

Graphical Abstract



The alignment between technical and regulatory shelf-life of pesticides is an important topic to maximize the life cycle of the product, an important pillar of circular economy

ECONOMIA CIRCULAR E AGROTÓXICOS: REFLEXÕES SOBRE A EXTENSÃO DO PRAZO DE VALIDADE E O POTENCIAL DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

Liliane Gomes Martins^{a,*} and Kalil Cristhian Figueiredo Toledo^a

^aInstituto de Química, Universidade de São Paulo, 05508-900 São Paulo – SP, Brasil

*e-mail: liliane.gomes@usp.br

Resumo

A agropecuária representa uma das principais atividades econômicas globais, responsável por mais de 10% da força de trabalho mundial. O uso de agrotóxicos é fundamental na produção agrícola em larga escala, pois permite o controle eficiente de pragas, otimizando a produção alimentar com custos reduzidos. No entanto, a validade desses produtos, frequentemente estabelecida com base em estudos de estabilidade acelerada, limita-se a cerca de dois anos, o que não reflete seu potencial para manter propriedades físico-químicas e toxicológicas eficazes por períodos mais longos. Essa limitação não apenas resulta em desperdício, mas também gera resíduos e impactos ambientais adversos. Portanto, este artigo discute a aplicação da Análise de Ciclo de Vida (ACV) como uma ferramenta para reavaliar os prazos de validade dos agrotóxicos, visando reduzir os impactos ambientais e minimizar a geração de resíduos químicos, contribuindo assim para práticas mais sustentáveis na agropecuária e promovendo os princípios da economia circular.

Palavras-chave: prazo de validade; agrotóxicos; economia circular; análise de ciclo de vida.

PRODUCT LIFE CYCLE ANALYSIS: A SUPPORT TOOL FOR EXTENDING THE SHELF LIFE OF PESTICIDES

Abstract

Agriculture is one of the world's major economic activities, accounting for over 10% of the global workforce. The use of pesticides is essential in large-scale agricultural production, as it allows for efficient pest control, optimizing food production at reduced costs. However, the validity of these products, often determined based on accelerated stability studies, is limited to approximately two years, which does not reflect their potential to maintain effective physical-chemical and toxicological properties for longer periods. This limitation not only leads to waste but also generates residues and adverse environmental impacts. Therefore, this article discusses the application of Life Cycle Assessment (LCA) as a tool to reevaluate the shelf life of pesticides, aiming to reduce environmental impacts and minimize the generation of chemical waste, thereby contributing to more sustainable practices in agriculture and promoting the principles of a circular economy.

Keywords: shelf-life; pesticides; circular economy; life cycle analysis.

INTRODUÇÃO

A agricultura é uma das atividades econômicas mais antigas da humanidade. Segundo a FAO¹, o valor agregado global gerado pela agricultura, silvicultura e pesca cresceu 89% em termos reais entre 2000 e 2022, atingindo 3,8 trilhões de dólares em 2022. O número de trabalhadores somente no setor agrícola chegou a 892 milhões em 2022, representando mais de 10% da população mundial total.

A área de terras agrícolas per capita diminuiu em todas as regiões entre 2000 e 2022, à medida que a população aumentou mais rapidamente do que a área de terras agrícolas. O constante aumento populacional gera uma demanda exponencial por alimentos, sendo necessárias melhorias em toda a cadeia do processo produtivo, tornando o alimento disponível a todos a um custo acessível.

O aumento da produtividade agrícola é parte dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da ONU, particularmente o objetivo 2: Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável.² Em seu item 2.4, é reforçada a necessidade de implementação de práticas agrícolas resilientes e sustentáveis: Até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo.²

Conceitos como a Economia Circular e Análise de Ciclo de Vida (ACV) vem sendo apresentados e mundialmente discutidos.^{3,4} No Parlamento da Comunidade Europeia, define-se a economia circular como um modelo de produção e de consumo que envolve a partilha, o aluguel, a reutilização, a reparação, a renovação e a reciclagem de materiais e produtos existentes, sempre que possível. Desta forma, o ciclo de vida dos produtos é aumentado.³

Na prática, a economia circular implica a redução do desperdício ou dos resíduos ao mínimo. Quando um produto chega ao fim do seu ciclo de vida, seus materiais são mantidos dentro da economia sempre que possível, graças à reciclagem. Isso permite que sejam utilizados repetidamente, criando mais valor.³



Figura 1. Modelo da economia circular, reforçando toda a cadeia produtiva (2025)³

Para reduzir desperdícios e resíduos ao mínimo, é fundamental aumentar o tempo de uso do produto pelo maior tempo possível, garantindo que suas propriedades sejam mantidas e que o produto continue seguro para uso. Portanto, a definição e o alinhamento do prazo de validade regulatório e técnico dos produtos são fundamentais para a otimização do uso seguro durante toda a sua vida útil.

Metodologia

A literatura científica foi pesquisada utilizando as bases de dados SciFinder e PubMed. Devido à baixa quantidade de artigos encontrados especificamente sobre a análise de ciclo de

vida aplicada aos agrotóxicos, o intervalo de tempo delimitado foi de 1990 a 2025. As palavras-chave utilizadas foram: “*shelf-life*”, “*pesticides*”, “*circular economy*”, “*life cycle analysis*”; para obter uma amostra mais representativa de artigos, consideraram-se resultados com um ou mais dos termos selecionados.

Considerando a importância do contexto regulatório no estudo, foram consultados sites de agências reguladoras da Europa, Estados Unidos e Brasil. Para ampliar a robustez dos dados, foram consultados sites e publicações de importantes organizações associadas à agricultura, como a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), o Instituto Nacional De Processamento De Embalagens Vazias (InpEV) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). É importante ressaltar que não existem trabalhos específicos sobre agrotóxicos que façam correlações diretas entre a extensão da validade dos agrotóxicos e a análise de ciclo de vida.

