

USO POTENCIAL DA METODOLOGIA DE ANÁLISE  
DE CICLO DE VIDA (ACV) PARA A CARACTERIZAÇÃO DE  
IMPACTOS AMBIENTAIS NA AGRICULTURA<sup>1</sup>

*José Humberto Valadares Xavier<sup>2</sup>*  
*Armando Caldeira-Pires<sup>3</sup>*

RESUMO

A Análise de Ciclo de Vida – ACV – é uma ferramenta para a análise das relações entre os sistemas produtivos e o ambiente. O conceito fundamental dessa técnica é o do ciclo de vida, que surge com a consciência de que qualquer produto, processo ou atividade produz impactos no ambiente desde o momento em que são extraídas as matérias-primas até que, após sua vida útil, o produto é devolvido à natureza. A aplicação da ACV à agricultura é relativamente nova e complexa. No entanto, diversos trabalhos têm sido realizados no âmbito da análise do processo de produção agrícola. Este trabalho, de caráter teórico, tem como objetivo fornecer uma visão abrangente dessa metodologia, seus principais conceitos e fases necessárias à sua utilização, bem como seu uso para determinar impactos ambientais decorrentes da agricultura, com o propósito de discutir a potencialidade de sua aplicação.

**Palavras-chave:** produção agrícola, avaliação de impacto ambiental, ACV.

POTENCIAL USE OF LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)  
METHODOLOGY FOR CHARACTERIZATION OF AGRICULTURE  
ENVIRONMENTAL IMPACTS

ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) is a tool for analysis of the relations among productive systems and the environment. The life cycle is the fundamental concept of this technique, which arises with the conscience that any product, process or activity produce impacts in the environment as from the moment where the indispensable raw

---

<sup>1</sup> Aceito para publicação em julho de 2004.

<sup>2</sup> Engenheiro agrônomo, M.Sc. em Desenvolvimento Sustentável, técnico de nível superior da Embrapa Cerrados, Km 18, Rodovia Brasília–Fortaleza, Caixa Postal 08223, 73301-970, Planaltina, DF, [jhumbert@cpac.embrapa.br](mailto:jhumbert@cpac.embrapa.br)

<sup>3</sup> Engenheiro químico, Ph.D. em Engenharia Mecânica, professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (UnB), SAS, Quadra 5, Bloco H, Sala 200, 70070-914, Brasília, DF, [armandcp@unb.br](mailto:armandcp@unb.br)

materials to its produce are extracted till, after its useful life and its return to nature. LCA's Application in the agriculture is relatively new and complex. However, several studies accomplished in the scope of the analysis of the process of agricultural production. This paper, of theoretical character, has as objective supply a general vision of this methodology, its main concepts and necessary phases to your utilization, as well as its use to assess the environmental impacts in the agriculture, aiming to argue the potentiality of your application.

**Key-words:** agricultural production, environmental impacts assessment, LCA.

## INTRODUÇÃO

A partir da década de 60, a agricultura nos países latino-americanos passou a sofrer forte influência da chamada “Revolução Verde”, fundada basicamente sobre princípios de aumento de produtividade e tendo como base a utilização intensiva de insumos químicos (adubos, agrotóxicos, etc.), a mecanização, o emprego de sementes melhoradas geneticamente e a irrigação (ALMEIDA, 1998).

A viabilização desse modelo estava diretamente relacionada à montagem de uma estrutura caracterizada por quatro elementos: pesquisa tecnológica, indústria de insumos e máquinas, programas de crédito e serviço de extensão rural.

Segundo Flores (1991), no início dos anos 70, a modernização do processo produtivo no campo era requisito imprescindível às novas exigências da economia e da sociedade. Dessa forma, o suporte tecnológico era entendido, ao lado do crédito, como um dos vetores que deveriam ser acionados para atingir esse objetivo. Para esse autor, é inegável que os investimentos feitos em pesquisa agropecuária traduziram-se em resultados e ganhos tecnológicos já incorporados pelo setor agropecuário nacional.

Apesar da riqueza gerada, esse modelo desencadeou sérios problemas ambientais, além de implicações de ordem econômica e social. Essas questões passaram a constar de toda agenda de debate acerca da crise dos modelos de desenvolvimento utilizados desde os primórdios do século 20. Desse debate resultou o fortalecimento do conceito de “desenvolvimento sustentável” que, segundo Pires (1998), nasceu da conscientização de que os recursos naturais não são infinitos e que o futuro do desenvolvimento é limitado pelas fragilidades

Uso potencial da metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) para a caracterização de...

ecológicas. Atualmente, os princípios do desenvolvimento sustentável – inclusão social, prudência ecológica e viabilidade econômica (SACHS, 2000) – norteiam as reflexões sobre o desenvolvimento e influenciam os mais diversos segmentos da sociedade.

Nesse contexto, o atual desafio da pesquisa agropecuária consiste em adequar-se ao conceito de desenvolvimento sustentável, por meio da inovação em metodologias e ferramentas de pesquisa, visando produzir uma exploração agrícola ajustada aos princípios de sustentabilidade. Esse é o motivo pelo qual o desenvolvimento e a aplicação de ferramentas de análise de impacto ambiental dos sistemas de produção agrícola vêm recebendo atenção especial por parte de diversos institutos de pesquisa agropecuária (RODRIGUES et al., 2002).

Partindo-se do pressuposto de que todas as atividades humanas e, conseqüentemente, os impactos ambientais delas decorrentes, estão relacionados à satisfação de determinadas necessidades, por meio de produtos e serviços, conclui-se que tais produtos e serviços devem desempenhar importante papel na regulação relativa à redução dos impactos ambientais. A Análise do Ciclo de Vida de Produtos (ACV) é uma das ferramentas indicadas para a análise de sistemas produtivos com foco ambiental.

Este trabalho, de caráter teórico, fornece um panorama geral dessa metodologia, seus principais conceitos e as fases necessárias à sua utilização. Apresenta também diversos estudos sobre seu uso para determinar impactos ambientais decorrentes da agricultura, com o propósito de discutir a potencialidade de sua aplicação.

### CONCEITOS DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA (ACV)

As primeiras idéias de análise de ciclos de vida de produtos remontam ao século 19, contudo, elas só tomaram força no século 20, sobretudo em relação às embalagens de produtos.

A metodologia de ACV foi construída com base nas diversas aplicações em vários países. A Society of Environmental Toxicology and Chemistry (Setac), por intermédio de organizações “irmãs” nos Estados Unidos e na Europa, participou ativamente do desenvolvimento e da padronização da metodologia, graças à adesão de praticantes e usuários da ACV. Atualmente, sua aceitação e difusão se devem ao fato de ser uma metodologia que pode

trazer muitos benefícios quando incorporada à rotina das empresas, como ferramenta de auxílio à tomada de decisão, em atividades como compras, gestão de produtos, logística, marketing, administração, planejamento estratégico, etc. (WEIDEMA, 1997).

É importante esclarecer que as bases dessa metodologia foram desenvolvidas nos países de clima temperado, principalmente os europeus, com foco orientado especialmente para produtos industrializados. No Brasil, praticamente não há estudos dedicados à ACV, sobretudo para produtos agrícolas.

Segundo Caldeira-Pires et al. (2002, p. 167):

“Os princípios associados à ACV encontram-se em fase de normalização, no conjunto de requisitos da ISO 14040 e seguintes. A norma ISO 14040 define a ACV como ‘compilação dos fluxos de entradas e saídas e avaliação dos impactos associados a um produto ao longo do seu ciclo de vida’. Essa norma define ainda ciclo de vida como ‘estados consecutivos e interligados de um produto, desde a extração de matérias primas ou transformação de recursos naturais, até a deposição final do produto na Natureza’ ”.

A ACV pode ser definida como uma técnica para determinar os potenciais impactos ambientais associados a um produto, mediante a compilação de um inventário das intervenções ambientais relevantes desse produto em todo o seu ciclo de vida, desde a retirada das matérias-primas necessárias à sua produção até sua deposição final no meio ambiente, avaliando os potenciais impactos ambientais dessas intervenções. Portanto, essa técnica considera todos os processos que contribuem para o impacto ambiental de um produto final (WEIDEMA e MEEUSEN, 2000).

Segundo Olsson (1999), a meta de desenvolvimento sustentável tem sido enfatizada como uma parte importante das políticas públicas, sobretudo na Europa. Para se alcançar essa meta, muitas ações diferentes têm que ser executadas, inclusive o desenvolvimento e o uso de ferramentas ambientais para dar suporte à tomada de decisão. É nesse contexto que a ACV vem ganhando importância. O autor argumenta que, num estudo de ACV, todas as extrações de recursos naturais (matérias-primas) e as emissões para o ambiente são determinadas numa forma quantitativa, quando necessário, em todo o ciclo de vida do produto ou serviço. É com base nesses dados que os impactos

ambientais potenciais sobre os recursos naturais, o meio ambiente e a saúde humana podem ser determinados.

