

## CAPÍTULO 4

# AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE BIOPRODUTOS A PARTIR DOS RESÍDUOS DA MANGA EM NÍVEL LABORATORIAL

*Anne Karolyne Pereira da Silva*

*Maria Cléa Brito de Figueirêdo*

*Francisco Casimiro Filho*

### Resumo

O processamento industrial de manga é responsável pela geração de grandes volumes de resíduos. No entanto, esses resíduos podem ser usados para extrair diversos bioprodutos, como: pectina e compostos fenólicos, a partir da casca; lignina e celulose, a partir do tegumento; e, amido, gordura e compostos fenólicos, a partir da amêndoa. Processos alternativos capazes de extrair esses bioprodutos foram desenvolvidos em escala laboratorial. Dessa forma, o objetivo deste estudo foi comparar processos alternativos para extração de bioprodutos a partir da casca, tegumento e amêndoa da manga. Adotaram-se as recomendações das ISO 14040 e 14044 (2006), que padronizam estudos de ACV. O escopo do estudo foi do berço ao portão. Os métodos de avaliação de impactos usados foram o ILCD Midpoint 2011 (mudanças climáticas, acidificação, eutrofização de água doce e marinha, ecotoxicidade, toxicidade humana cancerígena e não cancerígena) e o AWARE (escassez hídrica). Após o cálculo dos impactos ambientais, realizou-se a análise de incerteza pelo método de Monte Carlo. Os resultados mostraram que os processos com menor potencial de impacto para maioria das categorias analisadas foram: i) amêndoa: extração isolada de amido; ii) tegumento: extração acetosolv utilizando equipamentos alternativos; iii) casca: extração por Soxhlet/Ultrassom.

**Palavras-chave:** Avaliação do ciclo de vida. Valorização de resíduos. Ecodesign

## Introdução

A manga é uma das principais frutas produzidas no Brasil e em 2018 a produtividade brasileira dessa fruta chegou a 20 toneladas por hectare com um faturamento de R\$ 1.335.322 milhões (KIST et al., 2020). Uma vez que a maior parte dessa produção é demandada pelo mercado interno e direcionada para o processamento industrial, sabendo ainda que cerca de 40-45% do peso da manga é composto por casca e semente, estima-se que foram gerados, no mínimo, 0,5 milhão de toneladas de resíduos em 2018. Assim, o processamento de manga tem elevado potencial para geração de resíduos. Na perspectiva da economia circular, esses resíduos devem ser explorados para extração de bioprodutos de interesse econômico (Arora et al., 2018).

A utilização mais eficiente de biomassas, como ocorre em biorrefinarias, é uma tendência atual em tecnologias de conversão de biomassa, em que produtos como alimentos, rações, bioenergia (energia, calor e biocombustíveis para transporte) e produtos de base biológica (produtos químicos, materiais) podem ser produzidos juntos (Ahlgren et al. 2013).

Diferentes conceitos de biorrefinaria existem hoje, com diferentes caminhos para a conversão de biomassa e diferentes produtos finais. Pode-se dar como exemplo em funcionamento usinas de cana-de-açúcar que produzem açúcar, etanol e bioeletricidade (EMBRAPA, 2011).

Para avaliar os impactos ambientais de biorrefinarias usa-se em geral a Análise do ciclo de Vida (ACV). No entanto, Ahlgren et al. (2013) explica que esses estudos variam em demasia nas formas como aplicam a metodologia, levando a inconsistências. Portanto, esclarecimentos e recomendações nas principais questões relacionadas à ACV de biorrefinaria são necessárias. Em especial na escolha da unidade funcional (UF) desses sistemas, uma vez que, estes produzem mais de um produto, dificultando a escolha da função principal.

A UF quantifica a função do sistema de produto e fornece a unidade de referência. A escolha da UF afeta fortemente as conclusões do estudo e deve ser definida de acordo com os objetivos e escopo do estudo. Ahlgren

et al. (2013) identificaram 4 diferentes categorias de UF de biorrefinarias: Uso de matéria-prima, produto único, função do produto único, ou combinação de produtos.

A categoria de unidade funcional baseada em insumos 'uso de matéria-prima' é adequada para determinar o melhor uso da terra ou biomassa, considerando que estes são recursos limitados. Também pode ser útil ao analisar maneiras diferentes de lidar com resíduos.

Se o objetivo é comparar os produtos de uma biorrefinaria, os próprios produtos ou a função dos produtos podem ser usados como a unidade funcional. No entanto, as biorrefinarias produzem vários produtos úteis, o que significa que a seleção de um produto principal pode ser difícil.