Agrotóxicos

No Brasil, agrotóxicos e produtos afins são definidos como produtos e agentes de processos físicos, químicos ou biológicos, destinados ao uso nos setores de produção, no armazenamento e beneficiamento de produtos agrícolas, nas pastagens, na proteção de florestas, nativas ou plantadas, e de outros ecossistemas e ambientes urbanos, hídricos e industriais, cuja finalidade seja alterar a composição da flora ou da fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos, bem como as substâncias e produtos empregados como desfolhantes, dessecantes, estimuladores e inibidores de crescimento.⁵

O Brasil é um dos principais países produtores de alimentos do mundo.¹ Sua grande extensão territorial, variedade de solos e clima predominantemente tropical tornam a atividade economicamente atrativa e viável no país, que é também um dos maiores exportadores de *commodities* alimentícias.¹

WORLD PRODUCTION OF MAIN PRIMARY CROPS BY MAIN PRODUCERS (2022)

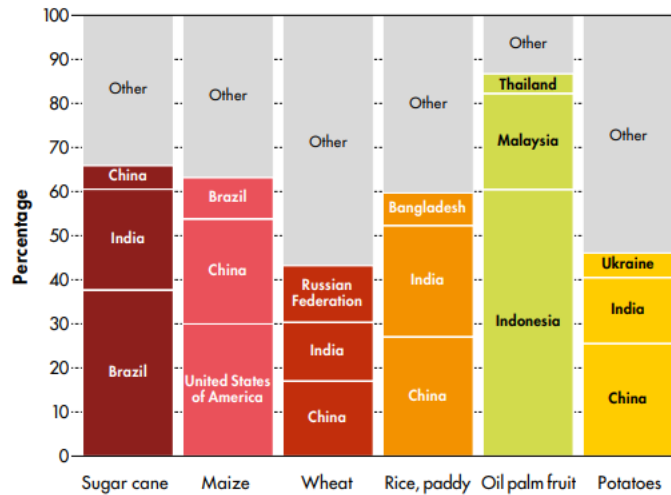


Figura 2. Produção das principais culturas primárias por maiores produtores, reforçando a relevância dos agrotóxicos no Brasil (FAO, 2024)¹

O clima tropical e alterações climáticas favorecem não somente o plantio, mas também o surgimento, ocorrência e severidade de doenças e pragas agrícolas, alterando a distribuição dos problemas fitossanitários em todo o mundo, com graves consequências econômicas, sociais e ambientais. Tanto o aumento quanto a redução na ocorrência de risco de problemas fitossanitários são informações importantes para a defesa vegetal, uma vez que alterações na dinâmica populacional de microrganismos e insetos têm implicações diretas nas estratégias de manejo e nos custos de produção. ⁶

Para a proteção dos cultivos agrícolas, foram consumidas 800 mil toneladas de agrotóxicos e produtos afins no Brasil em 2022 ¹, apontado pela FAO como o maior consumo de pesticidas por hectare, superando os maiores produtores mundiais, como China e Estados Unidos. Tal volume se deve também à quantidade de áreas produtivas em hectare no Brasil.

PESTICIDE USE (2022)

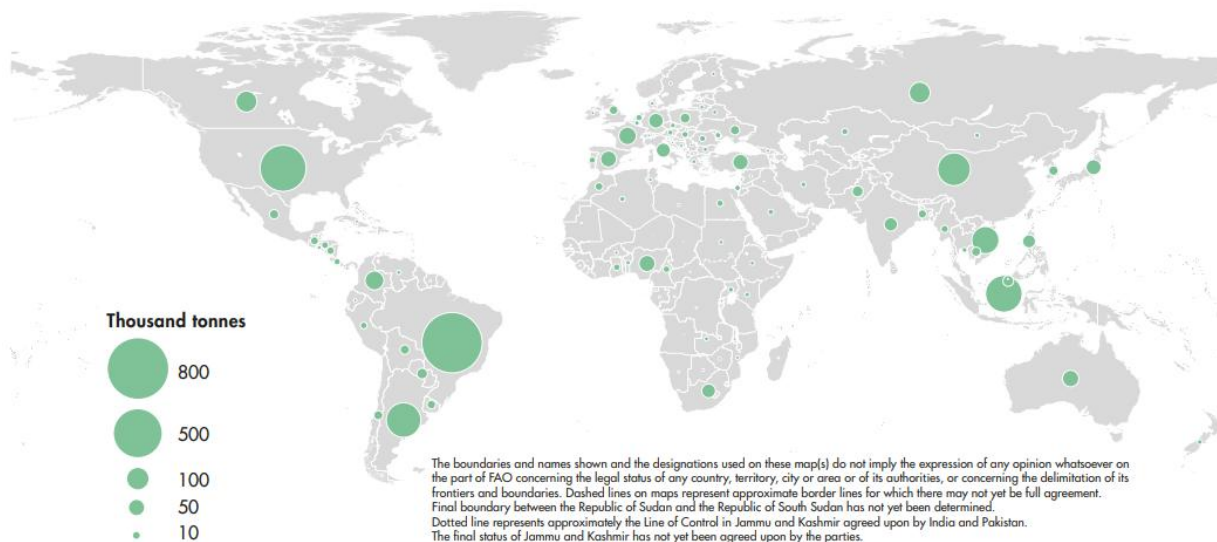


Figura 3. Uso de agrotóxicos em 2022, em milhares de toneladas. (FAO, 2024)¹

As oscilações na dinâmica populacional de microrganismos, plantas daninhas e insetos comprometem o correto planejamento de produção e importação de agrotóxicos. Apesar da alta demanda comercial por agrotóxicos, a produção nacional de seus ingredientes ativos é mínima. De acordo com o relatório de comercialização do IBAMA, ⁷ disponibilizado em dezembro de 2024, mais de 80% do volume utilizado provém de importação, especialmente de países como a China.

Tabela 1. Produção, importação, exportação e vendas de agrotóxicos químicos no Brasil em 2023⁷

Atividade	Quantidade de Produtos Técnicos*	Quantidade de Produtos Formulados*
Produção Nacional	68.745,23	465.340,62
Importação	528.769,61	326.357,60
Exportação	2.642,66	6.033,49
Vendas Internas	536.855,64	755.489,00

* Unidade de medida: toneladas de ingrediente ativo (IA).

A tabela 1 ressalta a baixa produção nacional de produtos técnicos (ingredientes ativos), resultando em altos índices de importação; o mesmo se aplica aos produtos formulados, dos quais mais de 40% do volume consumido no Brasil provém de outras nacionalidades. Para que o produto esteja disponível ao produtor rural, é necessário que ele seja registrado no Brasil. Partindo dessa premissa, entre o tempo em que o pedido é efetuado ao fabricante do ingrediente ativo e de suas matérias-primas, o produto ser fabricado e enviado ao Brasil (seja na forma de produto formulado ou ingredientes para formulação local) pode levar meses, podendo ultrapassar um ano.

Contudo, a ocorrência de pragas agrícolas e sua dinâmica populacional não pode ser considerada uma ciência exata. É frequente a situação em que houve planejamento e demanda pelo agrotóxico para combate a uma praga específica e a mesma não ocorre, ou ocorre em um cultivo não registrado, impossibilitando o uso do produto naquela janela de aplicação.

Como os produtos possuem prazos de validade pré-definidos, conforme será discutido no próximo tópico, pode ocorrer o vencimento desse prazo com o produto ainda lacrado, com suas propriedades técnicas intactas e em perfeitas condições de uso. Os agrotóxicos não utilizados e vencidos, caso não haja possibilidade de reprocesso, retrabalho ou revalidação,⁸ deverão ser incinerados. Tais processos, especialmente a incineração, são contraditórios aos três principais pilares da economia circular: eliminar resíduos e poluição, manter produtos e materiais em uso e regenerar a natureza.