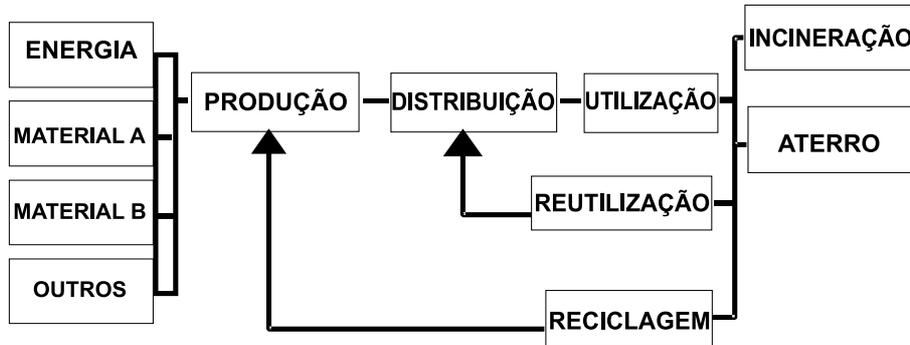
Conforme De Boer (2003), a ACV é um método para determinar, de maneira integrada, os impactos ambientais. “Integrada”, nesse contexto, significa que diversos aspectos ambientais, denominados “categorias de impacto ambiental”, são determinados simultaneamente, variando desde o uso de energia até o potencial de aquecimento global. Além disso, todos os processos relacionados à manufatura do produto, isto é, desde a extração das matérias-primas até as possibilidades de tratamento dos resíduos, podem ser incorporados à análise.

Azapagic e Clift (1995) consideram a ACV como um processo para avaliar o consumo de recursos (naturais) e os impactos ambientais associados a um produto, processo ou atividade, mas acrescentam que a ACV também envolve a identificação e a avaliação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de um produto ou atividade. Segundo Olsson (1999) e Weidema (1999), a ACV também é entendida como um método para determinar os impactos ambientais decorrentes de um produto, considerando a potencial substituição de produtos ou serviços ao longo do ciclo ou do próprio produto analisado, com vista à melhoria do desempenho ambiental.

Em síntese, a ACV é uma técnica que permite a determinação dos impactos ambientais relacionados a um produto, serviço ou atividade, ao longo do seu ciclo de vida, que visa também à identificação de pontos de melhoria do desempenho ambiental nesse ciclo.

Assim, para diversos autores, como Caldeira-Pires et al. (2002), o conceito fundamental dessa técnica é o do ciclo de vida, que surge com a conscientização de que qualquer produto, processo ou atividade produz impactos no ambiente desde o momento em que são extraídas as matérias-primas indispensáveis à sua existência até que, após sua vida útil, esse produto é devolvido à natureza. Na Fig. 1, ilustram-se as principais fases de um ciclo de vida. Essas fases são representadas em blocos, que devem corresponder a processos ou ações, devendo, entre eles, circular energia e materiais.

O conceito de “ciclo de vida” amplia a visão sobre o processo de produção industrial, porque possibilita a melhoria do seu desempenho, tanto do ponto de vista econômico como do ambiental. Incorporar considerações



**Fig. 1.** Principais fases de ciclo de vida de um produto (Caldeira-Pires et al., 2002, p. 168).

ambientais como objetivo de procedimentos de otimização da atividade industrial representa o início de uma mudança de paradigma no processo industrial, tradicionalmente direcionado apenas para o foco econômico. As principais desvantagens de outras abordagens utilizadas é que elas concentram a análise dos impactos ambientais apenas no processo de produção (Fig. 1), ou seja, não consideram outros estágios do ciclo de vida. Assim, é possível que essas abordagens indiquem uma redução dos impactos ambientais na fase de produção, ao mesmo tempo em que causam aumento desses impactos em outra parte do ciclo (AZAPAGIC e CLIFT, 1999; XAVIER, 2003).

Weidema (1997) relaciona os seguintes conceitos/definições sobre a ACV, de importância determinante para sua compreensão:

- a) Ambiente: meio que envolve as operações da organização (empresa, atividade) analisada.
- b) Impacto ambiental: qualquer mudança no ambiente, adversa ou benéfica, resultante de atividades ou produtos da organização.
- c) Intervenções: são os *inputs* ambientais (recursos) utilizados pelo sistema de produção; os *outputs* ambientais produzidos pelo sistema (emissões para o ar, água e solo), bem como as relações ambientais que não estão diretamente relacionadas com os *inputs* ou *outputs*, tais como: uso do solo; impactos físicos; aspectos relativos à saúde ocupacional; bem-estar de trabalhadores; bem-estar de animais domésticos (no caso de atividades agropecuárias), entre outros.

Uso potencial da metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) para a caracterização de...

- d) Produto: é um bem físico ou serviço que cumpre uma ou mais funções definidas.
- e) Sistema de produção: é o conjunto, material ou energético, de processos unitários (*unit processes*) conectados, que oferece (produz) um ou mais produtos. Num sistema de produção, um processo unitário é o menor nível para a coleta de dados.

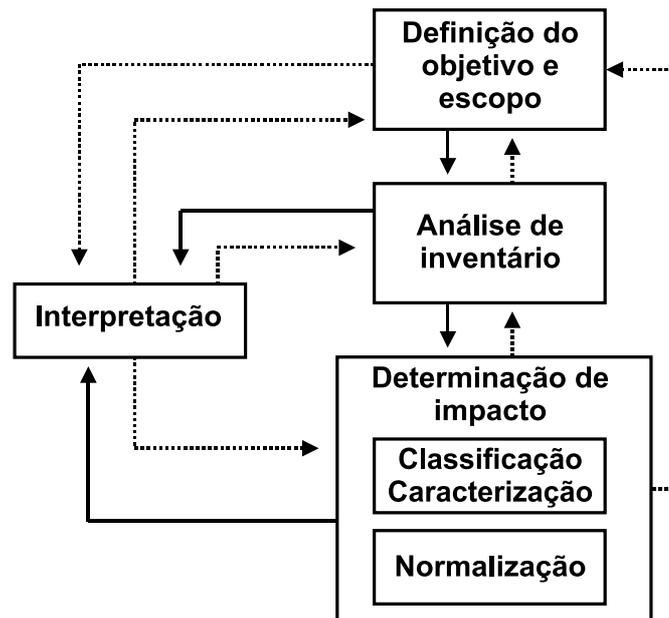
O autor agrupa as aplicações de ACV em quatro áreas:

- a) Análises não-comparativas de produtos já existentes: são relevantes para produzir relatórios ambientais de produtos, com o objetivo de melhorar o nível de informação dos consumidores ou para uma pesquisa inicial visando identificar as áreas ambientalmente mais críticas do ciclo de vida de um produto. Essas análises são baseadas em ambientes específicos (empresas ou localidades) ou em informações médias regulares.
- b) Análises comparativas de produtos existentes: visam influenciar os atores envolvidos com um produto (fornecedores, produtores ou consumidores). Uma avaliação de produtos similares produzidos por diferentes fornecedores pode revelar que alguns deles podem ser superiores do ponto de vista ambiental. Uma empresa pode comparar os próprios produtos com os de seus concorrentes. A comparação pode ser usada também como estratégia de marketing ou para rotulagem ambiental.
- c) Análises comparativas de produtos potenciais (desenvolvimento de produtos): nesse caso, a tarefa consiste em identificar melhorias no produto, tais como: a substituição de ingredientes, a aplicação de diferentes tecnologias no processo de produção, a redução dos resíduos na fase de distribuição, entre outras.
- d) Análises estratégicas de produtos em relação à gestão ambiental: tipicamente comparam diferentes tipos de produtos, a fim de obter um quadro de como eles funcionarão na perspectiva de um objetivo ambiental de longo prazo. Isso pode ser usado para determinar as prioridades de longo prazo de uma empresa do ponto de vista ambiental, agrupar as diretrizes gerais de desenvolvimento de produtos ou “pensar” ajustes de longo prazo no alcance do produto.

Os itens “a” e “b” são classificados como aplicações táticas, o “c” é classificado como aplicação prospectiva e o item “d” como aplicação estratégica. As diferentes aplicações exigem distintos tipos de informação. Dessa forma, é essencial estar atento para o planejamento da aplicação antes de realizá-la (WEIDEMA, 1997).

Os passos da ACV estão internacionalmente padronizados pela Society of Environmental Toxicology and Chemistry – Setac – e pela International Standardization Organization – ISO. Um estudo de ACV, normalmente, realiza-se em várias fases interativas, repetindo-se algumas delas muitas vezes, à medida que as incertezas são eliminadas (Fig. 2).