O uso de várias funções (por exemplo, uma combinação de produtos de saída ou 1 biorrefinaria) como a unidade funcional é bastante comum e pode ser muito útil ao identificar pontos críticos, comparar o fornecimento das mesmas funções com base em combustíveis fósseis ou comparar plantas autônomas com integradas sistemas. No entanto, pode ser uma desvantagem em algumas situações, pelo menos ao comunicar os resultados. Além disso, os resultados agregados têm capacidade limitada de comparação com outros estudos; frequentemente, alguém se interessa por um dos produtos, por exemplo, ao comparar diferentes biocombustíveis.

Nemecek et al. (2011) sugeriram ainda como UF que agrega várias funções a receita obtida, uma vez que esta é a principal motivação para produtores. O objetivo é minimizar os impactos ambientais por unidade de moeda, de forma a maximizar a ecoeficiência.

Para finalizar, é importante escolher uma unidade funcional compatível com o objetivo do estudo. Às vezes, um estudo pode ter vários objetivos; neste caso, diferentes unidades funcionais podem ser usadas para cumprir o objetivo. No entanto, é importante destacar quais unidades funcionais atendem a quais objetivos.

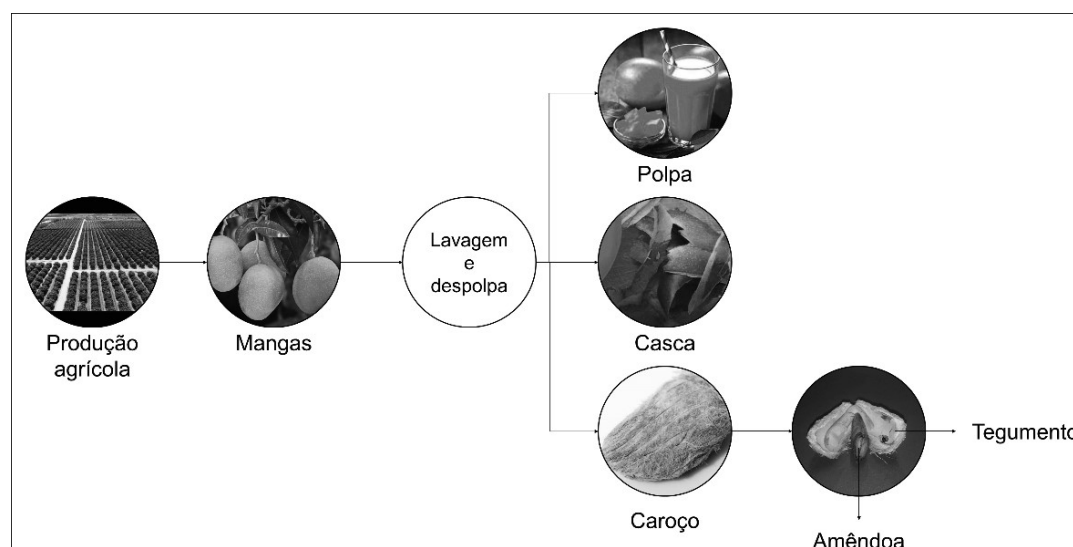
Portanto, este trabalho utilizará duas unidades funcionais distintas, uma em função da matéria-prima processada e a outra da receita, na comparação de processos alternativos de extração dos bioprodutos a

partir dos coprodutos da manga, identificando os de menor impacto ambiental em nível laboratorial.

## Materiais e Métodos

Este trabalho compara os impactos ambientais de processos alternativos de extração de bioprodutos a partir dos coprodutos – casca e caroço – da manga (Figura 1), apoiando a escolha dos processos com melhor desempenho ambiental.

**Figura 1:** Fluxograma simplificado do processamento de manga



Foram comparados, em escala laboratorial, processos alternativos e tecnicamente viáveis para extração de: i) pectina e compostos fenólicos, a partir da casca (Cavalcante, 2018); ii) lignina e celulose, a partir do tegumento (Verçosa, 2016; Silva et al., 2019); e iii) amido, a partir da amêndoa (Cordeiro et al., 2014; Melo et al., 2019). O quadro 1 abaixo contém um resumo dos processos que foram comparados.

**Quadro 1:** Processos avaliados por tipo de coproduto

<b>Matéria-prima processada</b>	<b>Bioprodutos</b>	<b>Cenário base</b>	<b>Cenário alternativo</b>
Tegumento (T)	Lignina e celulose	Extração com equipamentos convencionais	Extração com equipamentos alternativos
Amêndoa (A)	Amido	Extração isolada	Extração integrada
Casca (C)	Pectina e fenólicos	Soxhlet/Ultrassom	Soxhlet/ESP ESP/ESP ESP/Ultrassom

O processamento do tegumento foi avaliado comparando-se a extração de lignina e de celulose por uma polpação *acetosolv* (processo base). A partir da análise do cenário base, identificaram-se as etapas com maior impacto ambiental, com a finalidade de propor alternativas que serviram de suporte para a elaboração de um cenário de produção.

