

Capítulo • 1

Avaliação da pegada ambiental de produtos

Maria Cléa Brito de Figueirêdo

Cássia Maria Lie Ugaya

Marília Ieda da Silveira Folegatti Matsuura

Viviane da Silva Barros

Tayane de Lima dos Santos

Introdução

A pegada ambiental de produtos é uma medida quantitativa do desempenho ambiental de um produto, considerando toda ou parte da cadeia de suprimento, consumo e pós-consumo, ou seja, o ciclo de vida do produto (EUROPEAN UNION, 2013a). O desempenho ambiental de um produto é avaliado considerando o inventário de consumos (ex.: água e energia) e emissões (ex.: gases de efeito estufa) relacionados ao seu ciclo de vida, na avaliação dos potenciais impactos causados no meio ambiente.

O termo “pegada ambiental” foi introduzido pelo Centro de Pesquisa Científica na União Europeia (Joint Research Centre – JRC) com o objetivo de promover a avaliação ambiental de produtos baseada na avaliação de ciclo de vida por parte de empresas e instituições responsáveis pelo seu desenvolvimento e comercialização. Assim, a avaliação da pegada ambiental é ampla, compreendendo as seguintes categorias de impactos ambientais: mudanças climáticas, destruição da camada de ozônio, formação foto-oxidante, emissões de materiais particulados inorgânicos, radiação ionizante, depleção de recursos naturais (minerais e fósseis, incluindo a água), eutrofização marinha e de águas doces, acidificação do solo, mudança no uso da terra (perda de biodiversidade e da qualidade do solo), toxicidade humana e ecotoxicidade (EUROPEAN UNION , 2013a).

Estudos de pegada ambiental de produtos podem subsidiar a melhoria da eficiência do uso de recursos naturais e redução de impactos ambientais



nos diversos elos da cadeia produtiva associada a um produto. Em 2013, a União Europeia, por meio do JRC, iniciou um programa em conjunto com várias empresas europeias, visando avaliar, informar e reduzir a pegada ambiental de uma série de produtos, em especial alimentícios, como cerveja, café, peixes de água salgada e carne bovina (EUROPEAN UNION, 2013b).

A avaliação da pegada ambiental também pode apoiar programas de rotulagem ambiental tipo I, II e III, de acordo com a norma ISO 14020 (ISO, 2000). As rotulagens tipo I e III são certificadas por terceira parte acreditada por órgão normatizador oficial (ex.: ABNT no Brasil), enquanto a rotulagem tipo II é para autodeclaração. As principais diferenças entre os rótulos I e III é que o tipo I segue critérios de desempenho ambiental pré-estabelecidos por uma organização externa à empresa que utiliza o rótulo em seu produto, apresenta um rótulo com o nome do programa ambiental, não informa diretamente o desempenho ambiental de um produto nem obrigatoriamente considera o ciclo de vida do produto. O tipo III requer a aplicação da avaliação de ciclo de vida e informa em rótulo o resultado da pegada ambiental, considerando uma ou mais categorias de impacto. Exemplos de rótulos tipo I são *Transfer Fair Trade* e *Marine Stewardship Council*, e de rótulos tipo II, o PAS 2050 (BRITISH STANDARDS, 2011) e ISO 14067 (ISO, 2012), para pegada de carbono, e ISO 14046 (ISO, 2014), para pegada hídrica de produtos.

As normas ISO 14020, 14021, 14024 e 14025 definem os procedimentos e requisitos para obtenção de cada tipo de rótulo: i) tipo I, ISO 14024 (ISO, 1999a), ii) tipo II, norma ISO 14021 (ISO, 1999b), e iii) tipo III, norma 14025 (ISO, 2006a). De acordo com a norma ISO 14025, as empresas podem declarar a pegada ambiental de um produto (tipo III) quando seguem os procedimentos de avaliação de ciclo de vida (ACV) estabelecidos na norma ISO 14040 (2006b). Declarações da pegada ambiental de um produto podem ser divulgadas em diferentes formatos, como selos ambientais, rótulos contendo gráficos, boletins ou outros documentos tornados públicos.

No que se refere à pegada ambiental de alimentos, o Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas (United Nations Environmental Program – UNEP) e a Organização para Alimentação e Agricultura (Food and Agriculture Organization – FAO) estabeleceram a Força Tarefa Agroalimentar (FAO/UNEP Agri-Food Task Force). Dentre as ações desse programa, está a promoção de estudos de pegada ambiental de produtos, considerando seu ciclo de vida, por empresas do setor agroalimentar (MOOMAW et al., 2012).



A declaração da pegada ambiental de um produto não é obrigatória por nenhuma legislação, mas uma decisão voluntária de cada empresa. Entretanto, a consciência dos problemas ambientais globais por parte de consumidores e empresas nos últimos 10 anos vem intensificando o desenvolvimento de estudos de pegada ambiental de produtos.

Embora o estudo de pegada ambiental seja amplo e preconize a avaliação de várias categorias de impactos ambientais, devido à internacionalização do debate sobre aquecimento global e escassez hídrica, muitos estudos têm focado na avaliação das categorias de impacto: mudanças climáticas, em estudos de pegada de carbono, e escassez hídrica, em estudos de pegada hídrica. Atualmente, grandes empresas varejistas de alimentos, como Tesco (TESCO, 2013) e Dole (DOLE FOOD COMPANY, 2013; SIKIRICA, 2011), realizam a avaliação das pegadas de carbono e hídrica de seus produtos e incentivam toda a cadeia de suprimentos a também realizarem esses estudos.

É importante ponderar que estudos de pegada de carbono ou hídrica de produtos agrícolas são pontuais no sentido de que consideram apenas aspectos (ex.: gases de efeito estufa e água consumida) e impactos (ex.: mudanças climáticas e escassez hídrica) ambientais específicos. Uma abordagem ampla das questões ambientais pode somente ser empreendida quando se avalia a pegada ambiental de um produto, ou seja, quando todos os aspectos e impactos ambientais são levantados, considerando os processos relacionados ao ciclo de vida de um produto agrícola.

As próximas seções deste capítulo apresentam os conceitos e etapas de estudos de ciclo de vida de produtos. Como já mencionado, a ACV é uma metodologia que precisa ser seguida em quaisquer estudos de pegada ambiental de produtos, ou em estudos de pegada focados em categorias ambientais específicas, como os de pegada hídrica e de carbono.

Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

O conceito de ciclo de vida (*Life Cycle Thinking*) interliga um determinado produto a um fluxo de processos executados ao longo de uma cadeia produtiva e além dela, abrangendo o consumo e o pós-consumo. Uma avaliação considerando todo o ciclo de vida de um produto abrange a extração e processamento de matérias-primas, manufatura, transporte, distribuição, uso, reúso, manutenção, reciclagem e disposição final do produto (Figura 1).

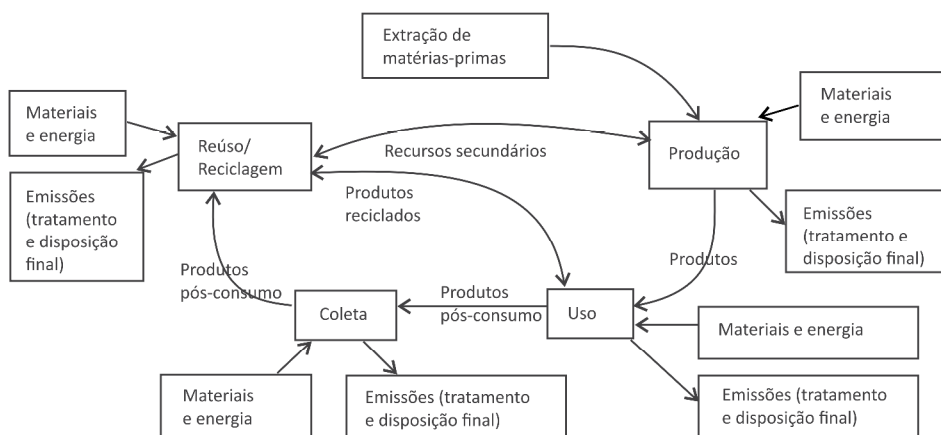


Figura 1. Etapas do ciclo de vida de um produto genérico.

