK, T.; SCHNETZER, J. Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural productions systems. data v3.0. Zürich: ART. p.34. (Ecoinvent Report, 15). 2011.

NOTARNICOLA, B.; SALA, S.; ANTON, A.; MCLAREN, S. J.; SAOUTER, E.; SONESSON, U. The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: a review of the challenges. **Journal of Cleaner Production**, n. 140, p. 399-409. 2017.

NOVAES, R. M. L.; PAZIANOTTO, R. A. A.; BRANDÃO, M.; ALVEZ, B. J. R.; MAY, A.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S. Estimating 20-year land change and CO<sub>2</sub> emission associated with crops, pasture and forestry in Brasil and each of its 27 states. **Global Change Biology**, 23, p. 3716-3728, fev. 2017.

NOVAIS, R. F.; SMITH, T. J. Fósforo em solos e plantas em condições tropicais. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1999.

OBERHOIZE, H. R.; FREIERMUTH KNUCHEL, R.; WEISSKOPF, P.; GAILLARD, G. A novel method for soil quality in life cycle assessment using several soil indicators. **Agronomy for Sustainable Development**. n. 32, p. 639–649. 2012.

OECD. Environmental indicators for agriculture: concepts and framework. Paris, 1999. v.1, 45p.

ONAT, N. C.; KUCUKVR, M.; HALOG, A.; CLOUTIER, S. Systems thinking for life cycle sustainability assessment: a review of recent developments, applications, a future perspectives. **Sustainability**, n. 706, v. 9, p. 1–25. 2017.

PETTI, L.; SERRELI, M.; DI CESARE, S. Systematic literature review in social life-cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, n. 23, p. 422-431. 2018.

POTTING, J.; BEUSEN, A.; ØLLGAARD, H.; HANSEN, O. C.; De HAAN, B.; HAUSCHILD, M. Aquatic eutrophication. In: Potting J, Hauschild, M (eds.). Technical background for spatial differentiation in life cycle impact assessment. Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen. 2005.

POTTING, J.; HAUSCHILD, M. Z. Spatial differentiation in Life Cycle Impact Assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. n. 11, p. 11–13. 2006.

REAP, J.; ROMAN, F.; DUNCAN, S.; BRAS, B. A survey of unresolved problems in life cycle assessment—part 2: impact assessment and interpretation. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. n. 13, p. 374–388. 2008.

ROSENBAUM, R. K.; ANTÓN, A.; BENGUA, X.; BJOM, A.; BRAIN, R.; BULLE, C.; COSME, N.; DJIKMAN, T. J.; FANTKE, P.; FELIX, M.; GEOGHEGAN, T. S.; GOTTESBUEREN, B.; HAMMER, C.; HUMBERT, S.; JOLLIET, O.; JURASKE, R.; LEWIS, F.; MAXIME, D.; NEMECEK, T.; PAYET, J.; RAESAENEN, K.; ROUX, P.; SCHAU, E. M.; SOURISSEAU, S.; van ZELM, R.; von STREIT, B.; WALLMAN, M. The Glasgow consensus on the delineation between pesticide emission inventory and impact assessment for LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, n. 20, v. 6, p. 765-776. 2015.

RODRIGUES, G. S. Indicadores de sustentabilidade, avaliação de impactos e gestão ambiental de atividades rurais. **Informativo Agropecuário**, n. 252, v. 30, p. 80-89. 2009.

RODRIGUES, G. S.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; SANTANA, D. P.; SILVA, A. G.; PASSTRELLO, B. M. C. Avaliação ambiental de práticas de manejo sítio específico aplicadas à produção de grãos na região de Rio Verde (GO). **Revista Brasileira de Agrociência**. n. 14, v. 3. 2008.

RODRIGUES, G. S.; CAMPANHOLA, C. Sistema integrado de avaliação de impacto ambiental aplicado a atividades do Novo Rural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 4, p. 445-451, 2003.

RODRIGUES, G. S.; CAMPANHOLA, C.; RODRIGUES, I.; FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P.; RAMOS FILHO, L. O. Gestão ambiental de atividades rurais: estudo de caso em agroturismo e agricultura orgânica. **Agricultura em São Paulo**. v.53, n. 1, p. 17-31. 2006.