Prazo de validade (shelf-life) de agrotóxicos

O *shelf-life* de um produto possui definições diversas, dependendo do país em que é comercializado. Além disso, a definição depende do setor produtivo e da legislação aplicável a tal setor. É importante diferenciar os termos específicos de *shelf-life*, que são o regulatório, o técnico e o operacional, a saber:

Regulatório: Refere-se ao período de validade estabelecido por normas e regulamentações governamentais. Geralmente, é determinado com base em estudos de estabilidade acelerada.

Técnico: Diz respeito ao tempo durante o qual um produto mantém suas propriedades e desempenho conforme especificações técnicas. Este prazo é geralmente baseado em testes realizados pelo fabricante e pode ser diferente do *shelf-life* regulatório.

Operacional: Refere-se ao tempo que um produto pode ser utilizado de forma segura e eficaz dentro de uma operação específica. Esse prazo pode ser influenciado por fatores como condições de armazenamento, manuseio e uso real do produto. Na indústria, entende-se como *shelf-life* operacional o valor mais restritivo quando comparado ao regulatório e ao técnico.

Garantir o maior tempo de uso do produto, mantendo suas propriedades técnicas preservadas e alinhando o *shelf-life* regulatório com o técnico, proporciona um *shelf-life* operacional otimizado e maximização do uso do produto, evitando a geração desnecessária de resíduos.

No Brasil, o Código de Defesa do Consumidor⁹ estabelece que todo produto comercializado, incluindo produtos químicos e agrotóxicos, deve conter em seu rótulo a indicação de prazo de validade, que representa a data limite de garantia da qualidade do produto, desde que mantido em condições apropriadas de armazenamento.

Para registro do prazo de validade de agrotóxicos no Brasil, não há legislação específica. Para o registro do prazo de validade de agrotóxicos no Brasil, não há legislação específica. Entretanto, o fabricante do produto é responsável por manter o produto dentro das especificações estabelecidas, com base em sua estabilidade. Na indústria farmacêutica, aplica-se a RDC 134,¹⁰ que determina que sejam feitos três tipos de teste de estabilidade para medicamentos:

Estudo de estabilidade acelerado: projetado para acelerar a degradação química ou mudanças físicas de um produto em condições forçadas de armazenamento. Esse tipo de estudo, acrescido aos resultados de longa duração, avalia o impacto de curtas exposições em condições fora daquelas estabelecidas no rótulo de um produto, que podem ocorrer durante o transporte, por exemplo, e é fundamental na extrapolação de prazo de validade.

Estudo de estabilidade de longa duração: projetado para verificar as características físicas, químicas, biológicas e microbiológicas de um produto durante e, opcionalmente, depois do prazo de validade esperado. Os resultados são usados para estabelecer ou confirmar o prazo de validade e recomendar as condições de armazenamento.

Estudo de estabilidade de acompanhamento: realizado para verificar se o produto mantém suas características físicas, químicas, biológicas e microbiológicas conforme os resultados obtidos nos estudos de estabilidade de longa duração. A tabela 2 apresenta os principais objetivos e usos dos estudos de estabilidade na indústria farmacêutica.

Os produtos químicos, incluindo os agrotóxicos, são projetados para serem estáveis e adequados para uso quando armazenados de acordo com as instruções do rótulo por um período definido (prazo de validade). Durante o desenvolvimento, os fabricantes realizam rotineiramente testes de armazenamento acelerado em temperaturas elevadas e testes de armazenamento em tempo real em temperatura ambiente para determinar a estabilidade de seus produtos.¹²

De acordo com a guia CIPAC MT 46.4,¹³ as condições de temperatura e tempo passíveis de garantir 2 anos de prazo de validade por extrapolação são: 2 semanas a 54 °C, 8 semanas a 40 °C, 12 semanas a 35 °C ou 18 semanas a 30 °C.

Tabela 2. Principais objetivos e usos dos estudos de estabilidade¹¹

Objetivo	Tipo de estudo	Uso
Selecionar formulações e recipientes adequados (do ponto de vista de estabilidade)	Acelerado	Desenvolvimento do produto
Determinar o prazo de validade e as condições de estocagem	Acelerado e longa duração	Desenvolvimento do produto e documentação do registro
Substanciar prazo de validade projetado pelos estudos de estabilidade acelerada	Longa duração	Documentação do registro
Verificar se foi introduzida alguma mudança na formulação ou no processo de fabricação que possa afetar adversamente a estabilidade do produto	Longa duração	Garantia da qualidade em geral, incluindo controle de qualidade

Para registrar um agrotóxico, os dados de estabilidade relevantes devem ser enviados às autoridades competentes. Dependendo das regulamentações específicas do país, o registro pode ser concedido com base em dados de estabilidade de testes de armazenamento acelerado que atendam aos requisitos de dados. Em alguns países, dados de estabilidade de testes de armazenamento em tempo real são adicionalmente exigidos para obter o registro. Com base nos dados de estabilidade enviados, é concedida uma validade regulatória para o agrotóxico. Durante o armazenamento, os agrotóxicos podem sofrer alterações químicas e físicas a uma taxa que depende da natureza do(s) seu(s) ingrediente(s) ativo(s), co-formulantes, tipo de formulação, material de embalagem e condições de armazenamento. O produto permanece apto para uso se as alterações não tiverem impacto negativo em sua aplicabilidade,

desempenho biológico e segurança do operador, consumidor ou meio ambiente. Uma condição essencial para a adequação ao uso de um agrotóxico é sua conformidade com o registro durante todo o prazo de validade. Para alguns países, os requisitos regulatórios estabelecem limites para o conteúdo do(s) ingrediente(s) ativo(s) ou impurezas toxicologicamente relevantes, bem como para as principais propriedades físicas do produto.¹²

Análise do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação (ou Análise) do Ciclo de Vida tem se mostrado uma importante ferramenta na análise de impacto ambiental de produtos. Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações,¹⁴ a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica utilizada para dimensionar potenciais impactos ambientais de um produto ou serviço. Utilizando uma abordagem conhecida como “do berço ao túmulo”, são levantadas as entradas e saídas que ocorrem em todo ciclo produtivo, da extração de matéria-prima da natureza até o descarte final do produto. Os resultados obtidos permitem comparações entre produtos, além de apresentar um levantamento completo dos insumos utilizados e produzidos durante o ciclo de vida.

A ACV possui uma série de benefícios, como a identificação de oportunidades de melhorias na performance ambiental de produtos e serviços, auxílio a tomadores de decisão dos setores produtivos e governamentais, seleção de indicadores ambientais relevantes ao contexto local e divulgação de ações sustentáveis, além de apoio à criação de políticas públicas.