Fonte: A partir de Rebitzer et al. (2004).

Esse conceito vem sendo adotado por pesquisadores, empresários e instituições governamentais e não governamentais com o intuito de auxiliar a tomada de decisão sobre pesquisa, desenvolvimento, comercialização e disposição final de produtos e serviços, permitindo a expansão dos horizontes da avaliação de impacto ambiental (FRANKL; RUBIK, 2000).

As normas ISO 14040 e 14044 (ISO, 2006b,c) estabelecem os procedimentos necessários para condução de uma ACV. Segundo a norma ISO 14040 (ISO, 2006b), a ACV busca acessar os aspectos e impactos ambientais de produtos por meio de: i) planejamento da avaliação com a definição do objetivo e escopo do estudo; ii) compilação de um inventário de entradas e saídas (aspectos ambientais) em uma cadeia produtiva, acrescida das etapas de consumo e pós-consumo; iii) avaliação dos impactos ambientais potenciais associados com as entradas e saídas; e iv) interpretação dos resultados da análise em relação aos objetivos do estudo.

Planejamento da avaliação

O planejamento de um estudo de ACV resulta na definição clara do objetivo do estudo, da unidade funcional utilizada, do escopo da avaliação e dos métodos de avaliação de impactos a serem utilizados. O objetivo de uma avaliação deve estabelecer a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-



-alvo. Em estudos de pegada de carbono de produtos agrícolas, o objetivo é quantificar a pegada de carbono de um produto, sendo a categoria de mudanças climáticas o foco da avaliação. Já estudos de pegada hídrica podem estar focados na avaliação de uma ou mais categorias de impacto relacionadas ao uso da água, como escassez hídrica, toxicidade aquática e eutrofização.

Nessa etapa, deve-se também apresentar a função ou serviço desempenhado pelo produto, quantificada pela unidade funcional e pelo fluxo de referência. A unidade funcional é uma medida da função de uma tecnologia, permitindo que o seu desempenho ambiental seja avaliado com base em uma medida de referência. Estudos de pegada de carbono ou hídrica realizados por unidades agrícolas e processadoras de alimentos produtoras de alimentos usualmente têm o foco na função de produção, ou seja, utilizam como unidade funcional a quantidade de produto produzido (ex.: quilo de melão, quilo de queijo coalho). Outros estudos, no entanto, consideram todo o ciclo de vida de um produto, como, por exemplo, os estudos voltados à nutrição humana que utilizam como unidade funcional o consumo de determinada quantidade de calorias (ou proteína) no tempo. Nesse último caso, o consumo de calorias pode vir de um conjunto de produtos cujas quantidades consumidas compõem os fluxos de referência do estudo.

O escopo de um estudo precisa ser delimitado na etapa de planejamento, ou seja, devem-se definir quais processos da cadeia produtiva, de consumo e pós-consumo serão contemplados na avaliação de um produto. Muitos estudos de pegada de carbono e hídrica de alimentos abrangem os processos de produção até a chegada no mercado varejista, incluindo processos de: produção de insumos agrícolas (ex.: fertilizantes, pesticidas, sementes, combustível, energia elétrica), transporte dos insumos para fazenda, produção na fazenda, processamento, embalagem do produto e seu transporte ao mercado consumidor. Esse tipo de escopo é denominado “do berço ao portão”. Já os estudos que, além de considerarem a extração de matérias-primas e produção, também contemplam o uso e disposição final do produto têm o escopo “do berço ao túmulo”.

Os requisitos de qualidade dos dados relacionados à cobertura temporal, geográfica e tecnológica dos processos em estudo devem também ser estabelecidos, assim como os métodos de avaliação de impacto que serão utilizados, uma vez que diferentes métodos estão disponíveis na literatura para avaliação de cada categoria de impacto (PENNINGTON et al., 2004).



Inventário de ciclo de vida (ICV)

Na realização do ICV, são levantadas todas as entradas e saídas dos processos relacionados a determinado produto, em cada etapa do ciclo de vida, resultando em um levantamento quantitativo de matérias-primas, energia, insumos, produtos, coprodutos e emissões geradas que serão alvo da avaliação de impacto ambiental (REBITZER et al., 2004). Todos os materiais extraídos diretamente da natureza e emissões liberadas para a natureza, integrantes do inventário em cada etapa analisada do ciclo de vida, são somados, gerando totais de consumos de recursos naturais e emissões no inventário final de ciclo de vida do produto.

Visando facilitar a quantificação de entradas e saídas de processos agrícolas e industriais comuns a vários produtos e serviços, foram desenvolvidas bases de dados para países europeus, norte-americanos e asiáticos. Essas bases contêm inventários para vários processos, por exemplo, relacionados à produção de energia e matérias-primas (ex.: fertilizantes e agrotóxicos), produtos agrícolas, além de serviços, como transporte e distribuição de energia.

Exemplos de bases de dados com inventários de produtos agrícolas são o Ecoinvent (FRISCHKNECHT, 2005) e a base de dados Europeia (European Reference Life Cycle Database – ELCD) (JOINT RESEARCH CENTRE, 2012), que contêm inventários de alguns produtos agrícolas, principalmente produzidos na Europa, e o Agri-Footprint (PRÉ CONSULTANT, 2015). A base de dados Ecoinvent contém inventários para as culturas de tomate, trigo, cevada, centeio, milho, fava, soja, ervilhas, girassol, colza e beterraba cultivadas na Suíça, assim como cana-de-açúcar cultivada no Brasil e algodão na China e Estados Unidos (WEIDEMA et al., 2013). Essas bases estão constantemente sendo ampliadas e atualizadas, considerando os sistemas de produção característicos de cada país.

A quantificação do uso de insumos em processos agrícolas é realizada por meio de entrevistas aplicadas a produtores rurais, associações de produtores e dados de literatura. São levantados dados referentes ao consumo médio de insumos e produção, relativos a uma determinada área (ex.: um hectare) e a um ciclo de produção. Buscam-se usualmente valores médios representativos dos últimos anos de cultivo, utilizando o sistema de produção atual. Nesse levantamento, contempla-se uma amostra representativa das várias áreas produtoras que caracterizam um determinado sistema de produção praticado em uma região.



As emissões de poluentes oriundas de áreas agrícolas podem ser quantificadas a partir de medições efetuadas em campo ou utilizando modelos ambientais. A medição de poluentes em campo precisa ser representativa do ciclo de produção e considerar vários anos, demandando tempo, recursos humanos e financeiros para o levantamento consistente dos dados. Assim, a maioria dos inventários de produtos agrícolas utilizam modelos ambientais para estimativa das emissões de poluentes. Os modelos utilizados pelo INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2006), para o cálculo de gases de efeito estufa (GEE), e pela base de dados *ecoinvent* (NEMECEK; SCHNETZER, 2011), para o cálculo de emissões de amônia, nitrato, óxidos de nitrogênio, fósforo, fosfato, metais pesados e pesticidas, são amplamente utilizados em todo o mundo, embora tenham sido desenvolvidos para regiões de clima temperado.