RODRIGUES, G. S.; CAMPANHOLA, C.; VALARINI, P. J.; QUEIROZ, J. F.; FRIGHETTO, R. T. S.; RAMOS FILHO, L. O.; RODRIGUES, I.; BROMBAL, J. C.; TOLEDO, L. G. Avaliação de impactos ambientais de atividades em estabelecimentos familiares do Novo Rural. 1. ed. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. 1-46. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 17).

RODRIGUES, G. S.; RODRIGUES, I. A.; BUSCHINELLI, C. C. A.; BARROS, I. Integrated farm sustainability assessment for the environmental management of rural activities. **Environmental Impact Assessment Review**. v.30, p. 229-239. 2010.

RODRIGUES, G. S.; RODRIGUES, I. A.; BUSCHINELLI, C. C. A.; LIGO, M. A.; PIRES, A. M.; FRIGHETTO, R. T. S.; IRIAS, L. J. M. Socio-environmental impact of biodiesel production in Brazil. **Journal of Technology Management and Innovation**. n. 2, v. 2, p. 46–66. 2007.

RUVIANO, C. F.; GIANEZINI, M.; BRANDÃO F. S.; WINCK, C. A.; DEWES, H. Life cycle assessment in Brazilian agriculture facing worldwide trends. **Journal of Cleaner Production**, v.28, p. 9-24, jun. 2012.

SEKARAN, U. Research methods for business. A skill building approach. John Wiley & Sons, Inc. 1992.

SEO, E. S. M.; KULAY, L. Avaliação do Ciclo de Vida: Ferramenta Gerencial para Tomada de Decisão. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, v. 1, n.1, ago. 2006.

SKINNER, J. A.; LEWIS, K. A.; BARDON, K. S.; TUCKER, P.; CATT, J. A.; CHAMBERS, B. J. An overview of the environmental impact of agriculture in the U.K. **Journal of Environmental Management**. n. 50, p. 111-128. 1997.

STEFANOVA, M.; TRIPEPI, C.; ZAMAGNI, A.; MASONI, P. Goal and Scope in Life Cycle Sustainability Analysis: The Case of Hydrogen Production from Biomass. **Sustainability**. n. 6, p. 5463–5475. 2015.

STOATE, C.; BOATMAN, N. D.; BORRALHO, R. J.; RIO CARVALHO, C.; de SNOO, G. R.; EDEN, P. Ecological impacts of arable intensification in Europe. **Journal of Environmental Management**. n. 63, p. 337-365. 2001.

UDO de HAES, H. A. How to approach land use in LCIA or, how to avoid the Cinderella effect? Comments on 'key elements in a framework for land use impact assessment within LCA'. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. n.11, p.219-221. 2006.

van der WERF, H. M. G.; SALOU, T. Economic value as a functional unit for environmental labelling of food and other consumer products. **Journal Cleaner of Production**, n. 94, p. 394-397. 2015.

VIDAL LAGAZ, B.; MARIA DE SOUZA, D.; TEIXEIRA, R. F. M.; ANTÓN, A.; PUTMAN, B.; SALA, S. Soil quality, properties, and functions in life cycle assessment: an evaluation of models. **Journal of Cleaner Production**. n. 140, p. 502-515. 2017.

VINCENT, Q.; AUCLERC, A.; BIGUIRISTAIN, T.; LEYVAL, C. Assessment of derelict soil quality: abiotic, biotic and functional approaches. **Science of the Total Environment**, n. 613-614. p. 990-1002. 2018.

WOOD, R.; HERTWICH, R. G. Economic modelling and indicators in life cycle sustainability assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. n. 18, p. 1710-1721. 2013.

YANG, Y.; HEIJUNGS, R. A generalized computational structure for regional life-cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, n. 22, p. 213-221. 2017.

ZOBEL, T.; ALMROTH, C. BRESKY, J. BURMAN, J. O. Identification and assessment of environmental aspects in an EMS context: an approach to a new reproducible method based on LCA methodology. **Journal of Cleaner Production**. n. 10, p. 381-96. 2002.

