

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ESTUDO DO PROCESSO DE *DEBITTERING* NA INDÚSTRIA DE
SUCO DE LARANJA**

Breno Della Torre Conrado

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientador Prof. Dr. Diego Andrade Lemos

São Carlos - SP
2026

Breno Della Torre Conrado

ESTUDO DO PROCESSO DE *DEBITTERING* NA INDÚSTRIA DE SUCO DE LARANJA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Diego Andrade Lemos

São Carlos - SP

2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliaram e aprovaram a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do candidato Breno Della Torre Conrado, realizada em 06/07/2026:

Orientador: Prof. Dr. Diego Andrade Lemos
DEQ - Universidade Federal de São Carlos

Professor da disciplina: Prof. Dr. Luís Augusto Martins Ruotolo
DEQ - Universidade Federal de São Carlos

Convidado: Prof. Dr. Gustavo Dias Maia
DEQ - Universidade Federal de São Carlos

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, que me concedeu saúde e forças durante este período da minha vida, e por me permitir viver essa experiência da melhor forma possível. A honra é glória é Sua, só os erros foram meus.

Aos meus pais, Eduardo e Maria Evelina, meu irmão, Dudu, e minha namorada, Luisa, por todo o amor, carinho e suporte constante, por me inspirarem a ser uma pessoa melhor, e, acima de tudo, por me manterem firme nesta caminhada. Obrigado por continuar acreditando em mim, se hoje estou aqui, é por vocês.

A todos meus colegas de faculdade, que compartilharam esse momento da vida comigo, tornando ele ainda mais especial. Espero que continuem a vida de vocês da melhor forma possível, e que não percamos contato.

Ao meu orientador, Diego, agradeço por me acompanhar nesta etapa final da graduação, pelos ensinamentos, conselhos e conversas ao longo desse período e, acima de tudo, pela paciência e confiança depositadas em mim para a realização deste trabalho.

Ao restante do corpo docente e técnico do Departamento de Engenharia da Química da UFSCar, que contribuíram direta ou indiretamente na minha formação durante os últimos 5 anos. Agradeço todos os ensinamentos, que prometo tentar aplicar da melhor forma possível, agora como Engenheiro Químico.

“Ora direis ouvir estrelas. Certo, perdeste o senso! ...

(Olavo Bilac)

RESUMO

O suco de laranja é uma das bebidas mais consumidas no mundo, sendo o Brasil responsável por mais de 70% do comércio mundial. Atualmente, um dos principais desafios operacionais da indústria de processamento é o fenômeno do amargor tardio, caracterizado pelo desenvolvimento de compostos amargos após a extração. O principal responsável por esse sabor no suco de laranja é o limonin, formado a partir de um precursor natural da fruta quando exposto em meio ácido, sendo perceptível mesmo em baixas concentrações. Esse problema tem se intensificado com o avanço do *greening*, que compromete a maturação dos frutos, favorecendo o acúmulo de limonoides. Para minimizar esse impacto, a indústria aplica diferentes tecnologias de *debittering* para a redução do amargor. Este trabalho realizou uma revisão sistemática das principais tecnologias disponíveis. A análise comparativa demonstrou que a adsorção por resinas adsorventes permanece como a alternativa mais consolidada, combinando alta eficiência de remoção, boa seletividade e compatibilidade com operações contínuas em escala industrial. Os demais métodos apresentam papel complementar ou ainda em estágio de desenvolvimento. Além da comparação entre as tecnologias, o estudo sistematiza aspectos fundamentais para a aplicação industrial do processo, incluindo os mecanismos de adsorção envolvidos na seleção das resinas, o fluxograma operacional do *debittering* e os principais fatores que limitam seu desempenho. Dessa forma, os resultados contribuem para o entendimento e a aplicação do processo de *debittering*, auxiliando na melhoria operacional e no aumento da qualidade e da competitividade do suco de laranja brasileiro.

Palavras-chave: suco de laranja; *debittering*; amargor tardio; limonin; resinas adsorventes.

ABSTRACT

Orange juice is one of the most widely consumed beverages in the world, with Brazil accounting for more than 70% of the global market. Currently, one of the main operational challenges in the juice processing industry is the delayed bitterness, characterized by the progressive formation of bitter compounds after extraction. The primary compound responsible for this bitter taste in orange juice is limonin, which is formed from a naturally occurring precursor of fruit when exposed to acidic conditions and can be perceived even at low concentrations. This issue has become more pronounced due to the spread of citrus greening disease, which impairs fruit ripening and promotes the accumulation of limonoids. To minimize this impact, the industry employs different debittering technologies aimed at reducing bitterness. This study presents a systematic review of the main technologies currently available. The comparative analysis showed that adsorption using adsorbent resins remains the most established alternative, combining high removal efficiency, good selectivity, and compatibility with continuous industrial-scale operations. The remaining methods play a complementary role or are still under development. In addition to comparing these technologies, this study systematizes key aspects of the industrial application of the process, including the adsorption mechanisms involved in resin selection, the operational debittering process flow, and the main factors limiting process performance. Therefore, the findings contribute to a better understanding and application of the debittering process, supporting operational improvements and enhancing the quality and competitiveness of brazilian orange juice.

Keywords: orange juice; debittering; delayed bitterness; limonin; adsorbent resins.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção mundial de laranja por país na safra 2024/25 - 10 maiores produtores.

Figura 2 - Destino da laranja na safra 2008/09 para os principais países produtores.

Figura 3 - Divisão regional do Cinturão Citrícola brasileiro.

Figura 4 - Série histórica da produção de laranja no cinturão citrícola 2000/01 - 2026/25.

Figura 5 - Distribuição percentual dos destinos da exportação de suco de laranja brasileiro.

Figura 6 - Período de colheita por variedade e percentual da produção no Cinturão Citrícola.

Figura 7 - Comportamento histórico médio do Ratio e °Brix para diferentes variedades.

Figura 8 - Principais produtos derivados da laranja.

Figura 9 - Diagrama com as principais etapas do processamento de suco de laranja.

Figura 10 - Estrutura química do limonin.

Figura 11 - Mecanismo de formação do limonin.

Figura 12 - Comportamento histórico do limonin no FCOJ entre as safras 2010/11 e 2020/21.

Figura 13 - Fluxograma de blocos do processo industrial de debittering por resinas adsorventes.

Figura 14 - Estimativa da necessidade de tratamento do suco de laranja por debittering no Cinturão Citrícola.

LISTA DE TABELAS E QUADROS

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de resinas PS-DVB Amberlite e suas propriedades.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais trabalhos selecionados na revisão bibliográfica sobre o processo de debittering.

Quadro 2 - Comparação das principais tecnologias de debittering para o suco de laranja.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BR - Brasil

FCOJ - *Frozen Concentrated Orange Juice*

FOP - *Frozen Orange Pulp*

HLB - *Huanglongbing*

HPLC - Cromatografia Líquida de Alta Eficiência

LARL - Ácido limonoico monolactona A (*Limonate A-ring lactone*)

NFC - *Not-From Concentrate*

PS-DVB - Poliestireno-divinilbenzeno

TAQ - Tratamento em água quente

US - Estados Unidos

WESOS - *Water Extracted Soluble Orange Solids*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 Contextualização da indústria de suco de laranja.....	14
3.2 Matéria-prima: qualidade da laranja.....	20
3.3 Produtos primários e secundários da indústria de processamento.....	25
3.4 Processamento industrial do suco de laranja.....	28
3.5 O problema do amargor na indústria.....	32
4. METODOLOGIA.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1 Avaliação comparativa das principais estratégias de debittering.....	40
5.2 Fundamentos da adsorção na remoção do amargor.....	51
5.3 Integração do processo de adsorção na planta industrial.....	55
5.4 Desafios operacionais e perspectivas tecnológicas.....	60
6. CONCLUSÃO.....	61
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

1. INTRODUÇÃO

A citricultura é um dos setores mais importantes do agronegócio brasileiro e mundial, com destaque para a laranja e sua cadeia produtiva. O suco de laranja destaca-se como a bebida cítrica mais consumida no mundo, valorizada por suas propriedades sensoriais, como sabor e aroma, além de um elevado valor nutricional (ZHANG et al., 2024).

O Brasil destaca-se como o maior processador e exportador de suco de laranja concentrado e integral do mundo, posição consolidada a partir das décadas de 1970 e 1980, após a migração da base produtiva norte-americana para o país (NEVES et al., 2019). Além do suco, o país também exerce papel estratégico na produção da fruta, sendo responsável por mais de um terço da produção mundial, segundo dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2025).

No contexto da indústria citrícola, a qualidade sensorial do suco é um fator determinante para a sua comercialização, uma vez que a aceitação do produto pelo mercado consumidor está diretamente relacionada às suas características de sabor, aroma e aparência. Entre os principais desafios operacionais e tecnológicos enfrentados atualmente, destaca-se o desenvolvimento de sabor amargo no suco. Esse fenômeno pode resultar na desvalorização do produto, impor barreiras comerciais em mercados consumidores e restringir, do ponto de vista operacional, as estratégias de armazenamento e utilização da matéria-prima (PUREWAL e SANDHU, 2021).

O amargor dos sucos cítricos é atribuído principalmente a duas classes de compostos, os flavonoides e os limonoides. No primeiro destaca-se a naringina, que é intrínseca à fruta e pode ser percebido imediatamente após a extração. Os limonoides, por sua vez, são progressivamente convertidos em sua forma amarga após o processo de extração. Durante essa etapa, um precursor insípido é liberado em meio ácido, sendo convertido em limonin, um composto amargo. A presença de ambos, naringina e limonin, pode ser percebida mesmo em baixas concentrações, podendo tornar o suco inaceitável para consumo se presentes em grande quantidade (BARBOSA, 2014; NAS e KARATAS, 2017).

A relevância do problema intensificou-se nos últimos anos, principalmente por conta do avanço do *greening*, doença cítrica, nos pomares do Cinturão Citrícola. Segundo a Fundecitrus (2025), a doença já afeta quase 48% das árvores da região, o que compromete a maturação dos frutos, favorecendo o acúmulo de limonoides, consequentemente aumentando a concentração do composto amargo no suco (WASHINGTON et al., 2025). Nesse contexto,

o controle do amargor deixa de ser apenas uma escolha técnica e passa a ser uma necessidade competitiva, uma vez que a queda da qualidade da matéria-prima reduz a margem de eficiência das estratégias preventivas convencionais, como o manejo adequado da colheita e *blending* entre lotes.

Uma das soluções encontradas pela indústria foi o desenvolvimento de diferentes métodos para prevenir ou remover o sabor amargo do suco de laranja, processo conhecido como “*debittering*”. Cada uma das abordagens apresenta uma eficiência de remoção e seletividade característica, além da própria maturidade tecnológica e de aplicação operacional. Diante disso, torna-se importante a avaliação comparativa desses métodos para orientar a sua seleção e implementação em escala industrial.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo consolidar o estado da arte das principais estratégias de *debittering* aplicadas ao suco de laranja, por meio de uma revisão sistemática da literatura e de uma metodologia de avaliação comparativa entre elas. Busca-se, assim, contribuir para o desenvolvimento e a seleção de estratégias mais eficientes de controle do amargor, com potencial de melhoria na qualidade do produto final, na agregação de valor e no desempenho do processo industrial.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi comparar as principais tecnologias de *debittering* aplicadas ao processamento industrial do suco de laranja, a fim de identificar a alternativa mais adequada ao contexto atual do setor citrícola brasileiro, considerando seus fundamentos, desempenho, viabilidade e aplicação industrial.

A partir do objetivo principal, os objetivos específicos foram:

- Caracterizar a cadeia produtiva da laranja e seu suco de laranja no Brasil e no mundo, destacando a importância econômica e estratégica do setor;
- Descrever os mecanismos bioquímicos da formação do amargor no suco de laranja, com foco nos compostos responsáveis pelo *delayed bitterness*;
- Revisar e sistematizar as principais técnicas de *debittering* reportadas na literatura, comparando-as com base em critérios de eficiência, seletividade, viabilidade econômica e compatibilidade com processos industriais;
- Analisar o mecanismo e os parâmetros que influenciam o desempenho da tecnologia considerada mais recomendável, avaliando seus impactos físico-químicos;
- Descrever a integração do processo de *debittering* à planta industrial de processamento de suco de laranja, com base em dados disponíveis na literatura;
- Discutir os principais desafios operacionais, limitações e perspectivas de aprimoramento da tecnologia estudada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Contextualização da indústria de suco de laranja

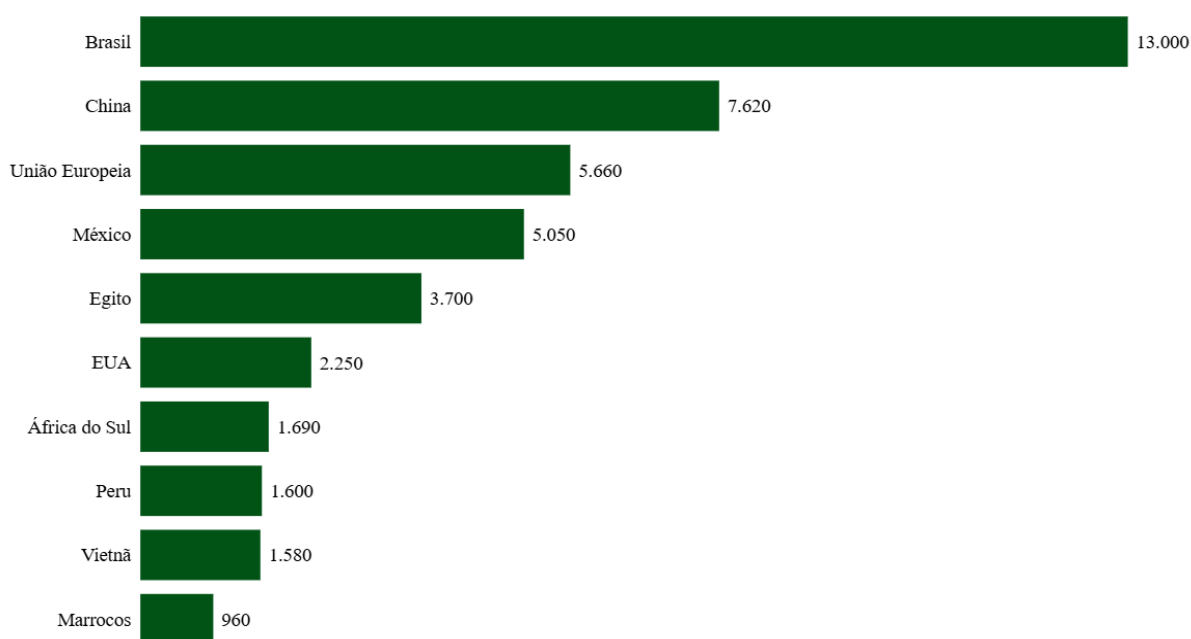
A cadeia produtiva da laranja e seus derivados possui elevada importância econômica global, sendo responsável por mais de dois terços da produção mundial de frutas cítricas - outras espécies são o limão, a toranja e a tangerina. Nesse contexto, a laranja doce (*Citrus sinensis*), principal matéria-prima da indústria de processamento, destaca-se como a fruta cítrica mais comercializada no mundo devido ao seu valor nutricional e à ampla aceitação pelo consumidor. Além do elevado teor de vitamina C, a fruta é fonte de fibras alimentares e potássio, compostos associados ao adequado funcionamento dos sistemas imunológico, metabólico e cardiovascular (FAO, 2024).

Atualmente, duas regiões destacam-se como os principais polos globais da citricultura: o estado de São Paulo (BR) e a Flórida (US), que juntos concentram mais da metade da produção mundial de laranja e cerca de 80% do suco. Até 1962, os Estados Unidos lideravam a produção global. No entanto, a ocorrência de geadas no ano mencionado e o avanço das doenças nos pomares norte-americanos impulsionaram a migração da base produtiva para o Brasil, onde a indústria se consolidou de forma definitiva entre as décadas de 1970 e 1980 (NEVES et al., 2019).

Outros países de destaque incluem a China, que se posiciona como o segundo maior produtor mundial de laranja e o maior produtor de frutas cítricas, incluindo tangerina, limão e toranja (USDA, 2024). Entretanto, a participação chinesa na cadeia de suco ainda permanece limitada em relação ao seu volume de fruta produzido, principalmente devido ao foco histórico no mercado de fruta fresca e ao perfil de consumo interno (TETRA PAK, 2004). A União Europeia, por sua vez, ocupa a terceira posição na produção mundial da fruta e configura-se como o principal mercado consumidor de suco de laranja (USDA, 2020). A região vem ampliando sua capacidade de processamento, com destaque para a Espanha, que responde por cerca de 20% da produção do bloco (VIDAL, 2021).

No contexto do mercado internacional, a Figura 1 apresenta os dez principais produtores mundiais de laranja e suas respectivas participações na safra 2024/25, segundo dados do USDA (2025). Nessa safra, a produção mundial de laranja foi estimada em 45,2 milhões de toneladas. Os dez países e blocos econômicos destacados concentraram aproximadamente 97% do total, com o Brasil responsável por cerca de 29%, seguido pela China, com 17%, e pela União Europeia, com 13%.

Figura 1 - Produção mundial de laranja por país na safra 2024/25 - 10 maiores produtores.



Produção mundial de laranja (em mil toneladas métricas)

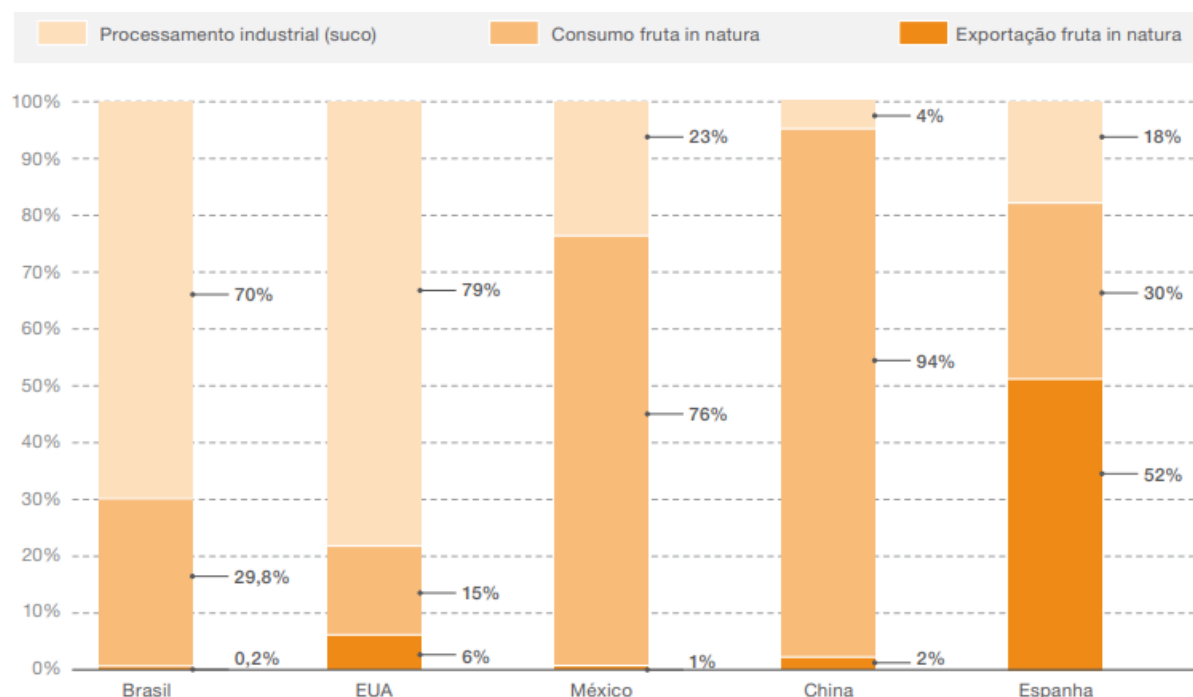
Fonte: Adaptado de USDA, 2025.

