

Do campo à indústria: Panorama sobre o tomate, benefícios do licopeno à saúde e valorização sustentável de subprodutos

From farm to industry: An overview of tomatoes, lycopene's health benefits, and the sustainable valorization of by-products

Del campo a la industria: Panorama sobre el tomate, los beneficios del licopeno para la salud y la valorización sostenible de subproductos

Recebido: 11/02/2025 | Revisado: 19/02/2025 | Aceitado: 20/02/2025 | Publicado: 23/02/2025

Rosa Maria de Brito Steckelberg

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7187-0623>

Universidade Federal de Goiás, Brasil

E-mail: rosagoianesia2@gmail.com

Edemilson Cardoso da Conceição

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4113-2686>

Universidade Federal de Goiás, Brasil

E-mail: edemilson_conceicao@ufg.br

Resumo

Este estudo tem como objetivo revisar o conhecimento atual sobre o tomate, os carotenoides, especialmente o licopeno, destacando seus benefícios à saúde e as possibilidades de aproveitamento sustentável dos subprodutos da indústria de processamento do tomate. Pertencente à família das Solanáceas, o tomate (*Solanum lycopersicum* L.) é uma das hortaliças mais consumidas no mundo, apreciado tanto na forma *in natura* quanto em produtos industrializados. A indústria tomateira gera grande volume de resíduos, cujo manejo inadequado pode trazer transtornos ambientais, além do desperdício de compostos bioativos valiosos como o licopeno, com alta capacidade antioxidante, cujo consumo está relacionado à redução de risco para o surgimento de alguns tipos de câncer e doenças cardiovasculares. Métodos inovadores e sustentáveis de extração, como o uso de solventes verdes e tecnologias assistidas por fluido supercrítico, ultrassom e outros vêm sendo explorados para otimizar o aproveitamento desses subprodutos, contribuindo para a economia circular e a sustentabilidade. É necessário que as pesquisas avancem para superar os desafios atuais e promover soluções para a redução de impactos ambientais negativos, extração eficiente e sustentável, redução de custos e escalabilidade das tecnologias de extração visando a obtenção de produtos com valor agregado para as mais diversas aplicações.

Palavras-chave: Tomate; Licopeno; Compostos bioativos; Extração sustentável; Subprodutos industriais.

Abstract

This study aims to review the current knowledge on tomatoes and carotenoids, particularly lycopene, highlighting their health benefits and the sustainable utilization of by-products from the tomato processing industry. Belonging to the Solanaceae family, the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is one of the most consumed vegetables worldwide, appreciated both fresh and in processed products. The tomato industry generates a large volume of waste, and improper management can cause environmental issues, besides leading to the loss of valuable bioactive compounds such as lycopene. Lycopene possesses high antioxidant capacity, and its consumption has been associated with a reduced risk of certain types of cancer and cardiovascular diseases. Innovative and sustainable extraction methods, including the use of green solvents and technologies such as supercritical fluid, ultrasound-assisted, and other emerging techniques, are being explored to optimize the valorization of these by-products, contributing to the circular economy and sustainability. Further research is needed to overcome current challenges and promote solutions for reducing environmental impacts, achieving efficient and sustainable extraction, lowering costs, and improving the scalability of extraction technologies to obtain high-value products for various applications.

Keywords: Tomato; Lycopene; Bioactive compounds; Sustainable extraction; Industrial by-products.

Resumen

Este estudio tiene como objetivo revisar el conocimiento actual sobre el tomate y los carotenoides, especialmente el licopeno, destacando sus beneficios para la salud y las posibilidades de aprovechamiento sostenible de los subproductos de la industria del procesamiento del tomate. Perteneciente a la familia de las Solanáceas, el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas más consumidas en el mundo, apreciado tanto en su forma fresca

como en productos industrializados. La industria del tomate genera un gran volumen de residuos, cuyo manejo inadecuado puede causar problemas ambientales, además de desperdiciar compuestos bioactivos valiosos como el licopeno. El licopeno posee una alta capacidad antioxidante y su consumo se ha asociado con la reducción del riesgo de desarrollar ciertos tipos de cáncer y enfermedades cardiovasculares. Se están explorando métodos innovadores y sostenibles de extracción, como el uso de disolventes ecológicos y tecnologías asistidas por fluidos supercríticos, ultrasonidos y otras técnicas emergentes, para optimizar el aprovechamiento de estos subproductos, contribuyendo a la economía circular y la sostenibilidad. Es necesario que la investigación avance para superar los desafíos actuales y promover soluciones que reduzcan los impactos ambientales negativos, logren una extracción eficiente y sostenible, reduzcan costos y mejoren la escalabilidad de las tecnologías de extracción, con el fin de obtener productos de alto valor agregado para diversas aplicaciones.

Palabras clave: Tomate; Licopeno; Compuestos bioactivos; Extracción sostenible; Subproductos industriales.

1. Introdução

O tomate (*Solanum lycopersicum*), pertencente à família Solanaceae, é uma das hortaliças mais consumidas e valorizadas globalmente, ocupando papel central na agricultura, na indústria alimentícia e na culinária de diversas culturas destacando-se como uma importante fonte de nutrientes e compostos bioativos, em especial os carotenoides, pigmentos lipossolúveis amplamente distribuídos em vegetais, desempenhando funções essenciais na proteção contra estresse oxidativo e na comunicação celular (Rawat et al., 2024).