Para o processamento da amêndoa, compararam-se duas formas de obtenção do amido, uma que extrai amido isoladamente (Cordeiro et al., 2014), e outra que extrai além do amido, gordura e compostos fenólicos (extração integrada) (Melo et al., 2019).

Com relação ao processamento da casca, avaliou-se a extração de compostos fenólicos por Soxhlet e por solvente pressurizado (ESP). Para a pectina avaliou-se a extração por Ultrassom e por ESP.

## Dados experimentais

Os inventários dos processos de extração de bioprodutos e de despolpa da manga foram montados a partir de dados primários, os quais foram coletados no período de julho de 2018 a janeiro de 2019, nos laboratórios e Planta Piloto da Embrapa Agroindústria Tropical.

As mangas (*Mangifera indica* L.) cv. Tommy Atkins foram adquiridas na Central de Abastecimento do Ceará (CEASA) as quais foram higienizadas com uma solução de cloro (200ppm). Em seguida, as mangas foram levadas a uma despolpadeira elétrica para partição da polpa e dos

coprodutos (cascas e caroços). Os caroços da manga são compostos pelo tegumento (parte externa) e pela amêndoa (parte interna) (figura 1). Por isso, realizou-se a separação manual da amêndoa e do tegumento.

## Processamento da amêndoa

Foram considerados dois processos para a avaliação do processamento da amêndoa: o primeiro extrai somente amido (Cordeiro et al., 2014), enquanto o segundo extrai conjuntamente amido, gordura e fenólicos (Melo et al., 2019).

De acordo com Cordeiro et al. (2014), realizou-se inicialmente o corte das amêndoas que foram imersos em solução de metabissulfito de sódio 0,5% (m/v). As amêndoas foram drenadas após 48h e levadas para serem trituradas junto com água. A pasta obtida dessa trituração foi filtrada usando uma peneira. O retido na peneira foi novamente levado ao triturador com água e em seguida filtrado. Esse procedimento foi repetido até obtenção de um filtrado translúcido. Na fração amilácea foi adicionada uma solução de NaOH 0,2% (m/v). Após 2h, foi adicionado HCl 0,5% (v/v) à mistura. Essa mistura foi centrifugada, repetidas vezes, sempre adicionando água ao precipitado. Na sequência, álcool absoluto foi adicionado ao amido com agitação magnética por 1h. Em seguida, essa mistura permaneceu em repouso para a decantação de amido. Este amido decantado foi lavado com água. Por fim, o amido foi secado, moído e armazenado.

De acordo com o processo proposto por Melo et al. (2019), realizou-se inicialmente a trituração das amêndoas, a secagem e a moagem para obtenção da farinha de amêndoa.

A partir dessa farinha, extraiu-se, primeiramente, a gordura. O processo de extração desse produto aconteceu no sistema Soxhlet, utilizando hexano como solvente. A mistura de solvente e gordura foi colocada no evaporador rotativo para concentração da amostra e recuperação do solvente.

A massa residual obtida nessa etapa anterior de desengorduramento foi seca em estufa, removendo o solvente residual. Essa massa residual foi colocada no sistema Soxhlet para uma nova extração, agora de fenólicos.

Para tanto, utilizou-se o solvente orgânico metanol. O extrato metanólico que saiu do Soxhlet foi concentrado no evaporador rotativo. A etapa posterior foi filtrar para remoção de impurezas.

O resíduo restante da extração de fenólicos foi colocado na estufa, removendo o solvente residual. Em seguida, uma amostra desse material foi misturada com água em um homogeneizador. A pasta obtida nessa etapa foi peneirada, lavando até que a coloração do filtrado fique mais clara. Ao filtrado, adicionou-se uma solução de hidróxido de sódio 0,2%. Essa mistura foi mantida em agitação magnética. Encerrada a etapa de agitação, a amostra ficou em repouso para a decantação do amido bruto e separação do sobrenadante, que foi neutralizado e descartado. O amido que decantou foi centrifugado, seguido por diversas remoções de impurezas e lavagens. Depois, o amido foi filtrado, secado e moído. Esse amido foi, então, branqueado com uma solução alvejante. A solução obtida foi centrifugada e lavada. Então, filtrou-se o amido branqueado resultante, desidratou-se e triturou-se.