## Apêndices

Apêndice 1. Resultados das análises de solo para os sete produtores avaliados, em duas coletas

		Análises de parâmetros químicos											
		Primeira amostragem											
Propriedades	Pontos	P	C org.	pH	Al	H+Al	Ca+Mg	Ca	Mg	K	S. Bases	CTC	V
		mg dm <sup>-3</sup>	g dm <sup>-3</sup>	CaCl <sub>2</sub>					mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>				%
1	1	4	18,85	5,42	0,0	47,9	117,3	93,3	24,0	10,3	127,6	175,40	73
	2	18	17,63	5,50	0,0	47,0	128,8	107,8	20,5	7,6	135,9	182,45	74
	3	21	15,35	5,33	0,0	47,9	75,9	62,2	13,7	5,1	81,0	128,80	62
	4	11	15,70	7,83	0,4	57,7	48,6	41,4	7,2	3,6	52,1	109,75	47
	5	38	19,11	5,03	0,1	55,7	65,7	54,4	11,4	5,0	70,7	126,35	56
	6	22	14,90	4,79	0,4	55,7	47,4	40,0	7,4	3,9	51,3	106,90	48
	Média	19	16,92	5,65	0,1	52,0	80,6	66,5	14,0	5,9	86,4	138,28	60
2	1	18	19,03	4,83	1,2	60,5	61,6	52,6	9,1	2,3	63,9	124,30	50
	2	9	15,28	5,11	0,0	47,5	52,5	43,9	8,5	4,3	56,7	104,45	54
	3	8	15,92	5,38	0,0	47,9	72,5	58,3	14,2	4,8	77,3	125,10	61
	4	8	17,85	5,27	0,0	48,0	119,3	94,1	25,2	5,1	124,4	172,35	72
	5	9	16,35	5,69	0,0	40,5	114,9	95,0	19,9	8,4	123,3	163,70	75
	6	4	19,94	5,58	0,0	45,4	112,4	95,5	16,9	6,8	119,2	164,55	72
	Média	9	17,40	5,31	0,2	48,3	88,9	73,2	15,6	5,3	94,1	142,41	64
3	1	14	17,41	5,96	0,0	34,2	80,9	65,7	15,3	3,2	84,1	113,75	71
	2	11	16,29	5,95	0,0	35,5	102,5	86,7	15,8	8,7	111,1	146,60	75
	3	9	20,84	5,68	0,0	43,6	103,4	86,2	17,2	7,8	111,2	154,80	72
	4	12	17,02	5,45	0,0	46,2	101,2	86,0	15,3	7,7	108,9	155,10	70
	5	30	14,43	5,59	0,0	44,2	103,9	87,1	16,8	7,3	111,1	155,30	72
	6	122	17,80	6,02	0,0	36,4	110,5	91,2	19,3	8,4	118,8	155,15	77
	7	122	11,83	5,67	0,0	42,3	77,9	65,4	12,5	7,2	85,1	127,35	67

	8	31	12,95	5,28	0,2	49,1	56,2	46,1	10,1	7,7	63,9	112,90	57
	9	32	13,76	5,06	0,2	53,0	56,2	46,2	10,3	5,8	62,3	115,20	54
	Média	43	15,81	5,63	0,0	42,7	88,1	73,4	14,7	7,1	95,2	137,35	68
4	1	42	20,43	4,94	5,4	70,7	64,1	52,3	11,8	3,1	67,2	137,90	47
	2	18	16,90	4,84	2,3	63,2	62,4	51,2	11,3	2,5	64,9	128,05	50
	3	48	17,35	4,88	3,8	64,9	59,1	46,4	12,4	3,3	62,0	126,85	48
	4	21	18,65	5,52	0,2	44,3	73,3	56,9	16,4	3,2	76,5	120,70	61
	5	16	15,20	5,88	0,0	35,8	69,6	51,7	18,0	2,4	72,0	107,75	66
	Média	29	17,71	5,21	2,3	55,7	65,7	51,7	13,9	2,9	68,5	124,25	54
5	1	26	16,67	4,59	1,9	66,6	47,0	36,7	10,3	2,8	49,7	116,25	43
	2	11	16,27	4,86	0,6	58,0	53,4	42,0	11,5	2,9	56,3	114,25	46
	3	9	16,38	5,06	0,0	57,7	77,9	63,5	14,4	5,4	83,3	140,9	59
	4	6	17,27	5,16	0,0	51,7	64,5	52,3	12,2	1,3	65,8	117,4	56
	5	24	17,54	5,25	0,3	54,1	204,6	160,3	44,3	6,8	211,4	265,5	80
	6	4	16,42	5,28	0,0	48,8	82,9	64,3	18,6	2,5	85,4	134,15	64
	7	20	17,36	5,64	0,0	45,4	201,8	158,5	43,3	7,7	209,5	254,85	82
	8	7	17,11	5,43	0,0	49,7	171,2	129,7	38,8	5,6	174,1	223,7	78
	9	7	14,98	4,46	3,4	69,9	31,5	25,5	6,0	2,5	34,0	103,8	33
	10	14	16,07	5,01	2,4	68,2	53,5	42,6	11,0	3,9	57,4	125,55	45
	11	8	14,62	4,92	0,8	56,9	82,6	68,4	14,2	1,8	84,4	141,25	60
	12	6	13,52	4,98	0,8	54,9	69,9	55,7	14,2	0,9	70,8	125,65	57
	Média	12	16,18	5,05	0,8	56,8	95,0	74,9	19,9	3,7	98,5	155,27	59
6	1	123	16,46	5,53	0,0	46,2	93,3	79,6	13,7	8,8	102,1	148,25	69
	2	108	14,60	5,79	0,0	40,8	94,7	81,0	13,8	9,7	104,4	145,15	72
	3	165	16,21	5,57	0,0	49,4	81,3	70,1	11,2	6,5	87,8	137,10	65
	Média	132	15,76	5,63	0,0	45,5	89,7	76,9	12,9	8,3	98,1	143,50	68
7	1	32	17,90	5,48	0,0	47,0	82,2	61,9	20,4	4,7	86,9	133,85	65
	2	23	23,30	5,62	0,0	44,5	116,2	86,7	29,5	8,0	124,2	168,65	74