A ACV pode ser dividida em quatro fases principais (Fig. 2): a) definição do objetivo e do âmbito (escopo) do estudo; b) inventário dos processos envolvidos, com a enumeração das entradas e saídas do sistema;



**Fig. 2.** Fases da metodologia de ACV. As linhas contínuas indicam a ordem das fases, e as linhas tracejadas, as interações (BERLIN, 2002, p. 940).

c) determinação dos impactos ambientais associados às entradas e às saídas do sistema; d) interpretação dos resultados das fases de inventário e avaliação, considerando os objetivos do estudo (AZAPAGIC e CLIFT, 1995; WEIDEMA, 1997; BERLIN, 2002).

Essas fases serão discutidas com mais detalhes a seguir, tendo como base o trabalho de Weidema (1997).

#### Definição do Objetivo e do Âmbito do Estudo de ACV

É a fase de planejamento da ACV. Nela são determinados os objetivos, o(s) público(s)-alvo (interessados), os recursos necessários e os participantes do estudo. A definição do escopo envolve a descrição do produto a ser pesquisado e de possíveis produtos alternativos. Outras atividades dessa fase são: a delimitação da pesquisa (geográfica, temporal, processos analisados, unidade funcional, tecnologia, nível de detalhe da análise, etc.), a escolha das categorias e dos parâmetros ambientais que serão analisados, assim como a definição da estratégia de coleta de informação. Essas definições são fundamentais para que os resultados da ACV possam ser utilizados.

A primeira tarefa a realizar no planejamento de uma ACV é estabelecer o objetivo do estudo conforme suas possíveis aplicações. Uma ACV executada, por exemplo, para situar um produto em relação a um padrão ambiental existente pode não ter um âmbito adequadamente amplo para ser utilizado no desenvolvimento de um novo produto. Uma análise tanto pode ser produzida para uma determinada situação ou local (um país, um continente) como pode ter uma perspectiva mundial. Da mesma forma, podem-se formular análises para subsidiar decisões do dia-a-dia, que podem ser facilmente alteradas, como a troca de fornecedores, como para subsidiar decisões mais amplas, como a compra de novo equipamento ou a mudança de uma legislação. O horizonte de tempo do estudo será obviamente maior no último tipo de análise.

Definir o âmbito (escopo) consiste em estabelecer os limites e a abrangência do estudo, de forma a identificar para quais produtos e processos unitários (*unit processes*) os dados serão coletados, bem como a localização geográfica e o nível tecnológico desses processos. Deve-se também decidir como fixar os limites para outros sistemas de produção que usam os mesmos processos. A definição do escopo inclui ainda a escolha dos parâmetros ambientais e dos métodos de determinação e interpretação dos impactos.

É pelo escopo que se vão identificar as informações essenciais para o estudo e a estratégia para sua coleta. Além disso, o escopo indicará a necessidade de uma avaliação (revisão) independente, bem como seu tipo e o agente que a realizará. Finalmente, o escopo deve descrever o tipo e o formato do relatório a ser produzido.

O produto pode ser descrito tanto como produto físico (como uma máquina de lavar) quanto como um serviço (como um serviço de lavanderia). É importante detalhar a qualidade mínima que ele precisa ter, pois essa especificação representa demandas para os processos e materiais utilizados no ciclo do produto e, portanto, tem consequência sobre o impacto ambiental total.

O produto deve ser definido não apenas por suas qualidades inerentes, mas também por seu uso atual. Isso é conhecido como “unidade funcional do produto”, por permitir a comparação entre produtos com funções semelhantes, mas não entre produtos de mesmos peso e volume. Portanto, a definição da unidade funcional nem sempre é uma tarefa de realização direta e imediata, verificada apenas por meio da comparação com outros produtos. Essa definição é, todavia, fundamental para o estudo, pois é a partir dela que serão realizadas as outras fases da metodologia.

Um processo (*unit process*) freqüentemente resulta em mais de um único produto. Não seria razoável considerar o produto principal como único responsável por todas as intervenções ambientais de um processo (de produção) e dos passos precedentes do ciclo de vida do produto (as intervenções ambientais acumuladas do processo de produção). Portanto, é necessário decidir como essas intervenções ambientais serão distribuídas entre os diferentes subprodutos do processo.

O procedimento mais simples para a alocação consiste em baseá-la nos preços relativos de cada produto no ponto da cadeia em que os produtos são separados (ponto de divisão). A idéia embutida nessa alocação econômica do produto é que a motivação atual para a produção – e, por meio disso, das intervenções ambientais – é o valor econômico dos produtos. Outra estratégia consiste em realizar a alocação com base no peso (massa) dos produtos.

A delimitação final a ser produzida antes da coleta da informação consiste na seleção dos parâmetros ambientais ou das categorias de informação para o estudo. A princípio, é possível, para uma ACV, focar apenas uma substância

Uso potencial da metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) para a caracterização de...

(CO<sub>2</sub>, por exemplo) ou um tema ambiental, ou ainda uma categoria de impacto (aquecimento global, por exemplo). Na busca por simplificação, muitos pesquisadores e praticantes têm defendido a limitação dos parâmetros ambientais pesquisados nos estudos de ACV.

Existe, porém, uma corrente contrária a essa simplificação, que defende a introdução de grande número de parâmetros com o intuito de habilitar a ACV a manejar toda a complexidade do atual debate relacionado ao meio ambiente.

Os parâmetros ambientais que serão incluídos no estudo dependerão do seu peso final na fase de determinação dos impactos ambientais. Para isso, é útil a realização de uma análise de custo/benefício, relacionando o custo para a coleta de informações ao peso na determinação do impacto ambiental final.

A estruturação da fase de inventário vai depender da estratégia utilizada na coleta de informações. Sugere-se, então, que a coleta de dados seja precedida da avaliação da importância de cada dado. Ela deve descrever também a qualidade dos dados.

A exigência da qualidade da informação pode variar conforme cada parte do ciclo de vida do produto, ou seja, algumas partes – que influenciam sobremaneira o resultado final – requerem informação de melhor qualidade do que as demais.

#### Inventário dos Processos de Enumeração de Entradas e Saídas do Sistema

É a fase que consome mais tempo. Uma pesquisa preliminar que utilize a informação disponível é suficiente para produzir estimativas iniciais sobre os processos e os componentes para os quais não há informação disponível ou acessível. Uma ACV baseada nessa informação bruta serve para uma rápida identificação daqueles processos e componentes do ciclo de vida mais significativos para o resultado. Nessas partes do ciclo, é preciso coletar informação adicional.

Embora existam diversas bases de dados que oferecem dados secundários, é preciso uma certa cautela, porque algumas podem apresentar má qualidade ou obsolescência de informação. Daí a necessidade e a importância de confecção de bases de dados que possam ser utilizadas para

estudos de ACV. Com o objetivo de melhorar o acesso a dados de qualidade, foi implantado um projeto, conhecido pela sigla SPOLD (The Society for the Promotion of Life Cycle Assessment Development). (OLSSON, 1999; WEIDEMA, 1999.)

A confiabilidade e, portanto, a aplicabilidade dos resultados da ACV dependem da qualidade dos dados e de informações originais. Dessa forma, o manejo da qualidade dos dados deve ser uma parte integrada à ACV. Essa qualidade pode ser aferida pelo uso de indicadores para cada conjunto de dados, que especificam sua qualidade em relação à maneira como serão utilizados no estudo.

Os indicadores são números semiquantitativos, definidos para um conjunto de dados, representando sua qualidade. Weidema e Wesnaes (1997)<sup>4</sup>, citados por Weidema (1997), sugerem cinco indicadores para descrever os aspectos da qualidade dos dados:

- a) Confiabilidade: relata as fontes, métodos e procedimentos de validação empregados na coleta dos dados. O indicador independe dos requerimentos de qualidade da informação para um estudo específico, ou seja, uma decisão produzida na definição do escopo não altera a confiabilidade dos dados, e os escores devem ser idênticos se os dados já foram usados em outros estudos.
- b) Representatividade: relata as propriedades estatísticas dos dados, isto é, a representatividade da amostra, e informa se ela contém um número adequado de dados para compensar flutuações normais. Da mesma maneira que o “indicador de confiabilidade”, esse indicador não depende dos requerimentos de qualidade de dados para um estudo particular.

Os próximos três indicadores apresentam correlação entre os dados e os requerimentos de qualidade relativos à tecnologia ou a condições de produção específicas do estudo de ACV:

- c) Correlação temporal: representa a correlação entre o período de tempo relevante para o estudo e a atualidade dos dados obtidos. Como a tecnologia se desenvolve rapidamente, dez anos de diferença entre o ano de estudo e o ano dos dados pode alterar totalmente as emissões e a eficiência de produção.

---

<sup>4</sup> WEIDEMA, B.P.; WESNAES, M.S. Data quality management for life cycle inventories: an example of using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, Great Britain, v.4, p. 167-174, 1996.

Uso potencial da metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) para a caracterização de...