A produção de laranja pode ser direcionada para diferentes mercados, compondo um mix entre o processamento industrial para a produção de suco, o consumo doméstico *in natura* e a exportação da fruta fresca. De modo geral, os produtores tendem a priorizar o mercado de fruta fresca, uma vez que os preços são mais atrativos em comparação ao processamento industrial. Em escala global, estima-se que aproximadamente 40% da produção de laranja seja destinada ao processamento industrial, embora esse percentual seja variável entre os países e regiões produtoras.

Mais de 80% da produção brasileira é direcionada ao processamento industrial, resultado, principalmente, das variedades cultivadas, como a Hamlin, selecionadas por características mais adequadas à indústria, como maior rendimento e teor de sólidos solúveis, em detrimento do mercado *in natura* (USDA, 2026). Os Estados Unidos apresentam um comportamento semelhante, com grande parte da produção voltada à fabricação de suco - na Flórida, cerca de 96% da produção é destinada ao processamento. Em contrapartida, países como México, China e Espanha concentram sua produção no mercado de fruta fresca, apresentando participação industrial reduzida.

A Figura 2 apresenta a destinação da produção de laranja na safra 2008/09 para os países mencionados, com base em dados da USDA, FAO e IBGE, compilados por Neves (2009).

Figura 2 - Destino da laranja na safra 2008/09 para os principais países produtores.



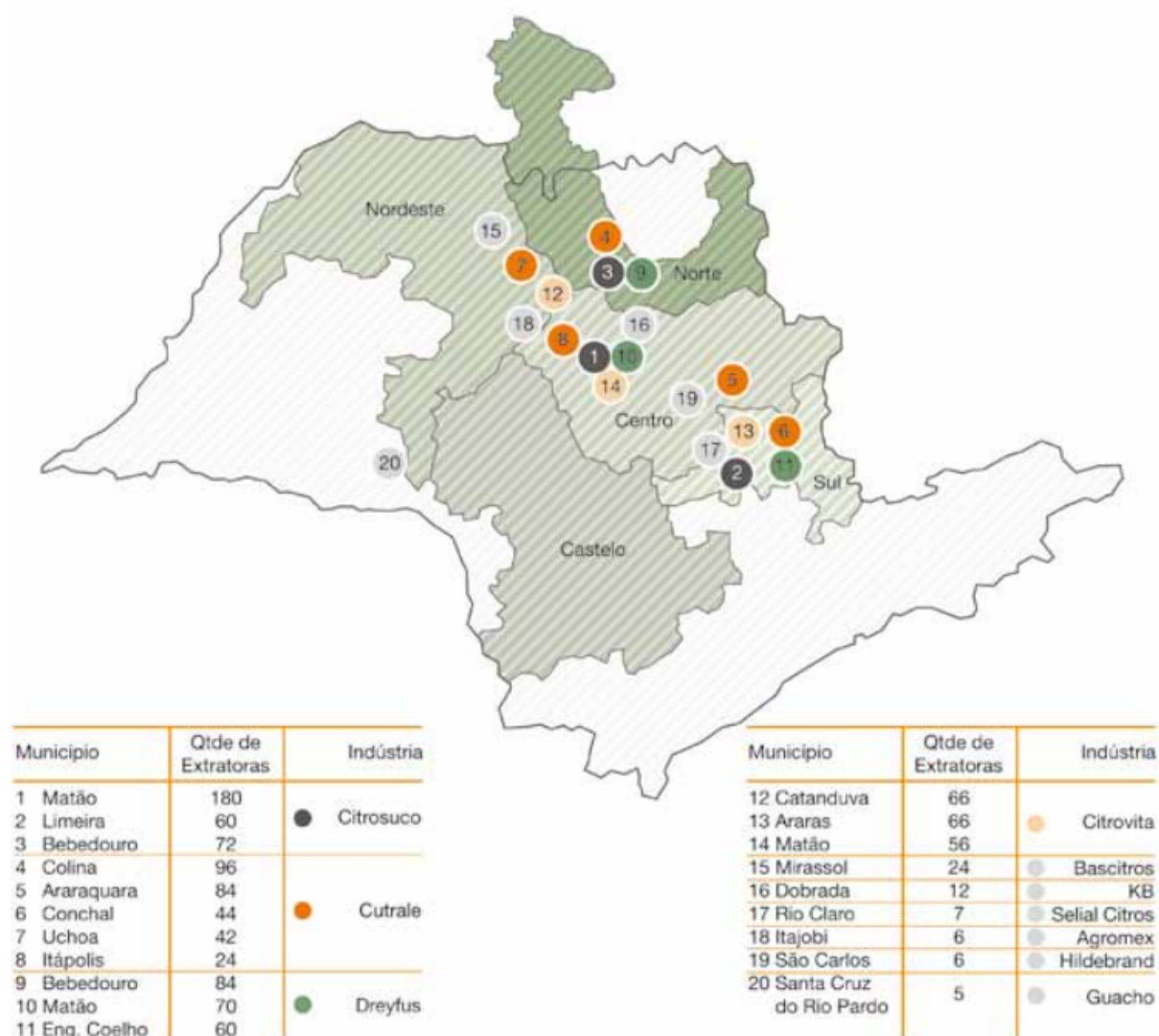
Fonte: Neves, 2009.

No Brasil, a citricultura caracteriza-se por uma elevada concentração geográfica e industrial em uma área denominada Cinturão Citrícola. Esta região, que abrange o estado de São Paulo e o Triângulo Mineiro, em Minas Gerais, consolida-se como principal polo produtor de laranja do mundo. De acordo com dados da Fundecitrus (2025), na safra 2024/25, o Cinturão produziu 230,9 milhões de caixas de 40,8 kg (aproximadamente 9,4 milhões de toneladas), o que representa mais de 70% da produção nacional.

A integração entre a base agrícola e a indústria de processamento é um diferencial competitivo da região. Do volume total produzido na safra, estima-se que 194,8 milhões de caixas (84,3%) tenham sido destinadas ao processamento industrial nas unidades localizadas dentro do próprio Cinturão (CitrusBR, 2025). Essa hegemonia é sustentada por décadas de desenvolvimento tecnológico e pela presença de grandes grupos globais, como Cutrale, Citrosuco e Louis Dreyfus, que operam plantas industriais de alta capacidade, majoritariamente no estado de São Paulo.

A Figura 3 mostra o Cinturão Citrícola, que é subdividido em Noroeste, Norte, Centro, Sul e Castelo, esta última associada ao eixo da rodovia Castelo Branco (SP-280). Na imagem, também está presente a localização das principais indústrias de processamento da região, percebendo-se a proximidade estratégica dos pomares com a fábrica.

Figura 3 - Divisão regional do Cinturão Citrícola brasileiro.



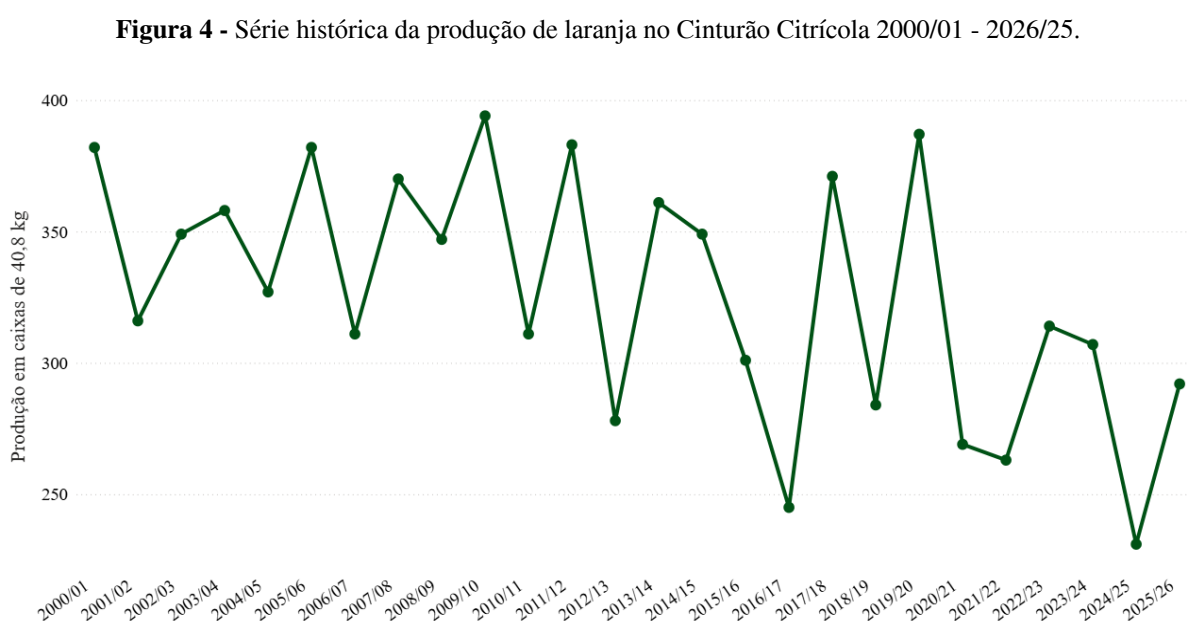
Fonte: NEVES et al., 2010.

A região apresenta uma estrutura produtiva altamente eficiente. Entre 1995 e 2018, a área colhida no estado de São Paulo foi reduzida em 63,2%, passando de 865,8 mil para 376,6 mil hectares. Essa retração está associada, principalmente, ao aumento dos custos de produção, que foi impulsionado pela incidência de pragas e doenças nos pomares e à substituição por culturas mais competitivas, especialmente a cana-de-açúcar (NETO e

FIGUEIRA, 2021). Por outro lado, a produção apresentou um crescimento ao longo do mesmo período, indo de 8,73 para 15,78 milhões de toneladas, com destaque para a safra 2019/20, que registrou produtividade recorde. Esse ganho de eficiência decorre da adoção de tecnologias e práticas de manejo mais intensivas, como o uso de viveiros protegidos, irrigação, nutrição do solo, controle fitossanitário e adensamento de pomares.

As safras do Cinturão Citrícola apresentam forte dependência das condições climáticas, o que resulta em oscilações significativas na produção ao longo dos anos. A safra 2024/25 marcou o quinto ano consecutivo de baixa produção, conforme a definição do CitrusBR (2025). Segundo a Fundecitrus, essa safra foi a segunda menor dos últimos 37 anos, sendo considerada atípica em função das condições climáticas adversas, com períodos prolongados de estiagem, temperaturas elevadas e intensificação da incidência do *greening*.

Em contraste, a safra 2025/26 apresentou uma recuperação, com aumento de 26,9% em relação ao ano anterior, totalizando 292,9 milhões de caixas de 40,8 kg. Para melhor entendimento da dinâmica produtiva do setor, a Figura 4 apresenta a evolução da produção no Cinturão Citrícola nas últimas duas décadas.



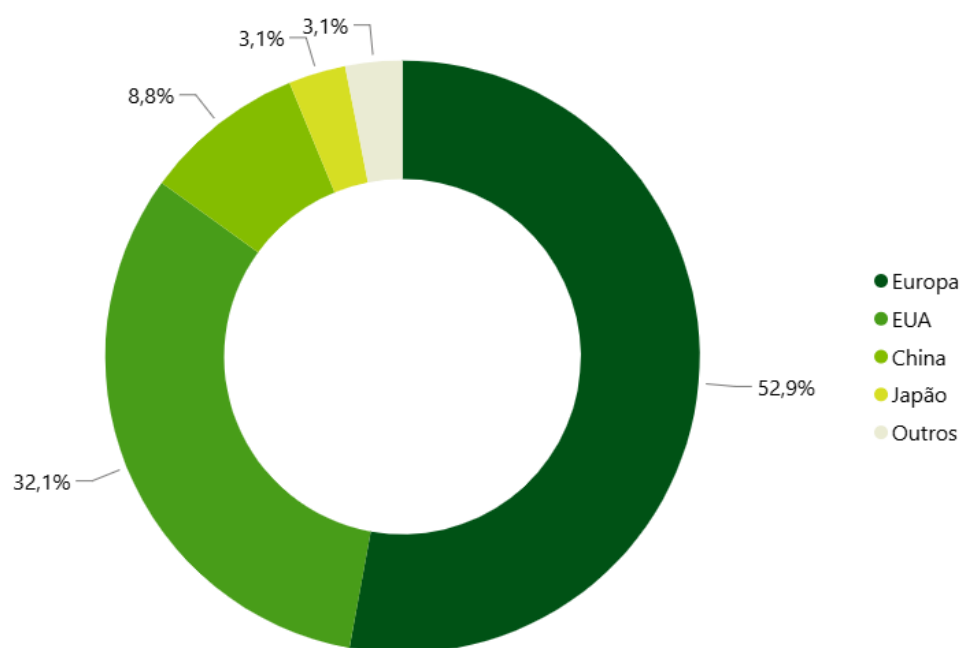
Fonte: Adaptado de CitrusBR e Fundecitrus.

O Brasil também é o líder mundial na produção e exportação de suco de laranja. A produção de suco brasileira é responsável por mais de 70% do comércio global, com uma média de 1,0 milhão de toneladas por ano, distanciando-se expressivamente do restante dos

produtores. O México, segundo colocado, produz cerca de 187 mil toneladas no mesmo período, seguido pelos Estados Unidos, que atingiram seu menor nível histórico, com apenas 80 mil toneladas. Essa assimetria evidencia a dependência do mercado global em relação à oferta brasileira (USDA, 2025).

O principal destino das exportações de suco brasileiro é a Europa, que respondeu por 53% da exportação em 2024. O segundo maior mercado são os Estados Unidos, com 32% do total no mesmo ano. Juntos, as duas regiões concentram a maior parte do volume exportado (CitrusBR, 2025). No entanto, na última década o Brasil tem conseguido diversificar os mercados em que atua, atualmente exportando para mais de 100 países, com destaque para a China e Japão, além de outros países da Ásia, África e Oriente Médio (NEVES, 2009). A Figura 5 apresenta a distribuição percentual dos destinos da exportação brasileira, com dados atualizados em setembro de 2024, segundo a CitrusBR (2024).

Figura 5 - Distribuição percentual dos destinos da exportação de suco de laranja brasileiro.



Fonte: Adaptado de CitrusBR e Fundecitrus.

3.2 Matéria-prima: qualidade da laranja

A laranja apresenta uma estrutura composta por vesículas de suco envolvidas por uma casca rica em compostos aromáticos e pigmentos, enquanto sua porção interna concentra açúcares, ácidos orgânicos, vitaminas e outros constituintes essenciais. Essa composição determina as características sensoriais do suco, como sabor, cor e aroma, e influencia diretamente o desempenho do processamento industrial.

A avaliação da qualidade da matéria-prima é realizada por meio de parâmetros físico-químicos. Entretanto, fatores agrônômicos e fitossanitários, como a variedade, a maturação, o manejo e a incidência de doenças, também influenciam a qualidade dos frutos e o desempenho da produção citrícola. Assim, a compreensão integrada desses aspectos é fundamental para a avaliação da cadeia produtiva e dos desafios enfrentados pelo setor.

3.2.1 Teor de Sólidos Solúveis (°Brix)

Os sólidos solúveis, expressos em °Brix, representam a concentração de compostos dissolvidos no suco, predominantemente açúcares (sacarose, glicose e frutose), além de vitaminas e ácidos em proporções menores. Esse parâmetro está diretamente associado à percepção de doçura e influencia atributos como sabor, aroma e textura do produto final.

Durante a maturação, os sólidos solúveis aumentam de forma gradual até atingir um ponto máximo, que corresponde ao momento ideal de colheita, que tende a se estabilizar e depois declinar caso a fruta permaneça na planta por mais tempo. Para a indústria de processamento, é interessante colher a fruta com a maior quantidade de sólidos solúveis possível, visando um melhor rendimento da produção (NETO e SANTOS, 2019).

O teor de sólidos pode ser medido por um refratômetro, sendo que o valor de 1 (um) °Brix equivale a 1 g de sólidos dissolvidos em 100 g de solução. Para o processamento industrial, valores acima de 11 °Brix são considerados adequados para a obtenção de um suco com boa qualidade.

3.2.2 Acidez Titulável

A acidez do suco é determinada pela concentração de ácidos orgânicos presentes, sendo o ácido cítrico o principal componente. A análise é feita em laboratório através da determinação da acidez total titulável (%). Com o avanço da maturação, os ácidos são

progressivamente consumidos pelo metabolismo respiratório da fruta, de modo que a acidez apresenta tendência decrescente ao longo do tempo.

De forma geral, não há interesse em processar uma fruta com alta acidez, a não ser que seja para a obtenção de um produto específico. No entanto, níveis muito baixos de acidez também são indesejáveis, pois resultam em frutas sensorialmente menos intensas, com menor frescor.

3.2.3 Ratio

O ratio é a relação entre o teor de sólidos solúveis e a acidez titulável ($^{\circ}\text{Brix}/\text{Acidez}$), indicando uma proporção de equilíbrio entre doçura e acidez. Atualmente, o ratio é utilizado como indicador do estágio de maturação da fruta e da qualidade do suco produzido, sendo considerado um dos critérios mais importantes para a definição do momento ideal de colheita.

Considerando o comportamento dos sólidos solúveis e da acidez ao longo da maturação, em que o $^{\circ}\text{Brix}$ apresenta uma tendência parabólica e a acidez diminui de forma contínua, o ratio tende a crescer progressivamente ao longo do tempo, sem recuar mesmo após os sólidos solúveis começarem a regredir.

De modo geral, valores entre 14 e 18 são considerados adequados para a produção de suco de laranja. Entretanto, algumas variedades apresentam comportamentos distintos; a laranja lima, por exemplo, pode atingir valores superiores a 50 em razão de sua baixa acidez. Na prática, o monitoramento do ratio em diferentes talhões auxilia produtores e indústrias na determinação do ponto de colheita mais adequado para cada área.

3.2.4 Rendimento industrial

O rendimento industrial expressa a quantidade de caixas de laranja necessárias para a produção de uma tonelada de suco concentrado, FCOJ, a 66 $^{\circ}\text{Brix}$. Quanto menor o valor, maior a eficiência do processo. Em geral, um rendimento próximo de 250 caixas por tonelada (cxs/ton) é considerado excelente, embora possa variar ao longo da safra. Na indústria citrícola, é comumente usado “caixa de laranja” como unidade de medida, que corresponde a 40,8 kg (90 lb) da fruta.