Ao final dessa etapa, têm-se inventários de cada processo de produção contendo entradas e saídas quantificadas e relacionadas à unidade funcional estabelecida. Um exemplo de inventário do processo de produção de melão Cantaloupe é apresentado na Tabela 1. Neste estudo, como o objetivo é avaliar a pegada de carbono do produto, somente as emissões de gases de efeito estufa foram quantificadas.

Avaliação do impacto de ciclo de vida (AICV)

A avaliação de impacto ambiental de ciclo de vida (AICV) relaciona o uso de recursos naturais e as emissões de poluentes, resultante de todos os processos que integram o sistema de produto em estudo, a efeitos ou impactos no meio ambiente (BAUMANN; TILLMAN, 2004). O uso de recursos naturais pode causar a escassez ou extinção quando a taxa de extração ou exploração do recurso é superior à sua disponibilidade no meio ambiente, com consequências socioeconômicas que afetam a sociedade. Já as emissões de poluentes podem modificar a qualidade da água, do solo e do ar, afetando os seres vivos que fazem parte do meio ambiente.

A definição de quais categorias de impacto são de interesse ao estudo e de como serão mensuradas é o primeiro passo na avaliação de impactos. Essa definição requer conhecimento sobre os principais problemas ambientais que afligem a sociedade, assim como a utilização de regras claras para qualificação e quantificação dos impactos.



Tabela 1. Inventário de consumos e emissões de GEE para uma tonelada de melão cantaloupe exportado.

Entradas e saídas	Unidade	Produção agrícola
Terra	m ²	430,43
Sementes	g	0
Mudas	g	2.471,75
Substrato de coco	g	0
Água	L	195,08
Eletricidade	kWh	44,77
Diesel	g	13.110,12
Produtos de limpeza	g	0
Plásticos	g	23.331,76
Papel	g	0
Madeira (pallets)	g	0
Fertilizantes		
Composto orgânico	g	131.670
N	g	2.970
P ₂ O ₅	g	4.950
K ₂ O	g	10.890
Outros	g	1.188
Agroquímicos		
Inseticidas	g	410,12
Fungicida	g	308,61
Herbicida	g	0
Resíduos sólidos		
Plásticos	g	23.331,76
Embalagem de agroquímicos	g	643,5
GHG		
CO ₂	g	187.375,32
CH ₄	g	215,82
N ₂ O	g	217,8

Fonte: Santos et al. (2013).



Figueirêdo et al. (2010) apontam e descrevem as seguintes categorias de impactos ambientais relevantes à atividade agroindustrial: perda da biodiversidade, erosão, compactação, salinização e sodificação do solo, acidificação, contaminação ambiental por agrotóxico (toxicidade), contaminação ambiental por resíduos sólidos (eutrofização, toxicidade), escassez hídrica, poluição hídrica (eutrofização e toxicidade), mudança climática, depleção de fontes não renováveis de matéria e energia e contaminação alimentar (toxicidade). Algumas dessas categorias dispõem de métodos de avaliação de impacto amplamente aceitos e adotados em AICV, já outras, por exemplo as relacionadas ao solo (erosão, compactação e salinização), são ainda objeto de desenvolvimento.

A quantificação de impactos requer o uso de regras claras que facilitem o levantamento dos dados, a modelagem e a interpretação dos resultados. A norma ambiental ISO 14044 (2006c) busca auxiliar esse trabalho na ACV, estabelecendo as seguintes etapas, algumas obrigatórias e outras opcionais, para avaliação de impacto considerando o ciclo de vida do produto:

- Obrigatórias: seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria, classificação e modelos de caracterização.
- Opcionais: normalização, agrupamento, ponderação e análise da qualidade dos dados.

Essas etapas se relacionam da forma apresentada na Figura 2. Inicialmente, os fluxos elementares do inventário são identificados, selecionados e relacionados (classificação) a categorias ou tipos de impactos ambientais, utilizando-se um modelo de caracterização. Estão disponíveis modelos de caracterização que permitem a avaliação de impactos intermediários (*midpoint*, ponto médio) e finais (*endpoint*, ponto final) na cadeia de causa e efeito ambiental (PENNINGTON et al., 2004). Os resultados de cada categoria de impacto podem ser normalizados em relação a uma referência, por exemplo, os impactos na acidificação causados por um cidadão global em 1 ano. Outro item opcional é o agrupamento em que categorias de impactos similares são organizadas em grupos. Por último, na ponderação, diferentes pesos podem ser atribuídos às categorias de impacto, permitindo somar os resultados em uma única pontuação. Ao longo do processo de avaliação, a qualidade dos dados e dos resultados obtidos deve ser continuamente analisada.



AICV: etapas da avaliação

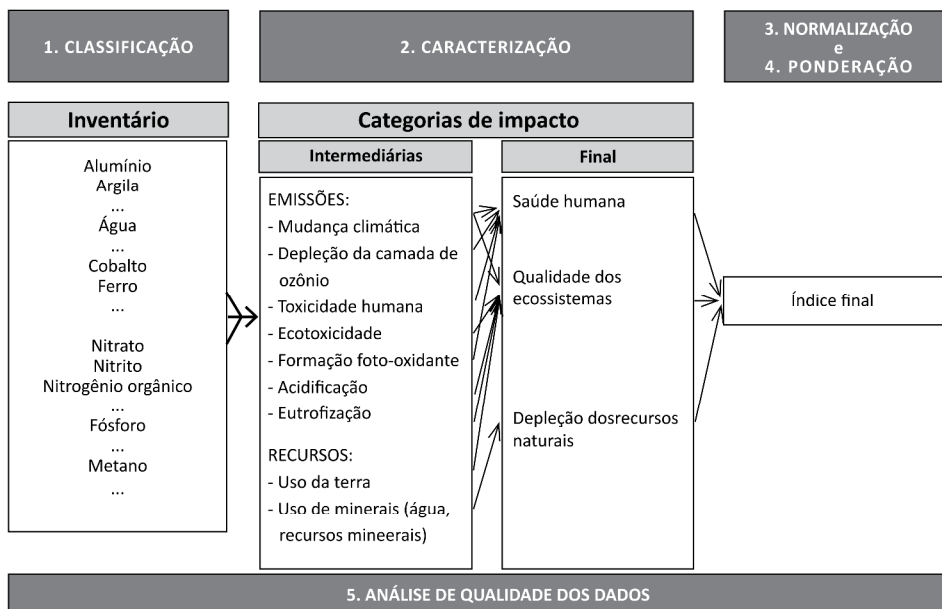


Figura 2. Relação entre etapas da AICV.

De acordo com a Comissão Europeia (JOINT RESEARCH CENTRE, 2012), as categorias de impacto com métodos de AICV recomendados para o contexto europeu são:

- Relacionadas ao uso de recursos naturais: uso da terra, escassez hídrica e depleção de recursos minerais.

- Relacionadas às emissões de poluentes: mudança climática, depleção da camada de ozônio, toxicidade (efeitos cancerígenos na saúde humana, efeitos não cancerígenos na saúde humana, radiação ionizante, material particulado e ecotoxicidade aquática), formação de ozônio fotoquímico, acidificação terrestre e aquática, eutrofização terrestre e aquática.

O Anexo A traz uma breve descrição dessas categorias de impactos.

Seleção das categorias de impacto ambiental

O primeiro passo na avaliação de impactos ambientais é a seleção dos principais problemas ambientais para o estudo que se pretende realizar. Essa identificação requer o conhecimento da cadeia de causa e efeito ambiental.