## Processamento do tegumento

O processamento do tegumento conta com a extração de lignina, processo proposto por Verçosa (2016), e com a extração de celulose, proposto por Silva et al. (2019).

Primeiramente, o tegumento foi desidratado, cortado em quadradinhos e moído.

Com isso, uma amostra do pó do tegumento foi colocada juntamente à uma solução *acetosolv* (93% ácido acético, 0,3% ácido clorídrico e 6,7% água) em um balão de fundo chato. O balão foi, então, levado a um sistema de refluxo. Desse sistema de refluxo, obteve-se uma polpa que foi filtrada para separar as fibras celulósicas do licor negro ácido, que contém lignina.

As fibras celulósicas foram lavadas e secadas na estufa. Na sequência, as fibras foram trituradas e branqueadas para retirar lignina e hemicelulose remanescente, utilizando solução alvejante (NaOH 4% (m/v) e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30% (v/v)). Depois do branqueamento, as fibras foram lavadas e secadas em estufa.

Já o licor negro foi colocado no rotaevaporador para concentrá-lo e recuperar o ácido acético (620ml). O licor concentrado obtido foi misturado com água destilada quente e deixada em repouso por 24 horas para que ocorresse a precipitação da lignina. Passado esse período, filtrou-se a lignina precipitada à vácuo. A lignina obtida foi lavada com água, posteriormente, colocada na estufa. Dessa forma, obteve-se a lignina seca.

Visando otimizar o consumo de energia de equipamentos com alta demanda, evaporador rotativo e filtro à vácuo, avaliou-se a possibilidade de substituição desses equipamentos.

O evaporador rotativo é usado na etapa de recuperação do solvente para separar o solvente da amostra, concentrando-a. O funcionamento desse equipamento é considerado simples e consiste em evaporar e condensar os materiais para separar diferentes substâncias. No entanto, a sua eficiência é baixa devida à alta dissipação de calor para o meio, fazendo com que o consumo de energia elétrica seja elevado. Assim, foi proposto, em reunião com especialistas em processos químicos, a substituição do evaporador rotativo pelo evaporador múltiplo efeito.

O evaporador múltiplo efeito apresenta como vantagem o aproveitamento dos vapores gerados, ou seja, o vapor produzido no efeito anterior é usado como meio de aquecimento para o próximo efeito, de forma que a alimentação acontece apenas no primeiro efeito.

Na etapa de lavagem e filtração, utiliza-se um filtro à vácuo, cujo funcionamento baseia-se na remoção da resistência à queda do líquido, acelerando o processo. Apesar de ser mais eficiente que filtros comuns, não é recomendado para filtrar grandes quantidades de mistura. Devido a elevada demanda por filtração nessa etapa, há um excessivo consumo de energia. Assim, optou-se por substituir o filtro a vácuo por filtro prensa nessa etapa.

O filtro prensa através de uma série de placas projetadas e alta pressão, aumenta tanto a área quanto a taxa de filtração. Os sólidos ficam retidos nas placas, enquanto o líquido escoar pelos dutos, sendo direcionado para fora do filtro.



## Processamento da casca

O processamento da casca conta com a extração respectiva de compostos fenólicos e pectina. Os procedimentos de extração foram desenvolvidos por Cavalcante (2018).

Para a extração de fenólicos, em ambos processos, as cascas da manga foram inicialmente secadas e moídas, obtendo-se uma farinha de casca de manga.

A condição de extração dos fenólicos pelo sistema Soxhlet aconteceu adicionando-se uma amostra de farinha de casca em um cartucho de extração e metanol P.A em um balão de fundo redondo, durante 9h. Enquanto a extração por ESP ocorreu em um extrator automático sob pressão e temperatura elevadas. Inicialmente, adicionou-se uma amostra de farinha de casca de manga com terra diatomácea, que foram colocados em uma célula extratora, durante 1h utilizando etanol 50% como solvente.

Para a extração da pectina por Ultrassom, foram misturadas a massa residual, após a extração de fenólicos, com uma solução de ácido cítrico 1%. A mistura foi colocada no banho ultrassom por 10min. O extrato contendo pectina foi direcionado para a centrífuga, também por 10min. O sobrenadante que saiu da centrífuga foi refrigerado por 24h. Ao sobrenadante refrigerado adicionou-se álcool etílico 96%, após 1h de repouso ocorreu a precipitação da pectina em forma de gel. Por filtração, o gel foi separado e, em seguida, liofilizado para se obter a pectina seca.