Esse indicador é influenciado por múltiplos fatores, como a variedade da fruta, a idade do pomar, as condições climáticas da safra e o estágio de maturação do fruto. O número de frutos por caixa também é uma medida relevante, determinada pela quantidade de frutos

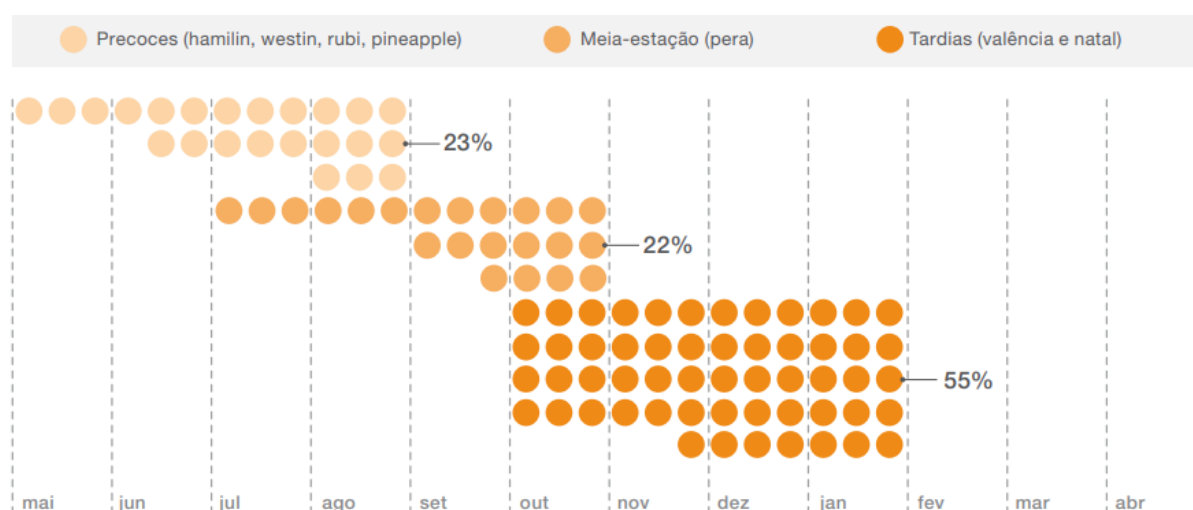
necessários para atingir o peso de uma caixa de laranja. Um número maior indica a presença de frutos menores, que, em geral, apresentam maior concentração de sólidos solúveis, favorecendo o rendimento e produção do suco concentrado. No entanto, frutos muito pequenos podem causar danos às extratoras.

3.2.5 Colheita

A colheita da laranja é realizada quando a fruta atinge o ponto ideal de maturação, avaliado principalmente pelo ratio e °Brix. O momento da colheita é influenciado pela época de florescimento e condições climáticas do ciclo produtivo, fatores que podem variar de acordo com a safra. Por isso, o monitoramento da maturação é contínuo, complementado pelo uso de bases históricas que permitem comparações e previsões com base em safras anteriores.

Diferentes variedades de laranja são cultivadas com o objetivo de garantir o abastecimento contínuo de matéria-prima ao longo do ano. No Brasil, essas variedades são divididas em três grupos: precoces, meia-estação e tardias, classificadas de acordo com o seu período de maturação na safra. Cada grupo apresenta características de maturação e colheita diferentes, conforme apresentado na Figura 6, junto com a participação de cada uma no Cinturão Citrícola.

Figura 6 - Período de colheita por variedade e percentual da produção no Cinturão Citrícola.



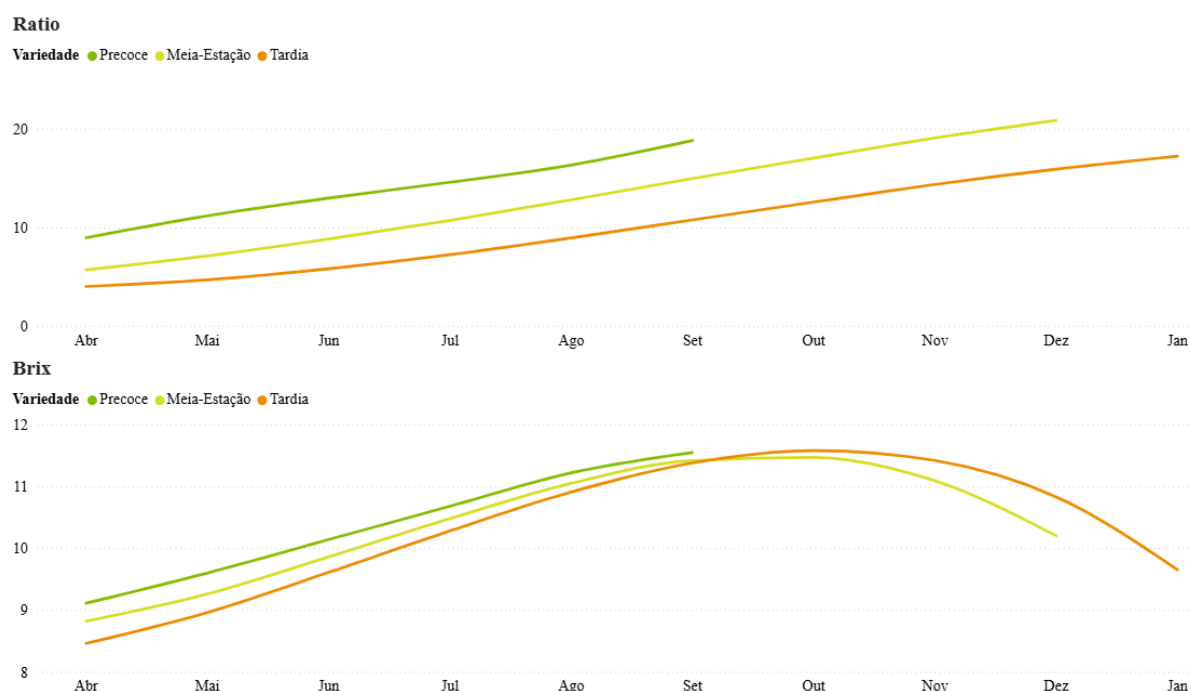
Fonte: NEVES et al., 2010.

Além da variedade, a região geográfica também interfere na época de colheita. Em condições normais, os frutos da região Norte do cinturão tendem a maturar antes dos das

regiões Centro e Sul, respectivamente. Outro fator relevante é a ocorrência de múltiplas floradas ao longo do ano. Em condições normais, a árvore apresenta uma florada principal, que origina a maior parte da produção da safra. No entanto, períodos de estresse hídrico seguidos de chuva ou irrigação podem introduzir floradas secundárias em diferentes épocas, resultando em frutos com estágios de maturação diferentes em um mesmo pomar - e até na mesma árvore. Esse fenômeno aumenta a variabilidade da matéria-prima recebida pelas indústrias e pode antecipar ou prolongar o período de colheita, dificultando o controle do ratio e impactando a qualidade do suco processado (DARROS-BARBOSA e CURTOLO, 2005).

Para uma mesma região, a Figura 7 apresenta o comportamento histórico médio do ratio e °Brix no Cinturão Citrícola para as três variedades mencionadas.

Figura 7 - Comportamento histórico médio do ratio e °Brix para diferentes variedades.



Fonte: elaborado pelo autor.

A análise conjunta das curvas de maturação das três variedades, apresentadas na Figura 7, permite identificar que os valores mais elevados de ratio e °Brix tendem a ocorrer entre os meses de novembro e janeiro. Esse período corresponde à fase de maior qualidade da matéria-prima, caracterizada por melhor equilíbrio entre açúcares e acidez e maior rendimento industrial. Como consequência, a colheita e o processamento de laranjas para produção de suco concentram-se nesse intervalo.

No entanto, o comportamento da curva de maturação pode ser alterado pela incidência de doenças. O *greening*, principal ameaça sanitária à cultura brasileira, afeta diretamente a qualidade da matéria-prima. As plantas infectadas produzem frutos com maturação irregular, menor teor de sólidos e maior acidez, tendo o ratio reduzido por consequência (FUNDECITRUS, 2025). A doença ainda provoca a queda prematura dos frutos, interrompendo o desenvolvimento da curva de maturação. Apesar desse impacto, os frutos que caem antecipadamente podem ser destinados ao processamento de FCOJ, desde que atendam os parâmetros mínimos de qualidade exigidos (KIMBALL e NORMAN, 1990).

3.2.6 Doenças na citricultura

Assim como outras culturas agrícolas, os pomares de laranja também estão suscetíveis à ocorrência de doenças que afetam a produtividade, a qualidade dos frutos e a longevidade das plantas. Em razão dos impactos econômicos associados, o setor citrícola investe continuamente em pesquisas voltadas ao desenvolvimento de métodos de controle, cultivares mais resistentes e práticas de manejo mais eficientes.

As estratégias de controle variam conforme as características de cada doença e podem incluir a erradicação de plantas infectadas, o controle químico de insetos vetores e a utilização de porta-enxertos resistentes (TETRA PAK, 2004). Nesse contexto, o monitoramento constante dos pomares é fundamental para a identificação precoce e contenção da disseminação dos patógenos.

Entre as principais doenças que afetam a citricultura destacam-se o cancro cítrico, responsável pela queda prematura de folhas e frutos; a Clorose Variegada dos Citros (CVC), que reduz o tamanho dos frutos e compromete o desenvolvimento da planta; e a *Citrus Black Spot*, doença fúngica que provoca lesões na casca e inviabiliza a comercialização da fruta para consumo in natura, embora ainda permita seu direcionamento para processamento industrial.

Atualmente, entretanto, a maior ameaça à citricultura mundial é o *greening* dos citros, originalmente chamada de *Huanglongbing* (HLB). A doença está presente em dezenas de países produtores e afeta todas as variedades comerciais de laranja, sendo considerada a enfermidade mais severa da cultura. Causada por bactérias do gênero *Candidatus Liberibacter* e transmitida pelo psíldeo *Diaphorina citri*, a doença reduz significativamente a produtividade, compromete a qualidade dos frutos e, em estágios avançados, leva à morte das árvores.

Como não existe método de cura para o HLB, as estratégias de manejo baseiam-se na eliminação de plantas infectadas e no controle rigoroso do inseto vetor por meio de inseticidas e monitoramento contínuo dos pomares (FUNDECITRUS, 2009). Segundo a Fundecitrus (2025), aproximadamente 48% das árvores do cinturão citrícola apresentam infecção pela doença, o que corresponde a cerca de 100 milhões de plantas. Além da redução da produtividade, o HLB é atualmente responsável por mais da metade das perdas de frutos decorrentes da queda prematura antes da colheita.

Mesmo diante do avanço do *greening*, o Brasil mantém sua posição de liderança mundial na produção de laranja, resultado da combinação entre escala produtiva, elevado nível tecnológico e capacidade de adaptação do setor citrícola. A expansão do cultivo para regiões com menor incidência da doença, associada ao manejo intensivo do vetor e à forte integração entre produtores e indústria, tem contribuído para a manutenção da competitividade e do volume de produção nacional.

3.3 Produtos primários e secundários da indústria de processamento

O suco de laranja, principal produto da indústria de processamento, pode ser comercializado de três formas: integral, denominado NFC (*Not From Concentrate*); concentrado congelado, o FCOJ (*Frozen Concentrated Orange Juice*), obtido pela remoção parcial da água por evaporação térmica; e o suco reconstituído, produzido pela rediluição do suco concentrado com água (SANTOS et al., 2012).

O FCOJ apresenta vantagens logísticas e de armazenamento em relação ao NFC. O processo de evaporação eleva o teor de sólidos solúveis para cerca de 66 °Brix, aproximadamente 6 vezes mais concentrado que o suco integral. Essa concentração reduz significativamente o volume necessário para transporte e estocagem, diminuindo os custos de operação. Além disso, a menor atividade de água proporciona maior estabilidade química e microbiológica durante o armazenamento (SCOTT, 2003).

Por outro lado, o NFC impõe desafios operacionais ao longo da cadeia produtiva. O produto é mais suscetível à degradação microbiológica e à perda de compostos voláteis responsáveis pelo aroma e sabor característico do suco fresco durante o transporte e armazenamento. Dessa forma, sua produção e distribuição exigem controle microbiológico rigoroso, manutenção contínua da cadeia de frio e gestão cuidadosa da degradação dos compostos aromáticos durante o armazenamento (ASHURST, 2016).

Apesar das limitações, observa-se um crescimento contínuo da participação do NFC no mercado internacional. Entre 2014 e 2019, o volume de produção do NFC aumentou em 35%, chegando a representar até 71% da produção total de suco. Essa transição é uma resposta da indústria à mudança no perfil do consumidor, especialmente nos mercados norte-americano e europeu, impulsionada pela demanda por produtos naturais e com melhor qualidade sensorial. Para a indústria, esse aumento também é dado pelo maior valor agregado do NFC, proporcionando uma maior margem de comercialização (SANTANA, CUNHA e WANDER, 2021).

Quando produzido adequadamente, o NFC apresenta características sensoriais muito próximas às do suco recém extraído da fruta. Em contrapartida, o FCOJ e seu suco reconstituído apresentam diferenças de sabor e aroma em relação ao suco fresco. Essas alterações estão associadas, principalmente, ao tratamento térmico aplicado nas etapas de concentração e reconstituição. O aquecimento pode promover a degradação de compostos voláteis responsáveis pelo perfil aromático característico do suco de laranja. Assim, para reduzir em parte a perda sensorial, a legislação atual permite a reincorporação das substâncias aromáticas originais da laranja volatilizadas durante o processo de evaporação (DARROS-BARBOSA e CURTOLO, 2005; SANTOS, 2012).

Além dos produtos principais, destaca-se também a produção da polpa. Após a separação do suco, a polpa passa por etapas de remoção de componentes indesejados, como bagaço e sementes, sendo posteriormente submetido à pasteurização e outros tratamentos térmicos. Esse produto pode ser comercializado como FOP (*Frozen Orange Pulp*), destinado à incorporação em sucos para agregar valor ao produto final, proporcionando maior textura e percepção mais natural ao consumidor.

Quando a polpa remanescente da extração do suco não é destinada diretamente à comercialização, usualmente pela presença de defeitos, ela pode ser lavada para a recuperação de sólidos solúveis secundários. O produto obtido nesse processo é denominado *pulp wash*, ou suco da polpa, e, de acordo com a legislação vigente, pode ser incorporado ao suco da linha de produção do concentrado, o que contribui para o aumento do rendimento industrial. É ressaltado que a utilização de sucos secundários deve ser cuidadosamente controlada, de modo a equilibrar o aumento do rendimento com a manutenção de qualidade e estabilidade do produto final. Um uso excessivo pode comprometer as características sensoriais do suco e resultar em reclamações e rejeição do produto pelos consumidores. Outro

suco secundário é o WESOS (*Water Extracted Soluble Orange Solids*), obtido a partir da lavagem do bagaço central da laranja, processo conhecido como "*core wash*".

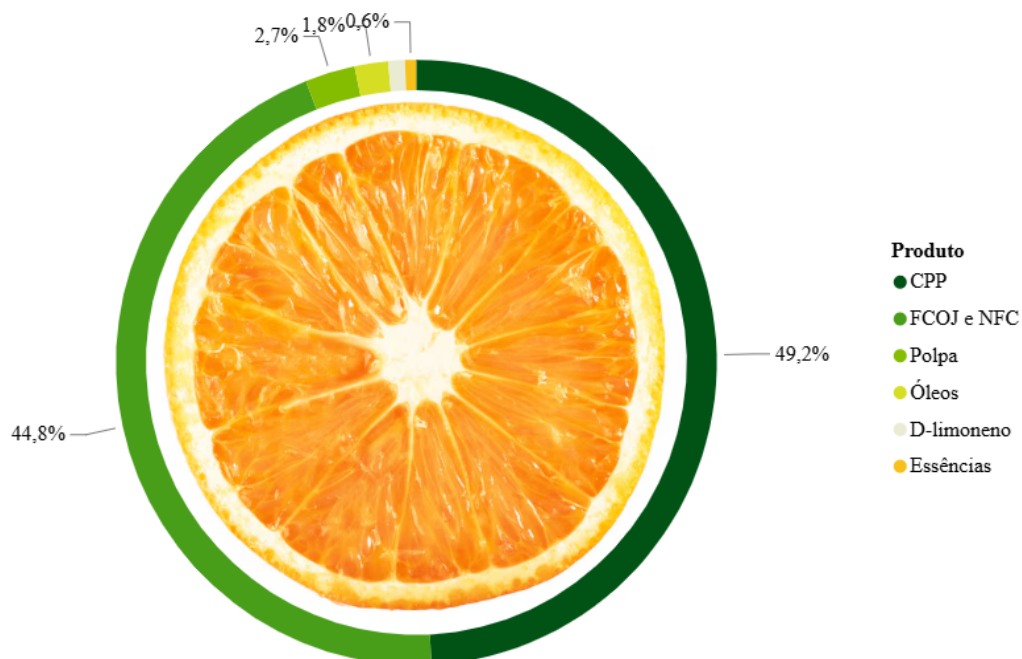
O processamento industrial também é voltado para o aproveitamento de subprodutos, os quais são derivados da casca, sementes e bagaço, frações não utilizadas para a produção do suco. Há três grupos principais de subprodutos: os terpenos, utilizados na fabricação de resinas e solventes biodegradáveis, com destaque para o d-limoneno; os óleos essenciais, amplamente aplicados na indústria de aromas e fragrâncias; e o bagaço, destinado principalmente à ração animal.

O subproduto mais expressivo é o CPP (*Citrus Pulp Pellets*), obtido a partir da desidratação e secagem do bagaço, cascas e sementes remanescentes do processamento. Esse material apresenta valor nutricional rico em fibras e pode ser utilizado na alimentação animal, especialmente de bovinos (SANTOS et al., 2020). A integração da produção de ração às unidades processadoras é estrategicamente importante, considerando que aproximadamente metade da massa da laranja processada é convertida em resíduos passíveis de aproveitamento na forma de CPP (MITSUHARA et al., 2025).

O aproveitamento integral da laranja constitui um fator essencial para a viabilidade econômica do processamento industrial. Essa importância é evidenciada pelo rendimento da matéria prima, pois para cada 1.000 kg de laranja processada, são obtidos aproximadamente 553 kg de suco. O restante é composto, majoritariamente, por bagaço, cascas e sementes, que totalizam cerca de 413 kg e são, em grande parte, destinados à produção de CPP, conforme mencionado anteriormente. Além disso, ainda há uma pequena fração de polpa, 30 kg, e óleo essencial extraído da casca, 3 kg.

Atualmente, estão sendo estudados processos para que haja um potencial de valorização dos resíduos da laranja. A partir do bagaço e da casca, é tecnicamente viável a extração de compostos com maior valor de mercado, como óleos essenciais, pectina e d-limoneno. No entanto, como mostra a Figura 8, a proporção destes produtos ainda é muito pequena quando comparada com o CPP. Segundo Bezerra (2025), este cenário evidencia uma oportunidade estratégica para a agregação de valor na cadeia produtiva, a partir da derivação do destino dos resíduos para produtos com maior valor agregado, como os mencionados.

Figura 8 - Principais produtos derivados da laranja.