	3	5	18,63	5,12	0,0	52,6	89,2	63,7	25,6	3,6	92,8	145,35	64
	4	7	12,54	5,57	0,0	40,6	100,9	75,7	25,2	6,2	107,1	147,60	73
	5	8	17,21	5,61	0,0	43,1	108,1	90,7	18,0	5,8	114,4	157,40	73
	Média	15	17,92	5,48	0,0	45,52	99,31	75,71	23,71	5,63	105,05	150,57	69
Segunda amostragem													
Propriedades	Pontos	P	C org.	pH	Al	H+Al	Ca+Mg	Ca	Mg	K	S. Bases	CTC	V
		mg dm <sup>-3</sup>	g dm <sup>-3</sup>	CaCl <sub>2</sub>					mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>				
1	1	8	14,64	5,48	0,0	43,7	113,0	88,7	24,4	9,2	122,2	165,85	74
	2	9	10,73	5,74	0,0	37,6	115,4	89,7	25,7	5,0	120,4	157,95	76
	3	19	14,10	5,51	0,0	42,8	70,5	57,4	13,1	5,5	75,9	118,70	64
	4	34	14,64	4,88	0,7	58,8	47,7	40,4	7,3	3,5	51,2	110,00	46
	5	10	15,78	5,30	0,0	48,0	55,0	45,3	9,8	3,9	58,9	106,80	55
	6	19	12,67	4,70	1,2	56,6	35,35	30,6	4,75	3,35	38,7	95,25	40
	Média	17	13,76	5,27	0,3	47,9	72,8	58,7	14,2	5,1	77,9	125,76	59
2	1	14	17,09	4,61	2,4	69,5	44,5	38,4	6,1	1,5	46,0	115,40	40
	2	7	15,80	5,16	0,0	47,9	49,6	41,1	8,6	3,8	53,4	101,25	53
	3	4	15,34	5,27	0,0	47,0	63,6	52,7	10,9	3,3	66,8	113,75	59
	4	4	16,89	5,52	0,0	43,8	116,0	91,1	24,9	6,4	122,3	166,05	74
	5	5	16,06	5,49	0,0	44,4	108,6	92,1	16,6	5,4	114,0	158,35	71
	6	4	20,99	5,32	0,0	49,7	106,9	90,4	16,5	6,8	113,7	163,35	70
	Média	6	17,03	5,23	0,4	50,3	81,5	67,6	13,9	4,5	86,0	136,36	61
3	1	7	15,53	5,58	0,0	38,3	67,4	55,5	11,9	2,7	70,0	108,30	65
	2	7	16,99	6,06	0,0	34,3	117,5	99,0	18,5	7,3	124,8	159,00	78
	3	6	18,14	5,40	0,0	47,9	88,2	71,7	16,5	4,9	93,1	140,00	66
	4	6	16,43	5,19	0,0	52,6	84,3	70,9	13,4	6,8	91,1	140,90	63
	5	33	15,90	5,95	0,0	36,3	114,2	94,4	19,9	7,7	121,9	158,15	77
	6	106	16,31	6,16	0,0	33,2	107,7	91,3	16,4	7,3	115,0	148,20	78
	7	57	13,01	5,61	0,0	41,7	72,3	59,1	13,2	5,9	78,2	119,80	65