A extração da pectina por ESP utilizou a massa residual após a extração dos fenólicos, a qual foi colocada em um extrator automático sob pressão e temperatura elevadas. Foram aplicadas as mesmas condições de extração de CF, exceto para o solvente, sendo utilizado ácido cítrico 1%. Obteve-se dessa fase o extrato de pectina que foi refrigerado e, em seguida, filtrado, misturado com álcool etílico, filtrado novamente e liofilizado.

## Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A avaliação dos impactos ambientais foi realizada por meio da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), seguindo as normas NBR ISO 14040 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura; e NBR ISO 14044 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.

O escopo do estudo foi do berço ao portão, sendo considerados os processos de produção agrícola e transporte de manga, produção e transporte dos reagentes químicos e da energia, despolpa da manga, extração de bioprodutos a partir dos coprodutos da manga, e tratamento de efluentes e de resíduos dos processos de extração. No caso dos efluentes líquidos foi considerado um tratamento genérico, visto que, não foi possível fazer a análise desses efluentes. Para os resíduos sólidos, por serem orgânicos, considerou-se como tratamento a compostagem.

A produção agrícola da manga foi contemplada nesse estudo, apesar de atualmente os coprodutos da manga serem resíduos do processo de despolpa da manga. Essa decisão foi tomada considerando que no futuro próximo, esses resíduos passarão a ter valor econômico para as indústrias de despolpa, passando a integrar o ciclo de vida dos bioprodutos obtidos a partir dessas biomassas residuais.

Os dados primários foram coletados nos processos de extração de bioprodutos e de despolpa da manga no período de julho de 2018 a janeiro de 2019, nos laboratórios e Planta Piloto da Embrapa agroindústria Tropical.

Observou-se que era necessário na comparação de cenários alternativos considerar um mesmo tempo de produção para todos os processos. Para padronização dos dados referentes a consumos, emissões e produção no tempo estipulado, seguiram-se dois passos: 1º) padronização do rendimento do processo para o tempo determinado; 2º) padronização das quantidades de insumos e emissões para o rendimento do tempo determinado. Adotou-se como tempo padrão 1 mês de extração para a comparação dos processos de extração dos bioprodutos em nível de laboratório.

Já os dados secundários foram coletados para os seguintes processos: produção e transporte de manga, produção e transporte dos insumos utilizados nos processos de extração (energia e produtos químicos) dos bioprodutos, e tratamento de efluentes e resíduos. Esses inventários foram obtidos na base de dados ecoinvent v.3.6 (Frischknecht et al., 2007).

Foram utilizadas duas UFs, uma baseada na matéria-prima processada, 1Kg de casca, tegumento ou amêndoa, e outra baseada na saída dos bioprodutos, 1US\$ obtido com sua respectiva venda.

O procedimento de alocação foi necessário no processo de despolpa, em que são obtidas a polpa, casca e caroço (tegumento e amêndoa). Adotou-se como critério a massa dos produtos. A tabela 2 mostra o percentual de alocação da despolpa.

**Tabela 2:** percentual de alocação dos coprodutos da despolpa

<b>Despolpa</b>		
<b>Coproducto</b>	<b>Qtde (kg)</b>	<b>Alocação mássica (%)</b>
Polpa	58	89,9
Casca	1,8	2,8
Tegumento	2,9	4,5
Amêndoa	1,8	2,7
<b>Total</b>	<b>64,5</b>	<b>100</b>

Os impactos ambientais foram analisados pelo método ILCD Midpoint 2011 (European Commission, 2011) para as seguintes categorias: mudanças climáticas (MC), acidificação (A), eutrofização de água doce (EAD), eutrofização marinha (EM), ecotoxicidade (ECT), toxicidade humana cancerígena (THC) e toxicidade humana não cancerígena (THNC). Já o impacto na escassez hídrica (EH) foi avaliado pelo método AWARE (Boulay et al., 2018). Foi utilizado o software SimaPro versão 9.0.0.3.5.

Após o cálculo dos impactos ambientais realizou-se a análise de incerteza pelo método de Monte Carlo na avaliação comparativa dos processos alternativos para geração de bioprodutos. Para gerar o desvio-padrão requerido pelo método de Monte Carlo utilizou-se a Matriz Pedigree (Frischknecht et al., 2007). Considerou-se que todas as variáveis seguem distribuição log-normal de probabilidade (Goedkoop, 2008).

## Resultados e Discussão

Identificação dos processos de extração com menor impacto ambiental

Na tabela 3 são apresentadas a quantidade de matéria-prima processada e a receita obtida por processo de extração. Para o processamento da amêndoa, nota-se que a quantidade de matéria-prima processada na extração isolada foi 80 vezes superior à extração integrada, e a receita obtida 2 vezes maior que a integrada. No processamento do tegumento, a extração com equipamentos alternativos processou 16% mais matéria-prima e obteve 4% mais receita em relação a extração com equipamentos convencionais. Quanto ao processamento da casca, percebe-se que quando a extração começa pelo Soxhlet a quantidade de matéria-prima processada aumenta em mais de 6 vezes e a receita obtida é pelo menos dobrada.