A cadeia de causa e efeito relaciona fluxos elementares (consumos e emissões) a vários níveis de impacto, usualmente classificados em intermediários e finais. Quando as características físico-químicas das substâncias inventariadas são consideradas, pode-se inferir sobre seus potenciais efeitos no meio ambiente. Além das características das substâncias, também podem ser consideradas as características do meio receptor de emissões ou doador de recursos, permitindo melhor compreensão do transporte das substâncias, nível existente de poluição do meio e potencial efeito da carga poluente adicionada ao ambiente. Nesse estágio de avaliação, são definidas categorias intermediárias de impacto ambiental, observando-se efeitos primários na cadeia de causa e efeito ambiental. Exemplos de impactos intermediários são o aumento do potencial de aquecimento global, o aumento da acidez do solo, a erosão e o enriquecimento de corpos d'água superficiais com nutrientes.

A ocorrência de alterações ambientais em uma região pode ainda causar a morte ou desabilitar pessoas e outros seres vivos, especialmente quando suas condições de saúde e capacidade de adaptação estão comprometidas, podendo as emissões causarem efeitos secundários no ambiente. Esse estudo aprofundado do ambiente receptor de emissões ou doador de recursos, que considera níveis de poluição no meio e de exposição das espécies, permite avaliar o dano causado por substâncias aos seres humanos, aos ecossistemas e aos estoques de recursos minerais. Fala-se então de impacto ambiental final.

Tomando como exemplo as emissões de gases de efeito estufa (ex.: CO_2 , N_2O , CH_4), observa-se que esses gases possuem diferentes capacidades de absorção dos raios infravermelhos do sol, contribuindo para o aumento da temperatura na troposfera em determinadas regiões do planeta. A análise da capacidade de absorção de cada gás permite agregá-los na categoria intermediária de impacto "aquecimento global". Por sua vez, o aumento da temperatura em uma dada região pode causar efeitos secundários como modificação do clima, aumentando a ocorrência de eventos extremos (ex.: secas, inundações). Esses efeitos podem elevar a ocorrência de doenças respiratórias, gastrointestinais (ex.: diarreia) e desnutrição nessa região, causando dano à saúde humana. O aumento de temperatura pode ainda afetar a sobrevivência de espécies, levando à sua extinção. Assim, em uma avaliação de impacto, deve-se compreender a cadeia de causa e efeitos ambientais e escolher o nível de avaliação suficiente para atender aos objetivos de um estudo (Figura 3).

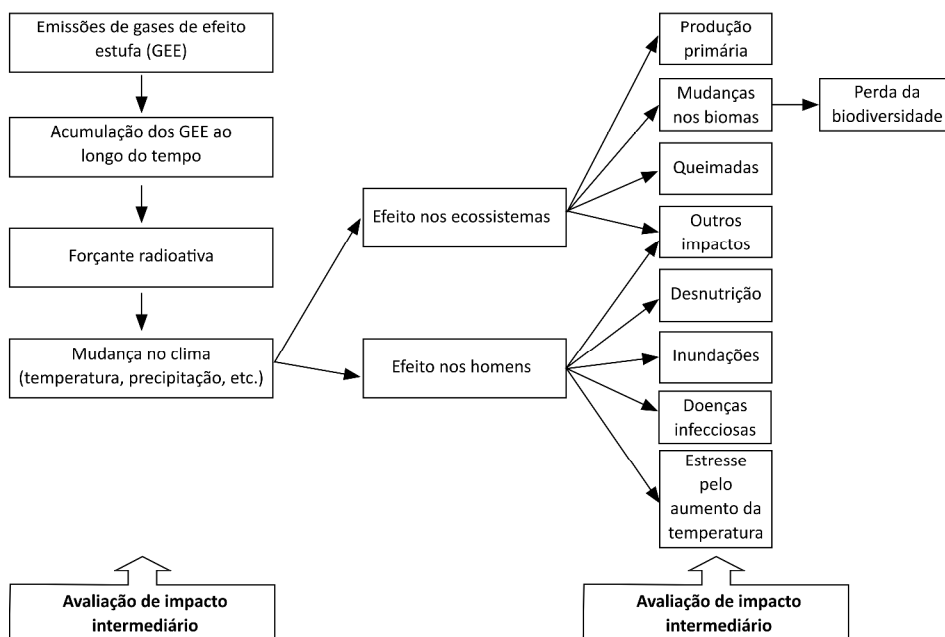


Figura 3. Cadeia de causa e efeito para mudanças climáticas.

Fonte: Joint Research Centre (2010).

Classificação

Nessa etapa, os itens inventariados são associados a uma ou mais categorias de impacto (ISO, 2006c). Essa múltipla associação é possível quando um item do inventário ambiental causar impactos que são independentes. Exemplificando, óxidos de nitrogênio na presença da luz solar podem causar a formação de ozônio foto-oxidante. Em seguida, essa mesma molécula pode reagir com o vapor d'água e liberar prótons H^+ , contribuindo para acidificação do solo. O átomo de nitrogênio pode ser precipitado com a chuva e causar a eutrofização de corpos hídricos. Tendo em vista os múltiplos impactos ambientais que um fluxo elementar pode causar, é necessário estabelecer sua relevância para cada categoria de impacto que é realizado por métodos de caracterização.

Caracterização

A etapa de caracterização permite quantificar potenciais impactos ambientais, considerando os fluxos elementares inventariados. Nessa etapa, pode-se avaliar a relevância de diferentes substâncias emitidas ou recursos consumidos na ocorrência de um impacto (ISO, 2006c). Para tanto, são utilizados



métodos científicos que estabelecem fatores de caracterização para substâncias inventariadas e classificadas em certa categoria de impacto. Substâncias classificadas em mais de uma categoria de impacto têm fatores de caracterização distintos para cada categoria.

Os métodos de caracterização geram fatores que indicam a importância de cada substância classificada para uma categoria de impacto em relação a uma substância de referência. Na avaliação intermediária de impactos causados por emissões, essa importância é usualmente definida a partir da análise das características físico-químicas das substâncias e de como essas características podem acarretar um impacto. Na avaliação do impacto intermediário devido ao consumo de recursos naturais, a importância é definida considerando a taxa de extração de recursos, ou seja, a relação entre demanda e disponibilidade do recurso.

Métodos de caracterização definem indicadores para avaliar o mecanismo ambiental e permitir a quantificação de cada categoria de impacto. Tomando como exemplo a categoria de impacto aquecimento global, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2006) estabeleceu fatores de caracterização para gases de efeito estufa. O indicador utilizado foi o forçamento radioativo infravermelho, característico de cada gás, medido em W/m^2 . Analisando o forçamento radioativo médio global de cada gás, para um determinado período de tempo, em relação ao dióxido de carbono, o Intergovernmental Panel on Climate Change estabeleceu potenciais de aquecimento global para cada gás. Esse potencial de aquecimento é o fator de caracterização utilizado na avaliação intermediária do efeito de emissões de gases de efeito estufa nas mudanças climáticas. Exemplos de forçamento radioativo e de potencial de aquecimento global de alguns gases estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Forçamento radioativo e potencial de aquecimento global para CO_2 , CH_4 e N_2O .

Gás de efeito estufa	Forçamento radioativo ($W\ m^{-2}\ ppb^{-1}$)	Potencial de aquecimento global para diferentes horizontes de tempo ($kg\ CO_2\text{-eq}/kg\ de\ gás$)		
		20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de carbono (CO_2)	$1,4 \times 10^{-5}$	1	1	1
Metano (CH_4)	$3,7 \times 10^{-4}$	72	25	7,6
Óxido Nitroso (N_2O)	$3,03 \times 10^{-3}$	289	298	153

Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change (2006).



No cálculo do impacto, as cargas poluentes ou quantidades de recursos consumidos quantificadas no inventário são multiplicadas por fatores de caracterização, permitindo a sua agregação e expressão da categoria de impacto em termos de uma substância equivalente (Equação 1). No caso da categoria mudança climática, a carga emitida de cada gás é multiplicada pelo seu potencial de aquecimento global, sendo esses valores somados e o resultado final expresso na unidade métrica kg de CO₂-equivalente (CO₂-eq) por quantidade de unidade funcional considerada.