O licopeno, encontrado principalmente nas cascas do fruto, é responsável pela coloração vermelha característica do tomate maduro, sendo considerado o carotenoide com mais alta capacidade antioxidante. Seu consumo está inversamente relacionado à redução do risco de doenças crônicas, como câncer, doenças cardiovasculares e condições inflamatórias (Caseiro et al., 2020).

Além de ser apreciado na forma fresca, o tomate, sendo altamente perecível e pela demanda por praticidade, é amplamente consumido em produtos processados, como molhos, sucos e purês. O comércio global de molhos e ketchup apresentou um crescimento significativo entre maio de 2021 e abril de 2022, superando o setor de tomates enlatados e atingindo 1,57 milhão de toneladas comercializadas, com os 14 principais países exportadores respondendo por mais de 83% das remessas mundiais, enquanto a demanda se expandiu em diversas regiões, exceto na América do Norte e em alguns mercados de baixo consumo (*World trade in Tomato Products*, 2023). No processamento industrial do tomate, são gerados resíduos compostos principalmente por cascas, sementes e pequenas quantidades de polpa residual, correspondendo a aproximadamente 2% a 5% da massa total processada. Esses resíduos são geralmente subutilizados ou até mesmo descartados inapropriadamente, podendo gerar impactos ambientais negativos e desperdício de valiosos compostos bioativos como o licopeno (Knoblich et al., 2005).

A valorização de subprodutos da indústria do tomate surge como uma estratégia relevante no contexto da economia circular, gerando oportunidades para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e economicamente viáveis para sua extração e aplicação industrial em alimentos, nutrição animal, cosméticos, suplementos e medicamentos (Lu et al., 2019). Além disso, o aumento da conscientização sobre os benefícios de compostos naturais tem impulsionado a demanda por produtos ricos em licopeno, especialmente na forma de alimentos funcionais, suplementos e cosméticos (Górecka et al., 2020).

Diante desse panorama, este estudo tem como objetivo revisar o conhecimento atual sobre o tomate, os carotenoides e o licopeno, destacando seus benefícios à saúde e as possibilidades de aproveitamento sustentável dos subprodutos da indústria de processamento do tomate. A abordagem busca fornecer uma visão abrangente sobre o tema, contribuindo para impulsionar pesquisas direcionadas ao desenvolvimento de soluções inovadoras que otimizem o uso desses recursos e incentivem práticas mais sustentáveis na cadeia produtiva do tomate.

2. Metodologia

Esta revisão narrativa foi conduzida com o objetivo de reunir e analisar criticamente a literatura existente sobre a produção, composição química e aproveitamento sustentável do tomate (*Solanum lycopersicum L.*), com ênfase no licopeno e nos subprodutos da indústria do tomate. A metodologia seguiu as diretrizes para revisões narrativas, conforme descrito por Green et al. (2006), priorizando a coleta de estudos relevantes publicados em bases de dados indexadas, como PubMed, Scopus, ScienceDirect e Google Scholar.

Foram utilizados os seguintes descritores para a busca bibliográfica: "tomato", "lycopene", "bioactive compounds", "sustainable extraction", "tomato by-products" e "valorization". A seleção dos artigos ocorreu com base na relevância para o tema, abrangendo estudos publicados nas últimas duas décadas, mas incluindo trabalhos clássicos que fundamentam o conhecimento sobre o tema. Foram excluídos artigos com informações duplicadas, revisões sem base metodológica clara e estudos sem revisão por pares.

A análise dos dados foi realizada de forma qualitativa, organizando os achados em categorias temáticas principais: (i) produção e processamento do tomate, (ii) propriedades nutricionais e bioativas do licopeno, (iii) métodos de extração e purificação de compostos bioativos, e (iv) alternativas sustentáveis para a valorização dos subprodutos industriais do tomate.

Os estudos sobre extração do licopeno foram classificados de acordo com os métodos empregados, incluindo extração convencional com solventes orgânicos (Pandya et al., 2017), extração assistida por ultrassom (Deng et al., 2021), fluidos supercríticos (Lopez-Cervantes et al., 2013) e microemulsão com biocompatibilidade alimentar (Amiri-Rigi & Abbasi, 2019). A discussão dos resultados levou em consideração a eficiência dos processos, a viabilidade econômica e os impactos ambientais.

A seção sobre valorização dos subprodutos baseou-se em revisões abrangentes sobre o tema (Lu et al., 2019; Coelho et al., 2023), abordando a aplicação dos subprodutos como ingredientes funcionais em alimentos (Fonseca, 2020), ração animal (Reda et al., 2022) e fontes de compostos bioativos para a indústria farmacêutica (Laranjeira et al., 2022).

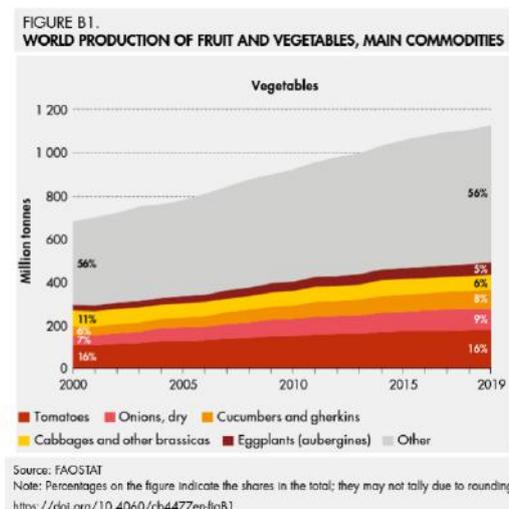
A presente revisão contribui para um melhor entendimento sobre a importância do tomate e seus derivados na indústria de alimentos e nutrição, apontando direções futuras para pesquisa e desenvolvimento de produtos de alto valor agregado.