A metodologia de uma ACV é estruturada nas quatro fases a seguir, de acordo com Roy et al.:¹⁵

- **Definição dos objetivos e escopo:** uma das fases mais importantes, visto que o estudo é realizado de acordo com o que é estabelecido nesta etapa, que define o propósito do estudo, o resultado esperado, os limites do sistema, a unidade funcional (UF) e as suposições;

- **Análise de inventário:** a fase mais trabalhosa e demorada em comparação com outras fases, sobretudo pela coleta de dados. Esta coleta pode consumir pouco tempo se existirem boas bases de dados e se clientes e fornecedores estiverem dispostos a ajudar; informações de bases de dados podem ser utilizadas para processos que não são de produtos específicos, como dados gerais sobre a produção de eletricidade, carvão e embalagem;
- **Avaliação de impacto:** a Avaliação dos Impactos de Ciclo de Vida (AICV) visa compreender e avaliar os impactos ambientais com base na análise de inventário no âmbito da meta e no escopo do estudo, fase em que os resultados do inventário são atribuídos a diferentes categorias de impacto, com base nos tipos de impactos esperados ao meio ambiente. A Avaliação dos Impactos na ACV geralmente consiste dos seguintes elementos: classificação, caracterização, normatização e avaliação;
- **Interpretação dos resultados:** o propósito de uma ACV é obter conclusões que possam apoiar uma decisão ou fornecer um resultado facilmente compreensível. O inventário e os resultados da avaliação de impacto são discutidos juntos, no caso de uma AICV, ou unicamente do inventário, no caso da análise ICV (Inventário de Ciclo de Vida), e questões ambientais significativas são identificadas para conclusão e recomendações compatíveis com os objetivos e escopo do estudo.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou as versões em português das seguintes normas ISO (ABNT, 2011):

- ISO 14040 - *Life Cycle Assessment: Principles and Framework* (2006) - (Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Estrutura).
- ISO 14044 - *Life Cycle Assessment: Requirements and Guidelines* (2006). (Avaliação do Ciclo de Vida: Requisitos e Orientações).

Análise do ciclo de vida aplicada ao agronegócio

A Análise de Ciclo de Vida, apesar de ser uma ferramenta mundialmente conhecida, ainda é relativamente pouco utilizada no Brasil. Na revisão de literatura realizada por Claudino e Talamini,¹⁶ ressaltou-se a importância da utilização de uma ferramenta robusta e confiável para mensuração dos impactos ambientais no agronegócio.

Em países como o Brasil, o agronegócio tem sido fundamental para a geração de riquezas e manutenção da economia brasileira, através da geração de empregos, equilíbrio das contas e balança comercial, substituição de importações e garantia de alimentos com preços baixos e de qualidade. Através do avanço tecnológico e da implementação de novas técnicas de produção, o Brasil se posicionou como destaque no suprimento de alimentos para o mundo¹⁶. Apesar disso, é crescente a preocupação da sociedade quanto à sustentabilidade ambiental, tema que vem ganhando importância nos debates técnicos e científicos, gerando a necessidade de criação de uma produção sustentável e limpa.

Os atuais sistemas para produção de alimentos requerem grandes quantidades de insumos, o que pode provocar diversos efeitos negativos para o meio ambiente, sendo esses sistemas configurados e otimizados para satisfazer as demandas econômicas e as necessidades de crescimento da população mundial.

Sendo o Brasil um dos maiores produtores e exportadores de alimentos no mundo, faz-se necessário conhecimento e aplicação das normativas locais e dos países importadores de alimentos produzidos no Brasil. Para garantir a produção com alta qualidade e mínimo impacto ambiental, foram criados selos de qualidade na cadeia produtiva do agronegócio, dentre os quais podem ser destacados:

Rainforest Alliance Certified: Certifica que a produção atende a padrões de sustentabilidade ambiental, social e econômica, garantindo que a agricultura seja feita de forma responsável, com respeito à natureza e aos trabalhadores.

Eureciclo: Certifica que a empresa assume a responsabilidade compartilhada pela reciclagem de suas embalagens, incentivando a logística reversa e a reciclagem de resíduos.

Qualiverde: Certifica que a empresa adota práticas de sustentabilidade em toda a operação, incluindo gestão de resíduos, consumo eficiente de água e energia e uso de ingredientes locais e orgânicos.

Ferramentas como a Análise de Ciclo de Vida são fundamentais na obtenção e manutenção de tais selos de qualidade, utilizando a já citada abordagem “do berço ao túmulo”, onde são levantadas as entradas e saídas que ocorrem em todo ciclo produtivo, garantindo também princípios de transparência fundamentais nesse processo.

O Brasil possui um caso de sucesso na implementação da Análise de Ciclo de Vida e selos como Eureciclo. O inpEV (Instituto Nacional de Processamento de Embalagens Vazias) é uma entidade sem fins lucrativos que representa a indústria fabricante de defensivos agrícolas no Sistema Campo Limpo.

O Sistema Campo Limpo é o programa pioneiro de logística reversa no agronegócio que garante a destinação ambientalmente correta de 100% das embalagens vazias de defensivos agrícolas recebidas (97% recicladas e 3% incineradas).¹⁷ Desde 2017, o Sistema também recebe as sobras pós-consumo de defensivos.

Desde 2002, o Sistema Campo Limpo deu destinação correta a mais de 800 mil toneladas de embalagens de defensivos agrícolas.¹⁷ Deste total, cerca de 95% são reciclados e retornam ao mercado, fazendo do Brasil uma referência mundial em economia circular e agricultura sustentável. Na França, segundo país que mais recicla, 79% dos recipientes têm esse destino. Nos Estados Unidos, um dos maiores produtores agrícolas globais, apenas 33% das embalagens são recicladas.

Para garantir o fechamento do ciclo de vida do produto e sua total utilização, o inpEV disponibiliza materiais educativos em acordo com a legislação vigente, para garantir que todo o produto seja consumido integralmente e que a embalagem do agrotóxico não seja utilizada para outra finalidade, o que poderia causar danos ao meio ambiente e à saúde.



Figura 4. Tríplice lavagem de embalagens de agrotóxicos, procedimento exigido pelo IBAMA e ilustrado pelo inpEV (2025)¹⁷

Os agrotóxicos são elementos fundamentais no agronegócio, garantindo controle e manejo de plantas daninhas, fungos e insetos. Kexuan Yang et al.¹⁸ aplicaram Avaliações de Ciclo de Vida (ACVs) baseadas em processos para promover tecnologias limpas e ecologicamente corretas. Neste contexto, a ACV do “berço ao túmulo” da produção de glifosato foi executada como exemplo para investigar fatores cruciais de produção (materiais ou energia) e os múltiplos impactos ambientais durante os processos de produção. O glifosato é um herbicida não seletivo, amplamente utilizado na agricultura para controlar plantas daninhas. É conhecido por sua eficácia no controle de uma variedade de plantas,

incluindo gramíneas, plantas daninhas de folhas largas e plantas lenhosas. O glifosato age inibindo uma enzima específica nas plantas, impedindo seu crescimento e sobrevivência. Por sua eficácia, é o herbicida mais utilizado na agricultura em todo o mundo, o que aumenta a relevância do trabalho, já que são milhares de toneladas produzidas anualmente.