Impacto ambiental = Σ quantidade substância * fator de caracterização (Eq. 1)

Quando o foco da avaliação é o impacto final causado por emissões, considerando o ciclo de vida de um produto, métodos mais complexos e que trazem maior incerteza são empregados no cálculo de fatores de caracterização (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2003). Os indicadores empregados na avaliação de impacto final relacionam emissões a efeitos sobre a saúde humana, a qualidade de ecossistemas. Já os indicadores utilizados na avaliação de impacto final nas reservas de recursos naturais relacionam o consumo de recursos abióticos à depleção das reservas existentes e sua indisponibilidade futura.

No caso de dano resultante de emissões, utilizam-se modelos de avaliação que consideram além das características físico-químicas das substâncias e seu transporte em vários meios (solo, ar, água), as cargas poluentes já presentes nos meios e a exposição aos poluentes dos seres vivos. Quando o foco é a depleção de recursos abióticos, os modelos podem considerar a energia ou custo marginal relativo à extração do recurso em depósitos de mais difícil acesso, ou o custo de substituição do recurso por outro de maior disponibilidade (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Na avaliação de impacto final, os métodos para cálculo dos fatores de caracterização usualmente expressam os resultados dos impactos na saúde humana em termos de anos de vida perdidos ou vividos sem saúde (*Disability-adjusted loss of life years* – DALY). A perda potencial de espécies em 1 ano por área ou volume (*Potentially disappeared fraction of species* – PDF) é usualmente a unidade de medida utilizada para avaliação da qualidade dos ecossistemas. Já o custo marginal de extração ou substituição do recurso usualmente expressa o dano aos recursos naturais.



Na AICV, métodos de caracterização utilizados na avaliação de um conjunto de categorias de impactos são agrupados e apresentados em pacotes metodológicos. Dois importantes pacotes metodológicos que permitem a avaliação de categorias tanto intermediárias como de dano ambiental são o Impact 2002+ (JOLLIET et al., 2003) e o ReCiPe (GOEDKOOPE et al., 2009). O ReCiPe congregou dois importantes métodos anteriores: o CML (GUINÉE et al., 2001) e o Eco-indicator 99 (GOEDKOOPE; SPRIENSMA, 2000). Nesses pacotes, os modelos de avaliação de dano ambiental consideram o continente europeu ou áreas temperadas como regiões de referência para modelagem do transporte de poluentes, níveis de poluição pré-existentes e efeitos sobre os seres vivos.

Em face da grande variedade de métodos de avaliação de impacto disponíveis, a Comissão Europeia realizou uma análise comparativa desses métodos, considerando critérios que avaliam as melhores práticas para estruturação de métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida (JOINT RESEARCH CENTRE, 2011). Foram analisados métodos presentes nos seguintes pacotes metodológicos: CML 2002, Eco-Indicator 99, EDIP (1997-2003), EPS2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, Swiss Ecotoxicity or Ecological scarcity, TRACI, MEEuP methodology e EcoSense. A classificação desses métodos e seus indicadores por categoria de impacto é apresentada na Tabelas 3, considerando avaliações intermediárias e de impacto final. Nota-se que há níveis diferenciados de recomendação, sendo que, para algumas das categorias de impacto, nenhum método é recomendado.

Dada a importância de métodos reconhecidos pela comunidade científica, em 2013, foi lançado um projeto com o objetivo de alcançar consenso nos indicadores de categoria dentro da Iniciativa do Ciclo de Vida do Programa das Nações Unidas para Meio Ambiente (PNUMA) e a Sociedade de Química Ambiental e Toxicológica (Setac).



Tabela 3. Métodos e indicadores por categoria de impacto intermediário e de dano ambiental.

Categoria de impacto	Avaliação intermediária			Dano ambiental		
	Método recomendado	Indicador	Classificação ⁽¹⁾	Método recomendado	Indicador	Classificação ⁽¹⁾
Mudança climática	Intergovernmental Panel on Climate Change (2006), 100 anos	Forçante radioativa no cálculo do Potencial de Aquecimento Global (<i>Global Warming Potential</i> – GWP)	I	Não recomendado	-	-
Depleção da camada de ozônio	Potencial de depleção indicado pela Organização Mundial (WHO; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2012), 100 anos	Potencial de depleção de ozônio (<i>Ozone depletion potential</i> – ODP)	I	Não recomendado	-	-
Toxicidade humana, efeitos cancerígenos	USEtox (ROSENBAUM et al., 2008)	Unidade comparativa de toxicidade para humanos	II/III	Cálculo do DALY aplicado ao USEtox (ROSENBAUM et al., 2008)	Dias de vida perdidos ou desabilitados (<i>Disability Adjusted Life Years</i> – DALY)	II
Toxicidade humana, efeitos não cancerígenos	USEtox (ROSENBAUM et al., 2008)	Unidade comparativa de toxicidade para humanos	II/III	Não recomendado	-	-
Toxicidade humana, material particulado	RiskPoll model (RABL; SPADARO, 2004; GRECO et al. 2007)	Fração inalada de partículas pequenas (kg PM 2.5-eq/kg)	I	DALY (adaptado de VAN ZELM et al., 2008)	Dias de vida perdidos ou desabilitados (<i>Disability Adjusted Life Years</i> – DALY)	I/II
Toxicidade humana, radiação ionizante	Modelo de efeito sobre a saúde humana desenvolvido por European Commission (1995) e Frischknecht et al., (2000)	Eficiência de exposição humana relativa ao U ²³⁵	II	Não recomendado	-	-
Ecotoxicidade, terrestre e marinha	Nenhum método recomendado	-	-	Não recomendado	-	-

⁽¹⁾ I - Recomendado e satisfatório; II - Recomendado, mas necessita de algumas melhorias; III - Recomendado mas para ser usado com precaução. Fonte: Joint Research Centre (2011).

Continua...



Tabela 3. Continuação.

Categoria de impacto	Impactos intermediários			Impactos finais (dano ambiental)		
	Método recomendado	Indicador	Classificação ⁽¹⁾	Método recomendado	Indicador	Classificação ⁽¹⁾
Ecotoxicidade, água doce	USEtox (ROSENBAUM et al., 2008)	Unidade comparativa de toxicidade para humanos	II/III	Não recomendado	-	-
Formação de ozônio fotooxidante	LOTOS-EUROS utilizada no ReCIpe (GOEDKOOP et al., 2009)	Aumento na concentração de ozônio troposférico	II	Modelo de dano à saúde humana do ReCIpe (GOEDKOOP et al., 2009)	Dias de vida perdidos ou desabilitados (<i>Disability Adjusted Life Years</i> – DALY)	II
Acidificação	Ultrapassagem acumulada (SEPPALÁ et al., 2006; POSCH et al., 2008)	Ultrapassagem acumulada (<i>Accumulated Exceedance</i> – AE)	II	Não recomendado	-	-
Eutrofização terrestre	Ultrapassagem acumulada (SEPPALÁ et al., 2006; POSCH et al., 2008)	Ultrapassagem acumulada (<i>Accumulated Exceedance</i> – AE)	II	Não recomendado	-	-
Eutrofização aquática	Modelo EUTREND como implementado em ReCIpe (GOEDKOOP et al., 2009)	Fração de nutrientes que chega a curso de água doce (Fósforo) ou estuários (Nitrogênio)	II	Não recomendado	-	-
Uso da terra	Modelo baseado na matéria orgânica do solo (<i>Soil organic matter</i> – SOM) (MILA i CANALS et al., 2007)	Matéria orgânica do solo	III	Não recomendado	-	-
Depleção de recursos naturais, minerais e fósseis	Modelo para consumo de água em <i>Ecoscarcity</i> (FRISCHKNECHT et al., 2008)	Uso da água relacionado à escassez regional	III	Não recomendado	-	-
Depleção de recursos naturais, água	CML 2002 (GUINEE et al., 2001)	Escassez	II	Não recomendado	-	-

⁽¹⁾ I - Recomendado e satisfatório; II - Recomendado, mas necessita de algumas melhorias; III - Recomendado mas para ser usado com precaução. Fonte: Joint Research Centre (2011).