- d) Correlação geográfica: representa a correlação entre a área geográfica relevante para o estudo e a cobertura geográfica dos dados obtidos. Os métodos de produção podem ser totalmente diferentes, dependendo da localidade.
- e) Correlações tecnológicas adicionais: relacionam-se a e afetam todos os outros aspectos considerados nas correlações geográficas e temporais. Embora os dados possam ter atualidade temporal e representatividade geográfica desejadas, eles podem não ser representativos para empresas, processos ou materiais específicos de determinado estudo de ACV. Dessa forma, pode ser preferível utilizar outros dados, mesmo aqueles considerados antigos ou referentes a outras localidades.

É importante considerar esses cinco indicadores como uma caracterização independente de aspectos da qualidade dos dados. Obviamente, dados oriundos de áreas “erradas” podem significar também que as tecnologias utilizadas são diferentes daquelas da área de estudo. Contudo, esse aspecto é relatado no indicador de correlação geográfica. No indicador de correlações tecnológicas adicionais, relatam-se apenas àquelas diferenças que ocorrem apesar de os dados serem atuais e oriundos da mesma área geográfica. Por exemplo, se houver necessidade de dados de um trator produzido na Dinamarca, em 1992, mas só se disponha dos dados de um trator produzido na Inglaterra, e em 1976, toda a diferença de tecnologia poderá ser atribuída a problemas nas correlações temporal e geográfica. No entanto, se, além disso, os dados da Inglaterra forem de um carro e não de um trator, isso seria descrito pelo indicador de correlações tecnológicas adicionais.

Da mesma forma, o indicador de representatividade pode ter um “valor” muito bom, enquanto os outros três indicadores de correlação apresentam valores muito ruins. Isso ocorre porque a representatividade não está relacionada ao estudo específico para o qual os dados estão sendo utilizados, mas apenas para os dados em si. Dessa forma, um conjunto de dados pode ser completamente representativo de determinada situação da Inglaterra em 1976, mas, ainda assim, não ter boa correlação se o estudo for realizado para a indústria dinamarquesa em 1992. Inversamente, um conjunto de dados perfeitamente ajustado, oriundo do estudo de uma empresa, pode não ser completo, e, portanto, não ter representatividade para outra área geográfica.

Os dados coletados para todos os processos (componentes) de um sistema de produção devem ser normalizados em relação à Unidade Funcional. São calculadas todas as intervenções ambientais de cada processo, pelo acompanhamento dos fluxos a montante, para extração das matérias-primas; e, a jusante, para a deposição final dos resíduos. Sistemas de produção complexos, isto é, com muitas inter-relações, tornam vantajosa a utilização de programas (*softwares*) específicos para a ACV.

Qualquer articulação de intervenções ambientais deve ser alocada entre os subprodutos do sistema de produção, seguindo os procedimentos descritos na fase de definição do escopo do estudo de ACV, a menos que isso já tenha sido realmente feito na fase de coleta de dados.

Dessa forma, as contribuições de cada processo para uma mesma intervenção ambiental (por exemplo, SO<sub>2</sub>) podem ser adicionadas para se obterem os valores de SO<sub>2</sub> do sistema de produção. Assim, emissões são agregadas, embora elas possam se originar de diferentes lugares do ciclo de vida do produto.

O resultado desses cálculos é uma longa lista de intervenções ambientais para cada sistema de produção. Essas listas podem ser comparadas. Em alguns casos, elas são suficientes para identificar os sistemas de produção com baixos impactos ambientais. No entanto, é mais comum que um sistema de produção tenha um impacto ambiental mais baixo para determinadas intervenções, enquanto outro sistema obtenha melhores resultados em outras. Esse fato torna complicada a comparação entre os sistemas. Para que se possam tirar conclusões, é necessário agrupar as intervenções ambientais em temas ou categorias de impactos ambientais.

#### Determinação dos Impactos Ambientais Associados às Entradas e às Saídas do Sistema

Nessa fase, as diversas intervenções ambientais são agrupadas e convertidas em impactos ambientais potenciais. Além disso, esses impactos potenciais podem ser comparados pela aplicação de pesos. O primeiro elemento na análise (determinação) dos impactos é a caracterização das intervenções ambientais em relação aos tipos de impactos ambientais conhecidos. Uma visão geral desses impactos é descrita no Tabela 1.

**Tabela 1.** Categorias de impactos ambientais relacionadas a estudos de ACV.

<b>Categorias de impactos relacionadas aos fluxos</b>	
<b>Categorias relacionadas às entradas (<i>inputs</i>)</b>	<b>Categorias relacionadas às saídas (<i>outputs</i>)</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Consumo de recursos energéticos</li><li>• Redução (perda) de recursos, incluindo recursos genéticos, culturais e aqueles relativos à paisagem</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aquecimento global</li><li>• Redução da camada de ozônio</li><li>• Impactos toxicológicos na saúde humana</li><li>• Impactos ecotóxicos</li><li>• Formação de fotooxidantes</li><li>• Acidificação</li><li>• Eutrofização</li><li>• Incômodos, incluindo odores, barulho, vibrações e impactos visuais</li></ul>
<b>Categorias de impacto independentes dos fluxos</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Bem-estar das pessoas, incluindo acidentes e aspectos relacionados à saúde ocupacional</li><li>• Bem-estar social</li><li>• Bem-estar de animais domésticos ou de laboratórios</li></ul>	

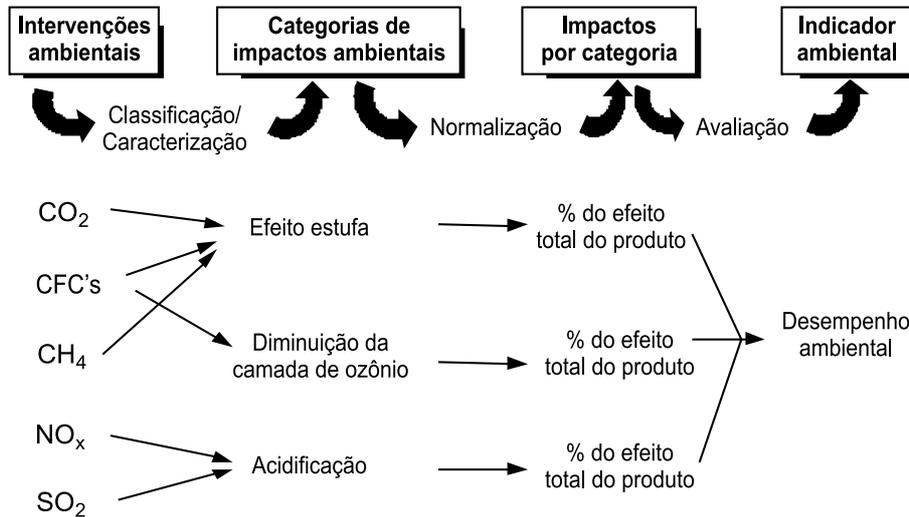
Fonte: Weidema (1997).

Para caracterizar os impactos ambientais, é necessária uma matriz de conversão, responsável pela transformação das intervenções em impactos ambientais. Esse processo é denominado de “classificação/caracterização” e consiste no primeiro passo ilustrado na Fig. 3.

O resultado da caracterização é uma expressão com as contribuições do sistema de produção na forma de potenciais impactos ambientais. A ocorrência desses impactos em meio real dependerá das condições locais, não podendo, portanto, ser previstos pela ACV.

Quando as intervenções ambientais estiverem traduzidas nos seus potenciais impactos ambientais, pode ocorrer que um sistema de produção seja melhor em algumas categorias de impacto, enquanto outro seja melhor em outra. A depender do tipo de sistema de produção, as intervenções ambientais podem resultar em maiores ou menores impactos ambientais.

O elemento final na análise de impacto, portanto, é uma ponderação, que define a importância relativa das categorias de impacto. A ponderação



**Fig. 3.** Representação esquemática da caracterização dos impactos ambientais (Caldeira-Pires et al., 2002, p. 169).

tem um certo aspecto subjetivo. A idéia é definir, por exemplo, se a categoria de impacto “aquecimento global” tem importância relativa maior do que a de “eutrofização”, e, portanto, a primeira categoria terá peso maior na análise do impacto total. De certa maneira, as determinações políticas de redução de impactos ambientais específicos podem ser utilizadas como orientadoras para a ponderação.

#### Interpretação dos Resultados das Fases de Inventário e Avaliação, Considerando os Objetivos do Estudo

É a fase final da ACV. O resultado é determinado e orienta a produção da conclusão final. Antes de extrair as conclusões, deve-se realizar uma análise de qualidade da informação oriunda da análise (fase) de inventário e da análise de impactos. Normalmente, uma avaliação da qualidade dos dados é apresentada depois de sua coleta, mas seus resultados devem, ainda, ser revisados e resumidos para posterior interpretação.

Freqüentemente, a conclusão consiste em uma ou mais recomendações para melhorias, ou substituição de determinado produto. Nessa fase,

Uso potencial da metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) para a caracterização de...

outros aspectos podem ser acrescentados à informação ambiental, como os argumentos técnicos ou econômicos para a escolha entre várias possibilidades de melhoria de determinado processo. Deve-se atentar, no entanto, que os resultados da ACV sejam interpretados de acordo com o objetivo principal do estudo.