3. Resultados e Discussão

3.1 Tomate: consumo, produção, histórico e benefícios nutricionais

O tomate, pertencente à família Solanaceae, que abriga importantes espécies de interesse para a agricultura, tais como batata, berinjela e pimentão, é a segunda hortaliça mais consumida no mundo, atrás apenas da batata e seguida pela cebola. Segundo dados da FAO (Food and Agriculture Organization of United Nations), exibidos na Figura 1, o tomate está entre as 5 principais commodities vegetais, sendo responsável por 16% da produção global de 2000 a 2019. A batata não figura neste ranking, pois está classificada na categoria "raízes e tubérculos" (FAO, 2021).

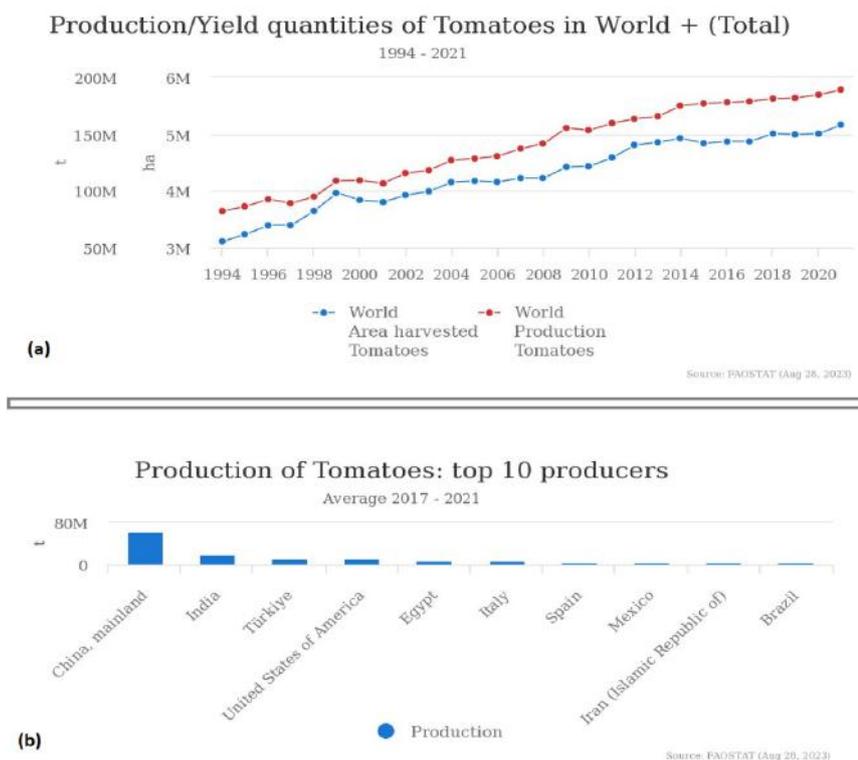
Figura 1 – Produção mundial das principais commodities vegetais entre 2000 e 2019 em milhões de toneladas.



Fonte: FAOSTAT- Statistical Yearbook – Food and Agriculture (2021).

A Figura 2 ilustra a evolução da produção tomateira e a área cultivada com expressivo crescimento desde 1994, estando o Brasil entre os 10 maiores produtores. Em 2021 a área plantada global ultrapassou 5 milhões de hectares (ha) e a produção mundial mais de 189 milhões de toneladas. Nesse mesmo ano, o Brasil alcançou uma produção de aproximadamente 3,7 milhões de toneladas em cerca de 52 mil hectares. (FAOSTAT, 2023) O estado de Goiás lidera a produção, com mais de 1 milhão de toneladas produzidas em 10,7 mil hectares em 2021 (IBGE, 2021).

Figura 2 - (a) Evolução da produção mundial e área plantada de tomates de 1994 a 2020. (b) 10 principais países produtores mundiais de tomate.



Fonte: “FAO - Faostat” (2023).

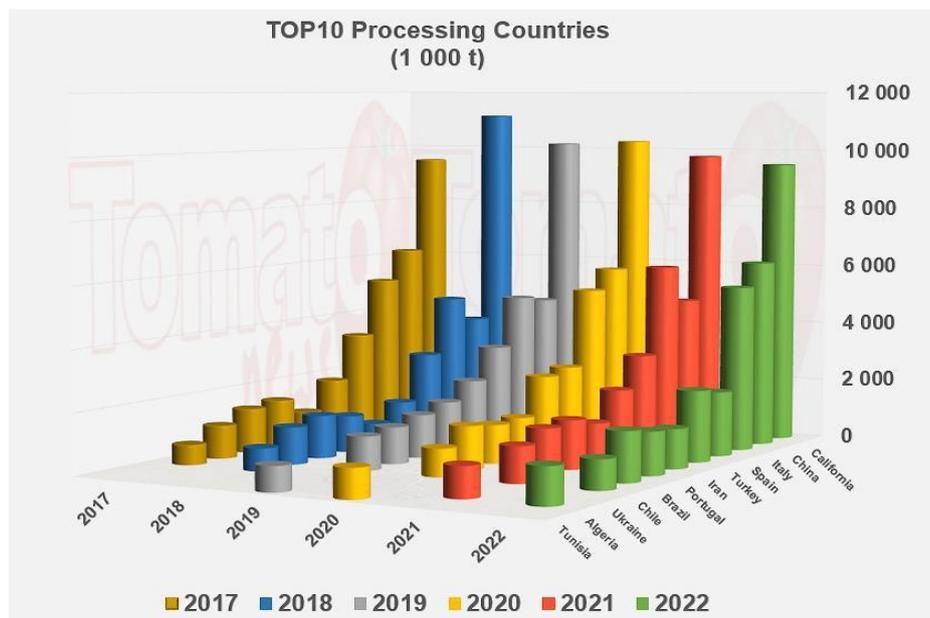
Embora botanicamente o tomate que consumimos seja o fruto do tomateiro, a forma como popularmente e culturalmente é consumido, justifica a sua classificação na cadeia alimentícia como legume ou hortaliça. Em 1753 foi nomeado botanicamente por Lineu como *Solanum lycopersicum*, já em 1768, Philip Miller, considerando ter descoberto um novo gênero, denominou a espécie como *Lycopersicon esculentum*, o que não foi consenso na comunidade científica, motivando debates que perduraram por cerca de 200 anos após a classificação feita por Lineu, até que as novas ferramentas, com uso de dados moleculares, possibilitaram uma revisão filogenética das Solanáceas na qual o termo *Lycopersicon* deixou de ser um gênero para figurar como uma seção do gênero *Solanum*, tal como foi descrito por Lineu (Bergougnoux, 2014). Atualmente ambas as denominações são aceitas pela literatura como sinônimos. (Tropicos.org, 2025)