Normalização

O objetivo dessa etapa é melhorar a compreensão da magnitude dos impactos que são expressos em diferentes unidades de medida (ISO, 2006c). Para tanto, os resultados das categorias de impacto são divididos por um valor de referência, convertendo os resultados da caracterização em valores adimensionais. Esse valor usualmente representa o potencial de impacto, em cada categoria, de um local (país, continente, mundo) ou pessoa (BAUMANN; TILLMAN, 2004). Assim, a significância relativa dos resultados das categorias de impactos pode ser avaliada em relação à referência adotada, e os valores normalizados podem ser agregados em um índice final de impacto.

Nem todos os métodos de avaliação de impacto existentes apresentam normalização, tendo em vista que é opcional. Exemplos de métodos que apresentam são o Traci, CML e Edip.

Agrupamento

O agrupamento busca ordenar ou classificar as categorias de impacto em grupos para que os resultados de uma avaliação possam ser mais facilmente interpretados por tomadores de decisão. Exemplos de agrupamentos são: impactos relativos a recursos e emissões; impactos relativos a emissões que afetam o solo, água, ar e biodiversidade; e impactos de interesse médio, alto e baixo. Este último exemplo é baseado em valores sociais de uma organização (ISO, 2006c).

Ponderação

Uma vez que os dados normalizados são adimensionais, a diferenciação de cada categoria de impacto é dependente da relevância do impacto ambiental, que corresponde à atribuição de pesos (ponderação). Em seguida, os resultados ponderados podem ser adicionados no índice final de impacto ambiental.

As estratégias utilizadas para definição de pesos são baseadas nas ciências sociais. As seguintes estratégias podem ser apontadas (BALLMAN; TILLMAN, 2004): monetarização, onde os pesos são atribuídos de acordo com os custos envolvidos com tratamento de resíduos ou preços atribuídos aos recursos para evitar sua depleção ou extinção; padrões de emissões ou consumo, onde a diferença entre o nível de poluição atual e o estabelecido como meta governamental é utilizada na derivação de pesos; painéis científicos, onde cientistas e líderes políticos são convidados a ranquearem as categorias de



impacto de acordo com sua percepção de importância para a realidade regional.

Seja qual for a estratégia de ponderação escolhida, um aspecto importante ao se fazer a ponderação é a necessidade de contar com um revisor externo do estudo. No caso de haver comparações a serem divulgadas ao público, a ponderação não deve ser realizada (ISO, 2006c).

Análise da qualidade dos dados

Os resultados de uma avaliação de impactos devem ser analisados buscando apontar a contribuição, incerteza e sensibilidade dos resultados (ISO, 2006c). A análise de qualidade permite melhor interpretar os resultados de uma avaliação.

As principais técnicas utilizadas nessa análise são (BAUMANN; TILLMAN, 2004):

– Dominância: identifica fatores que dominam os resultados de uma AICV, analisando as substâncias que mais contribuem para cada categoria de impacto e/ou os processos do sistema de produto que mais contribuem com emissões para as categorias de impacto. Essas substâncias e processos podem então ser estudados em maior detalhe para identificar fontes de variação nos resultados.

– Incerteza: analisa o efeito da variação estatística dos dados de inventário na variação do resultado final da categoria de impacto. Essa análise requer o conhecimento do intervalo de variação e do tipo de distribuição estatística dos dados inventariados. O Método Monte Carlo é usualmente empregado nessa análise (FRISCHKNECHT; JUNGBLUTH, 2007).

– Sensibilidade: observa o efeito de alterações sistemáticas nos dados de inventário de ciclo de vida (ICV) nos resultados das categorias de impacto. Os dados que acarretam grande variação no resultado final com pequena alteração em seu valor inicial são os mais críticos. A necessidade de maior precisão no levantamento desses valores é mais importante. Essa análise também pode ser feita para variações nas condições de um processo (ex.: temperatura e pressão), ao invés de variações em substâncias.

Disponibilidade de softwares para estudos de ACV

Softwares comerciais e de livre acesso estão disponíveis facilitando a AICV. Podem-se citar os softwares OpenLCA, SimaPro, Umberto, GaBi, PEMS, Emis e Regis (FRISCHKNECHT, 2005). Os softwares comerciais disponibilizam: bases de dados de inventário (ex.: ecoinvent) que auxiliam na realização de estudos AICV;



os principais modelos de avaliação de impacto (ex.: ReCiPe, CML, Impact 2002); e a ferramenta Monte Carlo para análise de incerteza.

Interpretação dos dados

Essa etapa ocorre em paralelo com as anteriores sempre que os dados de inventário e a avaliação de impacto são analisados, observando se os objetivos pretendidos com o estudo foram alcançados. A interpretação dos dados e resultados permite ponderar sobre as limitações do estudo e propor a realização de novos estudos visando ampliar o conhecimento do produto e seus sistemas de produção.

Considerações finais

O estudo da pegada ambiental de produtos agroindustriais é uma ferramenta importante para empresas desenvolvedoras e comercializadoras de produtos. A realização desse estudo na etapa de desenvolvimento de produtos permite a realização de alterações em processos logo no início da pesquisa, quando os custos da realização de mudanças ainda são reduzidos.

Já no levantamento dos dados primários de inventário, é possível identificar os processos unitários responsáveis pelas maiores quantidades de insumos e emissões, assim como identificar ineficiências que podem ser facilmente corrigidas. A etapa de avaliação de impacto, considerando todo o ciclo de vida do produto, permite identificar pontos críticos em toda cadeia de produção e consumo, assim como investigar cenários alternativos de produção. Esse escopo amplo da avaliação ambiental reduz os riscos de adoção de alternativas tecnológicas que apenas movem os impactos ambientais ao longo da cadeia de um produto, não contribuindo para efetiva redução dos impactos ao longo do ciclo de vida de um produto.

Além de permitirem a identificação de pontos críticos e análise de cenários tecnológicos, estudos de pegada ambiental de produtos são o primeiro passo para certificação de produtos tipo III. Essa certificação vem sendo cada vez mais demandada por cadeias de suprimento de alimentos e por consumidores que requerem formalização do compromisso ambiental de toda a cadeia produtiva relacionada a um produto.



Referências

BAUMANN, H., TILLMAN, A. M. **The hitch hicker's guide to LCA: an orientation in the life cycle assessment methodology and application.** Lund: Studentlitteratur, 2004.

BRITISH STANDARDS. **PAS 2050:2011** – specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. United Kingdom: DEFRA, 2011. Disponível em: <<http://shop.bsigroup.com/en/forms/PASs/PAS-2050/>>. Acesso em: 12 dez. 2012.

DOLE FOOD COMPANY. **Corporate responsibility and sustainability: carbon footprint.** 2013. Disponível em: <<http://dolecrs.com/sustainability/carbon-footprint/>>. Acesso em: 16 out. 2013.

EUROPEAN COMMISSION. **ExternE, Externalities of Energy. Luxembourg:** CEPN: Office for Official Publications of the European Commission, 1995. v. 5, Nuclear.