### APLICAÇÃO DA ACV À AGRICULTURA

A aplicação da ACV à agricultura é relativamente nova, a despeito de diversos trabalhos já terem sido realizados no âmbito da análise do processo de produção agrícola. Na Tabela 2, mostram-se alguns desses estudos.

Uma das motivações para o estudo das alterações provocadas no ambiente pela produção agrícola decorre do fato de esse segmento estar relacionado a importantes impactos ambientais. Por exemplo, segundo Kramer et al. (1999), o setor agrícola da Holanda é uma importante fonte de gases de

**Tabela 2.** Estudos de ACV relacionados à produção agrícola.

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Tema central do estudo</b>
Kramer et al. Cederberg e Mattsson	1999	Estudo das emissões de gases de efeito estufa pelo setor agrícola da Holanda
Mattsson et al.	2000	Identificação dos parâmetros com maior influência sobre os impactos ambientais de fazendas produtoras de leite na Suécia e suas causas
Haas et al.	2001	Análise da adequabilidade da ACV como ferramenta de análise do processo produtivo da agricultura, a partir da comparação dos impactos ambientais de fazendas de pecuária na Alemanha, em três sistemas de produção (orgânico, intensivo e extensivo)
Katajajuuri e Loikkanen	2001	Desenvolvimento de bases de dados ambientais. Estudo de caso aplicado à produção de cevada na Finlândia
Berlin, J. Caldeira-Pires et al.	2002	Estudo dos impactos ambientais da produção de queijo na Suécia
Margni et al.	2002	Potencial da ACV como ferramenta para análise do processo de produção relacionado à agricultura familiar e à produção orgânica
De Boer	2003	Estudo de ACV visando desenvolver uma metodologia mais precisa para determinar os impactos ambientais de pesticidas da agricultura
Xavier et al.	2004	Revisão das perspectivas e restrições da ACV como ferramenta para determinar os impactos ambientais da produção orgânica e convencional de leite
		Otimização de um sistema de produção agrícola familiar em duas situações: a) considerando somente as variáveis econômicas; b) associando as variáveis econômicas às ambientais

efeito estufa, como CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. Com efeito, das emissões totais desses gases, na Holanda, em 1990, 47% de CH<sub>4</sub> e 37% de N<sub>2</sub>O foram oriundas da agricultura.

No Brasil, esforços têm sido feitos para quantificar as emissões antrópicas de gases de efeito estufa, principalmente buscando atender aos compromissos firmados em fóruns internacionais, de maneira especial à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Assim, no âmbito da produção agropecuária, foi implementado o Programa Mudanças Climáticas, sob a coordenação do Ministério da Ciência e Tecnologia, com o objetivo de elaborar o inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Dados desse programa mostram que as principais fontes de emissão de metano na agropecuária são o cultivo de arroz inundado, a pecuária e a queima de biomassa. Conforme a Tabela 3, a pecuária é uma das mais importantes fontes de emissão de metano na agropecuária.

Berlin (2002) atenta para a necessidade urgente de aumentar os conhecimentos sobre conseqüências ambientais decorrentes da produção de alimentos, visando procedimentos que promovam a sustentabilidade. Nesse contexto, realizou-se um estudo de ACV com o objetivo de investigar as conseqüências sobre o ambiente decorrentes da produção de lácteos, especialmente da produção de queijo, na Suécia. Concluiu-se que, embora o queijo seja um produto de intenso processamento industrial, os maiores impactos ambientais estavam relacionados à produção do leite.

**Tabela 3.** Principais fontes de emissão de metano na agropecuária e quantidades emitidas no Brasil, em 1994.

<b>Fonte</b>	<b>Emissões de metano (Gigagramas – Gg)</b>
Arroz inundado	283,04
Pecuária <sup>(1)</sup>	9.751,12
Queima de resíduos agrícolas <sup>(2)</sup>	130,00
Queima de combustíveis	11,00

<sup>(1)</sup> Considerou-se, para o cálculo, a fermentação entérica e o manejo de dejetos dos seguintes rebanhos: gado de leite, gado de corte, bubalinos, ovinos, caprinos, eqüinos, muares, asininos e suínos. Para as aves, considerou-se apenas o manejo de dejetos.

<sup>(2)</sup> Cálculos realizados para a cana-de-açúcar e o algodão herbáceo, consideradas as principais culturas a utilizar processos de queima de resíduos agrícolas no Brasil.

Fonte: Lima et al. (2002a, (2002b), (2002c); Rosa et al. (2002).

Uso potencial da metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) para a caracterização de...

A ACV, como ferramenta de análise de avaliação dos impactos ambientais decorrentes da produção de alimentos, vem ganhando espaço e é foco de estudos e pesquisas em diversos países, visando padronizar seus procedimentos. Uma das ações realizadas nesse sentido é a chamada *LCA Net Food*, cujo objetivo principal é desenvolver e dar suporte ao aumento do uso dos resultados de estudos de ACV como base para decisões estratégicas, táticas e operacionais. Esse objetivo geral pode ser desmembrado em quatro objetivos específicos (OLSSON, 1999; WEIDEMA e MEEUSEN, 2000):

- a) Desenvolver uma rede de trabalho sobre ACV na cadeia de alimentos.
- b) Avaliar e relatar o estado da arte da metodologia de ACV utilizada, com ênfase nas falhas relacionadas à cadeia de alimentos.
- c) Desenvolver um programa estratégico de pesquisa focado na cadeia de alimentos.
- d) Iniciar e promover a formação de uma base de dados européia sobre ACV relacionada à cadeia de alimentos.

Cabe ressaltar que muitos dos estudos realizados no âmbito da produção de alimentos restringiram-se exclusivamente às fases de beneficiamento e industrialização. São, portanto, muito recentes os estudos de ACV voltados ao processo de produção agrícola, em especial para sistemas produtivos de colheitas únicas. E ainda são raros os trabalhos em que são feitas análises de impactos ambientais relacionados ao sistema de produção, em geral.

Um dos motivos para essa situação reside no fato de o processo de produção agrícola, bem como a aplicação da metodologia de ACV a produtos da agricultura, apresentarem complexidades e particularidades em relação a sua aplicação a produtos industrializados (HASS et al., 2001; KATAJAJUURI e LOIKKANEN, 2001).

Segundo Olsson (1999), o uso da ACV na cadeia de alimentos apresenta algumas particularidades relacionadas à unidade funcional, às influências das variações geográficas e climáticas, à grande influência do comportamento dos consumidores e à estrutura da cadeia, com grande número de unidades produtivas de pequena escala (agricultores), o que implica alta variabilidade nos efeitos ambientais e problemas de coleta de dados.

A propósito, um destaque especial deve ser feito à coleta dos dados, em virtude de representar a fase de maior consumo de tempo e recursos nos estudos de ACV, à qual se soma a dificuldade de realização da tarefa. A princípio, isso parece um paradoxo, se se considerar que, de toda a cadeia de alimentos, a agricultura é a parte do ciclo de vida que apresenta maior quantidade de dados em domínio público. No entanto, cumpre lembrar que esses dados raramente estão numa forma que permita sua relação direta com uma quantidade específica de um produto, necessitando, portanto, de modelagem adicional. Ademais, os dados têm uma variabilidade muito grande, em parte por causa da diversidade das unidades produtivas (cada uma com diferentes métodos de produção), em parte em virtude da variabilidade das condições locais de produção. Por fim, esses dados não são coletados de uma maneira padronizada (WEIDEMA e MEEUSEN, 2000).

Em suma, há necessidade de facilitar a seleção, o intercâmbio e a interpretação de dados para os estudos de ACV, sobretudo aqueles relacionados ao processo de produção agrícola. Weidema e Meeusen (2000) apontam os seguintes eixos temáticos para estudos de modelagem, padronização e elaboração de bases de dados:

- a) Dados sobre uso de energia e emissões advindas do uso de combustível em estábulos, máquinas agrícolas, irrigação e secagem de produtos: esses dados estão associados à categoria de impacto de aquecimento global, provenientes das emissões de  $\text{CH}_4$  do rebanho, emissões de  $\text{CO}_2$  do uso de máquinas e equipamentos agrícolas, bem como do transporte de rações e fertilizantes.
- b) Dados sobre o ciclo e o balanço do nitrogênio, incluindo emissões de animais, estábulos, esterco e cultivos: a volatilização de  $\text{NH}_3$  proveniente da aplicação de adubos/esterco está relacionada à acidificação de ecossistemas. A lixiviação de  $\text{NO}_3$  causa eutrofização e contaminação dos lençóis de água. Finalmente, a emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  oriunda do uso de adubos sintéticos nitrogenados influencia no potencial de aquecimento global.
- c) Ciclo e balanço de outras substâncias, sobretudo o fósforo: a lixiviação de  $\text{PO}_4$  está relacionada à eutrofização.
- d) Tipificação de fazendas visando à estruturação da coleta e gestão dos dados: a maior parte dos trabalhos sobre o potencial impacto

Uso potencial da metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) para a caracterização de...

ambiental de processos de produção agrícola refere-se a fazendas experimentais que não necessariamente representam os correspondentes sistemas de produção (DE BOER, 2003). Dessa forma, é necessária a realização de estudos de ACV no meio real, isto é, em propriedades que sejam representativas dos diversos tipos de sistemas de produção existentes, bem como das diversas condições agroecológicas.