Fonte: Adaptado de Bezerra, 2025.

3.4 Processamento industrial do suco de laranja

O processamento tem início com a recepção da fruta dos pomares. Ao ser descarregada na indústria, a matéria-prima passa por uma avaliação inicial que determina a sua aptidão para o processo, uma vez que frutas com deficiências de qualidade ou produtividade são descartadas. Com o aumento das exigências fitossanitárias dos mercados importadores, a integração entre a indústria e as fazendas produtoras tornou-se um fator fundamental, permitindo maior controle e rastreabilidade de matéria-prima (ASHURST, 2016).

No processo de descarregamento, as frutas são lavadas e sanitizadas para a remoção de contaminantes, sujeira superficial e resíduos químicos da colheita. Cabe destacar que a indústria citrícola se destaca pelo uso racional da água, uma vez que grande parte do volume de água utilizado é dado pela recuperação, especialmente após a etapa de evaporação do suco concentrado. Após a higienização, as frutas passam por classificadores que as separam por tamanho, garantindo maior eficiência operacional durante a extração.

A extração tem como objetivo obter o máximo de suco presente na fruta com o mínimo de incorporação de componentes da casca, bagaço e sementes, que podem contribuir

para o amargor ou outros defeitos no produto final (DARROS-BARBOSA e CURTOLO, 2005). Por essa razão, trata-se de uma das operações mais críticas do processamento industrial, influenciando diretamente tanto o rendimento quanto a qualidade do suco obtido.

Durante a extração industrial, a laranja é posicionada entre dois copos que se fecham ao redor do fruto. Dois cortadores circulares, um superior e um inferior, realizam um corte central nas extremidades da fruta, permitindo que a fração interna, chamada de *core*, seja forçada para dentro de um tubo extrator. Na sequência, a fruta é comprimida, fazendo com que o suco, juntamente com as vesículas de polpa, sejam liberados pela abertura gerada no corte. A pressão continua sendo aplicada para maximizar a recuperação do suco. Durante esse processo, há o rompimento da casca e a consequente liberação de óleo essencial. Para evitar o contato com o suco, e para recuperação desse componente, utilizam-se aspersores de água reciclada que formam uma emulsão chamada “água-amarela”.

Em algumas variedades de laranja, observa-se uma maior liberação de óleo da casca durante a extração, podendo resultar em concentrações superiores ao limite aceitável no suco - em um produto de boa qualidade, os níveis de óleo não devem ser superiores a 0,035% (TETRA PAK, 2004). Esse problema é mais acentuado no NFC, uma vez que, no FCOJ, parte significativa do óleo é removida durante a etapa de concentração. Para reduzir os teores de óleo incorporados no suco, utiliza-se uma pressão menor no momento da extração, garantindo uma melhor qualidade. Essa modificação, porém, afeta o rendimento industrial, dada a menor recuperação de suco.

Após extraído, o suco passa por um processo de filtração para reduzir e estabilizar o teor de polpa presente no suco, etapa chamada de clarificação. Na saída das extratoras, o suco apresenta cerca de 20 a 25% de polpa em suspensão, que é reduzido para 12% por meio de filtrações sequenciais. É possível reduzir ainda mais o teor de polpa por centrifugação, conforme especificação do produto final. A polpa recuperada pode ser comercializada congelada como subproduto ou destinada ao processo de *pulp washing* para recuperação adicional de sólidos solúveis.

Em seguida, o suco é submetido a tratamento térmico, que consiste na pasteurização, no caso do NFC, ou na concentração em múltiplos estágios para a produção de FCOJ. Para a obtenção de um suco integral de alta qualidade, recomenda-se que seja aplicado o mínimo de tratamento térmico possível, minimizando a degradação de compostos voláteis responsáveis

pelo sabor característico do suco. Entretanto, é fundamental garantir a estabilidade química e microbiológica do suco suficiente para garantir o seu armazenamento.

Na produção do suco concentrado, parte dos compostos voláteis são evaporados juntos com a água na concentração. Por isso, esses compostos são frequentemente recuperados em sistemas paralelos, sendo separados da fase aquosa por destilação à vácuo. A fase oleosa obtida contém os compostos aromáticos da fruta original, podendo ser reincorporadas ao suco concentrado para recomposição parcial do seu perfil sensorial.

Após o processamento térmico, o suco é resfriado e armazenado em tanques, podendo ainda passar por operações de *blending* com diferentes lotes para ajuste das especificações de qualidade. No caso do NFC, realiza-se previamente uma etapa de desaeração, destinada à remoção de bolhas de ar dissolvidas que podem acelerar a oxidação da vitamina C e comprometer a estabilidade do produto. O armazenamento é conduzido em tanques assépticos, apenas para o suco integral, e sob refrigeração, minimizando perdas nutricionais e alterações sensoriais ao longo do tempo.

A parte interna da laranja (*core*), removida pelos cortadores no início da extração, é submetida à lavagem para a obtenção do WESOS, etapa chamada de *core wash*. O produto é então concentrado e pode ser utilizado como base para bebidas ou como ingrediente em produtos alimentícios (BRADDOCK, 1999).

A emulsão de água e óleo essencial gerada na extração, a “água-amarela”, é centrifugada para a separação e recuperação do óleo essencial da casca, podendo ser comercializado como subproduto para setores de aromatizantes, perfumaria e limpeza. A fase aquosa remanescente, por sua vez, é recirculada aos aspersores, embora seja importante a sua renovação periódica para manter a eficiência do processo e evitar problemas microbiológicos. Uma alternativa para evitar o descarte dessa corrente consiste em sua incorporação à linha de produção do concentrado, aproveitando os sólidos solúveis ainda presentes.

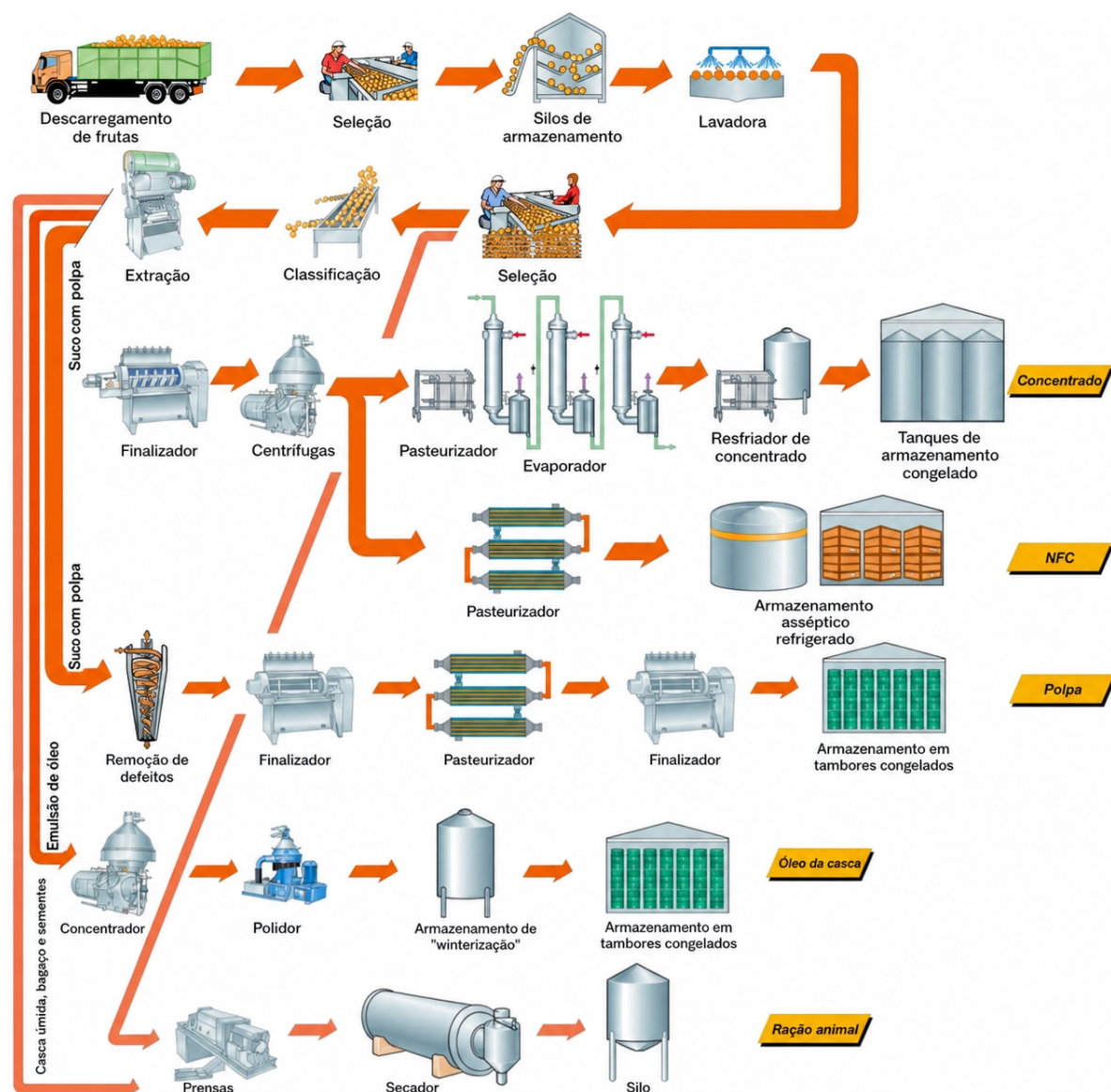
No entanto, essa corrente apresenta um elevado teor de óleo e limonin, composto responsável pelo amargor do suco. Dessa forma, antes de sua incorporação ao suco primário, essa corrente precisa passar por tratamento em sistemas de colunas com resinas adsorvedoras, capazes de remover seletivamente os compostos mencionados, sem comprometer os demais atributos sensoriais do suco. De forma análoga, esse processo também é utilizado para o WESOS, que também apresenta altos teores de limonin. Apesar da eficiência desse tratamento na redução do amargor, os sucos secundários obtidos dessas correntes ainda

apresentam qualidade sensorial inferior ao suco primário, especialmente em relação ao frescor, aroma e sabor.

Os resíduos sólidos, compostos pelo bagaço, casca e sementes, são destinados à produção de CPP. O processo consiste na prensagem do bagaço para redução da umidade, seguido de secagem e posterior peletização. Além da alimentação animal, o CPP ainda pode ser aproveitado na extração da pectina, presente na casca da laranja, e na recuperação de d-limoneno - subprodutos com alto valor agregado.

Na Figura 9 é mostrado um diagrama de todas as etapas do processamento descrito acima.

Figura 9 - Diagrama com as principais etapas do processamento de suco de laranja.



Fonte: adaptado de TETRA PAK, 2004.

3.5 O problema do amargor na indústria

O amargor destaca-se como um dos principais desafios da indústria de suco de laranja, uma vez que afeta diretamente a qualidade sensorial do produto, sua aceitação pelo consumidor e seu valor comercial, além de impor restrições operacionais ao processamento (PUREWAL; SANDHU, 2021). Dessa forma, a compreensão dos fatores que influenciam sua formação é essencial para o desenvolvimento de estratégias capazes de minimizar seus impactos e garantir a competitividade da indústria citrícola.

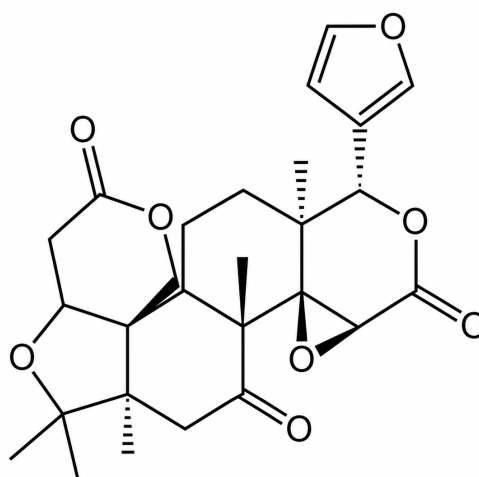
3.5.1 Mecanismo de formação do amargor

Segundo McIntosh et al. (1982), o amargor em sucos cítricos pode ser categorizado em dois tipos: o amargor instantâneo, associado à presença de flavonoides naturalmente existentes na fruta, como a naringina, perceptível imediatamente após a extração; e o amargor tardio (*delayed bitterness*), que se desenvolve progressivamente durante o processamento e o armazenamento, sendo atribuído principalmente à formação do limonin.

No contexto do suco de laranja, a naringina não representa o composto predominantemente responsável pelo amargor na maioria das variedades comerciais. Teores mais expressivos podem ser observados em variedades como a laranja navel e a baianinha, motivo pelo qual esses frutos são pouco utilizados pela indústria de processamento (DARROS-BARBOSA e CURTOLO, 2005). Dessa forma, entre os dois fenômenos, o amargor tardio é o de maior relevância industrial, por estar diretamente relacionado às condições de processamento e por ser passível de controle por meio de estratégias operacionais e tecnológicas.

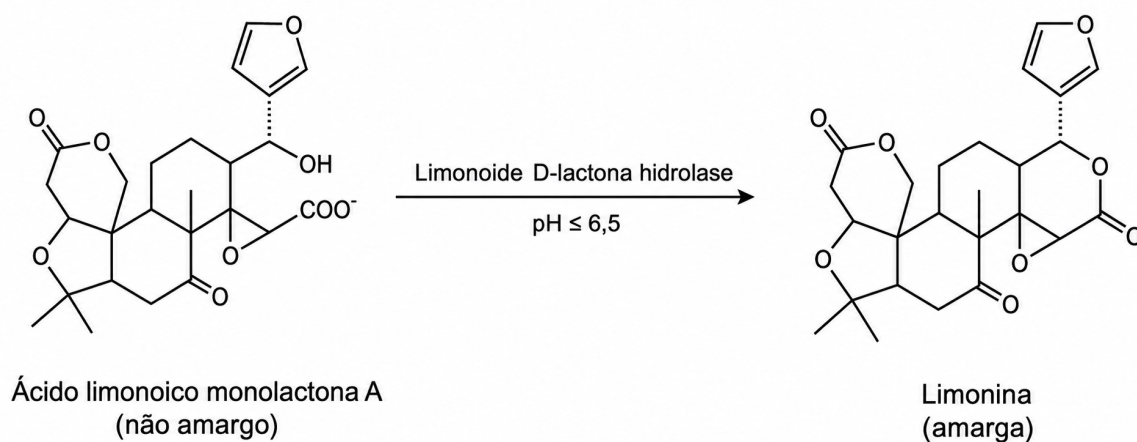
O limonin ($C_{26}H_{30}O_8$) é um composto triterpênico oxigenado contendo dois anéis lactona, um grupo epóxido, um anel furano, um éter cíclico e um grupo cetona, cuja estrutura química é apresentada na Figura 10. Diferentemente da naringina, o limonin não está presente em concentrações significativas na fruta *in natura*. Na laranja, encontra-se seu precursor natural, o ácido limonoico monolactona A (LARL), um composto insípido localizado principalmente nas sementes, casca e membranas internas da fruta. Durante a extração, a ruptura desses tecidos promove a liberação do LARL para o meio ácido do suco ($pH < 5,5$), onde ocorre uma reação de lactonização catalisada pela enzima D-lactona hidrolase. Como resultado, ocorre a formação do limonin, composto amargo, conforme ilustrado na Figura 11 (HASEGAWA e MIYAKE, 1996).

Figura 10 - Estrutura química do limonin.



Fonte: adaptado de Manners, 2007.

Figura 11 - Mecanismo de formação do limonin.



Fonte: adaptado de Manners, 2007.

A cinética dessa reação é relativamente lenta, razão pela qual o amargor não é imediatamente perceptível após a extração, intensificando-se ao longo do armazenamento. Em razão desse comportamento, a quantificação do limonin, realizada por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), é convencionalmente feita após 48 horas da extração, de modo a representar com maior precisão a concentração final do composto no suco (SINGH et al., 2025).

A relação entre a concentração de limonin e a percepção do amargor já está bem estabelecida na literatura. Guadagni et al. (1973) determinaram que o limiar de percepção no

suco de laranja é de aproximadamente 6 mg/L, concentração na qual 75% dos avaliadores identificaram a presença do sabor amargo, valor posteriormente corroborado por Kimball e Norman (1990). Concentrações entre 12 e 15 mg/L, por sua vez, estão associadas a uma percepção intensa e desagradável, tornando o produto inadequado para comercialização (BARBOSA, 2014; NAS e KARATAS, 2017). Dessa forma, a quantificação e o monitoramento contínuo do limonin constituem ferramentas fundamentais para o controle do processo e para a manutenção da qualidade do produto final.

3.5.2 Fatores de variação e padrão sazonal

A concentração de limonoides na laranja não é constante, variando em função de fatores como o estágio de maturação, o porta-enxerto utilizado e a variedade processada, principalmente. Durante a maturação, parte dos precursores é naturalmente convertida em glicosídeos não amargos, reduzindo o potencial de formação do limonin no suco. Esse processo ocorre pela ligação de uma molécula de glicose à aglicona correspondente, o que impede a formação da estrutura bicíclica responsável pelo amargor, originando, assim, compostos mais estáveis e sensorialmente neutros (HASEGAWA e MIYAKE, 1996). Como consequência, frutos mais maduros tendem a apresentar menor potencial de desenvolvimento do amargor tardio, uma vez que uma fração maior dos precursores já foi convertida em formas não amargas antes do processamento.

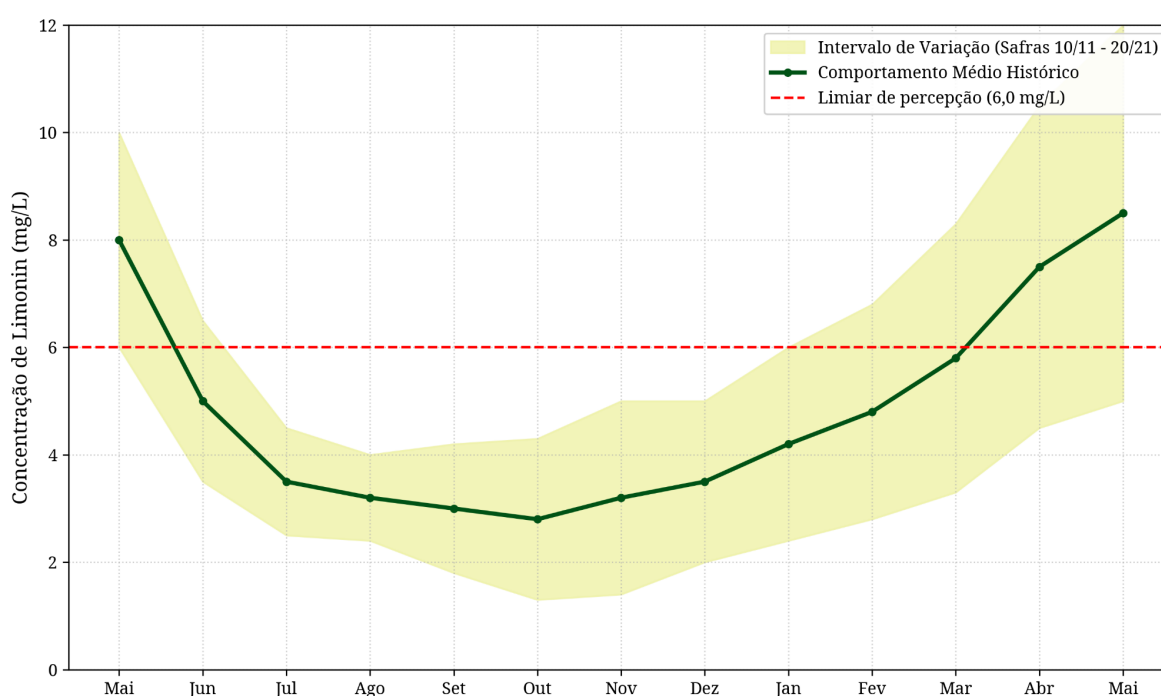
Esse comportamento reflete-se no padrão sazonal da concentração de limonin ao longo da safra. A Figura 12 apresenta o perfil histórico médio da concentração desse composto no suco concentrado produzido em uma unidade de processamento do Cinturão Citrícola entre as safras 2010/11 e 2020/21. Ressalta-se, no entanto, que o gráfico representa um ciclo anual, de maio a maio. O período que tipicamente corresponde a uma safra no Cinturão Citrícola são os meses entre maio e fevereiro, seguido por um período de entressafra e pelo início da safra subsequente.