EUROPEAN UNION. Product environmental footprint guide. **Official Journal of the European Union**, 09 de abril de 2013a. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:124:0001:0210:EN:PDF>>. Acesso em: 18 dez. 2015.

EUROPEAN UNION. **The product environmental footprint pilots.** 2013b. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/ef_pilots.htm#pef>. Acesso em: 18 dez. 2015.

FIGUEIREDO, M. C. B. de; BORGES, M. de F.; MATTOS, A. L. A.; MOTA, F. S. B. **Avaliação do desempenho ambiental de inovações tecnológicas agroindustriais: conceitos e métodos.** Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2010. 44 p. (Embrapa Agroindústria Tropical. Documentos, 126). Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/33966/1/DO10001.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2012.

FRANKL, P.; RUBIK, F. Life Cycle **Assessment in Industry and Business: adoption patterns, applications and implications.** Berlin: Springer-Verlag, 2000. 280 p.

FRISCHKNECHT, R.; STEINER, R.; JUNGBLUTH, N. **The Ecological Scarcity Method Eco-Factors 2006.** Bern: Federal Office for the Environment FOENöbu, 2009.

FRISCHKNECHT, R. Ecoinvent Data v1.1: from heterogeneous databases to unified and transparent LCI data. **International Journal of LCA**, v. 10, n. 1, p. 1-2, 2005.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N. **Ecoinvent: overview and methodology.** Dubendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.

FRISCHKNECHT, R.; BRAUNSCHWEIG, A.; HOFSTETTER, P.; SUTER, P. Modelling human health effects of radioactive releases in Life Cycle Impact Assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 20, n. 2, p. 159-189, 2000.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; SCHRYVER, A., J.; ZELM, R. **ReCiPe 2008.**



Holanda: PRé Consultants: University of Leiden: Radboud University: National Institute for Public Health and the Environment, 2009.

GOEDKOOP, M.; SPRIENSMA, R. **The Eco-indicator 99**: a damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology Report. Amersfoort: PRé Consultants B. V., 2000. 132 p.

GRECO, S. L.; WILSON, A. M.; SPENGLER J.D.; LEVY J. I. Spatial patterns of mobile source particulate matter emissions-to-exposure relationships across the United States. **Atmospheric Environment**, v. 41, p. 1011-1025, 2007.

GUINÉE, J. B.; BRUIJN, H.; DUIN, R. ; HUIJBREGTS. M. **Life cycle assessment**: an operation bal guide for the ISO standards. Leiden: University of Leiden, 2001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Genebra, 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>>. Acesso em: 01 out. 2013.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14020 – Environmental labels and declarations** – General principles. Genebra, 2000.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14021 – Environmental labels and declarations** – Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling). Genebra, 1999a.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14024 – Environmental labels and declarations** – Type I environmental labelling – Principles and procedures. Genebra, 1999b.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14025 – Environmental labels and declarations** – Type III environmental declarations – Principles and procedures. Genebra, 2006a.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040 – Environmental management** – Life cycle assessment – Principles and framework. Genebra, 2006b.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044 – Environmental management** – Life cycle assessment – Requirement sand guide lines. Genebra, 2006c.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14046 – Environmental management** – Water footprint – Principles, requirements and guidelines. Genebra, 2014.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14067 – Carbon footprint of products** – Requirements and guidelines for quantification and communication. Genebra, 2012.

JOLLIET, O.; MARGNI, M.; CHARLES, R.; HUMBERT, S.; PAYET, J.; REBITZER, G.; ROSENBAUM, R. Impact 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. **International Journal of Life Cycle Assess**, v. 8, n. 6, p. 324-330, 2003.



JOINT RESEARCH CENTRE; INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook** - Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.

JOINT RESEARCH CENTRE; INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook** – Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011.

JOINT RESEARCH CENTRE; INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. **ELCD**: European reference Life Cycle Database, 2012. Disponível em: <<http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>>. Acesso em: 29 set. 2014.

KOUNINA, A.; MARGNI, M.; BAYART, J. B.; BOULAY, A. M.; BERGER, M.; BULLE, C.; FRISCHKNECHT, R.; KOEHLER, A.; MILÀ I CANALS, L.; MOTOSHITA, M.; NÚÑEZ, M.; PETERS, G.; PFISTER, S.; RIDOUTT, B.; ZELM, R.; VERONES, F.; HUMBERT, S. Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assess**, v. 18, p. 707-721, 2013.

MILÀ I CANALS, L.; ROMANYÀ J.; COWELL S. J. Method for assessing impacts on life support functions (LSF) related to the use of fertile land in Life Cycle Assessment (LCA). **Journal of Cleaner Production**, v. 15, p. 1426-1440, 2007.

MOOMAW, W.; T. GRIFFIN, K.; KURCZAK, J.; LOMAX. “**The Critical Role of Global Food Consumption Patterns in Achieving Sustainable Food Systems and Food for All, A UNEP Discussion Paper**”. Paris: United Nations Environment Programme, Division of Technology, Industry and Economics, 2012.

NEMECEK, T.; SCHNETZER, J. **Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems**. Zurich, 2011.

PENNINGTON, D. W.; POTTING, J.; FINNVEDEN, G.; LINDEIJER, E.; JOLLIET, O.; RYDBERG, T.; REBITZER, G. Life Cycle Assessment Part 2: Current impact assessment practice. **Environmental International**, v. 30, p. 721-739, 2004.

POSCH, M.; SEPPÄLÄ, J.; HETTELINGH, J. P.; JOHANSSON, M.; MARGNI M.; JOLLIET, O. The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, p. 477-486, 2008.

PRÉ CONSULTANT. **Agri-foot print Comprehensive Agriculture-Oriented LCI Database**. 2015. Disponível em: <<http://www.pre-sustainability.com/agri-footprint-database-comprehensive-agriculture-oriented-lci-database>>. Acesso em: 07 mar. 2015.

RABL, A.; SPADARO, J. V. **The RiskPoll software**. version 1.051. 2004. Disponível em: www.arirabl.com. Acesso em: 12 dez. 2010.



REBITZER, G.; EKVALL, T.; FRISCHKNECHT, R.; HUNKELER, D.; NORRIS, G.; RYDBERG, T.; SCHMIDT, W. P.; SUH, S.; WEIDEMA, B. P.; PENNINGTON, D. W. Life Cycle Assessment Part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, v. 30, p. 701-720, 2004.

ROSENBAUM, R. K., BACHMANN, T.M., GOLD, L. S., HUIJBREGTS, M. A. J., JOLLIET, O., JURASKE, R., KÖHLER, A., LARSEN, H.F., MACLEOD, M., MARGNI, M., MCKONE, T. E., PAYET, J., SCHUHMACHER, M., VAN DE MEENT, D., HAUSCHILD, M. Z. USEtox – The UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterization factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 7, p. 532-546, 2008.

SANTOS, T. de L.; BARROS, V. da S.; FIGUEIREDO, M. C. B. de; NUNES, A. B. de A.; GONDIM, R. S.; ARAGAO, F. A. S. de; SOUSA, J. A. de. **Pegada de carbono de produtos agrícolas: estudo de caso do melão Cantaloupe**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2013. (Embrapa Agroindústria Tropical. Documentos, 167). Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/103035/1/DOC13011.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2013.

SEPPÄLÄ, J.; POSCH, M.; JOHANSSON, M.; HETTELINGH, J. P. Country-dependent characterization factors for acidification and terrestrial eutrophication based on accumulated exceedance as an impact category indicator. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 6, p. 403-416, 2006.

SIKIRICA, N. **Water Footprint Assessment: bananas and pineapples**. Driebergen: Soil & More International, 2011.