O tomate é nativo do oeste da América do Sul, ao longo da costa e dos altos Andes, desde o Equador central, passando pelo Peru, até o norte do Chile, e nas Ilhas Galápagos (Peralta & Spooner, 2005). A origem da domesticação do tomate é controversa, com teorias que atribuem essa origem no Peru ou México, sendo considerada também a hipótese de ocorrência em ambos os países de forma independente. Mas o fato é que a domesticação não ocorreu no seu local de origem. Estudos apontam que chegou à Espanha por meio do conquistador Hernán Cortés, após seu exército dominar *Tenochtitlan*, antiga cidade asteca e atual capital do México, seguindo para a Itália e depois para a Inglaterra e de lá para os Estados Unidos por volta de 1711. Os historiadores sugerem que o fruto chegou ao Brasil também pelo Velho Mundo e não pelos países americanos. O mais antigo registro sobre o tomate encontrado, escrito em 1544 pelo médico e botânico italiano Petrus Matthioli, menciona um vegetal que quando maduro adquire uma cor dourada e sugere um preparo culinário semelhante a um refogado de cogumelos. Entretanto, até o século XVII o tomate era praticamente cultivado apenas para fins ornamentais, pois sua semelhança botânica com as Solanáceas conhecidas na época por sua toxicidade, como a Mandrágora e Beladona gerava certo temor. Os italianos provavelmente foram um dos primeiros povos a usar o tomate na culinária e especula-se que a variedade originariamente aportada no país tenha sido o tomate cereja amarelo, pois foi logo batizado como *pomodoro*, que significa maçã dourada (Neitzke & Büttow, 2008).

Atualmente o tomate está presente na culinária de diversas etnias e é amplamente cultivado no mundo inteiro. É consumido e apreciado tanto na forma *in natura* quanto nas formas derivadas de processamento industrial como molhos, purés, extratos, sucos e ketchups. As variedades e forma de cultivo são determinadas em função do mercado a ser destinado, seja o de produto fresco ou produto para processamento, ou seja, tomate de mesa ou tomate industrial. O tomate é uma Solanácea herbácea de caule flexível, que não suporta o peso dos frutos, dessa forma a planta possui 2 hábitos de crescimento, determinado ou indeterminado, que irão demandar processos de condução distintos. O tomate de mesa, por ter hábito indeterminado, requer um tipo de condução tutorada, geralmente em estacas e tratos culturais que objetivam a melhoria da aparência e qualidade do tomate por permitir uma maior aeração dos frutos, maior facilidade de controle fitossanitário e para evitar o pisoteio dos frutos. O tomate industrial, que possui hábito determinado, não requer os mesmos tratos culturais do tomate de mesa, porém o cultivo rasteiro, que favorece a colheita mecanizada, aumenta a suscetibilidade a pragas e doenças, especialmente em clima quente. (Filgueira, 2008; Teixeira, et al., 2022) Algumas características são importantes e desejáveis na escolha e seleção de cultivares destinadas ao processamento industrial e deve considerar a produtividade; redução de perdas durante a colheita; firmeza do fruto para facilitar o manuseio e transporte a granel e principalmente os atributos necessários para garantir a qualidade do produto final, tais como: teor de sólidos solúveis com grau Brix acima de 5,0; coloração vermelha intensa por fora e por dentro do fruto; viscosidade; sabor; acidez; espessura do pericarpo e facilidade de remoção da pele dos frutos (Melo & Vilela, 2005; Neitzke & Büttow, 2008; Vieira et al., 2019). Segundo dados do World Processing Tomato Council (WPTC), aproximadamente 38 milhões de toneladas de tomate são processados no mundo atualmente, sendo por isso considerado o principal vegetal para processamento. A produção de derivados do tomate processado está fortemente concentrada entre 10 países, responsáveis por cerca de 83% da produção mundial anual, estando o Brasil na 8ª posição,

conforme ilustra a Figura 3. As principais regiões produtoras de tomate para processamento situam-se em zonas de clima temperado, sendo que 90% da colheita mundial ocorre no hemisfério norte entre os meses de julho a dezembro. O Brasil é considerado uma exceção, pois situa-se no hemisfério sul e processa mais de 1,5 milhões de toneladas anualmente no mesmo período das regiões do hemisfério norte (*WPTC - World Processing Tomato Council, 2023*).