As concentrações mais altas de limonin concentradas no início, entre maio e junho, estão associadas à maior participação de frutos ainda em maturação e à predominância da variedade Hamlin, naturalmente mais suscetível ao desenvolvimento do amargor do que outras variedades. A partir de novembro, verifica-se um novo aumento da concentração de limonin, que se estende até o final da safra. Esse comportamento está associado à transição

entre variedades e à ocorrência de floradas tardias, que introduzem no processamento frutos com menor grau de maturação.

Embora a Figura 12 represente a variação da concentração de limonin durante o ano, ela não reflete o volume de suco processado em cada período. O processamento acompanha o calendário de colheita do Cinturão Citrícola, com o início gradual em maio e concentrando-se principalmente entre novembro e janeiro, reduzindo-se progressivamente até o encerramento da safra (NEVES et al., 2010).

Figura 12 - Comportamento histórico do limonin no FCOJ entre as safras 2010/11 e 2020/21.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.5.3 Impacto na qualidade e nas operações industriais

O padrão sazonal descrito acima define as janelas críticas de controle do amargor ao longo do ciclo industrial, caracterizado pelo início e final da safra. Do ponto de vista comercial, lotes com elevado teor de amargor tendem a sofrer desvalorização ou rejeição por parte dos importadores, especialmente nos mercados europeu e norte-americano, onde os padrões sensoriais são mais rigorosos. Essa exigência é particularmente crítica para o NFC, cujo diferencial competitivo reside justamente na qualidade sensorial. Sob a perspectiva operacional, a presença de compostos amargos restringe a flexibilidade da indústria na gestão

dos estoques e na formulação de blendagens, uma vez que lotes com qualidade sensorial inferior têm menor capacidade de serem incorporados a correntes de melhor qualidade sem comprometer o produto final, reduzindo o aproveitamento da matéria-prima e elevando os custos de controle de qualidade.

A primeira estratégia disponível para a redução do amargor é o manejo adequado da matéria-prima, respeitando os estágios ideais de colheita e o monitoramento contínuo dos teores de limonin ao longo da safra. Quando essa medida não é suficiente, recorre-se ao *blending* com lotes de menor teor do composto, promovendo sua diluição no produto final.

Historicamente, a ocorrência do amargor foi mais crítica nas correntes secundárias do processo, como o *core wash* e a “água-amarela”, que apresentam alto teor de limonin em razão do maior contato com as sementes, casca e membranas internas da fruta durante a extração. Nessas correntes, a aplicação de sistemas de debittering por resinas adsorventes já é prática consolidada antes de sua incorporação ao suco primário (BRADDOCK, 1999).

No entanto, o cenário atual aponta para uma ampliação do problema ao suco primário. O avanço do greening (Huanglongbing, HLB) nos pomares do Cinturão Citrícola compromete o processo de maturação dos frutos infectados e aumenta o potencial de formação de limonin no suco extraído (WASHINGTON et al., 2025). Considerando que quase 48% das árvores da região já estão infectadas, a proporção de matéria-prima com esse perfil tende a crescer nas próximas safras (FUNDECITRUS, 2025). Como resultado, concentrações de limonin acima do limiar de percepção sensorial têm sido observadas com maior frequência no suco primário, mesmo sob condições adequadas de processamento.

Diante desse cenário, as estratégias convencionais de controle tornam-se progressivamente insuficientes para garantir a qualidade sensorial dentro dos padrões exigidos pelos mercados importadores. Isso reforça a importância crescente das tecnologias de redução de amargor como parte integrante do processamento industrial do suco de laranja.

4. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido na forma de uma revisão bibliográfica orientada, com caráter qualitativo e exploratório, abordagem considerada a mais adequada para atender ao objetivo central da pesquisa: sistematizar, examinar e discutir criticamente o estado da arte tecnológico e científico sobre o processo de *debittering* do suco de laranja. De acordo com Gil (2019), a pesquisa bibliográfica possibilita reunir e analisar conhecimentos já produzidos sobre determinado tema, permitindo a construção de uma visão ampla e fundamentada do objeto de estudo. Nesse contexto, buscou-se desenvolver um panorama consolidado das tecnologias utilizadas para a remoção do amargor na indústria citrícola, seu funcionamento, características operacionais e restrições.

A etapa de levantamento de dados apoiou-se, principalmente, em três bases acadêmicas e científicas: Google Scholar, ResearchGate e Science Direct. A seleção dessas plataformas considerou a abrangência de periódicos nacionais e internacionais relacionados à área de engenharia de processos, indústria alimentícia, tecnologia e inovação, além da confiabilidade editorial dos conteúdos indexados. Essa etapa foi realizada entre os meses de novembro de 2025 e junho de 2026.

As buscas foram conduzidas a partir de palavras-chave e expressões em português e em inglês, de modo a ampliar a cobertura de referências disponíveis. O cruzamento desses descritores foi realizado por meio dos operadores booleanos AND e OR, permitindo diferentes combinações de pesquisa. Os principais termos utilizados foram “*debittering*”, “limonoides”, “suco de laranja”, “processamento industrial”, “citricultura”, “qualidade” e “percepção sensorial”.

Os critérios de inclusão dos materiais bibliográficos foram estabelecidos com base na abrangência e na relevância científica das publicações. Foram considerados artigos publicados em periódicos científicos, dissertações, teses, trabalhos de conclusão de curso, capítulos de livros e documentos de patentes. Priorizou-se a inclusão de estudos publicados a partir do ano 2000, sem excluir automaticamente referências anteriores quando estas se mostraram relevantes para a compreensão do tema ou quando não havia publicações mais recentes que abordassem o mesmo conteúdo com profundidade equivalente.

A triagem dos materiais iniciou-se pela leitura dos títulos e resumos dos documentos, excluindo-se aqueles sem relação direta com o escopo da pesquisa. Foram selecionados os estudos que abordassem, de forma direta ou substancialmente relacionada, o processo de

remoção de compostos amargos no suco de laranja ou em outros sucos cítricos, bem como seus efeitos sobre as características sensoriais e do produto. Em seguida, os trabalhos selecionados foram analisados integralmente para a verificação de sua aderência aos objetivos da pesquisa, considerando a consistência metodológica, a clareza na descrição dos processos avaliados e a aplicabilidade das informações apresentadas.

Os estudos que atenderam aos critérios estabelecidos compuseram a base bibliográfica utilizada na discussão dos resultados. O Quadro 1 apresenta uma síntese dos artigos selecionados, incluindo seu título, autor, base de dados de origem e a principal tecnologia ou tópico abordado, proporcionando uma visão consolidada da literatura analisada.

Quadro 1 - Principais trabalhos selecionados na revisão bibliográfica sobre o processo de *debittering*.

(continua)

ID	Base de dados	Título	Tecnologia/tópico abordado(a)	Referência
1	Google Scholar	<i>Juice debittering: basic science, optimization, and recent advances</i>	Análise da estrutura polimérica, tamanho do poro e da área superficial no debittering de suco de laranja por resinas adsorventes	GHANEM, 2012
2	ResearchGate	<i>Removal of Limonin Bitterness by Treatment of Ion Exchange and Adsorbent Resins</i>	Adsorção por resinas - comparação da Amberlite XAD-16HP e Dowex Optipore L285 no suco de laranja	KOLA et al., 2010
3	ResearchGate	<i>Removal of Bitterness by Using of Amberlite in Orange Juices</i>	Adsorção do amargor no suco de laranja utilizando a resina Amberlite XAD-7HP	NAS e KARATAS, 2017
4	Science Direct	<i>Industrial orange juice debittering: impact on bioactive compounds and nutritional value</i>	Análise do impacto do tratamento por resinas adsorventes sobre compostos bioativos e valor nutricional	STINCO et al., 2013
5	ResearchGate	<i>Commercial Debittering Processes to Upgrade Quality of Citrus Juice Products</i>	Princípios de adsorção e revisão histórica das tecnologias comerciais de debittering	SHAW et al., 2000
6	ResearchGate	<i>Industrial orange juice debittering: effect on volatile compounds and overall quality attributes</i>	Análise do impacto do tratamento por resinas adsorventes sobre compostos voláteis e qualidade do suco de laranja	VÁZQUEZ et al., 2013
7	ResearchGate	<i>Macroporous adsorbent resin debittering of Huang longbing (HLB)-affected orange juice and its impacts on consumer sensory acceptance</i>	Uso de resinas adsorventes para o tratamento de suco afetado por HLB	WASHINGTON et al., 2025
8	ResearchGate	<i>Impact of adsorbent Amberlite XAD-16 in reducing bitterness of pummelo juice</i>	Tratamento de suco de pomelo utilizando Amberlite XAD-16	DEVI et al., 2025

Quadro 1 - Principais trabalhos selecionados na revisão bibliográfica sobre o processo de *debittering*.

(conclusão)

ID	Base de dados	Título	Tecnologia/tópico abordado(a)	Referência
9	ResearchGate	<i>Effect of juice extraction methods and processing temperature-time on juice quality of Nagpur mandarin (Citrus reticulata Blanco) during storage</i>	Análise da influência do método de extração, e tempo e temperatura de pasteurização na qualidade do suco de tangerina	PAREEK et al., 2010
10	Google Scholar	<i>Distribution pattern of bittering principles in kinnow fruit</i>	Efeito do método de extração na liberação do precursor do limonin em frutas cítricas e sua concentração em diferentes partes da fruta	PREMI et al., 1994
11	Science Direct	<i>Debittering of citrus juice by different processing methods: A novel approach for food industry and agro-industrial sector</i>	Revisão de diferentes estratégias de <i>debittering</i> no processamento de sucos cítricos	PUREWAL e SANDHU, 2021
12	Science Direct	<i>Enemies of Citrus Fruit Juice: Formation Mechanism and State-of-the-Art Removal Techniques</i>	Revisão de mecanismos de formação do amargor nos sucos cítricos e processos de remoção	KONWAR et al., 2024
13	ResearchGate	<i>Efficacy of various techniques on biochemical characteristics and bitterness of pummelo juice</i>	Tratamento térmico e seu efeito sobre o amargor e qualidade no suco de pomelo	KORE e CHAKRABORTY, 2014
14	ResearchGate	<i>Use of Pre and Post Harvest Low Cost Techniques to Control/Minimize Citrus Juice Bitterness</i>	Diferentes estratégias para controle e minimização de amargor para indústria cítrica	KORE e CHAKRABORTY, 2018
15	Google Scholar	<i>Application of ultrafiltration for shelf-life extension of kinnow juice</i>	Aplicação da ultrafiltração e seu impacto na qualidade e vida útil do suco	ILAME e SINGH, 2018
16	EPA	<i>Use of ultrafiltration in the preventing of orange juice bitterness and its effects on the aroma compounds distribution</i>	Ultrafiltração - prevenção do amargor e preservação de compostos voláteis do suco de laranja	TALLARICO et al., 1998
17	Google Scholar	<i>Reduction of Bitterness and Tartness in Grapefruit Juice with Florisil</i>	Uso do Florisil (silicato de magnésio ativado) para remoção do limonin e naringina	BARMORE et al., 1986
18	Research Gate	<i>Effect of debittering techniques on the chemical characteristics of stores kinnow juice</i>	Avaliação sensorial do suco de <i>kinnow</i> a partir de diferentes métodos de <i>debittering</i>	KASHYAP e ANAND, 2017
19	Google Scholar	<i>Reduction of limonin content in lime juice using β-cyclodextrin treatment</i>	β -ciclodextrina - formação de complexos de inclusão e remoção de limonin em suco de limão	BALA et al., 2018
20	Science Direct	<i>β-cyclodextrin application for debittering of mandarin juice</i>	β -ciclodextrina - redução do amargor em suco de tangerina sem perda de qualidade	DESHWARE et al., 2018

Fonte: elaborado pelo autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma vez estabelecido o impacto do amargor na qualidade sensorial do suco de laranja, torna-se necessário avaliar as alternativas disponíveis para seu controle. Ao longo das últimas décadas, diferentes tecnologias destinadas à remoção ou redução dos compostos responsáveis por esse fenômeno foram desenvolvidas, constituindo um processo que ficou conhecido como "*debittering*".

5.1 Avaliação comparativa das principais estratégias de *debittering*

As tecnologias de *debittering* podem ser classificadas em métodos físicos, químicos e biológicos. Cada abordagem apresenta diferentes mecanismos de ação, eficiência de remoção dos compostos amargos, impacto sobre outras características físico-químicas e sensoriais do suco, e viabilidade de aplicação em escala industrial. Dessa forma, os principais métodos descritos na literatura são discutidos de maneira comparativa, buscando identificar suas vantagens, limitações e potencial de adoção pela indústria citrícola.

5.1.1 Métodos físicos

5.1.1.1 Adsorção por resinas

A adsorção por resinas constitui uma das principais estratégias aplicadas para o *debittering* de sucos cítricos. O método baseia-se na remoção seletiva dos compostos responsáveis pelo amargor por meio de materiais poliméricos macroporosos, sem a adição de reagentes químicos ao produto.

A eficiência das resinas adsorventes na remoção desses compostos é amplamente documentada na literatura. Shaw et al. (2000) consolidam a evolução histórica dessa tecnologia, que teve início com ensaios utilizando acetato de celulose e evoluiu para a aplicação de resinas de poliestireno-divinilbenzeno. Esse avanço resultou na instalação da primeira planta de *debittering* por resina nos Estados Unidos, em 1988, voltada para o tratamento de suco de laranja *navel*. Após uma década, registrou-se a existência de pelo menos 34 unidades industriais equipadas com estes sistemas em operação, consolidando a tecnologia como uma das principais soluções para o controle do amargor em sucos cítricos.

Resultados mais recentes reforçam esse potencial. Kola et al. (2010) avaliaram a aplicação da resina adsorvente Amberlite XAD-16HP e da resina de troca iônica Dowex Optipore L285 no tratamento de suco de laranja *navel*. Em ambos os casos, os autores

observaram uma remoção superior a 99%, reduzindo sua concentração inicial de 15,7 mg/L para valores próximos de zero. O alto teor inicial de limonin pode ser atribuído à utilização de um fruto do início da safra, conforme explicitado no estudo.

Apesar da eficiência na remoção dos compostos amargos observada no estudo, a resina Dowex Optipore L285 também promoveu a redução da acidez do suco. A resina Amberlite XAD-16HP, por sua vez, não provocou alterações nas demais características sensoriais. Esses resultados são consistentes com os reportados por Couture e Rouseff (1992), que observaram redução da acidez com o uso de outra resina de troca iônica, IRA-93, e a completa remoção do amargor pela resina Amberlite XAD-16, sem alterações de outras propriedades do suco.

Nas e Karatas (2017) estudaram a eficiência de remoção do amargor no suco de laranja utilizando a resina Amberlite XAD-7HP. O resultado foi semelhante com os anteriores, apresentando eficiência de remoção superior a 90% em diferentes condições operacionais. Os autores também citam a mudança da acidez relacionada a temperatura e tempo de operação, embora não tenham sido observadas diferenças significativas de outras características físico-químicas, como o pH e sólidos solúveis.

A eficiência da remoção do amargor utilizando adsorção também é observado em outras frutas cítricas. Devi et al. (2025), observaram a redução de 88% do limonin e 40% da naringina do suco de pomelo após o tratamento com a resina Amberlite XAD-16. O estudo não abordou a análise de outros componentes para verificação de sua alteração, porém concluíram que o uso da resina é mais eficiente para remover os limonoides, responsáveis pelo amargor tardio, quando comparado com a naringina, flavonoide.

5.1.1.2 Métodos de extração e processamento

O controle das condições de extração constitui uma estratégia preventiva para a redução do amargor em sucos cítricos. Parâmetros como a pressão aplicada durante a extração influenciam o grau de ruptura das sementes e das membranas internas do fruto e, consequentemente, a incorporação de precursores do limonin, uma vez que essas estruturas apresentam maior concentração de limonoides (PREMI et al., 1994).

A partir disso, estudos indicam a influência do método de extração na qualidade final do suco processado. Pareek et al. (2010) avaliam a diferença entre dois métodos de extração do suco de tangerina, um espremedor manual do tipo parafuso e uma extratora comercial

elétrica, ambos utilizando a fruta descascada, e passando na sequência por etapas equivalentes de filtração e pasteurização. A principal diferença entre os tratamentos, além do equipamento utilizado, foi o grau de ruptura observado das vesículas e sementes da fruta durante a extração. Por apresentar uma maior pressão de extração, o equipamento comercial apresentou um maior teor de limonin e naringina após 6 meses de armazenamento, com aumentos de 21% e 19%, respectivamente.

Além disso, verificou-se que a temperatura e o tempo de pasteurização também influenciam a formação de compostos amargos. Ao final do período avaliado, observou-se que o tratamento realizado a 85 °C por 15 min apresentou concentração de limonin aproximadamente 65% maior à observada no tratamento a 65 °C pelo mesmo tempo. Esse comportamento foi atribuído ao aumento da conversão do precursor LARL em limonin, favorecida pelo aquecimento, bem como à menor solubilidade desse composto em água, contribuindo para sua maior concentração no suco. Por outro lado, temperaturas mais baixas de pasteurização parecem inibir essa conversão, reduzindo a formação de limonin durante o armazenamento. Um comportamento semelhante também foi observado para a naringina.

Embora o estudo tenha sido conduzido em condições experimentais não totalmente representativas do processamento industrial, especialmente devido à extração manual do suco, os resultados evidenciam a relevância de parâmetros operacionais como a pressão de extração e a temperatura de pasteurização no controle da formação de compostos amargos.

No entanto, apesar de apresentar resultados positivos, o método apresenta uma limitação importante. A redução da pressão implica a diminuição do rendimento de extração e, consequentemente, da capacidade produtiva da planta industrial. Além disso, outros estudos demonstraram que a redução do amargor obtida exclusivamente pelo ajuste das condições de extração é relativamente pequena, não sendo suficiente para eliminar o problema de forma isolada (KORE e CHAKRABORTY, 2014; DESHAWARE et al., 2018).