TESCO INC. **Measuring our carbon footprint**. 2013. Disponível em: <<http://www.tesco.ie/corporate-responsibility/environment/>>. Acesso em: 16 out. 2013.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Evaluation of environmental impacts in life cycle assessments**. Bruxelas, 2003.

VAN ZELM, R.; HUIJBREGTS, M. A. J.; DEN HOLLANDER, H. A.; VAN JAARVELD, H. A.; SAUTER, F. J.; STRUIJS, J.; VAN WIJNEN, H. J.; VAN DE MEENT, D. European characterization factors for human health damage of PM10 and ozone in life cycle impact assessment. **Atmospheric Environment**, v. 42, p. 441-453, 2008.

WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C. O.; WERNET, G. **Overview and methodology: data quality guideline for the ecoinvent database version 3**. St. Gallen: The Ecoinvent Centre, 2013. (Ecoinvent Report 1 (v3)).

WHO; UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME. **Scientific assessment of ozone depletion**. Suíça: WHO/UNEP, 2012.

**ANEXO A****Categorias de impactos ambientais em AICV.**

Categoria	Descrição	Unidade de medida	
		Impacto intermediário	Dano
Mudança climática	<p>Refere-se ao aumento da concentração de emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, causando o aumento da temperatura e outros efeitos secundários que afetam a sociedade e os ecossistemas.</p> <p>Os métodos de AICV consideram o potencial de aquecimento global dos GEE e as possíveis consequências do aumento da temperatura sobre a saúde humana e biodiversidade.</p> <p>Principais substâncias: CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs e SF₆</p>	kg CO ₂ -eq	Dias de vida perdidos ou desabilitados (DALY)
Depleção da camada de ozônio	<p>Refere-se à redução do ozônio na estratosfera que controla a incidência de raios ultravioletas nocivos aos seres vivos.</p> <p>Os métodos de AICV avaliam o potencial de redução do ozônio estratosférico por substâncias persistentes contendo átomos de cloro e bromo, assim como o efeito do aumento da radiação ultravioleta na saúde humana.</p> <p>Principais substâncias: CFCs, HCFCs, HBFCs, halons, CCl₄, CH₃CCl₃ e CH₃Br.</p>	kg CFC-11-eq	DALY
Toxicidade	<p>Refere-se ao potencial tóxico de substâncias químicas orgânicas e inorgânicas aos seres vivos.</p> <p>Os métodos de AICV analisam o potencial tóxico de substâncias químicas a partir da incidência (número de casos) de doenças cancerígenas e não cancerígenas observadas em estudos laboratoriais, quando essas substâncias são inaladas ou ingeridas em determinadas doses. Os métodos utilizam modelos para transporte e acumulação de substâncias tóxicas em diferentes meios, para análise da exposição das pessoas e dos efeitos de diferentes doses nos seres vivos.</p> <p>Principais substâncias: mais de 3.000 substâncias, como solventes orgânicos, metais pesados e pesticidas (ROSEMBAUM et al., 2008).</p>	<p>- Unidade tóxica comparativa (efeitos cancerígenos e não cancerígenos)</p> <p>- kg PM2.5-eq (material particulado)</p> <p>- kg U²³⁵-eq (radiação ionizante)</p>	DALY (saúde humana) e fração de espécies desaparecidas (PDF) (ecossistemas)

Continua...



Anexo A. Continuação.

Categoria	Descrição	Unidade de medida	
		Impacto intermediário	Dano
Formação de ozônio foto-oxidante	<p>Formação foto-oxidante se refere ao aumento da concentração de substâncias foto-oxidantes (ex: ozônio, PAN, peróxido de hidrogênio, aldeídos) na troposfera. Essas substâncias formam uma neblina (smog) tóxica que causa problemas respiratórios e danifica a vegetação.</p> <p>Os métodos de AICV analisam o potencial de substâncias de formar ozônio foto-oxidante, quando expostas à luz solar.</p> <p>Principais substâncias: NOx, COVs (compostos orgânicos voláteis) e HC (hidrocarbonetos).</p>	kg C ₂ H ₄ -eq	DALY
Acidificação	<p>Refere-se à deposição de íons H⁺ no ambiente, acarretando a mortalidade de peixes e a lixiviação de metais danificando ecossistemas e construções.</p> <p>Os métodos de AICV avaliam o potencial das substâncias de liberação de íons H⁺.</p> <p>Principais substâncias: SOx, NOx, HCl e NH₃.</p>	mol H ⁺ -eq	PDF
Eutrofização	<p>Refere-se ao aumento de nutrientes no ambiente, levando a mudanças na composição de espécies e aumento da produtividade biológica (ex: aumento na quantidade de algas). Pode influenciar ecossistemas aquáticos e terrestres.</p> <p>Os métodos de AICV analisam o potencial de substâncias aumentarem a produtividade primária, considerando o nutriente menos disponível no meio: nitrogênio em estuários e ambientes terrestres; e fósforo em água doce.</p> <p>Principais substâncias: compostos de nitrogênio (NO₂, NO₃, NH₄, NH₃)₂ e fósforo (PO₄, H₃PO₄, P₂O₅).</p>	<p>mol N-eq (eutrofização terrestre)</p> <p>kg N-eq (eutrofização marinha)</p> <p>kg P-eq (eutrofização de água doce)</p>	PDF
Uso da terra	<p>Refere-se à transformação e ocupação do solo com efeitos sobre o solo e a biodiversidade</p> <p>Os métodos de AICV analisam a alteração na qualidade do solo, utilizando indicadores como quantidade de matéria orgânica do solo, pH, assim como extinção de espécies e redução na produção primária (<i>Net Primary Production</i> – NPP).</p> <p>Principais recursos: área ocupada ou transformada, tempo de ocupação e transformação.</p>	<p>Área ocupada ou transformada (m²)</p> <p>kg de matéria orgânica</p>	PDF

Continua...

**Anexo A.** Continuação.

Categoria	Descrição	Unidade de medida	
		Impacto intermediário	Dano
Depleção de recursos hídricos / escassez hídrica	Refere-se à redução na disponibilidade de água em uma região devido ao uso consuntivo (retirada de um volume de água que não retorna à fonte hídrica após o uso, devido à evaporação, incorporação em produtos ou lançamento em outros corpos hídricos).	l-equivalente de H ₂ O consuntiva (escassez hídrica)	DALY (Saúde Humana)
	Os métodos de AICV avaliam a escassez física de água, usualmente observando a relação entre demanda e disponibilidade hídrica em uma região, assim como a escassez de água com qualidade adequada aos diferentes usos (KOUNINA et al., 2013), utilizando indicadores específicos de qualidade da água ou os disponíveis para eutrofização e toxidade humana e aquática. Efeitos da escassez hídrica na saúde humana, pela desnutrição ou doenças provocadas pela má qualidade da água, e nos ecossistemas, pelo desaparecimento de espécies, também são avaliados.	kg P-eq ou N-eq (eutrofização)	PDF (ecossistemas)
	Principais recursos: volume de água consuntiva (escassez física), emissão de nutrientes (eutrofização) e de substâncias tóxicas (Toxicidade humana e ecotoxicidade).	kg Substância tóxica de referência (Toxicidade)	
Depleção de recursos minerais e fósseis	Refere-se à depleção das reservas existentes pela extração e uso dos recursos minerais e fósseis. Avalia o impacto da extração do recurso sobre a disponibilidade atual, por meio da relação demanda e disponibilidade, em relação a uma substância equivalente. Seguindo na relação de causa e efeito, avalia também a depleção do recurso para gerações futuras, pelos maiores custos de extração de novas reservas ou uso de recursos alternativos em substituição aos atuais.	kg Sb equivalente	Custo (\$) de extração de novas reservas

Fontes: Joint Research Centre (2012), Kounina et al. (2013).