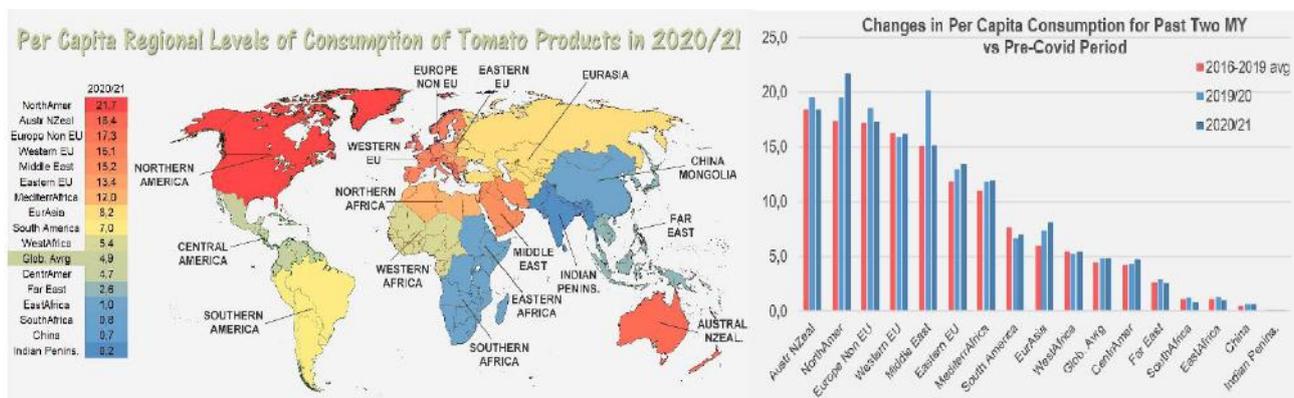
Figura 3 - Ranking dos principais países em processamento de tomates.



Fonte: WPTC - <https://www.wptc.to/production/>.

Em termos comerciais, o setor de processamento de tomates é um dos players mais importantes da indústria alimentar global com um volume de exportação de aproximadamente 6,9 milhões de toneladas em 2021, distribuídos em pasta (49%), tomate em lata (28%) e molhos e ketchup (23%). O Brasil não figura entre os grandes exportadores. Sua produção atende o mercado local (*WPTC - World Processing Tomato Council, 2023*). Globalmente, o consumo de produtos à base de tomates vem aumentando em média de 2% ao ano no período de 2011 a 2022. Já o consumo per capita vem crescendo a uma taxa de 1,2%. As regiões ocidentais e mediterrâneas são a de maior consumo, contrastando com os menores consumos observados na Ásia, parte da África e América do Sul. Regiões ocidentais e mediterrâneas destacam-se com os mais altos níveis de consumo *per capita* de tomates processados, contrastando com Ásia, África e América do Sul, onde esses produtos têm historicamente ocupado um papel menos relevante na culinária. Durante a crise da Covid-19, as regiões com maiores níveis de consumo individual também testemunharam aumentos significativos, impactando as vendas nos supermercados, enquanto outras áreas do mundo permaneceram relativamente inalteradas, conforme mostra a Figura 4 (Branthôme, 2022).

Figura 4 - Consumo *per capita* de produtos do processamento de tomates em 2020/21 por regiões no mundo e as mudanças nesse consumo relacionadas ao período pré-pandemia da Covid-19 (2016/19) e os períodos pandêmicos 2019/20 e 2020/21.



Fonte – Tomato News - https://www.tomatonews.com/en/consumption-2021-in-the-wake-of-2020_2_1618.htmlv.

O tomate, uma das hortaliças mais cosmopolitas e disseminadas no mundo, é um dos principais vegetais que compõem a dieta mediterrânea, caracterizada pelo expressivo consumo de azeite de oliva, grande quantidade de frutas e vegetais, pães, cereais, castanhas e sementes, além de peixes, aves e consumo moderado de vinho. O alto teor de antioxidantes é uma das justificativas para que seja considerada uma das dietas mais saudáveis, com vários estudos relacionando inversamente o consumo com a redução de riscos para doenças cardiovasculares, certos tipos de câncer, dentre outras (Gómez-Romero et al., 2007). Além de ser boa fonte de nutrientes, contendo em média 3% de carboidratos; 1% de lipídeos; proteínas (1,2%); minerais como cálcio, magnésio, fósforo, potássio, sódio e zinco e vitaminas (principalmente A, C e vitaminas do complexo B), o tomate é rico em compostos fenólicos; especialmente ácidos fenólicos e flavonoides; tomatina, um glicoalcaloide de leve toxicidade encontrado nas folhas, caules e fruto verde, além de carotenoides. Os compostos fenólicos e os carotenoides, especialmente o licopeno que confere a cor vermelha ao tomate maduro, são os principais compostos bioativos do fruto do tomateiro (Salehi et al., 2019).

3.2 Carotenoides: importância, propriedades físico-químicas e biossíntese

Os carotenoides são um dos grupos de pigmentos naturais mais abundantes do planeta, com mais de 750 membros (Misawa, 2010; Nisar et al., 2015). Como exemplos, podem ser citados o β -caroteno de cenouras e batatas-doces, o licopeno de tomates e melancias, a capsantina e a capsorrubina de pimentões vermelhos, e a luteína de flores de calêndula.