A despeito das lacunas existentes e da necessidade de melhorar o padrão e a qualidade dos dados para a ACV, muitos estudos vêm sendo realizados, em diversos campos da produção agrícola, tanto em escalas amplas, como é o caso de estudos de âmbito nacional, quanto em escalas menores, chegando alguns estudos às unidades de produção.

Mattsson et al. (2000) utilizaram a ACV no âmbito de um projeto de pesquisa na Suécia, que tinha os seguintes objetivos:

- a) Propor, para o uso do solo, procedimentos com objetivos ambientais.
- b) Sugerir um conjunto de indicadores para determinar o uso do solo como uma categoria de impacto.
- c) Testar a abordagem sugerida em estudos de caso de culturas oleaginosas.

Os autores argumentam que a ACV acrescenta uma série de informações a várias categorias de potencial impacto ambiental, como é o caso do aquecimento global. Nessa categoria, as contribuições de diversos gases, tais como o CO<sub>2</sub> e o N<sub>2</sub>O, entre outros, são agregadas em equivalentes de CO<sub>2</sub>. O uso do solo é uma dessas categorias, embora seu processo de caracterização ainda não esteja bem trabalhado. As culturas estudadas foram a colza na Suécia, a soja no Brasil e a mamona na Malásia.

Erosão do solo, matéria orgânica, estrutura do solo, pH, impactos sobre a biodiversidade causados pelos cultivos e estoques de fósforo e potássio do solo foram considerados indicadores razoáveis. Os autores consideram que o uso do solo raramente tem sido levado em conta pela ACV, já que não existe disponibilidade de métodos de determinação desse impacto ambiental. Também ressaltam as dificuldades de obtenção de informações, mesmo em relação a cultivos importantes.

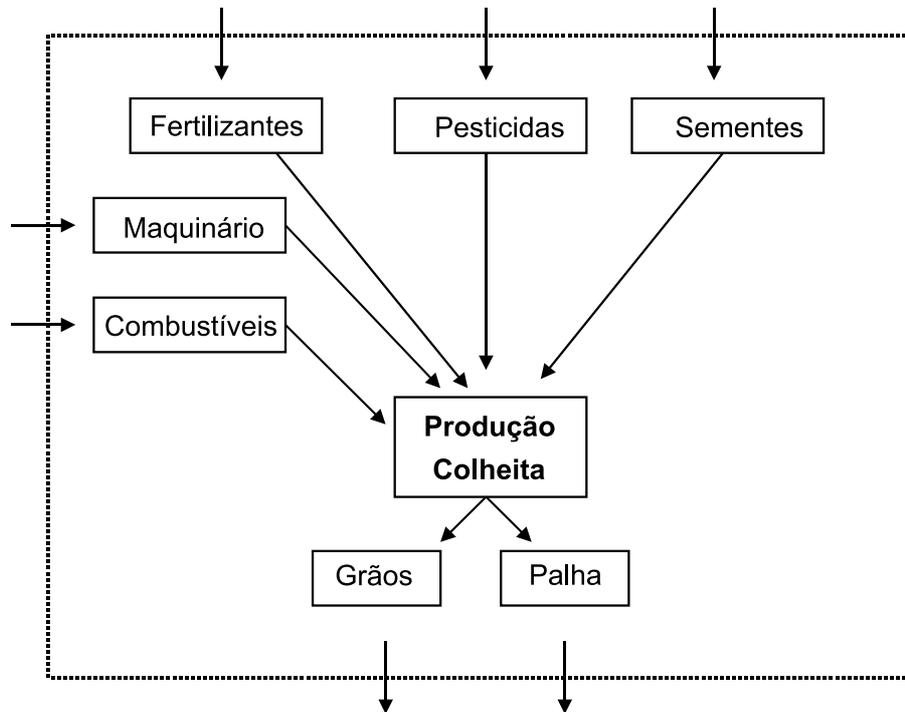
Kramer et al. (1999) consideram que os estudos de ACV para a agricultura têm focado persistentemente o aspecto do uso de energia, e, portanto, da emissão de  $\text{CO}_2$ . As emissões de outros gases de efeito estufa, tais como  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , têm sido pouco estudadas. Dessa forma, os autores realizaram um estudo, utilizando dados médios, para calcular integralmente as emissões de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  da produção agrícola holandesa, por meio da abordagem de ACV, com o objetivo de determinar o total de emissões de gases de efeito estufa por unidade física (1 kg) em vários cultivos.

No caso do trigo, por exemplo, as atividades agrícolas de aração, colheita e transporte dos grãos e da palha são as principais fontes de emissão de  $\text{CO}_2$ . A produção e a aplicação de fertilizante nitrogenado sintético são as principais causas da emissão de  $\text{N}_2\text{O}$ . As emissões de  $\text{CH}_4$  são baixas e relacionadas principalmente ao uso de combustíveis nas operações agrícolas. Embora a massa de  $\text{CO}_2$  tenha excedido a de  $\text{N}_2\text{O}$ , esta última é mais significativa em termos de potencial de aquecimento global ( $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$ ). Dessa forma, as emissões de gases estufa pelo trigo não estão relacionadas exclusivamente ao uso de energia. A produção e a aplicação de fertilizantes nitrogenados, bem como as atividades mecanizadas de aração e colheita são importantes fontes geradoras desses gases.

Pelos cálculos realizados para outros cultivos, verifica-se que existe uma variação muito grande entre as emissões de cada um deles, bem como das fontes dessas emissões. Cultivos destinados ao consumo direto emitem menos gases. Cultivos característicos de produção em pequena escala apresentam emissões baixas, enquanto produções de larga escala, com alto uso de fertilizantes, pesticidas e maquinários, emitem maior quantidade de gases.

Analisando-se esses resultados, observa-se que a determinação de forma integrada, conforme Fig. 4, da emissão de gases estufa pelas culturas oferece mais informações e novas formas de compreensão sobre essas emissões do que uma abordagem exclusiva das práticas agrícolas. Os *inputs* do ciclo de vida contribuem de consideravelmente para o total de emissões de gases estufa pelas culturas. A emissão desses gases ocorre em várias etapas da cadeia produtiva. Para se ter uma visão global, é preciso uma análise de toda a cadeia.

Margni et al. (2002) relatam que, em um estudo específico de ACV sobre alguns pesticidas utilizados na agricultura, as ferramentas de ACV



**Fig. 4.** Ciclo de vida da produção agrícola (as linhas pontilhadas indicam os limites do sistema) (modificado pelos autores, a partir de KRAMER et al., 1999, p. 10).

disponíveis informam, precariamente, seus impactos, considerando apenas dados toxicológicos e ecotoxicológicos, sem levar em conta seu destino no meio ambiente. Os autores propõem uma metodologia que permita avaliar os impactos ambientais de pesticidas sobre a saúde humana e ecossistemas aquáticos e terrestres, possibilitando comparar diferentes efeitos de exposição, tais como sua inalação e ingestão via alimentos ou água.

Na perspectiva das cadeias de produção de alimentos, portanto, existem fortes razões para a produção e a utilização de informações sobre a origem e as características dos produtos alimentícios, incluindo aspectos ambientais. Isso se relaciona particularmente com a tendência de intensificação da competição nos mercados internacionais. Nesse contexto, agentes-chave da cadeia de produção de alimentos da Finlândia realizaram uma iniciativa

ambiental em conjunto, buscando desenvolver uma base de dados com informações ambientais. Esse projeto teve como passo inicial um estudo de caso da ACV aplicado à produção de cevada. Entre as conclusões desse estudo, ressalta-se que, pela perspectiva metodológica, a aplicação da ACV em produtos agrícolas demonstrou ser mais complexa do que sua utilização na análise dos produtos industriais convencionais (KATAJAJUURI; LOIKKANEN, 2001).