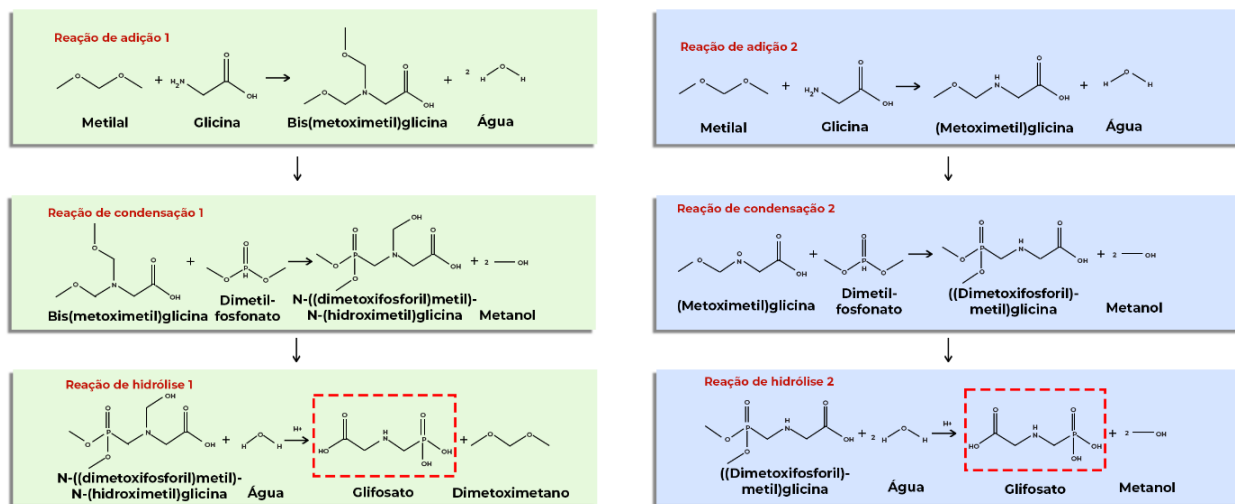


Figura 5. Principais reações químicas do processo de produção do glifosato. Adaptada da referência 18

Seguindo os princípios da ACV, Yang et al.¹⁸ dividiram o estudo nas quatro fases indicadas:

- **Definição dos objetivos e escopo:** avaliar os impactos ambientais de cada subprocesso durante a produção de glifosato. Esquemas de otimização foram propostos para promover tecnologias limpas e o desenvolvimento sustentável da indústria de pesticidas organofosforados.
- **Análise de inventário:** criação de um inventário de fluxo de dados de todos os subprocessos durante o processo de produção. Os dados utilizados nesse estudo foram derivados principalmente dos relatórios de avaliação de impacto ambiental da empresa em questão e incluíram processos de produção, insumos e produtos.

- **Avaliação de impacto:** a avaliação de impacto foi realizada para identificar os impactos ambientais do processo de produção. Devido à toxicidade da produção de glifosato, foram incluídas 11 categorias de impacto ambiental: potencial de acidificação (PA), potencial de eutrofização (PE), potencial de aquecimento global (PAG), potencial de depleção da camada de ozônio (PDO), oxidação fotoquímica (PO), toxicidade humana (HT), ecotoxicidade aquática em água doce (EAC), ecotoxicidade aquática marinha (EAM), ecotoxicidade terrestre (TE), ecotoxicidade em sedimentos de água doce (ESD) e ecotoxicidade em sedimentos marinhos (ESM).

- **Interpretação dos resultados:** neste estudo, ACVs do berço ao túmulo (ou portão, considerando a saída do produto, termo utilizado no artigo) foram conduzidas para processos de produção de glifosato. Metanol e eletricidade (geração a carvão) foram identificados como fatores-chave, com taxas de contribuição para o impacto ambiental de 61,00% e 22,24%, respectivamente. Para reduzir ainda mais o impacto ambiental, foram investigados os impactos ao longo do ciclo de vida de esquemas de otimização, incluindo melhoria de energia e conversão direcionada de águas residuais. Portanto, o efeito desses esquemas otimizados foi demonstrado pelo declínio no valor de normalização para $6,50 \times 10^{-8}$ e $21,10 \times 10^{-8}$, respectivamente.

A confiabilidade dos dados foi verificada usando análise de sensibilidade (AS) e análise de incertezas (UA). Entre eles, os resultados da AS mostraram uma alta correlação linear, já que os valores de R^2 estavam todos acima de 0,98, enquanto a UA demonstrou precisão significativamente maior porque os coeficientes de variação baseados na simulação de Monte Carlo foram muito menores do que aqueles em ACVs de pesticidas anteriores. Portanto, a determinação dos fatores-chave (solvente-metanol e energia-eletricidade) pode ser um complemento importante para o gerenciamento dos fatores de poluição do processo de produção de glifosato, bem como uma estrutura para a aplicação de ACV a montante. Este trabalho ofereceu uma base teórica e orientação prática para facilitar ainda mais a gestão

ambiental e o desenvolvimento sustentável da indústria de organofosforados sob a perspectiva da utilização de recursos residuais.

Geisler et al.¹⁹ estudaram a aplicação da avaliação do ciclo de vida no desenvolvimento de pesticidas através do estudo de caso com dois reguladores de crescimento vegetal de diferentes gerações de produtos, Moddus e Stuntan.

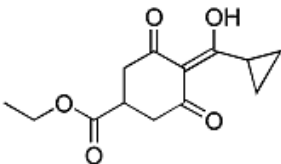
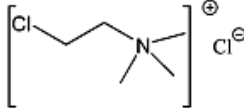
Product name	Moddus	Stuntan
Active substance	trinexapac-ethyl	chlorocholine chloride
Molecular structure		
Introduction in the market	Early 1990s	Early 1960s
Applied dose of active substance, in kg/ha	0.10 – 0.15 (20)	0.4 – 1.2 (21)

Figura 6. Características do Trinexapac-Etil (Moddus) e Cloreto de Clorocolina (Stuntan), os dois ingredientes ativos dos reguladores de crescimento utilizados. Reproduzido da referência 19 com permissão da ACS, copyright 2005

O objetivo do estudo foi propor um método de ACV aplicável nas fases iniciais do desenvolvimento de pesticidas, comparando dois reguladores de crescimento de plantas de diferentes gerações (Moddus e Stuntan) em relação ao seu uso na produção intensiva de trigo. Foram definidas as unidades funcionais com base na dose recomendada para comparação dos pesticidas e realizado cálculo de pontos de equilíbrio ambiental que consideram os impactos da produção e aplicação de pesticidas em relação ao aumento de rendimento das culturas.