Localizam-se em organelas celulares, como cloroplastos e cromoplastos, desempenhando papéis distintos na fotossíntese e na coloração de frutas e vegetais, que vai do incolor passando para o amarelo, laranja e vermelho, influenciando assim o seu valor econômico (Khoo et al., 2011; Nisar et al., 2015).

Carotenoides são produzidos por todos os organismos fotossintéticos, incluindo cianobactérias, bactérias fotossintéticas, algas, plantas superiores, bem como em algumas bactérias não fotossintéticas, leveduras e fungos, sendo associados a vários processos biológicos essenciais, como a captação de luz para fotossíntese e fotoproteção e a regulação do crescimento e desenvolvimento desses organismos, além de serem precursores do hormônio ácido abscísico em plantas superiores (Nisar et al., 2015). Como os animais, incluindo peixes, crustáceos e mamíferos, não podem sintetizar carotenoides, eles precisam obtê-los por meio da alimentação.

Os carotenoides são elementos nutricionais essenciais e alguns são precursores da vitamina A. Eles também desempenham um papel na proteção das células contra danos oxidativos causados por espécies reativas de oxigênio. A

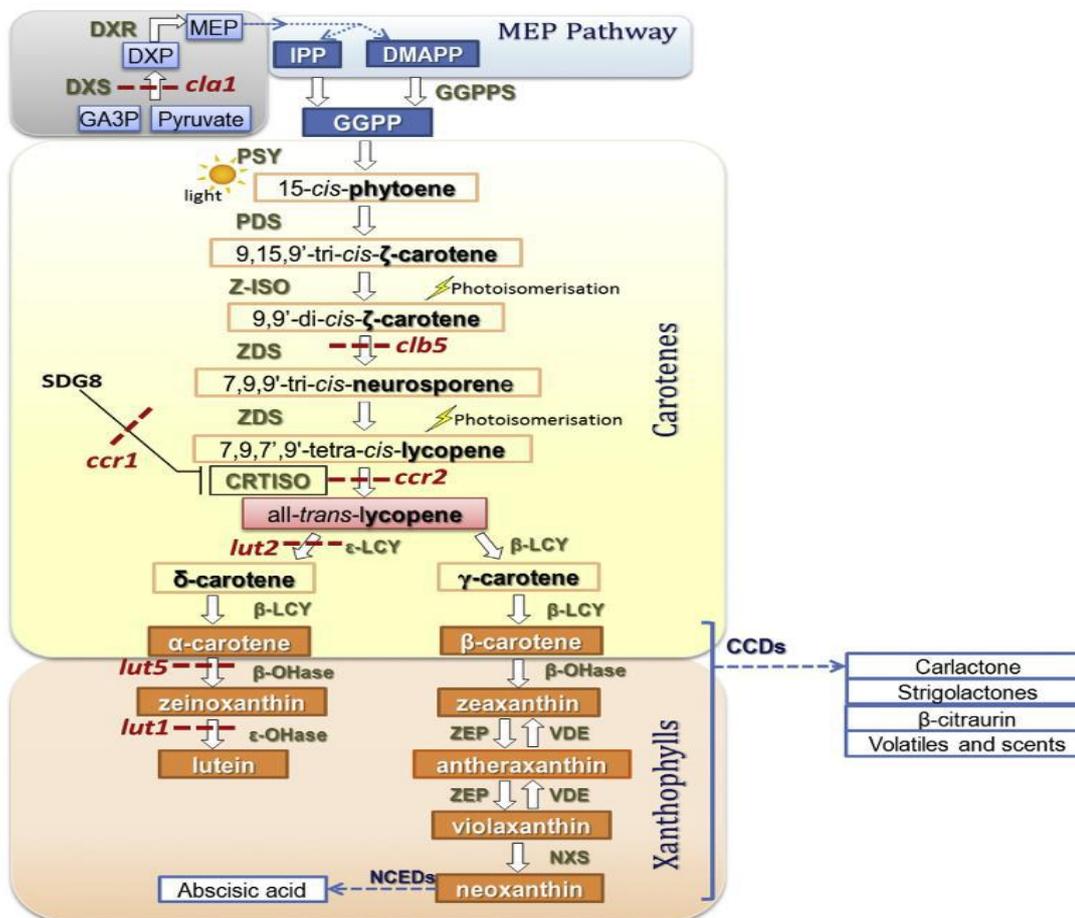
quantidade de ligações duplas conjugadas e grupos funcionais em suas moléculas impactam na cor e atividade antioxidante. Estudos mostram que carotenoides com mais ligações duplas têm máximas de absorção mais altas e contribuem para uma variedade de cores, apresentando maior capacidade no combate aos danos oxidativos.

Durante o amadurecimento dos frutos, a esterificação com ácidos graxos pode também afetar a intensidade da cor. A maioria dos carotenoides possui uma estrutura composta por 40 átomos de carbono (C40), classificando-se como tetraterpenos. São classificados em carotenos (carotenoides hidrocarbonetos) e xantofilas (carotenoides que contêm oxigênio). A maior parte da diversidade estrutural dos carotenoides está nas xantofilas, que são derivadas de um pequeno número de carotenos.

A biossíntese dos carotenoides começa com a formação de fitoeno (ou 4,49-diapofitoeno em casos raros) a partir de duas moléculas de difosfato de geranylgeranil (GGPP) e difosfato de farnesil (FPP). Esses precursores hidrocarbonetos passam por desaturação (desidrogenação) para formar ligações duplas conjugadas, frequentemente são ciclizados e sofrem uma série de modificações para gerar uma variedade de xantofilas. A Figura 5 ilustra a via metabólica para a biossíntese de carotenos (Nisar et al., 2015).