**Tabela 3:** Quantidade de matéria-prima processada e receita obtida por tipo de coproduto

<b>Coproduto processado</b>	<b>Bioprodutos</b>	<b>Processo de extração</b>	<b>Quantidade de MP processada (Kg/mês)</b>	<b>Receita (US\$/mês)</b>
<b>Amêndoa</b>	Amido	Extração isolada	10,8	0,21
		Extração integrada	0,13	0,13
<b>Tegumento</b>	Lignina e celulose	Extração acetosolv com equipamentos convencionais	0,31	0,25
		Extração acetosolv com equipamentos alternativos	0,36	0,26
<b>Casca</b>	Pectina e fenólicos	Soxhlet/Ultrassom	1,8	0,04
		ESP/ESP	0,28	0,02
		Soxhlet/ESP	1,8	0,05
		ESP/Ultrassom	0,28	0,01

A seguir apresentam-se 3 tabelas, a primeira contém a comparação entre os processos de extração do amido, a segunda entre os processos de extração da lignina e celulose, e a última entre os processos de extração da pectina e fenólicos. Nas tabelas, os resultados estão divididos por UF e mostram o impacto total de cada processo por categoria de impacto, a comparação percentual entre os processos e o resultado da análise de erro. Na comparação entre os processos é mostrado se houve redução ou aumento percentual do processo alternativo (B) em relação ao de referência (A).

A tabela 4 mostra a comparação entre os processos de extração isolada e integrada do amido. Observa-se que a extração integrada de amido aumentou o impacto na maioria das categorias, utilizando a UF por receita, e em todas as categorias, utilizando a UF por matéria-prima processada. Esse resultado é explicado pela maior demanda de energia da extração integrada. É importante salientar que mesmo que o estudo de Melo et al. (2019) tenha demonstrado que a extração integrada de amido possui viabilidade técnica e bom rendimento, obtendo os outros coprodutos, a análise ambiental mostrou que é mais vantajoso ambientalmente a extração isolada de amido. Como foi possível notar, as diferentes UFs (por receita e por matéria-prima processada) levaram à escolha dos mesmos processos de extração como menos impactante ambientalmente. A análise de incerteza mostrou que o processo alternativo para a extração de amido não apresentou melhoria no desempenho ambiental com nível de confiança acima de 95% em no mínimo 4 categorias de impacto.

**Tabela 4:** Resultados da comparação dos processos de extração do amido, por receita e por matéria-prima processada

UF	Categorias de impacto	Unidade	Amêndoa				
			Ex. isolada (A)	Ex. integrada (B)	Redução/Aumento (%)	A < B (%)	A > B (%)
Por receita	MC	kg CO <sup>2</sup> eq	28	164	83	100	0
	THNC	CTUh	0,00004	0,00002	42	44	56
	THC	CTUh	0,000003	0,00001	48	87	13
	A	molc H <sup>+</sup> eq	0,4	0,8	45	100	0
	EAD	kg P eq	0,02	0,04	53	100	0
	EM	kg N eq	0,1	0,1	7	70	30
	ECT	CTUe	1239	1836	32	97	3
	EH	m <sup>3</sup>	374	65	83	57	43
Por matéria-prima processada	MC	kg CO <sup>2</sup> eq	0,55	162	99,7	100	0
	THNC	CTUh	0,0000007	0,000021	97	61	39
	THC	CTUh	0,00000007	0,000006	99	100	0
	A	molc H <sup>+</sup> eq	0,009	0,79	99	100	0
	EAD	kg P eq	0,0004	0,04	99	100	0
	EM	kg N eq	0,002	0,11	98	100	0
	ECT	CTUe	24	1820	99	100	0
	EH	m <sup>3</sup>	7	65	89	55	45
Legenda:			Diferença significativa entre processos em 95% das comparações com Monte Carlo				
			Diferença não significativa entre processos em 95% das comparações com Monte Carlo				

A comparação entre os processos de extração acetosolv com equipamentos convencionais e alternativos da lignina e celulose está na tabela 5. O processo alternativo foi elaborado a partir da substituição de equipamentos que exercem a mesma função, porém com menor consumo de energia. Nesse caso, o processo alternativo possibilitou a redução do

impacto em todas as categorias de impacto, utilizando ambas UFs, devido à redução do consumo de energia elétrica. A análise de erro confirmou que a extração acetosolv com equipamentos alternativos apresentou melhoria no desempenho ambiental nas categorias MC, THNC, A, EAD, EM e ECT, com nível de confiança acima de 95%.