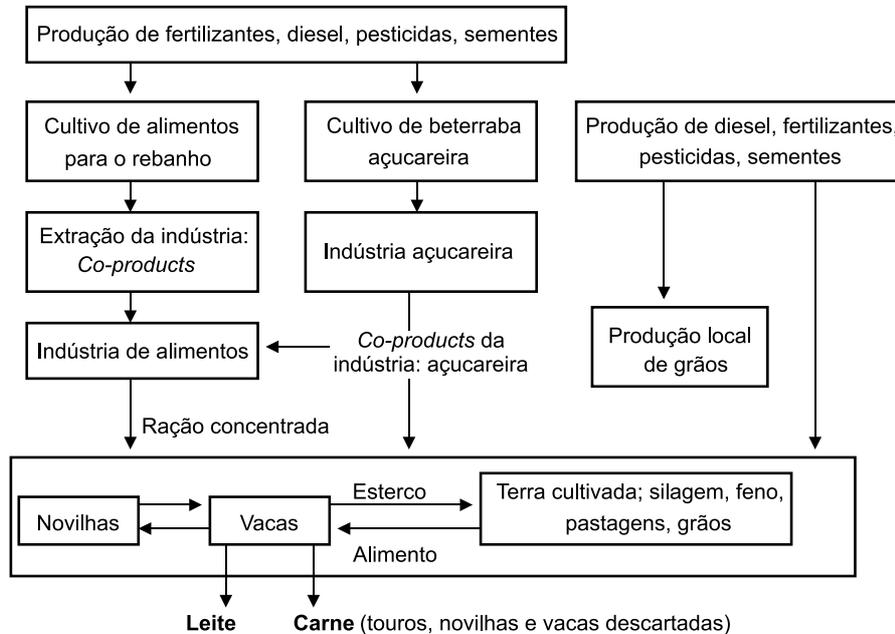
Um dos primeiros estudos de ACV aplicada à pecuária foi realizado por Cederberg e Mattsson (2000), que compararam os impactos ambientais de duas fazendas de produção de leite na Suécia – uma utilizando o sistema convencional, e a outra, o sistema orgânico. A incorporação do conceito de ciclo de vida orientou a definição dos limites do estudo, conforme se vê na Fig. 5. O estudo foi conduzido durante um ano agrícola (setembro de 1996 a agosto de 1997) e, segundo os autores, as maiores diferenças entre as fazendas estão incluídas. Foram consideradas as seguintes categorias de impacto:

- a) Recursos: energia, materiais e uso da terra.
- b) Saúde humana: uso de pesticidas.
- c) Efeitos ecológicos: aquecimento global, acidificação, eutrofização, formação de foto oxidantes, redução da camada de ozônio.

Nesse estudo de Cederberg e Mattsson (2000), observou-se que sistemas agrícolas de baixas entradas, como é o caso do sistema orgânico, apresentam benefícios ambientais. Aparentemente, os maiores benefícios são a redução considerável no uso de pesticidas e fósforo. Considerando outras categorias de impacto – aquecimento global, acidificação e eutrofização –, medidas de redução dos potenciais impactos ambientais da produção de leite precisam ser adotadas em ambos os sistemas.

Berlin (2002), reconhecendo a importância do setor do leite e de outros produtos lácteos na alimentação da população da Suécia, efetuou um estudo de ACV, enfocando o processo de produção de um tipo de queijo bastante consumido (o *Hushallsost*, do tipo *semi-hard*), com o objetivo de investigar as consequências ambientais decorrentes da produção de queijo nesse país. As principais categorias quantitativas de impacto ambiental selecionadas foram: uso de recursos, consumo de energia, aquecimento global, acidificação e eutrofização. Os parâmetros-chave dessas categorias são: óxido nitroso ( $N_2O$ ),

Uso potencial da metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) para a caracterização de...



**Fig. 5.** Ciclo de vida da produção de leite de fazendas convencionais e orgânicas na Suécia.

Nota: Apenas as fazendas convencionais usam fertilizantes e pesticidas nas suas lavouras e nos *co-products* oriundos da indústria açucareira (em itálico) (CEDERBERG e MATTSSON, 2000, p. 51).

metano ( $\text{CH}_4$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ) e suas emissões. Os resultados de cada atividade englobaram a produção, o processamento do ingrediente ou do produto e seu transporte para a próxima atividade. Nesse estudo, demonstrou-se que a fase de produção de leite contribuiu para o maior impacto ambiental em todas as categorias analisadas e que a fase industrial da produção do queijo foi a segunda maior fonte de impactos.

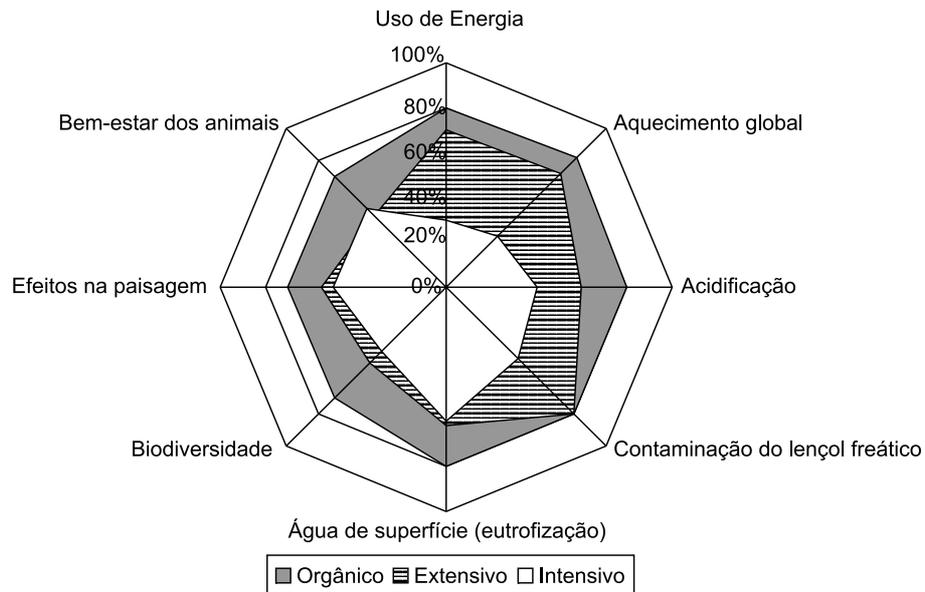
Hass et al. (2001) implementaram um estudo na região de Allgäu (Alemanha) com o objetivo de comparar os impactos ambientais relevantes de fazendas de pecuária (sistemas de produção) em três níveis tecnológicos (intensivo, sistema orgânico e extensivo). Os indicadores desse estudo (Tabela 4) foram selecionados considerando a opinião pública, as políticas agroambientais européias e os indicadores normalmente utilizados em estudos

de ACV. De acordo com indicadores agroambientais específicos, foi possível traçar um perfil dos diferentes tipos de sistemas de produção (Fig. 6). O estudo confirmou a conveniência da utilização da ACV para a comparação de sistemas de produção, no entanto, aponta a necessidade de desenvolvimento de uma metodologia de ACV específica para a agricultura.

**Tabela 4.** Categorias de impacto e indicadores selecionados na aplicação de ACV na região de Allgäu, Alemanha.

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Indicador ambiental</b>
<b>Consumo de recursos</b>	
Energia	Uso de energia primária
Minerais	Uso de fertilizantes fosfatados e potássicos
<b>Potencial de aquecimento global</b>	Emissões de CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O (equivalentes CO <sub>2</sub> )
<b>Esgotamento dos solos</b>	Acumulação de metais pesados
Pastagens	Emissões de NH <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> ; excedente de N e P
Outros ecossistemas	(em equivalentes de SO <sub>2</sub> e PO <sub>4</sub> )
<b>Qualidade da água</b>	Fertilização nitrogenada, balanço de N do sistema e
Lençol freático (conteúdo de nitrato)	lixiviação de nitrato
Água de superfície (eutrofização com P)	Fertilização fosfatada, balanço de P e percentagem de área drenada
<b>Biodiversidade</b>	Pastagens (número de espécies, data do 1º corte), limites (cercas vivas) e margens de campos (densidade, diversidade, estado/cuidados, cercas)
<b>Efeitos estéticos na paisagem</b>	Pastagens, limites (cercas vivas) e margens de campos, manejo dos animais (período, alimentação, local de confinamento do rebanho), layout da fazenda (tipo regional, construções, jardins, árvores, pomar)
<b>Bem-estar dos animais</b>	Sistema de confinamento e suas condições, manejo do rebanho (ex.: luminosidade, espaço, período de pastejo, cuidados dispensados aos animais)

Fonte: Hass et al. (2001).



**Fig. 6.** Perfil ambiental e categorias selecionadas de impactos ambientais de três tipos de sistemas de produção na região de Allgäu, Alemanha. Valores maiores dos eixos significam impactos mais positivos, enquanto valores menores significam impactos mais negativos (HASS et al., 2001, p. 51).