Naturalmente, a maioria dos carotenoides ocorre na natureza na forma *trans-isômero*, mas durante o processamento dos alimentos envolvendo aquecimento e secagem, pode haver uma isomerização com o aumento da forma *cis-isômero* (Khoo et al., 2011). A estrutura característica dos carotenoides permite a engenharia metabólica para a produção de novas xantofilas raras ou carotenoides de importância industrial. Isso é alcançado pela combinação de genes que codificam enzimas de modificação, como oxigenases e glicosil transferases. Com o objetivo de aumentar o conteúdo de carotenoides e/ou produzir carotenoides desejados, pode-se recorrer a abordagens de engenharia de vias utilizando plantas superiores como hospedeiros de genes de biossíntese de carotenoides (crt) provenientes de bactérias carotenogênicas. Nesse sentido, a etapa da síntese do fitoeno a partir de GGPP foi identificada como crucial para aumentar os níveis de carotenoides em várias partes de plantas, incluindo semente de colza, fruto de tomate, tubérculo de batata e semente de linho (Misawa, 2010).

Figura 5 – Via metabólica para a biossíntese de carotenos.



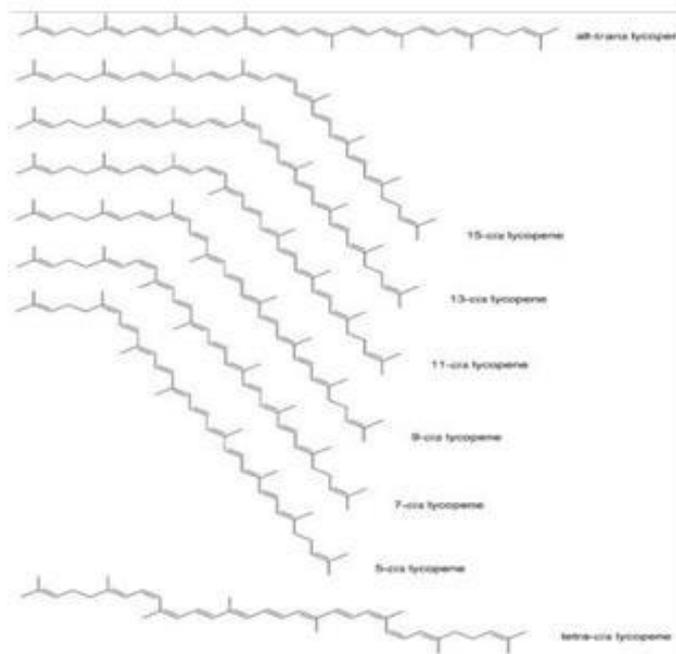
O diagrama representa as etapas primárias encontradas em quase todas as espécies de plantas. O carotenoide C40, fitoeno, é derivado da condensação de duas moléculas de GGPP C20, produzidas a partir de IPP e DMAPP. O fitoeno é convertido em licopeno por meio de uma série de dessaturações e isomerizações. O licopeno é ciclizado por b-LCY e ε-LCY ou b-LCY para produzir α-caroteno ou β-caroteno. Esses carotenoides são posteriormente hidroxilados para produzir xantofilas (por exemplo, luteína e zeaxantina). A clivagem do ramo do β-caroteno por CCDs e NCEDs produz vários voláteis (por exemplo, b-citraurina, etc.) e fitormônios (estrigolactonas e ácido abscísico). Mutantes de Arabidopsis com defeitos na carotenogênese (cla1; alterada cloroplasto 1, clb5; biogênese do cloroplasto 5, ccr1 e ccr2; regulação de carotenoides e cloroplastos 1 e 2, lut1, lut2 e lut5; deficiente em luteína 1, 2 e 5) são mostrados em vermelho. b-LCY, β-ciclase; ε-OHase, ε-caroteno hidroxilase; GA3P, gliceraldeído-3-fosfato; GGPPs, sintase de GGPP; NCED, dioxygenase de 9-cis-epoxycarotenoides; NXS, sintase de neoxantina; PDS, dessaturase de fitoeno; PSY, sintase de fitoeno; SDG8, histona metiltransferase SET2; VDE, de-epoxidase de violaxantina; ZDS, dessaturase de z-caroteno; ZEP, epoxidase de zeaxantina; Z-ISO, isomerase de z-caroteno.

Fonte: Copiado e traduzido de Nisar et al. (2015).

3.3 Licopeno: estrutura, características, benefícios à saúde e mercado

O licopeno (C40H56), com peso molecular de 536,89 g/mol, é composto por 89,45% de carbono e 10,51% de hidrogênio e foi identificado no tomate pela primeira vez em 1876. Este carotenoide acíclico possui 11 ligações duplas conjugadas organizadas linearmente e 2 não conjugadas. Sua estrutura química não inclui o anel β-ionona, o que explica a ausência de atividade provitamina A. A Figura 6 ilustra as formas isoméricas do licopeno, sendo a configuração *all-trans* a mais estável termodinamicamente e predominante em tomates frescos. No entanto, os isômeros *cis* demonstram maior bioatividade e melhor absorção pelo organismo (Caseiro et al., 2020; Madia et al., 2021).

Figura 6 – Representação estrutural das formas isoméricas de Licopeno.



Fonte: Agarwal & Rao (1998).