**Tabela 5:** Resultados da comparação dos processos de extração da lignina e celulose, por receita e por matéria-prima processada

UF	Categorias de impacto	Unidade	Tegumento				
			Ex. acetosol c/ eq. Convencionais (A)	Ex. acetosol c/ eq. Alternativos (B)	Redução/Aumento (%)	A < B (%)	A > B (%)
Por receita	MC	kg CO <sup>2</sup> eq	45	7	84	0	100
	THNC	CTUh	0,000006	0,000002	71	36	64
	THC	CTUh	0,000002	0,000001	66	0	100
	A	molc H <sup>+</sup> eq	0,2	0,04	83	0	100
	EAD	kg P eq	0,013	0,002	81	0	100
	EM	kg N eq	0,032	0,007	77	0	100
	ECT	CTUe	530	132	75	0	100
	EH	m <sup>3</sup>	20	7	63	45	55
Por matéria-prima processada	MC	kg CO <sup>2</sup> eq	36	5	86	0	100
	THNC	CTUh	0,000005	0,000001	74	39	62
	THC	CTUh	0,000001	0,0000004	70	0	100
	A	molc H <sup>+</sup> eq	0,2	0,03	85	0	100
	EAD	kg P eq	0,01	0,002	83	0	100
	EM	kg N eq	0,03	0,01	80	0	100
	ECT	CTUe	430	95	78	0	100
	EH	m <sup>3</sup>	16	5	67	45	55
Legenda:			Diferença significativa entre processos em 95% das comparações com Monte Carlo				
			Diferença não significativa entre processos em 95% das comparações com Monte Carlo				

Por fim, apresenta-se a comparação dos processos de extração de fenólicos seguida da extração de pectina. O cenário base é formado pela extração Soxhlet seguida da Ultrassom e os alternativos são: i) ESP/ESP; ii) Soxhlet/ESP; iii) ESP/Ultrassom. Analisando a tabela 6 nota-se que, ao comparar os cenários pela UF de receita, o cenário base foi significativamente mais impactante que os outros em no mínimo 5 categorias de impacto. Já ao utilizar a UF por matéria-prima processada, o cenário base foi significativamente menos impactante que os cenários ESP/ESP e Soxhlet/ESP em pelo menos 4 categorias. Entretanto, em relação ao cenário ESP/Ultrassom houve um “empate”, isto é, o cenário base é significativamente menos impactante nas categorias THNC e EM, porém significativamente mais impactante nas categorias MC e ECT. Nota-se ainda na tabela 6 que na categoria MC todos os cenários alternativos reduziram o impacto entre 7 e 181%. Isso aconteceu devido ao uso do etanol nos processos de extração por ESP, o qual é produzido da cana-de-açúcar que em sua fase agrícola apresenta sequestro de carbono. Devido à dificuldade de apontar qual cenário é ambientalmente menos impactante utilizou-se como critério de escolha a facilidade de simulação industrial, assim escolheu-se o cenário Soxhlet/Ultrassom.



**Tabela 6:** Resultados da comparação dos processos de extração de fenólicos e pectina, por receita e por matéria-prima processada

UF	Categorias de impacto	Unidade	Casca												
			Soxhlet/ Ultrasom (A)	ESP/ESP (B)	Redução/ Aumento (%)	A < B (%)	A > B (%)	Soxhlet/ ESP (C)	Redução/ Aumento (%)	A < C (%)	A > C (%)	ESP/ Ultrasom (D)	Redução/ Aumento (%)	A < D (%)	A > D (%)
Por receita	MC	kg CO2 eq	483	-123	126	0	100	359	26	0	100	-111	123	0	100
	THNC	CTUh	0,0001	0,0002	59	75	25	0,0001	19	68	32	0,000211	64	83	17
	THC	CTUh	0,00002	0,00001	48	9	91	0,00001	12	5	95	0,000011	35	23	77
	A	molc H+ eq	2,52	1,30	48	0	100	2,20	12	0	100	1,65	35	1	99
	EAD	kg P eq	0,14	0,05	63	0	100	0,12	15	0	100	0,07	53	1	99
	EM	kg N eq	0,36	0,23	35	1	100	0,32	10	1	100	0,29	20	5	95
	ECT	CTUe	5528	1690	69	0	100	4657	16	0	100	2208	60	0	100
	EH	m3	382	3226	88	49	52	758	50	48	52	4192	91	51	49
	MC	kg CO2 eq	11	-9	181	0	100	10	7	7	93	-4	137	0	100
	THNC	CTUh	0,000002	0,00001	87	100	0	0,000003	35	100	0	0,000007	77	99	1
	THC	CTUh	0,00000037	0,000001	40	96	4	0,00000040	9	100	0	0,0000004	3	78	22
	A	molc H+ eq	0,056	0,09	39	100	0	0,061	9	100	0	0,06	4	64	36
	EAD	kg P eq	0,0031	0,004	15	81	19	0,0033	6	100	0	0,002	25	21	79
	EM	kg N eq	0,0080	0,02	52	100	0	0,01	11	100	0	0,010	22	99	1
ECT	CTUe	123	120	3	48	52	129	5	98	2	78	36	0	100	
EH	m3	8	228	96	66	35	21	60	77	23	148	94	55	45	
Legenda:			Diferença significativa entre processos em 95% das comparações com Monte Carlo												
			Diferença não significativa entre processos em 95% das comparações com Monte Carlo												