Os resultados mostraram que as emissões reduzidas do novo pesticida foram compensadas por impactos mais altos da produção. O Moddus demonstrou menor impacto em toxicidade humana e ecotoxicidade em comparação ao Stuntan, mas seus impactos de produção foram mais altos devido à complexidade de sua estrutura química, o que naturalmente demanda

maior consumo de matérias-primas e energia para produção em escala industrial. A aplicação combinada de Moddus e Stuntan foi considerada ambientalmente preferível em relação ao uso isolado de Stuntan, considerando o melhor cenário entre as características de toxicidade a humanos e impacto ambiental causado pela produção.

Combined Application of Moddus and Stuntan						
	primary energy demand, MJ	global warming potential, kg CO ₂ equiv	Environmental Investment photooxidant creation potential, kg ethene equiv	human toxicity potential, kg 1,4-DCB equiv	freshwater ecotoxicity potential, kg 1,4-DCB equiv	terrestrial ecotoxicity potential, kg 1,4-DCB equiv
median	280	19	5.3×10^{-3}	2.5	0.70	5.3×10^{-4}
95th percentile	340	22	1.3×10^{-2}	10	2.3	2.0×10^{-3}
5th percentile	230	16	3.0×10^{-3}	0.80	0.27	1.6×10^{-4}
Relative Yield Increase ^a Needed To Reach Break-Even Point (wt %)						
median	2.4	2.8	1.9	1.2	0.082 ^b	1.2×10^{-3} ^b
95th percentile	4.0	4.4	15 ^c	46 ^c	2.7	5.1×10^{-2} ^b
5th percentile	1.6	2.0	0.69 ^b	0.12 ^b	0.010 ^b	8.9×10^{-5} ^b
Robustness Factor (dimensionless)						
	2.5	2.3	0.67	0.22	3.7	200
Application of Stuntan Alone						
	primary energy demand, MJ	global warming potential, kg CO ₂ equiv	Environmental Investment photooxidant creation potential, kg ethene equiv	human toxicity potential, kg 1,4-DCB equiv	freshwater ecotoxicity potential, kg 1,4-DCB equiv	terrestrial ecotoxicity potential, kg 1,4-DCB equiv
median	140	9.1	2.9×10^{-3}	1.2	0.54	2.2×10^{-4}
95th percentile	170	11	8.1×10^{-3}	5.2	1.6	9.0×10^{-4}
5th percentile	110	7.8	1.5×10^{-3}	0.39	0.21	6.4×10^{-5}
Relative Yield Increase ^d Needed To Reach Break-Even Point (wt %)						
median	1.2	1.3	1.0	0.61	0.063	5.0×10^{-4}
95th percentile	2.0	2.1	10 ^c	23 ^c	1.3	0.024
5th percentile	0.79	0.98	0.31	0.059	7.6×10^{-3}	3.2×10^{-5}
Robustness Factor (dimensionless)						
	2.0	1.9	0.40	0.17	3.1	170

^a Possible yield increases in field studies range from 1 to 14 wt % (Supporting Information). ^b Yield increase at break-even point is smaller than the minimum yield increase in the field studies. ^c Yield increase at break-even point is larger than the maximum yield increase in the field studies. ^d Possible yield increases in field studies range from 0 to 7 wt % (Supporting Information) ^e Impact score distributions of the environmental investment are displayed, as well as relative yield increases necessary to reach break-even points (eq 2) for selected percentiles of the environmental investment and robustness factors (eq 3).

Figura 7. Avaliação dos pontos de equilíbrio para dois esquemas de aplicação de Moddus e Stuntan. Reproduzido da referência 19 com permissão da ACS, copyright 2005

A ACV é importante para decisões de desenvolvimento de pesticidas, mas deve ser revisada à medida que mais informações se tornam disponíveis. Uma estimativa de impacto ambiental pode ser feita em estágios iniciais de desenvolvimento de novas moléculas; porém, o estudo enfatizou a necessidade de considerar a eficiência ambiental na aquisição de matérias-primas

e ingredientes de formulação. Maximizar o aumento de rendimento e minimizar a dose aplicada são objetivos importantes, mas a eficiência de produção e os impactos da aplicação também devem ser considerados. Com isso, Geisler et al.¹⁹ sugerem que a implementação da ACV nas fases iniciais do desenvolvimento pode ajudar a identificar oportunidades para reduzir impactos ambientais, porém deverá ser revisada ao transferir a tecnologia de síntese de escala piloto para industrial. Em sua tese de doutorado, Dijkman²⁰ abordou a quantificação das emissões de pesticidas na fase de Análise de Inventário de Ciclo de Vida (LCA). O modelo PestLCI (Pesticide Life Cycle Inventory) 2.0 foi desenvolvido para calcular as emissões de pesticidas para ar, água superficial e água subterrânea, com foco em condições europeias, aplicando-o em estudos de caso sobre a emissão de pesticidas em cultivos de kiwi na Nova Zelândia e na produção de cevada na Dinamarca sob condições climáticas atuais e futuras.

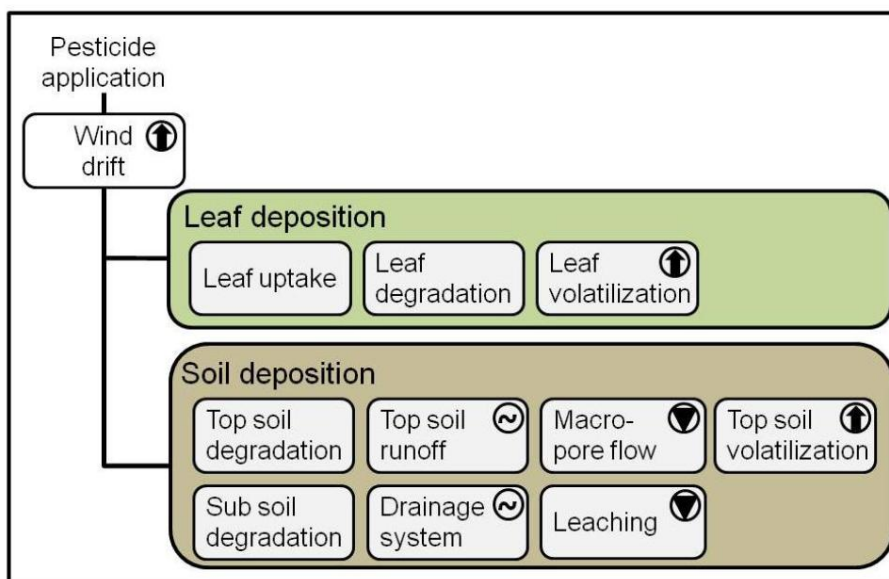


Figura 8. Visão geral da estrutura do modelo PestLCI. As emissões para a atmosfera são indicadas por uma seta para cima, as emissões para águas superficiais por um til e as emissões para águas subterrâneas por um triângulo²⁰

O modelo incluiu processos primários e secundários que determinam como os pesticidas são depositados e como suas emissões são afetadas por fatores como vento e chuva. Atualizações significativas foram feitas em processos como volatilização, escoamento e fluxo de macroporos, que levam a emissões para águas subterrâneas. Comparações foram feitas entre as emissões de pesticidas calculadas pelo PestLCI 2.0 e modelos de avaliação de risco, mostrando que o PestLCI geralmente fornece resultados mais baixos para emissões de água superficial.