5.1.1.3 Tratamento com água quente

O tratamento em água quente (TAQ) consiste na imersão da fruta em água aquecida, normalmente a cerca de 50 °C, por 20 a 30 minutos, antes da etapa de extração, sendo considerado um método preventivo de redução do amargor. Kore e Chakraborty (2014) verificaram que essa técnica é capaz de reduzir o amargor final do suco quando comparada ao método convencional de extração. No entanto, quando avaliada em painel sensorial com

escala hedônica de 1 a 9 (sendo 9 a maior aceitabilidade), a redução do amargor apresentou baixa percepção, com média de 1,5 em relação ao suco sem tratamento.

Embora o método apresente algum efeito, sua eficiência é limitada quando comparada a outras estratégias. Além disso, o TAQ pode promover alterações significativas em outras características físico-químicas e sensoriais do suco, sendo esta a sua principal limitação para a aplicação em escala industrial.

5.1.1.4 Filtração por membranas

Outra estratégia física para o controle da incorporação de compostos amargos é a filtração por membranas, com destaque para a ultrafiltração (UF). Além da clarificação do suco, etapa responsável pela remoção da polpa, a tecnologia contribui para reduzir a concentração de limonoides e aumentar sua estabilidade durante o armazenamento.

Ilame e Singh (2018) relataram que a aplicação de membranas de ultrafiltração em suco de *kinnow* possibilitou seu armazenamento em até 60 dias a 4°C sem a utilização de conservantes, além de promover melhorias nas características visuais e sensoriais do produto. Para o suco de laranja, Tallarico et al. (1998) avaliaram a eficiência da ultrafiltração na redução do amargor e observaram que o suco permeado apresentou uma redução de até 65% no teor do limonin em comparação ao suco fresco, obtendo-se uma concentração de 3,5 mg/L, valor inferior ao limiar de percepção do composto, de 6,0 mg/L. Ambos os estudos indicaram preservação das demais características do suco após o tratamento. Compostos como limonin e outros aromáticos menos polares tendem a permanecer associados à fração de polpa, que é retida pela membrana durante o processo de filtração.

Embora possa contribuir para a redução do sabor amargo, a ultrafiltração não atua por adsorção seletiva de compostos amargos. Seu efeito está relacionado principalmente à retenção de polpa e de partículas coloidais associadas a precursores do amargor, enquanto os compostos solúveis atravessam a membrana e são transferidos para o permeado. Dessa forma, a UF é empregada principalmente como etapa de clarificação e pré-tratamento em sistemas de *debittering*, atuando de forma complementar às outras tecnologias de adsorção, e não como substituta direta desses processos (SHAW et al., 2000; PUREWAL e SANDHU, 2021).

5.1.2 Métodos químicos

5.1.2.1 Florisil (silicato de magnésio ativado)

O florisil, ou silicato de magnésio ativado, é um agente adsorvente de origem mineral amplamente utilizado em processos de separação e purificação. No *debittering* de sucos cítricos, seu mecanismo ocorre pela quimissorção dos compostos responsáveis pelo amargor, seguida da remoção do material por sedimentação e filtração.

Barmore et al. (1986) avaliaram diferentes concentrações de florisil no tratamento de suco de pomelo em processo descontínuo. Os autores verificaram que a eficiência de remoção do amargor mostrou-se diretamente proporcional a concentração de florisil utilizada, obtendo eficiências de remoção de 33% e 81% a concentrações de 5% e 20% (m/v) do produto, respectivamente - menor e maior concentração analisada no estudo. Mesmo na maior concentração, não foram observadas alterações significativas de outras características físico-químicas do suco. Contudo, foi relatado que em concentrações a partir de 10%, o tempo de contato deve ser inferior a 1 minuto, com risco de perda de sabor.

Os autores também verificaram a eficiência de remoção a partir da reutilização do florisil. Após a separação, o produto era lavado em água corrente e submetido a um novo tratamento, utilizando o suco fresco. A uma concentração de 10%, o teor de limonin foi inicialmente reduzido de 7,7 para 3,7 mg/L, correspondendo a uma eficiência de remoção de 52%. Com a reutilização do produto, a eficiência diminui progressivamente, apresentando valores de 47%, 27% e 20% após o primeiro, segundo e terceiro reuso, respectivamente. Comportamento semelhante foi observado para a remoção da naringina.

Embora a perda de eficiência durante os ciclos de utilização represente uma limitação operacional, os autores destacam que o florisil pode ser regenerado por tratamento térmico, possibilitando sua reutilização após reativação.

A avaliação sensorial conduzida na pesquisa também indicou resultados positivos. Em um painel composto por 26 avaliadores, 24 identificaram uma diferença no suco tratado, sendo que 20 preferiram o produto submetido ao tratamento com florisil a 4% (BARMORE et al., 1986). Em um estudo mais recente, Kashyap e Anand (2017) avaliaram a eficiência do *debittering* no suco de *kinnow* a partir de uma análise sensorial com escala de 1 a 5, em que 5 representa “não amargo”. Enquanto o tratamento com resina adsorvente atingiu uma nota de aproximadamente 4,5, o tratamento com florisil obteve 3,5, cerca de um ponto abaixo.

5.1.2.2 β -ciclodextrina

A β -ciclodextrina é um oligossacarídeo cíclico capaz de formar complexos de inclusão com moléculas hidrofóbicas, encapsulando compostos responsáveis pelo amargor em sua cavidade interna. Após essa complexação, os compostos podem ser removidos do suco por precipitação e filtração (PUREWAL e SANDHU, 2021).

Bala et al. (2018) avaliaram a aplicação da β -ciclodextrina no tratamento de suco de limão, cuja concentração inicial de limonin foi de 23,2 mg/L - valor característico da fruta, superior ao normalmente encontrado para o suco de laranja. Os autores também verificaram concentrações significativamente maiores de limonin e naringina na casca e nas sementes, reforçando que a incorporação dessas estruturas durante a extração intensifica o amargor do suco. Quanto ao desempenho do tratamento, a β -ciclodextrina promoveu remoção de apenas 14,2% do limonin, resultado muito inferior ao obtido com a resina Amberlite XAD-16, que atingiu eficiência de 74,6% nas mesmas condições experimentais.

Apesar da baixa capacidade de remoção do composto amargo, foi indicado que o tratamento com a β -ciclodextrina resultou em uma melhora substancial da qualidade sensorial do suco. Adicionalmente, ambos os tratamentos apresentaram uma pequena retenção de ácido ascórbico, indicando, no geral, boa seletividade. Ao final do estudo, o suco tratado com a resina adsorvente XAD-16 apresentou a melhor qualidade sensorial, obtendo as maiores avaliações nos atributos de sabor, textura e cor.

Deshaware et al. (2018), por sua vez, avaliaram diferentes concentrações de β -ciclodextrina (0,25 a 2%, m/v) no tratamento de suco de tangerina. A concentração de 1,5% foi identificada como a condição de melhor desempenho, proporcionando redução significativa do *bitter aftertaste* (“amargor retroativo”) e melhoria perceptível do aroma. Mesmo nas menores concentrações avaliadas, o tratamento já promoveu redução estatisticamente significativa da percepção do amargor em comparação ao suco sem tratamento. Além da redução do amargor, estudos anteriores compilados pelos autores indicam que a utilização da β -ciclodextrina pode contribuir para a preservação das propriedades nutricionais, físico-químicas e sensoriais do suco, tornando essa tecnologia uma potencial alternativa para o tratamento por resina.

5.1.2.3 Tratamento com soda cáustica

O tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH) consiste na imersão de frutos cítricos inteiros em solução aquecida de soda cáustica, geralmente a aproximadamente 80 °C por cerca de um minuto, seguida de neutralização com ácido cítrico e lavagem em água (KORE e CHAKRABORTY, 2014). O tratamento promove alterações na região do albedo da casca, favorecendo a remoção ou transformação de compostos responsáveis pelo amargor antes da extração do suco.

Entretanto, essa estratégia provoca alterações significativas na composição do produto, evidenciando que o tratamento afeta não apenas os compostos amargos, mas também outros parâmetros importantes relacionados à qualidade do suco. Além dos impactos sobre as características físico-químicas, o processo também gera efluentes alcalinos que necessitam de tratamento adequado antes do descarte, aumentando sua complexidade e custo operacional.

5.1.3 Métodos biológicos e enzimáticos

Os métodos biológicos representam uma abordagem alternativa para o *debittering* de sucos cítricos, baseada na conversão enzimática dos compostos amargos em moléculas de menor ou nenhuma percepção sensorial. Diferentemente dos métodos físicos e químicos apresentados, que removem seletivamente esses compostos do suco, estas modificam sua estrutura bioquímica, preservando o restante da composição do suco e reduzindo a necessidade de etapas adicionais de separação (KONWAR et al., 2024).

Embora apresentem uma boa eficiência, elevada seletividade e potencial para preservar as características nutricionais e sensoriais do suco, essas tecnologias ainda se encontram predominantemente em estágio de desenvolvimento, enfrentando desafios relacionados à estabilidade enzimática, aos custos de produção e na adaptação às condições de processamento dos sucos cítricos.

5.1.3.1 Naringinase e enzimas de degradação de flavonoides

A naringinase é uma enzima bifuncional responsável pela degradação da naringina, principal composto associado ao amargor de frutas como *grapefruit* e pomelo, além de contribuir para o amargor instantâneo do suco de laranja. Seu mecanismo de conversão ocorre em duas etapas. Inicialmente, a naringina é hidrolisada em prunina e, posteriormente, esta é

convertida em glicose e naringenina, flavanona cujo amargor é significativamente inferior ao do composto original.

Segundo Konwar et al. (2024), a utilização de naringinase imobilizada em microesferas de quitosana permitiu remover aproximadamente 75% da naringina presente em suco de toranja, reduzindo sua concentração para valores inferiores ao do limiar de percepção. Além da elevada eficiência, a imobilização aumentou a estabilidade da enzima em meio ácido e possibilitou sua reutilização em diferentes ciclos de operação, reduzindo o consumo de biocatalisador e os custos operacionais em comparação ao uso da enzima livre.

Conforme discutido anteriormente, Kashyap e Anand (2017) compararam diferentes tecnologias de *debittering* para suco de *kinnow* por meio de uma escala sensorial de 1 a 5, na qual a nota 5 correspondia à melhor eficiência na redução do amargor. A resina adsorvente apresentou a maior avaliação (4,5), seguida pela naringinase (4,0) e pelo florisil (3,5), indicando que a tecnologia enzimática apresenta desempenho intermediário entre os métodos avaliados e potencial para aplicação no tratamento de sucos cítricos.

A imobilização nas microesferas de quitosana é um avanço significativo sob um dos principais fatores limitantes do uso de enzimas para o tratamento de suco, o meio ácido - no estudo, a enzima conseguiu operar em um pH de 3,7. No entanto, a produção da enzima em quantidades suficientes para processos contínuos permanece economicamente inviável, enquanto a presença de sólidos suspensos no suco pode favorecer o entupimento dos suportes de imobilização, tendo como consequência uma redução da atividade enzimática.

5.1.3.2 Enzimas de conversão de limonoides

Enquanto a naringinase atua principalmente sobre flavonoides, o controle do amargor tardio em suco de laranja tem direcionado as pesquisas para enzimas capazes de atuar especificamente sobre os limonoides (KONWAR et al., 2024).

A principal enzima estudada atualmente é a UDP-D-glicose: limonoide glicosiltransferase (LGT), que catalisa uma unidade de glicose da uridina difosfoglicose (UDPG) para o LARL, convertendo-o em um glicosídeo não amargo. Esse mecanismo reduz o potencial de formação do limonin no suco, reproduzindo o processo bioquímico que ocorre naturalmente durante a maturação dos frutos cítricos. A enzima limonoato desidrogenase (LDH) seria capaz de um mecanismo semelhante, porém atuando no suco recém-extraído, antes da formação do limonin.

Embora essas tecnologias ainda se encontrem em estágio experimental, elas demonstram potencial para o desenvolvimento de processos biológicos de controle do amargor em sucos cítricos.

5.1.4 Comparação entre as diferentes tecnologias

Entre as tecnologias analisadas, a adsorção por resinas destaca-se por apresentar o melhor desempenho documentado. Diversos estudos reportaram, de forma consistente, remoções superiores a 90% dos compostos amargos, acompanhada de melhora perceptível na qualidade sensorial do suco (Devi et al., 2025; COUTURE e ROUSSEFF, 1992; KOLA et al., 2010; NAS e KARATAS, 2017).

Entre os métodos enzimáticos, a naringinase também apresentou um alto potencial de redução do amargor por meio da conversão da naringina em compostos de menor percepção sensorial. A imobilização da enzima em microesferas de quitosana possibilitou a remoção de aproximadamente 75% da naringina presente no suco de toranja. Embora a naringina tenha uma menor contribuição para o amargor do suco de laranja, os resultados reforçam o potencial das tecnologias enzimáticas para a conversão seletiva de compostos amargos e complementam a escassez de estudos experimentais sobre enzimas como a LGT e a LDH, que atuam diretamente na conversão do LARL, precursor do limonin (KONWAR et al., 2024). O florisil, por sua vez, apresentou desempenho dependente da concentração utilizada, com remoções na faixa de 33% e 81% (BARMORE et al., 1986).

Os resultados obtidos são coerentes com a avaliação sensorial conduzida por Kashyap e Anand (2017) em suco de *kinnow*. Em uma escala de 1 a 5 para percepção da redução do amargor, a adsorção por resinas obteve a maior pontuação (4,5), seguida da naringinase (4,0) e pelo florisil (3,5), evidenciando a relação entre o desempenho do processo e a melhoria sensorial do produto.

A ultrafiltração apresentou potencial para reduzir em até 65% o teor de limonin em comparação ao suco não tratado, atingindo concentrações inferiores ao limiar de percepção sensorial. Além da redução do amargor, a tecnologia contribui para a clarificação do suco e para o aumento de sua estabilidade durante o armazenamento, prolongando a vida útil do produto. Já a β -ciclodextrina apresentou a menor eficiência na remoção, com redução de apenas 14,2% do limonin no suco de limão, enquanto a resina Amberlite XAD-16 alcançou 74,6% nas mesmas condições experimentais (BALA et al., 2018).

A seletividade, entendida como a capacidade de remover os compostos amargor sem alterar outras características físico-químicas do suco, constitui um dos principais critérios para a avaliação das tecnologias de *debittering*.

As resinas adsorventes Amberlite apresentaram alta seletividade, preservando parâmetros como pH, sólidos solúveis e acidez (NAS e KARATAS, 2017). Por outro lado, resinas de troca iônica, como a Dowex Optipore L285 e a IRA-93 promoveram a redução da acidez titulável do suco (KOLA et al., 2010; COUTURE e ROUSSEFF, 1992). Os métodos enzimáticos possuem a maior seletividade teórica, pois são capazes de converter especificamente os compostos amargos, como a naringina e o LARL, sem a alteração de outros componentes do suco.

Entre os métodos químicos, a β -ciclodextrina apresentou boa seletividade, promovendo apenas uma pequena retenção de ácido ascórbico, sem alteração significativa nos demais parâmetros de qualidade do suco (BALA et al., 2018). Em contraste, o florisil apresentou uma menor seletividade, sendo observado que o método pode ocasionar a perda de sabor quando utilizado em maiores concentrações, condição que também proporciona maior remoção dos compostos amargos (BARMORE et al., 1986). A ultrafiltração atua de forma não seletiva, uma vez que sua eficiência resulta da retenção da polpa e de frações coloidais, as quais parte dos compostos amargos estão associados, e não da sua remoção específica. Assim, compostos amargos solúveis poderiam atravessar a membrana juntamente com o permeado. Por outro lado, a tecnologia apresenta baixo impacto sobre vitaminas, açúcares e demais constituintes do suco (ILAME e SINGH, 2018).

A análise da complexidade operacional envolveu a infraestrutura necessária para a implantação e operação da tecnologia, enquanto a maturidade tecnológica reflete o estágio de desenvolvimento de cada método. As resinas adsorventes exigem a maior complexidade operacional, pois demandam colunas de leito fixo, sistemas de controle de vazão, etapas de regeneração, além de uma infraestrutura para o pré-tratamento do suco, como a centrifugação, evitando que partículas da polpa prejudiquem a atividade das resinas. Apesar dessa complexidade, trata-se de uma tecnologia consolidada, com protocolos operacionais bem estabelecidos (SHAW et al., 2000).

Os métodos biológicos, por sua vez, apresentam uma alta complexidade operacional associada à produção e imobilização das enzimas, que envolvem processos biotecnológicos específicos. Além disso, o desenvolvimento tecnológico do método ainda está no estágio

inicial, comparado a outras alternativas avaliadas. Apesar dos resultados promissores em escala laboratorial, os métodos apresentam pouca validação em condições mais próximas do processamento industrial, especialmente em termos de regime de operação, que é feito predominantemente em batelada e com tempo na ordem de horas por ciclo. Adicionalmente, a presença de sólidos suspensos pode comprometer a estabilidade e a eficiência dos suportes de imobilização ao longo do tempo (KONWAR et al., 2024). Os desafios de custo, estabilidade e escalonamento ainda limitam essa tecnologia ao ambiente de pesquisa.

A β -ciclodextrina e o florisil apresentam complexidade e maturidade tecnológica intermediária, operando predominantemente em sistemas descontínuos que exigem adição do produto ao suco seguida de etapas de separação, por precipitação ou sedimentação, e filtração. No caso do florisil, há ainda o cenário de recuperação para a sua reutilização, envolvendo a regeneração térmica do material. A ultrafiltração requer um investimento inicial em sistemas de membranas e controle de pressão, além de operações periódicas de limpeza. No entanto, trata-se de uma operação simples e com tecnologia amplamente estabelecida e consolidada na indústria de sucos cítricos.

O Quadro 2 sintetiza uma comparação qualitativa das tecnologias avaliadas, considerando os critérios descritos acima. A comparação foi restrita às tecnologias que atuam diretamente sobre o suco processado, excluindo estratégias preventivas, como o controle das condições de extração, o tratamento em água quente e o tratamento alcalino da fruta, que atuam em etapas distintas do processamento e, portanto, não são diretamente comparáveis às demais alternativas.

Após a análise, conclui-se que a adsorção por resinas representa, atualmente, a alternativa mais consolidada para o *debittering* do suco de laranja. Os resultados reportados na literatura evidenciam um elevado potencial de aplicação industrial, sustentado por décadas de desenvolvimento tecnológico e validações em diferentes condições de processamento, reunindo alta eficiência na remoção de compostos amargos, elevada seletividade e maturidade tecnológica - embora apresente também o maior investimento inicial e custos.

As demais abordagens, como os métodos enzimáticos, a β -ciclodextrina e o florisil apresentam vantagens específicas e potencial de evolução. Porém, suas limitações quanto à eficiência, escalabilidade ou nível de desenvolvimento ainda restringem sua aplicação industrial. Assim, essas tecnologias devem ser vistas como alternativas complementares ou

promissoras para aplicações específicas, enquanto as resinas permanecem como a solução de referência para o debittering em escala industrial.

Quadro 2 - Comparação das principais tecnologias de *debittering* para o tratamento de sucos cítricos.