	8	33	15,19	4,77	0.8	62.3	47,3	39,8	7.5	6.7	53.9	116.15	46
	9	37	16,01	4,77	2.2	61.5	46,2	37,9	8.3	4.7	50.9	112.30	45
	Média	32	15,95	5,50	0.3	45.3	82,8	68,8	13.9	6.0	88.7	133.64	65
4	1	22	19,41	4,76	5.8	71.9	48,5	38,4	10.2	2.3	50.8	122.60	41
	2	36	16,97	4,73	4.1	65.6	47,1	36,9	10.3	1.9	49.1	114.60	42
	3	6	14,98	5,01	0.2	51.6	48,2	37,7	10.5	1.1	49.3	100.80	49
	4	32	17,86	5,04	2.7	58.0	58,8	46,2	12.6	1.0	59.7	117.70	50
	5	12	13,82	6,16	0.0	30.2	70,5	53,2	17.4	1.2	71.7	101.90	70
	Média	22	16,61	5,14	2.6	55.4	54,6	42,4	12.2	1.5	56.1	111.52	50
5	1	12	14,59	4,73	1.0	54.7	37,0	29,6	7.4	2.4	39.4	94.10	42
	2	7	16,78	5,48	0.0	42.1	72,2	54,6	17.7	1.9	74.1	116.15	64
	3	20	17,39	4,66	2.9	67.3	53,3	44,9	8.4	2.4	55.7	122.95	45
	4	8	12,83	4,90	0.5	51.9	54,1	41,3	12.8	1.7	55.8	107.65	52
	5	12	16,58	5,41	0.0	47.0	172,8	135,8	37.0	5.1	177.9	224.85	79
	6	3	16,91	5,32	0.0	47.6	88,5	69,0	19.5	1.2	89.6	137.20	65
	7	12	16,96	5,58	0.0	47.3	190,1	147,0	43.1	4.0	194.1	241.30	80
	8	9	20,89	5,58	0.0	45.3	123,4	99,3	24.1	5.9	129.3	174.55	74
	9	20	14,66	4,57	3.7	66.2	34,8	29,1	5.7	1.5	36.3	102.75	35
	10	12	15,53	4,86	0.8	56.8	55,4	44,1	11.3	2.9	58.3	115.05	51
	11	7	17,56	5,00	0.5	56.1	70,9	57,1	13.8	1.2	72.1	128.15	56
	12	9	18,03	5,33	0.0	49.1	80,6	65,0	15.6	1.0	81.6	130.60	63
	Média	11	16,56	5,12	0.8	52.6	86,1	68,1	18.0	2.6	88.7	141.28	59
6	1	226	16,68	5,39	0.0	49.7	91,1	78,0	13.1	6.9	98.0	147.60	66
	2	65	13,43	5,28	0.0	49.2	78,0	68,2	9.8	6.1	84.1	133.20	63
	3	200	17,95	5,51	0.0	46.4	86,5	71,8	14.7	6.0	92.5	138.80	67
	Média	164	16,02	5,39	0.0	48.4	85,2	72,7	12.5	6.3	91.5	139.87	65
7	1	16	16,07	5,03	0.0	51.0	53,9	41,9	12.0	3.4	57.3	108.25	53
	2	18	19,33	5,75	0.0	40.2	114,4	87,5	26.9	6.3	120.7	160.85	75

3	14	17,49	5,14	0.0	51.6	84,6	59,6	25.1	4.0	88.6	140.10	62
4	5	15,46	5,52	0.0	39.9	99,1	73,7	25.4	5.0	104.1	143.90	72
5	7	17,91	5,40	0.0	45.3	105,3	87,5	17.8	6.1	111.4	156.65	71
Média	12	17,25	5,37	0.0	45.6	91,4	70,0	21.4	5.0	96.4	141.95	67

Extratores: P, K = Mehlich 1; Ca, Mg, Al = KCl 1M; (H+Al) = SMP; Carbono orgânico = método colorimétrico; pH = CaCl<sub>2</sub> 0,01 M