Emissões de água subterrânea foram, em alguns casos, mais altas no PestLCI devido à inclusão de fluxo de macroporos. PestLCI 2.0 foi utilizado para calcular as emissões de pesticidas em nove cenários diferentes, levando em consideração variações de solo e clima. As emissões foram dominadas pelo pesticida cianamida. Avaliou-se o impacto ambiental da cevada sob condições climáticas de 2010 e 2050.

As diferenças de impacto foram principalmente impulsionadas por mudanças na produtividade devido ao clima. Concluiu-se que o uso do PestLCI 2.0 pode alterar significativamente a avaliação de impactos tóxicos, especialmente na comparação entre agricultura convencional e orgânica. O modelo PestLCI 2.0 foi considerado uma ferramenta valiosa para modelar as emissões de pesticidas e suas implicações em LCA, e verificou-se que ainda existem oportunidades para aprimoramentos adicionais no modelo.

Aplicação da Análise de Ciclo de Vida (ACV) na Alteração de Prazos de Validade de Agrotóxicos

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta valiosa para avaliar os impactos ambientais associados a produtos ao longo de seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até o descarte final. No contexto da alteração dos prazos de validade de agrotóxicos, a ACV pode ser utilizada para identificar como a extensão desses prazos pode reduzir impactos ambientais e economizar recursos.

Como a ACV se Aplica à Alteração de Prazos de Validade

1. Definição dos Objetivos e Escopo: O primeiro passo na ACV é definir os objetivos claros do estudo. No caso dos agrotóxicos, o objetivo poderia ser avaliar o impacto ambiental da extensão do prazo de validade de 2 para 3 anos, por exemplo, considerando todas as fases da produção, distribuição e descarte.
2. Análise de Inventário: Nesta fase, são coletados dados sobre insumos e emissões associados à produção e ao uso do agrotóxico. Por exemplo, se um agrotóxico normalmente geraria 1.000 toneladas de CO₂ durante sua produção, uma extensão da validade poderia reduzir a necessidade de produção em um terço, economizando aproximadamente 100 toneladas de CO₂ anualmente.
3. Avaliação de Impacto: Os dados do inventário são avaliados para quantificar os impactos ambientais. Utilizando dados de ACV, estudos têm mostrado que a extensão do prazo de validade pode diminuir as emissões de gases de efeito estufa.
4. Interpretação dos Resultados: Os resultados da avaliação de impacto são interpretados para informar os tomadores de decisão. Se a ACV evidencia que uma extensão de validade reduz as emissões e o uso de recursos naturais, isso pode ser um argumento forte para que os reguladores reavaliem as diretrizes dos prazos de validade, oferecendo assim benefícios ambientais significativos.

Exemplos Quantitativos de Estudos Correlatos

Estudo de impacto sobre o uso de agrotóxicos: Em 2024, um estudo conduzido por Yang et al.¹⁸ analisou a produção de glifosato e mostrou que a redução do prazo de validade em 2 para 1 ano, em determinadas condições, poderia resultar em uma geração de resíduos de até 20% a mais, implicando uma maior quantidade de produtos químicos a serem incinerados. Este estudo utilizou a ACV para quantificar que, por cada tonelada de glifosato cujo prazo foi

alterado, haveria um impacto equivalente a 5 toneladas de CO₂ a mais na atmosfera devido ao aumento no número de incinerações e na produção adicional de agrotóxicos.

Sistemas de Logística Reversa: Um estudo brasileiro sobre o Sistema Campo Limpo,¹⁷ que analisa a destinação de embalagens de agrotóxicos, indicou que a implementação de práticas de responsabilidade ambiental associadas à ACV poderia permitir que as empresas desfrutassem de uma redução média de 15% nas emissões dessas operações. Se esse modelo fosse aplicado ao prolongamento do shelf-life, o potencial de reduzir as emissões de CO₂ associado ao transporte e descarte de resíduos se tornaria ainda mais significativo.

REFLEXÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na definição de economia circular do Parlamento Europeu, deve-se pensar em um modelo de produção e consumo que envolva a partilha, o aluguel, a reutilização, a reparação, a renovação e a reciclagem de materiais e produtos existentes, sempre que possível, para maximizar o ciclo de vida dos produtos. Nessa revisão de literatura, encontrou-se poucos dados sobre análise de ciclo de vida aplicada ao agronegócio, o que é surpreendente dada a relevância dessa atividade socioeconômica.

Antes de pensar em reutilização e/ou reciclagem, deve-se considerar a maximização do uso do produto durante o período de validade. Como na maioria dos países, a validade de agrotóxicos é definida com base em estudos acelerados, garantindo cerca de dois anos de validade a partir de sua data de fabricação, faz-se necessário um estudo mais detalhado para alinhar o chamado prazo de validade regulatório com o técnico, que é definido através de testes físico-químicos, de estabilidade e, em alguns casos, de aplicação, que garantem a qualidade do produto em tempo e condições reais de uso.

Ao aplicar ferramentas como a Análise de Ciclo de Vida, considerando todas as entradas e saídas do produto desde seu processo produtivo até o descarte, pode-se verificar em detalhes

o potencial impacto ambiental desde a produção dos agrotóxicos. Devido à enorme quantidade produzida anualmente, utiliza-se uma grande quantidade de insumos químicos, energia para fabricação, embalagens e emissão de gases que podem contribuir para o efeito estufa na produção, transporte e, posteriormente, na incineração de produtos não utilizados. Na análise de inventário, deve-se considerar o tempo de produção de todos os insumos para síntese do ingrediente ativo, componentes da formulação, materiais de embalagens (primárias e secundárias), da formulação do agrotóxico e do tempo necessário para que o produtor agrícola receba esse material a tempo da janela de aplicação. Sabe-se que há casos de emergências fitossanitárias em que pragas não esperadas em determinados cultivos podem ocorrer, e a falta de agrotóxicos no período necessário de aplicação pode causar prejuízos econômicos da ordem de milhões; além do prejuízo ao produtor, o consumidor também sofre nesses casos com a escassez e aumento de preços dos alimentos.