Critério	Resinas adsorventes	Ultrafiltração	Florisil	β-ciclodextrina	Naringinase/enzimas
Tipo	Físico	Físico	Químico	Químico	Biológico
Eficiência de remoção	Alta	Moderada	Alta	Baixa	Alta
Seletividade	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Alta
Impacto sobre compostos desejáveis	Baixo	Baixo	Alto	Baixo	Baixo
Complexidade operacional	Alta	Baixa	Moderada	Moderada	Alta
Maturidade tecnológica	Alta	Alta	Limitada	Limitada	Baixa

Fonte: elaborado pelo autor, com base em Kola et al. (2010); Nas e Karatas (2017); Barmore et al. (1986); Bala et al. (2018); Deshaware et al. (2018); Ilame e Singh (2018); Konwar et al. (2024); Purewal e Sandhu (2021).

5.2 Fundamentos da adsorção na remoção do amargor

Como observado, a literatura descreve diferentes tipos de resinas aplicadas ao processo de *debittering* do suco, as quais apresentam desempenho e características diferentes. Esta seção tem como objetivo apresentar o mecanismo de funcionamento dessa tecnologia e discutir as principais considerações envolvidas na seleção de cada tipo de resina, aprofundando a compreensão do tema.

5.2.1 Mecanismo do processo de adsorção

O processo de adsorção consiste em uma operação de transferência de massa no qual moléculas presentes em um fluido se acumulam na superfície de um sólido adsorvente. Esse processo é tipicamente limitado pela difusão das moléculas até a superfície do adsorvente, ou em seu interior. Por isso, justifica-se a utilização de materiais com elevada área superficial e a alta porosidade (NORMAN, 1990).

A estrutura porosa influencia diretamente o desempenho do processo, estabelecendo um balanço entre área disponível e resistência à difusão interna. Poros menores aumentam a área de adsorção, porém dificultam o transporte molecular, enquanto poros maiores facilitam

a difusão, mas reduzem a densidade de sítios ativos. Além disso, o tamanho do poro também influencia o tamanho da molécula que consegue adsorver.

No *debittering* de sucos cítricos, a adsorção é feita a partir de interações físicas hidrofóbicas e forças de van der Waals entre o limonin e a matriz adsorvente, resultando na sua retenção. Esse comportamento está relacionado à natureza química do limonin, que pertence à classe das furanolactonas, compostos que contêm anéis de lactona e furano em sua estrutura. Embora haja a presença de grupos oxigenados de natureza polar, a predominância de uma estrutura policíclica formada por átomos de carbono e hidrogênio confere caráter globalmente hidrofóbico à molécula, favorecendo sua adsorção na matriz apolar.

Como não ocorre nenhuma ligação química entre ambos os compostos, o processo é definido como uma fisissorção. Washington et al. (2025) descrevem que o mecanismo de adsorção do limonin segue o modelo da isoterma de Langmuir, inferindo-se, portanto, que ocorre em monocamada.

Ressalta-se que a resina apresenta uma capacidade finita de remoção dos compostos amargos, dado a saturação dos sítios ativos disponíveis. Quando isso acontece, torna-se necessária a regeneração do leito adsorvente. Esse processo é feito utilizando outro solvente apolar, como o hidróxido de sódio, que promove o enfraquecimento das interações hidrofóbicas entre o limonin e a matriz da resina, favorecendo sua dessorção e restabelecendo a capacidade de adsorção do material.

5.2.2 Desempenho e seletividade das resinas adsorventes

O principal parâmetro no processo de *debittering* por adsorção, segundo Norman (1990), é a escolha da resina, uma vez que seu desempenho e seletividade determinam diretamente a qualidade do produto final. Ao longo das últimas décadas, diferentes materiais foram avaliados para essa finalidade, incluindo carvão ativado, zeólitas, esferas de acetato de celulose e ciclodextrinas. No entanto, limitações como baixa seletividade, dificuldades operacionais, restrições regulatórias e inviabilidade econômica impediram sua consolidação em escala industrial.

Atualmente, as resinas à base de poliestireno-divinilbenzeno (PS-DVB) constituem a principal tecnologia empregada no *debittering* de sucos cítricos. Esses materiais são formados por matrizes poliméricas altamente porosas, geralmente na forma de partículas esféricas, o que favorece o empacotamento em coluna e a distribuição uniforme do fluxo. A retenção dos

compostos amargos ocorre predominantemente por interações físicas e hidrofóbicas com a matriz polimérica, sem a presença de grupos funcionais ativos, o que minimiza alterações as propriedades do suco em comparação com resinas de troca iônica, que podem afetar parâmetros como a acidez titulável.

A consolidação das PS-DVB decorre da combinação de alta afinidade por moléculas insaturadas e com a presença de anéis aromáticos, como o limonin, alta estabilidade térmica e mecânica, facilidade de regeneração e viabilidade econômica em operação contínua. Embora materiais mais hidrofóbicos, como resinas estirênicas bromadas, apresentem maior capacidade de adsorção, sua regeneração é mais complexa, limitando sua aplicação industrial (GHANEM, 2012).

Entre as resinas de PS-DVB mais estudadas, destaca-se a Amberlite, amplamente avaliada em diferentes estudos devido ao seu desempenho no *debittering* de sucos cítricos. A Tabela 1 apresenta as principais características dessa resina e outras, incluindo suas propriedades estruturais e eficiências de remoção de compostos amargos. A seletividade e os impactos observados em outras características sensoriais do suco, além da influência de parâmetros do experimento, foram discutidas abaixo.

Tabela 1 - Comparação de resinas PS-DVB Amberlite e suas propriedades.

Resina Adsorvente	Área Superficial [m ² /g]	Tamanho do Poro [Å]	Eficiência	Referência
Amberlite XAD-16HP	800	~150	98%	KOLA et al. 2010
Amberlite XAD-7HP	Entre 380 e 520	~550	88%	NAS; KARATAS, 2017
Amberlite XAD-16	Entre 800 e 900	Entre 100 e 200	87%	DEVI et al., 2025
Lewatit VPOC 1064 MD PH	800	Entre 50 e 100	-	STINCO et al., 2013 VÁZQUEZ et al., 2013

Nota: a eficiência de remoção do limonin no trabalho de STINCO et al. (2013) e VÁZQUEZ et al. (2013) não foi quantificada pelos autores, com maior foco nos componentes bioativos do suco.

Fonte: elaborado pelo autor, com base em Kola et al. (2010); Nas e Karatas (2017).

Os estudos utilizando as resinas Amberlite evidenciam a alta eficiência e seletividade de remoção. O estudo de Kola et al. (2010) observou reduções menores que 5% em características como o ácido ascórbico, e consequentemente da acidez titulável (2,8%), resultando em um aumento do ratio (1,8%) utilizando a Amberlite XAD-16HP. No mesmo estudo, variações de temperatura (20, 35 e 50 °C) não apresentaram influência significativa na

eficiência de remoção. Por outro lado, o aumento da vazão do suco no tratamento proporcionou um menor desempenho do processo, possivelmente devido ao menor tempo de contato entre o suco e a resina.

Embora o estudo de Nas e Karatas (2017) tenham apresentado uma redução de até 96% da concentração de limonin a 40 °C, a eficiência média observada, considerando a mesma faixa de temperatura do estudo de Kola et al. (2010), foi de 88%, 10 pontos percentuais abaixo da atingida pela resina anterior. Essa diferença pode ser atribuída às características estruturais da resina, como a área superficial e o tamanho dos poros.

A Amberlite XAD-16HP apresenta menor diâmetro de poros e maior área superficial, enquanto a Amberlite XAD-7HP possui poros maiores, resultando em menor área superficial. De acordo com Ghanem (2012), a literatura técnica sugere que o desempenho otimizado para remoção de limonoides em sucos cítricos é atingido com diâmetros médios de poros na faixa de 60 e 200 Å. Assim, conclui-se que a XAD-16HP estaria melhor adequada a esse intervalo, preservando uma maior área superficial e número de sítios ativos. A XAD-7HP, por apresentar poros maiores, diminui sua área superficial sem trazer um ganho significativo pela diminuição da resistência de difusão interna, resultando em uma menor capacidade de adsorção.

A seletividade do processo utilizando a XAD-7HP, por sua vez, apresentou um resultado ligeiramente superior ao da XAD-16HP, com uma redução de 2,0% da acidez titulável - em comparação a 2,8%. A partir disso, infere-se que o aumento da área superficial da resina, mantendo um tamanho de poro compatível com o processo, é capaz de melhorar a eficiência global, apesar de uma pequena redução da seletividade observada em relação à acidez titulável. Adicionalmente, os resultados obtidos por Nas e Karatas (2017) também evidenciam uma redução da eficiência do processo em temperaturas maiores que 50 °C, com média de 65% a 60 °C.

Com a utilização da resina de poliestireno Lewatit VPOC 1064 MD PH, Stinco et al. (2013) verificaram a eliminação do amargor sensorial do produto, embora a eficiência de remoção de limonin não tenha sido quantificada. Em contrapartida, o tratamento promoveu reduções de 26% no ácido ascórbico, comprometendo o teor de vitamina C, e de até 39% dos compostos fenólicos, incluindo ácidos hidroxicinâmicos, flavonas e flavanonas, reduzindo também a atividade antioxidante do suco. Esses resultados evidenciam alterações significativas nas propriedades físico-químicas do produto, tornando essa resina pouco

recomendada para aplicação industrial. Esse comportamento pode estar associado novamente à uma maior área superficial, que favorece a adsorção de outros compostos bioativos de interesse.

5.3 Integração do processo de adsorção na planta industrial

Definida a resina adsorvente e os critérios que orientam sua escolha, torna-se necessário compreender como essa etapa se insere no fluxograma de uma planta de processamento de suco de laranja. Diferentemente de ensaios em escala laboratorial, a operação industrial deve conciliar a remoção dos compostos amargos com a continuidade do processo, a preservação das características do suco e a viabilidade econômica da fábrica.

A unidade de *debittering* é tipicamente posicionada após a extração e o *finishing*, etapa responsável pela remoção de sementes, fragmentos de casca e excesso de polpa. O tratamento também deve ser feito antes da concentração ou tratamento térmico, etapa em que o suco se encontra na forma de “*single strength*”. A posição da unidade antes da concentração do suco é explicada porque o aumento de viscosidade decorrente da evaporação parcial comprometeria a transferência de massa e aumentaria a perda de carga no leito. No tratamento com o suco FCOJ já processado, é necessário fazer a sua diluição antes da adsorção por resina.

De forma geral, o processo é organizado em duas etapas principais, a clarificação do suco por centrifugação ou ultrafiltração, seguida da passagem do suco clarificado por colunas de leito fixo contendo a resina, onde ocorre a remoção dos compostos responsáveis pelo amargor. Em seguida, a fração de polpa é recombinada ao suco tratado, restituindo corpo e turbidez antes das etapas finais de processamento.

A clarificação antes do tratamento é determinante para o desempenho e vida útil do leito. A redução de sólidos suspensos minimiza fenômenos como a colmatação, que se refere ao entupimento ou bloqueio da resina, a formação de canais preferenciais (*channeling*) e o aumento da perda de carga, além de favorecer o contato entre o suco e os sítios ativos da resina, aumentando a eficiência de remoção. Em geral, considera-se adequado um teor de polpa inferior a cerca de 1% para evitar impactos no desempenho do processo (NORMAN, 1990).

É comum também o posicionamento de uma etapa de *deoiling* após a clarificação do suco. A remoção do óleo, componente hidrofóbico, é importante pois ele também pode ser

adsorvido pelas resinas de poliestireno-divinilbenzeno, fazendo com que haja a saturação dos sítios ativos e, conseqüentemente, uma redução da eficiência do processo de remoção do amargor. Além disso, a operação possibilita a recuperação do óleo, composto de alto valor agregado para a indústria citrícola.

A operação das colunas é semi-contínua, sendo limitada pela saturação dos sítios ativos e necessidade de regeneração da coluna. Com a diminuição da atividade da resina, a eficiência do processo começa a diminuir e, também, o teor de compostos amargos removidos. O ponto de ruptura, ou *breakthrough*, é usualmente definido com base em critérios sensoriais, sendo a concentração de limonin no efluente o principal indicador de exaustão do leito. Quando esse limite é atingido, a coluna é retirada de operação e submetida à regeneração. Para garantir a continuidade do processo, utiliza-se um arranjo de múltiplas colunas operando de forma alternada, no qual uma coluna realiza adsorção enquanto outras são regeneradas, ou permanecem em espera.

O ciclo operacional das colunas pode ser descrito de forma mais detalhada em dois modos de operação: o “modo de serviço” e o “modo de regeneração”. O primeiro corresponde ao tratamento, na qual ocorre a passagem do suco pelo leito adsorvente, seguido, após o *breakthrough*, por uma etapa de sanitização das linhas, com o objetivo de evitar contaminações entre os ciclos de operação.

Uma vez atingida a condição de saturação do leito e a sanitização da linha, inicia-se o processo de regeneração. Inicialmente, é realizada uma etapa de remoção do suco remanescente no leito por água ou ar. Na sequência, aplica-se a retrolavagem, com fluxo ascendente de água, com o objetivo de remover polpa residual e partículas finas eventualmente acumuladas, além de reclassificar o leito e minimizar problemas de perda de carga em ciclos subsequentes. Em seguida, ocorre a etapa de regeneração química, na qual uma solução alcalina diluída, tipicamente hidróxido de sódio, é percolada através do leito, promovendo a dessorção dos compostos amargos adsorvidos. Por fim, realiza-se a etapa de enxágue, na qual a água é utilizada para remover resíduos do agente regenerante e recondicionar o leito para um novo ciclo de operação.

Além da remoção do amargor, a mesma plataforma de colunas pode ser utilizada para outras etapas de tratamento do suco, como desacidificação, estabilização da turbidez (*cloud*) e ajuste de cor, por meio de diferentes tipos de resinas. Essas operações podem ser realizadas em série, melhorando a qualidade geral do suco. Assim, o que é observado na indústria é a

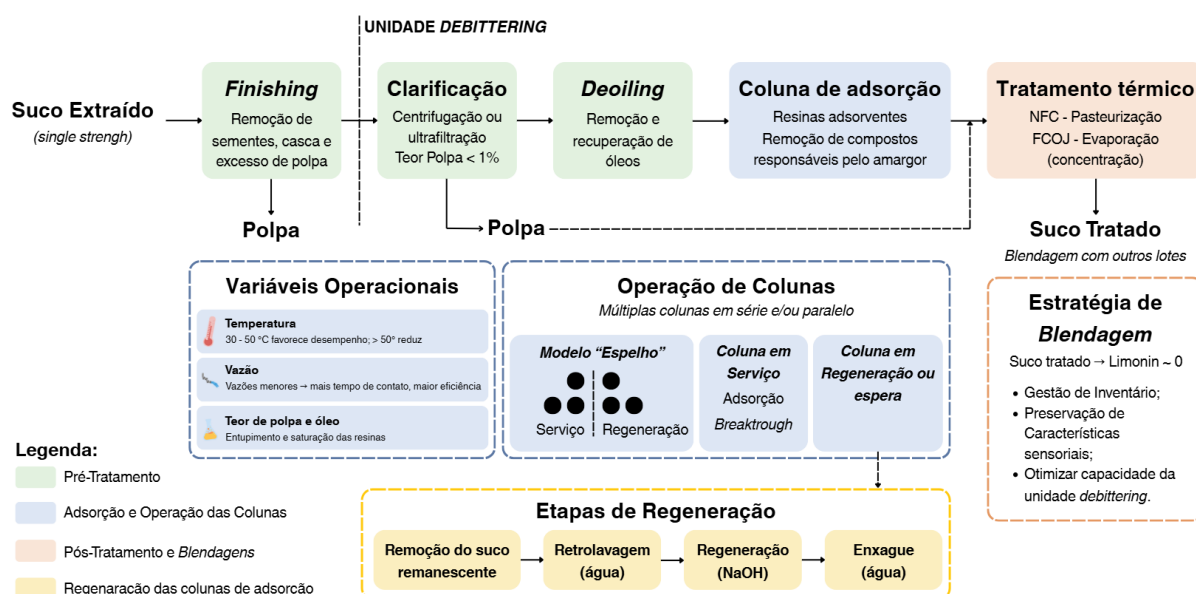
adoção de uma estrutura em “espelho”, para manter o processo contínuo durante a regeneração, de uma ou mais colunas em série e também em paralelo, aumentando a capacidade de processamento.

O desempenho do processo depende de variáveis operacionais interdependentes. A vazão ou velocidade espacial controla o tempo de contato entre suco e resina, influenciando diretamente o *breakthrough*. A temperatura afeta simultaneamente a difusão e a eficiência de remoção, com valores intermediários, entre 30 e 50 °C, favorecendo o desempenho global. O pH do meio e a composição do suco também influenciam as características físico-químicas e o total de compostos removidos por carga. Além disso, características do leite, como altura, granulometria e geometria da coluna, impactam a transferência de massa e a perda de carga.

Após a adsorção, o suco tratado é re combinado com a fração de polpa previamente separada. Como essa fração ainda pode conter limonoides e seus precursores, sua reincorporação pode contribuir para a formação residual de limonin durante o armazenamento, reduzindo parcialmente a eficiência do tratamento. Assim, o controle da quantidade de polpa re combinada, e sua concentração de compostos amargos constituem medidas complementares para garantir a estabilidade da qualidade do suco.

A Figura 13 apresenta, de forma simplificada, um fluxograma de blocos do processo industrial de remoção do amargor por resinas adsorventes, destacando suas principais etapas operacionais e sua integração à linha de processamento de suco de laranja.

Figura 13 - Fluxograma de blocos do processo industrial de *debittering* por resinas adsorventes.



Fonte: elaborado pelo autor.

O suco tratado segue então o processamento convencional até a produção dos sucos primários NFC ou FCOJ. Na prática industrial, entretanto, essa corrente normalmente não é destinada diretamente à comercialização. Em geral, ela é utilizada na formulação de *blends* com outros lotes, reduzindo a concentração média de limonin a níveis sensorialmente aceitáveis. Essa estratégia otimiza a utilização da unidade de adsorção, preserva as características nutricionais e aromáticas do produto e aumenta a flexibilidade na gestão dos estoques, contribuindo para a padronização da qualidade final do suco ao longo da safra.

5.3.1 Estimativa da necessidade de tratamento de suco

Conforme discutido anteriormente, o processamento da safra no Cinturão Citrícola de São Paulo e Triângulo Mineiro estende-se, em geral, de maio a abril, concentrando a maior parte da produção entre os meses de novembro e janeiro. Com base no comportamento sazonal da concentração de limonin e na evolução dos sólidos solúveis (°Brix), associados ao ratio, é possível estabelecer uma estimativa da potencial necessidade por tratamento de *debittering* ao longo da safra.