Xavier et al. (2004) analisaram um sistema de produção familiar utilizando os conceitos e as ferramentas da ACV e da programação linear, tendo como objetivos: a) verificar os resultados da otimização desse sistema de forma a aumentar a sua margem bruta; b) determinar os impactos ambientais do ciclo de vida desse sistema; c) avaliar as mudanças impostas na otimização, considerando as principais variáveis de impactos ambientais. O estudo demonstra que a criação de gado bovino é uma importante fonte de impactos ambientais, em virtude da emissão de gases de efeito estufa. A incorporação dessas variáveis pelo processo de otimização resulta em mudanças significativas em virtude da inviabilidade econômica de determinadas atividades. O estudo demonstra a importância da associação entre ACV e programação linear na análise dos desempenhos social, ambiental e econômico de um sistema de produção de agricultura familiar.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos apresentados demonstram a importância da realização de análises dos impactos ambientais resultantes do processo de produção agrícola, segmento que, na condição de produtor de matérias-primas para a agroindústria, responde por uma parcela significativa dos impactos causados pela cadeia de produção de alimentos. O conjunto de trabalhos apresentado sobre a utilização da ACV na determinação desses impactos mostra que ela é uma ferramenta promissora para tal tarefa, visando ao desempenho ambiental dos sistemas de produção agrícola.

No Brasil, diversas instituições têm se empenhado em desenvolver metodologias de análise de impacto ambiental, sobretudo em relação às inovações tecnológicas na agricultura. Nesse contexto, foi desenvolvido, pela Embrapa Meio Ambiente (uma das Unidades de Pesquisa da Embrapa), o sistema denominado Ambitec-Agro (Sistema de Avaliação de Impacto Ambiental da Inovação Tecnológica Agropecuária), que é uma ferramenta simples e prática de avaliação do impacto ambiental da inovação tecnológica agropecuária, pronta para ser utilizada no campo, por meio de entrevista/levantamento direcionado ao agricultor responsável pela atividade agropecuária modificada com a adoção da tecnologia. Além disso, o sistema é flexível, permitindo sua adaptação a situações específicas de uso, por meio da alteração dos fatores de importância ou exclusão de indicadores e componentes, quando apropriado.

Entende-se que a ACV é uma metodologia que pode ser complementar e útil para tal tarefa, ao introduzir a noção de ciclo de vida e permitir sugestões de melhoria com foco ambiental. No entanto, para sua plena utilização, é necessário um maior desenvolvimento metodológico, visando adequá-la às particularidades e à complexidade do processo de produção agrícola. Ademais, a viabilidade da agricultura necessita ser analisada considerando não somente os aspectos ambientais a ela relacionados. Assim, é importante incluir elementos econômicos e sociais nos estudos de ACV, para que se possam ajustar essas análises ao conceito de desenvolvimento sustentável.

É necessário, pois, realizar trabalhos que apliquem a metodologia de ACV em escala real, visando determinar os impactos ambientais decorrentes de diferentes sistemas de produção agrícola, assim como seus resultados socioeconômicos.

Uso potencial da metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) para a caracterização de...

Finalmente, é importante ressaltar que essa metodologia vem sendo empregada no âmbito das normas de certificação ISO para empresas. Assim, em longo prazo, seu uso poderá ser muito útil à conquista de novos mercados para os produtos agrícolas.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. Da ideologia do progresso à idéia do desenvolvimento (rural) sustentável. In: ALMEIDA, J.; NAVARRO, J. **Reconstruindo a agricultura: idéias e ideais na perspectiva de um desenvolvimento rural sustentável**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1998. p. 33-55.
- AZAPAGIC, A.; CLIFT, R. The application of life cycle assessment to process optimization. **Computers and Chemical Engineering**, Oxford, v. 23, n. 10, p. 1509-1526, Dec. 1999.
- AZAPAGIC, A.; CLIFT, R. Life cycle assessment and linear programming: environmental optimization of products system. **Computers and Chemical Engineering**, Oxford, v. 19, n. 2, p. s229-s234, Feb. 1995. Supplement.
- BERLIN, J. Environmental life cycle assessment (LCA) of Swedish semi-hard cheese. **International Dairy Journal**, Oxford, v. 12, n. 11, p. 939-953, Nov. 2002.
- CALDEIRA-PIRES, A.; RABELO, R. R.; XAVIER, J. H. V. Uso potencial da análise do ciclo de vida (ACV) associada aos conceitos da produção orgânica aplicados à agricultura familiar. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, v. 19, n. 2, p. 149-178, maio/ago. 2002.
- CEDERBERG, C.; MATTSSON, B. Life cycle assessment of milk production: a comparison of conventional and organic farming. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 8, n. 1, p. 49-60, Feb. 2000.
- DE BOER, I. J. M. Environmental impact assessment of conventional and organic milk production. **Livestock Production Science**, Amsterdam, v. 80, n. 1/2, p. 69-77, Mar. 2003.
- FLORES, M. X. **A pesquisa agropecuária no Brasil**. Brasília: Embrapa-SEA, 1991. 23 p. (Embrapa-SEA. Documentos, 6).

HAAS, G.; WETTERICH, F.; KÖPKE, U. Comparing organic, intensive and extensive grassland farming in southern Germany by process life cycle assessment. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Oxford, v. 83, n. 1/2, p. 43-53, Jan. 2001.

KATAJAJUURI, J. M.; LOIKKANEN, T. Enhancing competitiveness through green innovation: finish food industry committed to environmental data production: LCA pilot case for barley. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE GREENING OF INDUSTRY NETWORK, 9., 2001, Bangkok. **Proceedings...** [Bangkok: s.n., 2001]. CD ROM.

KRAMER, K. J.; MOLL, H. C.; NONHEBEL, S. Total greenhouse gas emissions related to the Dutch crop production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Oxford, v. 72, n. 1, p. 9-16, Jan. 1999.

LIMA, M. A.; LIGO, M. A. V.; CABRAL, O. M. R.; BOEIRA, R. C.; NEVES, M. C.; PESSOA, M. C. P. Y. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa**: emissões de gases de efeito estufa na queima de resíduos agrícolas. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2002a. 108 p. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/clima>>. Acesso em: 2 jul. 2003.

LIMA, M. A.; PESSOA, M. C. P. Y.; LIGO, M. A. V. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa**: emissões de metano da pecuária. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2002b. 78 p. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/clima>>. Acesso em: 2 jul. 2003.

LIMA, M. A.; PESSOA, M. C. P. Y.; LIGO, M. A. V. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa**: emissões de metano do cultivo de arroz. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2002c. 58 p. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/clima>>. Acesso em: 2 jul. 2003.

MARGNI, M.; ROSSIER, D.; CRETZAZ, P.; JOLLIET, O. Life cycle impact assessment of pesticides on human health and ecosystems. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Oxford, v. 93, n. 1/3, p. 379-392, Dec. 2002.

MATTSSON, B.; CEDERBERG, C.; BLIX, L. Agricultural land use in life cycle assessment (LCA): case studies of three vegetable oil crops. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 8, n. 4, p. 283-292, Aug. 2000.

OLSSON P. (Ed.). **LCAnet food**: final document. Göteborg: LCAnet Food, 1999. 25 p. Disponível em: <<http://www.lca-net.com/>>. Acesso em: 10 ago. 2002.

Uso potencial da metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) para a caracterização de...

PIRES, M. O. A trajetória do conceito de desenvolvimento sustentável na transição de paradigmas. In: DUARTE, L. M. G.; BRAGA, M. L. de S. **Tristes cerrados:** sociedade e biodiversidade. Brasília: Paralelo 15, 1998. p. 65-92.

RODRIGUES, G. S.; CAMPANHOLA, C.; KITAMURA, P. C. Avaliação de impacto ambiental da inovação tecnológica agropecuária: um sistema de avaliação para o contexto institucional de P&D. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, v. 19, n. 3, p. 349-375, set./dez. 2002.

ROSA, L. P.; SCHECHTMAN, R.; SZKLO, A. S.; SALA, J. F. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa:** emissões de gases de efeito estufa por queima de combustíveis. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2002. 110 p. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/clima>>. Acesso em: 2 jul. 2003.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável.** Rio de Janeiro: Garamond, 2000. 95 p.

WEIDEMA, B. P. **Data, databases and software for LCAs on food:** theme report for the LCA-net-food. Göteborg: LCAnet Food, 1999. 23 p. Disponível em: <<http://www.lca-net.com>>. Acesso em: 10 ago. 2002.

WEIDEMA, B. P. **Environmental assessments of products:** a textbook on life cycle assessment. Helsinki: The Finnish Association of Graduate Engineers TEK, 1997. 93 p.

WEIDEMA, B. P.; MEEUSEN, M. J. G. (Ed.). **Agricultural data for life cycle assessment.** Hague: Agricultural Economics Research Institute, 2000. v. 1.

XAVIER, J. H. V. **Análise de ciclo de vida (ACV) da produção agrícola familiar em Unai, MG:** resultados econômicos e impactos ambientais. 2003. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília.

XAVIER, J. H. V.; CALDEIRA-PIRES, A.; MARTINS-FILHO, J. S. L. **Life cycle assessment and optimization of a Brazilian family farm production system.** Artigo submetido à publicação no Agriculture Ecosystems and Environment, em fevereiro de 2004.