Ao aprofundar a análise de inventário, é possível verificar que em alguns casos o tempo para que o agrotóxico seja fabricado em seu país de origem e entregue ao consumidor ultrapassa alguns meses e pode chegar a um ano, que já é a metade do prazo de validade determinado com base em testes de estabilidade acelerada. Com isso, a não ocorrência de alguma praga agrícola para a qual o agrotóxico foi adquirido pode causar o vencimento do produto sem que sequer sua embalagem tenha sido aberta.

Na avaliação de impacto, quando ocorre um cenário como o descrito acima, alguns países sequer permitem que se faça uma revalidação do material, que deve ser enviado para incineração. Isso abre espaço para que o produtor, que investiu um valor considerável na aquisição do agrotóxico, considere utilizá-lo mesmo vencido e sem qualquer controle da qualidade do material, o que pode causar mais danos ao meio ambiente.

Grandes produtores rurais, em geral, possuem estrutura para realizar controle de estoque e o processo de logística reversa nesses casos, devolvendo ao fabricante o material vencido para que possa ser analisado e revalidado (em países onde esse processo é permitido por legislação). Porém, deve-se considerar também o impacto dessa atividade não somente do

ponto de vista ambiental, mas também financeiro: o frete reverso, análise e novo frete em caso de sucesso na revalidação aumentam o custo final do produto, o que conseqüentemente eleva o preço do alimento ao consumidor.

Na eventual interpretação de resultados de uma Análise de Ciclo de Vida de agrotóxicos direcionada ao seu prazo de validade, espera-se uma redução significativa de impacto ambiental apenas alinhando o prazo de validade regulatório com o técnico, simplesmente pela maximização do tempo de uso do produto durante seu ciclo de vida, onde suas propriedades de eficácia e técnicas podem ser garantidas pelo fabricante. Portanto, seria interessante a todos os envolvidos na cadeia que tais análises sejam feitas e disponibilizadas, quando possível, garantindo também o princípio de transparência e mostrando que o objetivo de colocar um produto no mercado é que seu máximo potencial benéfico à sociedade seja garantido, do ponto de vista técnico e econômico.

Para demonstrar a redução do impacto ambiental ao estender o *shelf-life* de pesticidas de dois para três anos, por exemplo, podemos considerar vários fatores, como a diminuição das emissões de pesticidas e a redução do uso de novos produtos químicos. Com um *shelf-life* mais longo, a quantidade de pesticidas produzidos e transportados pode ser reduzida. Isso não só diminui as emissões associadas à produção e transporte, mas também reduz o uso de recursos naturais como água e energia em sua produção. Isso pode levar a uma análise econômica onde os custos de produção e aplicação são comparados com os benefícios ambientais de uma menor emissão de pesticidas.

A diminuição das emissões ambientais na produção e descarte de agrotóxicos vencidos implicaria menos emissões de pesticidas para o solo, água e ar, o que pode resultar em impactos ambientais menores. Isso é especialmente relevante em contextos de avaliação de ACV, onde as emissões de pesticidas são um fator crítico. Além disso, a extensão do *shelf-life* pode ajudar os agricultores a estarem mais alinhados com políticas públicas e regulamentações que exigem práticas agrícolas sustentáveis e a redução do uso de produtos químicos.

A aplicação da Análise de Ciclo de Vida no contexto da alteração de prazos de validade de agrotóxicos mostra-se vital não apenas para identificar os impactos ambientais, mas também para fundamentar decisões regulatórias que podem levar a práticas mais sustentáveis. Através de dados quantitativos e análises detalhadas, a ACV pode ajudar a demonstrar como a extensão dos prazos de validade pode não só ser viável, mas também benéfica do ponto de vista econômico e ambiental.

REFERÊNCIAS

1. FAO. 2024. World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2024. Rome.
<https://doi.org/10.4060/cd2971en>
2. [Sustainable Development Goal 2: Fome zero e agricultura sustentável | As Nações Unidas no Brasil](#), acessada em abril 2025.
3. [Economia circular: definição, importância e benefícios | Temas | Parlamento Europeu](#), acessada em abril 2025.
4. Navarro, A. C.; Ferreira, D. H. L.; Sugahara, C. R.; Conti, D. de M. *Revista Visão: Gestão Organizacional* **2021**, 10, 17-23. DOI: 10.33362/visao.v10i2.2754.
5. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4074.htm , acessada em abril 2025.
6. Morandi, M. A. B.; Packer, A. P.; Mendes, R.; Tanure, J. P. M.; Andrade, C. A. de; MENEZES, C. (ed.). *Agricultura & meio ambiente: a busca pela sustentabilidade*. Brasília, DF: Embrapa, 2024. 1010 p. il. color. cap. 23. part. 4. Disponível em:
<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1171804>
7. [Relatórios de comercialização de agrotóxicos — Ibama](#), acessada em março 2025.
8. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/lei/114785.htm, acessada em abril 2025.
9. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/18078compilado.htm, acessada em abril 2025.
10. https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2001/rdc0134_13_07_2001.html, acessada em maio 2025.

11. Oriqui, L.R.; Mori, M.; Wongtschowski, P. Shelf-life para a indústria química, 1. ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
12. https://croplife.org/wp-content/uploads/2021/04/CLI-TM-17-Guideline-for-Shelf-Life_FINAL.pdf, acessada em março 2025.
13. <https://www.cipac.org/index.php/component/content/article/37-mt-46-4-accelerated-storage-procedure?catid=2:uncategorised&Itemid=210>, acessada em abril 2025.
14. [ACV — Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia](#), acessada em abril 2025.
15. Roy, P.; Nei, D.; Orikasa, T.; Xu, Q.; Okadame, H.; Nakamura, N.; Shiina, T. *J. Food Eng.* **2009**, *90*, 1-10.
16. Claudino, E.S.; Talamini, E. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **2013**, *17*, 77–85, 2013.
17. <https://www.sistamacampolimpo.org.br/inpev/> , acessada em abril 2025.
18. Yang, K.; Jing, D.; Wang, X.; Zhou, S.; Zhang, B.; Qin, L.; Wang, Q.; Jing, G.; Li W.; Li, S. *J. Env. Manag.* **2024**, *350*, 119584.
19. Geisler, G.; Hellweg, S.; Hofstetter, T.; Hungerbuehler, K. *Environ Sci Technol.* **2005**, *39*, 2406-13.
20. Dijkman, T. J. Modelling of pesticide emissions for Life Cycle Inventory analysis: Model development, applications and implications. DTU Management Engineering. 2013. Disponível em: [Modelling_of_pesticide_emissions.pdf](#)