De acordo com a Figura 12, verifica-se uma alta concentração de limonin nas primeiras 4 a 6 semanas da safra, seguida por um período intermediário em que os valores permanecem abaixo do limiar de percepção de 6,0 mg/L durante a maior parte do ciclo produtivo. Nas últimas 6 a 8 semanas do ano, considerando também o período de entressafra, observa-se um novo aumento da concentração de limonin, que volta a ficar acima do estabelecido. Dessa forma, considerando apenas a duração desses períodos, aproximadamente 25% do ciclo anual resultaria em um suco com concentração de limonin acima do limite sensorial. Ressalta-se, entretanto, que essa estimativa baseia-se na média histórica das safras 2010/11 a 2020/21, período anterior ao agravamento da incidência do *greening*. Com o aumento da participação de frutos afetados pela doença, é esperado que a frequência e a intensidade desses períodos de maior amargor sejam ainda mais expressivas nas safras atuais.

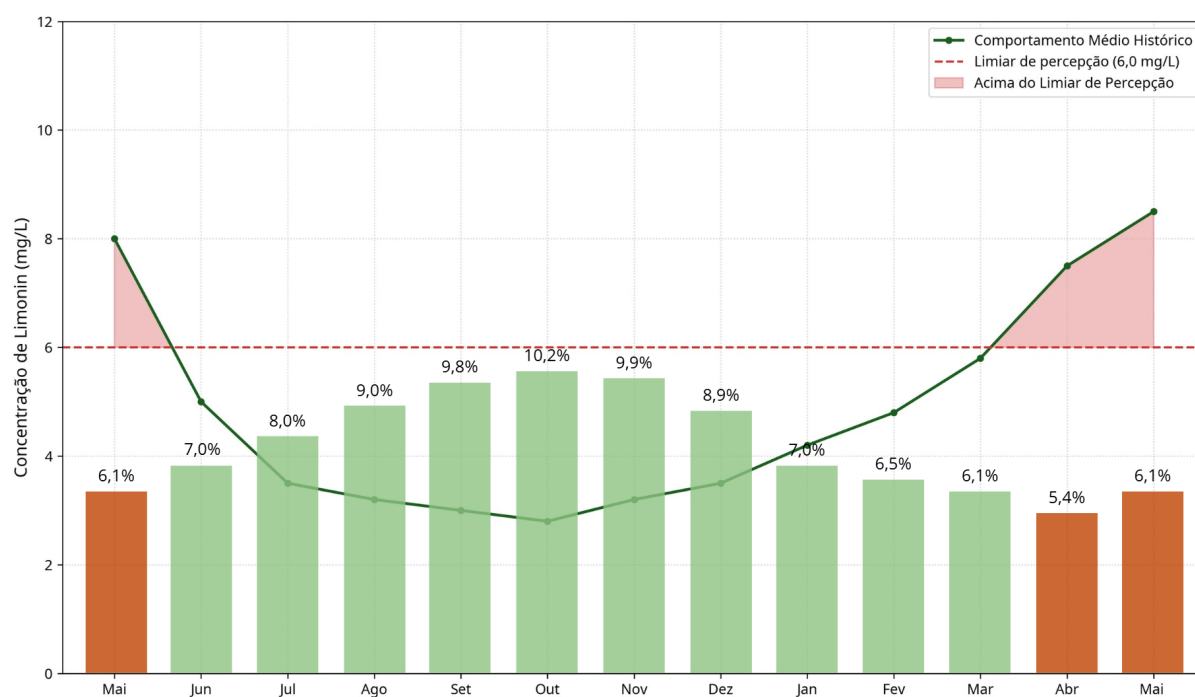
Por outro lado, a produção de suco durante a safra não é uniforme. A maior concentração de processamento industrial ocorre no período intermediário, quando a fruta está no estágio ideal de maturação, exatamente onde o amargor também é reduzido. Assim, para considerar uma demanda mais realista, a curva de processamento também foi estimada adotando como premissa a distribuição sazonal dos sólidos solúveis, apresentada na Figura 7. A partir disso, a produção foi normalizada entre os meses da safra utilizando como

ponderação os valores de °Brix, e comparada com a curva média da concentração de limonin, conforme mostrado na Figura 14.

A partir dessa análise, é estimado que aproximadamente 17,6% do volume total produzido apresentaria concentrações superiores ao limite sensorial de 6,0 mg/L. Desconsiderando estratégias de blendagens com o suco em inventário, e tendo como referência a safra 2024/25 do Cinturão Citrícola, esse percentual corresponde a aproximadamente 40,6 milhões de caixas de laranja de 40,8 kg, equivalente a 1,6 milhões de toneladas da fruta. Dado um rendimento médio de 55% de suco na fruta, estima-se que cerca de 912 mil toneladas de suco necessitariam do tratamento de remoção do amargor.

No entanto, é importante entender que esse valor representa um cenário conservador. Na prática, a necessidade efetiva de tratamento tende a ser bem menor, uma vez que a indústria frequentemente utiliza estratégias de blendagem entre os sucos com menor teor de limonin, reduzindo a fração do produto destinado ao processo de *debittering*. Por outro lado, produtos de maior valor agregado, como o suco NFC, normalmente apresentam especificações de qualidade mais rigorosas que o próprio limiar de percepção, com possibilidade de limites inferiores a 3,0 mg/L, especialmente em mercados como Estados Unidos e Europa.

Figura 14 - Estimativa da necessidade de tratamento do suco de laranja por *debittering* no Cinturão Citrícola.



Fonte: elaborado pelo autor.

5.4 Desafios operacionais e perspectivas tecnológicas

Embora consolidado como a principal tecnologia para remoção do amargor em sucos cítricos, o processo por resinas adsorventes ainda apresenta limitações relacionadas principalmente à seletividade da adsorção e à regeneração do adsorvente. Como o mecanismo de retenção é baseado em interações hidrofóbicas, parte dos óleos, como o d'limoneno, também pode ser absorvida, resultando em uma redução da eficiência do processo de remoção do amargor. Além disso, compostos desejáveis, como vitamina C, flavonoides e compostos aromáticos, também podem ser alteradas, de acordo com a resina utilizada, reduzindo a atividade antioxidante e alterando o perfil sensorial do suco, como mostrado no estudo de STINCO et al. (2013).

Esse efeito, conhecido como *flavour scalping*, torna-se especialmente crítico na produção do suco integral (NFC), nos quais os compostos voláteis são mais perceptíveis no produto final. Adicionalmente, espera-se do NFC um determinado perfil aromático e sensorial, característico do suco-recém extraído. Dessa forma, a perda de compostos voláteis durante o *debitting* pode comprometer uma das propriedades de maior valor agregado desse segmento.

A regeneração das resinas também representa um desafio operacional. Além do consumo de soluções alcalinas ou solventes, o processo gera efluentes que necessitam de tratamento e contribui para o aumento do consumo de água e dos custos operacionais. Além disso, a perda gradual da capacidade adsorativa ao longo dos ciclos de utilização faz necessária a reposição da resina na coluna, que representa um alto custo para a fábrica.

Em resposta a essas limitações, as pesquisas têm se concentrado no desenvolvimento de adsorventes mais seletivos, capazes de remover preferencialmente os limonoides sem comprometer outros constituintes do suco, bem como na integração da adsorção com tecnologias complementares, como os processos enzimáticos.

6. CONCLUSÃO

O amargor tardio permanece como um dos principais desafios tecnológicos da indústria de processamento de suco de laranja e outras frutas cítricas. A formação do limonin após a extração compromete a qualidade sensorial do produto, reduz sua aceitação e limita estratégias operacionais de utilização da matéria-prima, especialmente em um cenário de crescente incidência do *greening*. Nesse contexto, o controle do amargor deixa de representar

apenas uma estratégia de melhoria da qualidade, passando a constituir um requisito para a manutenção da competitividade do setor citrícola brasileiro.

A revisão realizada permitiu compreender os mecanismos de formação do amargor no suco de laranja e comparar sistematicamente as principais tecnologias de *debittering* descritas na literatura. Embora métodos como ultrafiltração, β -ciclodextrina, florisil e tratamentos enzimáticos apresentem potencial para aplicações específicas, verificou-se que as resinas adsorventes permanecem como a alternativa mais consolidada para uso industrial, possuindo elevada eficiência de remoção, alta seletividade e reduzido impacto sobre as características sensoriais e nutricionais do suco.

Entre as resinas avaliadas, as do tipo Amberlite destacam-se pelo desempenho e seletividade, característica fundamental para sua viabilidade industrial. A comparação de diferentes resinas permitiu inferir que a eficiência de remoção do limonin está diretamente relacionada às propriedades estruturais da resina, como a área superficial específica e o tamanho de poros.

Este trabalho também analisou a integração do sistema de adsorção por resinas ao processo industrial de produção de suco de laranja, avaliando sua inserção nas operações unitárias existentes e sua compatibilidade com o fluxo produtivo. A partir dessa proposta, foi realizado um estudo da demanda por tratamento utilizando o comportamento sazonal da concentração de limonin em conjunto com uma curva de processamento estimada a partir da evolução dos sólidos solúveis (°Brix). Os resultados indicaram que uma parcela relevante da produção pode apresentar concentrações de limonin acima do limiar sensorial, evidenciando a viabilidade técnica e a importância estratégica da implementação do processo de diferentes estratégias para o controle de amargor.

Por fim, conclui-se que a perspectiva para a tecnologia de *debittering* por resinas adsorventes concentra-se no desenvolvimento de materiais com maior seletividade ao limonin e menor impacto sobre os compostos desejáveis do suco, aliado a otimização das etapas de regeneração e integração com tecnologias complementares. Esses avanços têm potencial para ampliar a eficiência, reduzir os custos operacionais e tornar o processo ainda mais sustentável e competitivo para aplicação industrial.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHURST, P. R. *Chemistry and Technology of Soft Drinks and Fruit Juices*. Wiley-Blackwell, ed. 3, 2016.
- BALA, A.; KAUSHAL, B. B. L.; JOSHI, V. K.; KAUSHAL, M. *Comparison of juice extraction methods, determination of bittering principles and standardization of debittering of lime juice*. Indian Journal of Natural Products and Resources, v. 8, n. 3, p. 263–268, 2018.
- BARBOSA, E. *Influência do porta-enxerto, da configuração de extração e do período de maturação no teor de limonina e na aceitação sensorial do suco de laranja Pêra-Rio*. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2014.
- BARMORE, C. R.; FISHER, J. F.; FELLERS, P. J.; ROUSEFF, R. L. *Reduction of bitterness and tartness in grapefruit juice with Florisil*. Journal of Food Science, v. 51, n. 2, p. 415–416, 1986.
- BRADDOCK, R. J. *Handbook of Citrus By-Products and Processing Technology*. New York: Wiley, 1999.
- BEZERRA, L. R. *Valorização de resíduos agroindustriais da laranja na geração de produtos com maior valor agregado*. Universidade Federal de São Carlos, 2025.
- CITRUSBR - Associação Nacional dos Exportadores de Sucos Cítricos. *Exportações Brasileiras de Suco de Laranja*. São Paulo, 2026. Disponível em: <https://citrusbr.com/estatisticas/exportacoes/>. Acesso em: 11 de maio de 2026.
- COUTURE, R.; ROUSEFF, R. *Debittering and Deacidifying Sour Orange (Citrus aurantium) Juice Using Neutral and Anion Exchange Resins*. Journal of Food Science, v. 57, 1992.
- DARROS-BARBOSA, R.; CURTULO, J. E. *Produção Industrial de Sucos e Subprodutos cítricos*. In: Dirceu de Mattos Junior; Jorgino Pompeu Junior; Dagoberto De Negri; Rose Mary Pio. (Org.). Citros, 1 ed. Cordeirópolis: Centro Avançado de Pesquisa Tecnológica do Agronegócio de Citros Sylvio Moreira (IAC), 2005, v. 1, p. 841- 870.
- DEVI, M. P. et al. *Impact of adsorbent Amberlite XAD-16 in reducing bitterness of Pummelo juice*. Agriculture Association of Textile Chemical and Critical Reviews Journal, p. 113 - 117, 2025.
- DESHAWARE, S.; GUPTA, S.; SINGHAL, R. S.; JOSHI, M.; VARIYAR, P. S. *Debittering of bitter gourd juice using β -ciclodextrina: Mechanism and effect on antidiabetic potential*. Food Chemistry, v. 262, p. 78 - 85, 2018.

FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE. *Production - Oranges*. USDA, 2025. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/production/0571120>. Acesso em: 11 de maio de 2026.

GHANEM, F. *Juice Debittering: Basic Science, Optimization, and Recent Advances*. Citrus Engineering Conference, 2012.

GIL, Antonio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GUADAGNI, D.G.; MAIER, V.P.; TURNBAUGH, J.G. *Effects of some citrus constituents on taste thresholds for limonin and naringin bitterness*. Journal Science Food Agricultural, v.24, p.1277-1288, 1973.

HASEGAWA, S., MIYAKE, M. *Biochemistry and Biological Functions of Citrus Limonoids*. Food Reviews International, v.12, p.413-435, 1996.

ILAME, S. A.; SINGH, S. V. *Physico-chemical properties of ultrafiltered kinnow (mandarin) fruit juice*. Journal of Food Science and Technology, v. 55, n. 6, p. 2189–2196, 2018.

JOHNSON, R. L.; NAGY, S. Commercial debittering processes. In: NAGY, S. et al. (Ed.). *Citrus Science and Technology*. 1994.

KASHYAP, P.; ANAND, S. *Effect of debittering techniques on the chemical characteristics of stored kinnow juice*. Journal of Hill Agriculture, v. 8, n. 4, p. 490–494, 2017.

KIMBALL, D. A.; NORMAN, S. I. *Change in California navel orange juices during commercial debittering*. Journal of Food Science, v.55, p.273-274, 1990.

KOLA, O.; KAYA, C.; DURAN, H.; ALTAN, A. *Removal of Limonin Bitterness by Treatment of Ion Exchange and Adsorbent Resins*. Food Science Biotechnol, v. 19, 2010.

KONWAR, J. *Enemies of Citrus Fruit Juice: Formation Mechanism and State-of-the-Art Removal Techniques*. Nutrition and Food Science Journal, v. 12, p. 977 - 999, 2024.

KORE, V. T., CHAKRABORTY, I. *Efficacy of various techniques on biochemical characteristics and bitterness of pummelo juice*. Journal of Food Science and Technology, 2014.

KORE, V. T.; CHAKRABORTY, I. *Use of pre and post-harvest low-cost techniques to control/minimize citrus juice bitterness*. American Journal of Food and Nutrition, v. 1, p. 11–21, 2018.

MANNERS, G. D. *Citrus Limonoids: Analysis, Bioactivity, and Biomedical Prospects*. Journal of Agricultural Food Chemistry, v.55, p.8285–8294, 2007.

MITSUHARA, A. T.; MORAES, J. C.; CRESTANI, C. E. *Caracterização química do bagaço de laranja: potencial rota para uso desse resíduo*. Revista Principia, v. 62, p. 76 - 78, 2025. Instituto Federal de São Paulo (IFSP). Matão, São Paulo. 2025.

NAS, G.; KARATAS, S. *Removal of Bitterness by Using of Amberlite in Orange Juices*. International Journal of Electronics. v. 7, p. 1419 - 1432, 2017.

NETO, G. G.; FIGUEIRA, S. R. F. *Produção da laranja no principal cinturão citrícola brasileiro: perfil e concorrência com outras culturas*. Campo Território: Revista de geografia agrária, v. 16, p. 129 - 149, 2021.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G.; MILAN, P.; LOPES, F. F.; CRESSONI, F.; KALAKI, R. *O retrato da citricultura brasileira*. Ribeirão Preto: Markestrat, 2009.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G. *Anuário da citricultura*. CitrusBR. São Paulo, 2017.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G.; MONACO NETO, L. C.; KALAKI, R. B. *Orange Juice Chain: past, present and future*. Ribeirão Preto: Kaap Agri, 2019.

NORMAN, Seth I. *A Commercial Citrus Debittering System*. Citrus Engineering Conference, 1990.

PAREEK, S.; PALIWAL, R.; MUKHERJEE, S. *Effect of juice extraction methods and processing temperature-time on juice quality of Nagpur mandarin (Citrus reticulata Blanco) during storage*. Journal of Food Science and Technology, v. 48, n. 2, p. 197–203, 2011.

PREMI, B. R.; LAL, B. B.; JOSHI, V. K. *Distribution pattern of bittering principles in kinnow fruit*. Journal of Food Science and Technology (Mysore), v. 31, n. 2, p. 140–141, 1994.

PUREWAL, S. S.; SANDHU, K., S. *Debittering of citrus juice by different processing methods: A novel approach for food industry and agro-industrial sector*. Scientia Horticulturae, v. 276, 2021.

SANTANA, B. M.; CUNHA, C. A.; WANDER, A. E. *Margens de comercialização do suco de laranja no estado de São Paulo*. Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, ed. 59, 2021.

SANTOS, R. M.; NAS, I. A.; MOLLO NETO, M.; VENDRAMETTO, O. *An overview on the Brazilian orange juice production chain*. Revista Brasileira de Fruticultura, v. 35, n. 1, p. 218–225, 2012.

SCOTT, W. C. *Orange Juice Processing*. Food Technology Magazine, IFT, dezembro de 2003.

- SHAW, P. E.; BAINES, L.; MILNES, B. A.; AGMON, G. *Commercial Debittering Processes to Upgrade Quality of Citrus Juice Products*. ACS Symposium Series, v. 758, p. 120 - 131, 2000.
- SINGH, N. et al. *Bitterness in Citrus Fruit Juice: Chemistry Challenges and Solutions*. Indian Citriculture, v. 3, 2025.
- STINCO, C. M.; FERNÁNDEZ-VÁZQUEZ, R.; HERNANZ, D.; HEREDIA, F. J.; MELÉNDEZ-MARTÍNEZ, A. J.; VICARIO, I. M. *Industrial orange debittering: Impact on bioactive compounds and nutritional value*. Journal of Food Engineering, v. 116, p. 155 - 161, 2013.
- TALLARICO, P.; TODISCO, S.; DRIOLI, E. *Use of ultrafiltration in the preventing of orange juice bitterness and its effect on the aroma compounds distribution*. AgroFood Industry Hi-Tech, v. 33, n. 5, p. 739–756, 1998.
- VÁZQUEZ, R. F.; STINCO, C. M.; HERNANZ, D.; HEREDIA, F. J.; VICARIO, I. M. *Industrial orange juice debittering: effect on volatile compounds and overall quality attributes*. International Journal of Food Science and Technology, v. 48, p. 1861 - 1867, 2013.
- VIDAL, M. F.. *Produção de laranja na área de atuação do BNB*. Caderno Setorial ETENE, n. 198, 2021.
- WASHINGTON, T. L.; BRICENO, F. V.; SIMS, C. A.; NAU, K.; YAGIZ, Y.; GU, L. *Macroporous adsorbent resin debittering of Huang long bing (HLB)-affected orange juice and its impacts on consumer sensory acceptance*. Journal of Food Science, v. 90, e70048, 2025.
- WEBBER, H. J. *History and development of the citrus industry*. In: REUTHER, W.; WEBBER, H. J.; BATCHELOR, L. D. *The citrus industry*. Vol. 1. Berkeley: University of California Press, 1967.
- ZHANG, N.; XU, Y.; LI, X.; REN, J.; JIA, X.; PAN, S.; LI, Z.; HE, X.; HU, Z.; FAN, G. *Factors affecting the formation of delayed bitterness in sweet orange (Citrus sinensis (L.) Osbeck) juice*. Journal of Food Composition and Analysis, v. 132, 2024.