## Considerações Finais

Portanto, os processos de extração dos bioprodutos avaliados com menor impacto ambiental, em ambas UFs, foram: i) amêndoa: extração isolada de amido; ii) tegumento: extração acetosolv utilizando equipamentos alternativos; iii) casca: extração por Soxhlet/Ultrassom.

Foram avaliados dois tipos de UF, uma em função da matéria-prima processada e a outra da receita. A primeira foi considerada a alternativa mais razoável para análise de conceitos de biorrefinaria, contudo, sem especificar os impactos por produto. Isto é, os resultados da avaliação são relativos à quantidade de matéria-prima processada e não ao produto obtido. Contudo, pela perspectiva de administradores de biorrefinarias talvez fosse preferível conhecer os resultados dos impactos por receita ou lucro obtido em cada conceito de biorrefinaria, e não por quantidade de matéria-prima processada.

Na análise dos processos críticos dos processos menos impactantes ambientalmente, o principal elemento responsável pela carga ambiental foi a produção da energia elétrica que é requerida. Entretanto, ressalta-se que os processos escolhidos para montar os sistemas analisados estão ainda em nível de laboratório, acarretando em todas as limitações dessa etapa de desenvolvimento, como elevado consumo de energia. Dessa forma, indica-se a simulação desses processos em nível industrial por meio de Software para investigar se é possível reduzir os aspectos ambientais desses sistemas.

## Referências Bibliográficas

AGROENERGIA, Embrapa. Biorrefinarias. Embrapa Agroenergia-Fôlder/Folheto / Cartilha (INFOTECA-E), 2011.

AHLGREN, S. et al. LCA of biorefineries - Identification of key issues and methodological recommendations. Report No 2013:25, p. 81, 2013, f3 The Swedish Knowledge Centre for Renewable Transportation Fuels, Suécia. Disponível em: <http://f3centre.se/>. Acesso em: 25 set. 2019.

ARORA, A. et al. Process design and techno-economic analysis of an integrated mango processing waste biorefinery. *Industrial Crops and Products*, v. 116, p. 24-34, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14040: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14044: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BOULAY, A. M. et al. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 23, n. 2, p. 368–378, 2018.

CAVALCANTE, Márcia Maria da Silva. Extração de polifenóis, mangiferina e pectina da casca de manga (*Mangifera indica* L.) cv. Tommy Atkins utilizando sistema pressurizado. 2018. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

COMMISSION, E. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for life cycle assessment, Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg, 2011.

CORDEIRO, E.M.S. et al. Polymer biocomposites and nanobiocomposites obtained from mango seeds. *Macromolecular Symposia*, v. 344, n. 1, p. 39–54, 2014.

FRISCHKNECHT, R. et al. Overview and methodology. Data v2.0 (2007). Ecoinvent report No.1. Ecoinvent Centre, 2007.

GOEDKOOOP, M. et al. Introduction to LCA with SimaPro 7. PRé Consultants, The Netherlands, 2008.

KIST, B. B. et al. Anuário da Fruticultura Brasileira 2018. [S.l.: s.n.], 2018.

MELO, P. E. F. et al. Antioxidant films from mango kernel components. *Food Hydrocolloids*, v. 95, p. 487–495, 2019.

NEMECEK, T. et al. Life cycle assessment of Swiss farming systems: I. Integrated and organic farming. *Agricultural Systems*, v. 104, p 217-232, 2011.

SILVA, A. P. M. et al. Mango kernel starch films as affected by starch nanocrystals and cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers*, v. 211, n. November 2018, p. 209–216, 2019.

VERÇOSA, F.G. et al. Extração de lignina do tegumento de mangas. Embrapa Agroindústria Tropical-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2019.