A estrutura acíclica do licopeno, combinada com a alta quantidade de ligações duplas não conjugadas e sua marcante hidrofobicidade, confere propriedades físico-químicas e biológicas únicas. Trata-se de um composto lipofílico, com maior solubilidade em óleos e solventes orgânicos, como clorofórmio, hexano, acetona e éter de petróleo, enquanto permanece insolúvel em água, etanol e metanol. As principais propriedades físicas do licopeno estão dispostas na Tabela 1.

Figura 7 – Propriedades físicas do Licopeno.

Table 1. Physical properties of lycopene.	
Molecular formula	C ₄₀ H ₅₆
Molecular weight	536.85 Da
Melting point	172–175 °C
Crystal form	Long red needles separate from a mixture of carbon disulfide and ethanol
Powder form	Dark reddish-brown
Solubility	Soluble in chloroform, hexane, benzene, carbon disulfide, acetone, petroleum ether and oil; Insoluble in water, ethanol and methanol
Stability	Sensitive to light, oxygen, high temperature, acids, catalyst and metal ions

Source: Shi *et al.* [23].

Fonte: Extraído de Kong et al. (2010).

Essas características e vários outros fatores irão influenciar ainda na biodisponibilidade do licopeno em humanos. Estudos *in-vitro* apontam que é um dos carotenoides que apresentam mais baixa absorção. Além disso, o aumento da fração

não digerível reduz a liberação do licopeno da matriz alimentar para o trato digestivo, portanto, dietas ricas em fibras reduzem a absorção e diminuem os níveis plasmáticos de licopeno. A absorção no intestino grosso é ínfima e ainda assim, a liberação é maior que no intestino delgado. A absorção das formas *cis* é significativamente maior que na forma *all-trans* de acordo com pesquisas *in-vitro*. No entanto, o processo da digestão pode causar a isomerização *trans-cis*, de acordo com estudos que relataram a presença de cerca de 60% de isômeros *cis* em pessoas que haviam ingerido produtos com fonte de licopeno na forma *trans*. Outros fatores que melhoram a absorção são a ingestão conjunta com fontes lipídicas e o processamento industrial (Kong et al., 2010). A biodisponibilidade do licopeno é maior em produtos de tomate processados, como suco pasteurizado, sopa, molho e ketchup, em comparação com tomates frescos. Isso ocorre porque esses produtos contêm proporções estáveis de formas *all-trans* e *cis* do licopeno, que não sofrem retro-isomerização. O processamento não térmico, como tratamento ácido e processamento mecânico, oferece uma alternativa para manter a estabilidade do licopeno, resultando em produtos alimentares seguros, minimamente processados e estáveis. Por outro lado, o tratamento térmico convencional é mais adequado para a produção em larga escala, uma vez que converte o licopeno *all-trans* em isômeros *cis* mais estáveis. Portanto, a escolha das condições de processamento de tomate desempenha um papel crucial na quantidade, qualidade e disponibilidade do licopeno nos produtos de tomate (Caseiro et al., 2020).

Depois de absorvido, o licopeno é transportado pelas lipoproteínas plasmáticas, geralmente as de baixa densidade, ao contrário de outros carotenoides polares. A sua distribuição pelos tecidos está relacionada com a estrutura química, sendo que os isômeros *cis* de cadeia mais compacta tem maior capacidade de ligarem-se a proteínas ou lipoproteínas do que a forma *all-trans* (Kong et al., 2010).

O licopeno na dieta é proveniente de uma lista limitada de alimentos, com mais de 80% do licopeno consumido nos Estados Unidos sendo derivado de produtos de tomate (*Solanum lycopersicum*) (Clinton, 1998). O teor de licopeno no tomate também pode sofrer variações substanciais devido a diversos fatores, como condições ambientais, práticas agrícolas, variedades de tomate e grau de maturação. A cor vermelha característica é resultado do acúmulo de carotenoides, com o licopeno sendo cinco vezes mais concentrado na casca em comparação com a polpa. Essa coloração vermelha é devido à estrutura de longas cadeias de polieno no cromóforo do licopeno, que absorve a maior parte da luz visível, com exceção das frequências mais baixas. A coloração do licopeno também varia de acordo com sua forma isomérica, sendo vermelha na forma *all-trans* e, na maioria das outras formas isoméricas, laranja (Caseiro et al., 2020).

Uma revisão de Khan e colaboradores (2021) relatou possíveis efeitos adversos do licopeno, como a licopenemia, caracterizada pelo acúmulo de pigmento de licopeno na pele deixando-a amarela ou alaranjada. Isso ocorre em casos de ingestão excessiva de fontes de licopeno quando o pigmento se deposita no estrato córneo da pele provocando essa condição. Os autores ainda encontraram estudos controversos sobre a segurança na gravidez. O consenso é que a ingestão proveniente de fontes naturais é segura, porém alguns estudos associaram a ingestão de suplementos de licopeno com a taxa de prematuridade, o que não foi observado em outros. Portanto, na falta de estudos conclusivos, é mais seguro evitar a suplementação além da ingestão dietética em gestantes e nutrízes. Por outro lado, alguns estudos avaliados nessa revisão, relataram benefícios na adição suplementar de licopeno e vitamina C na prevenção da pré-eclâmpsia. O licopeno, como outros carotenoides, também pode atuar como agente pró oxidante sob algumas condições especiais como: altas concentrações; situações de estresse oxidativo intracelular elevado (comum em células cancerosas); alta concentração de oxigênio (como nos pulmões de fumantes), baixos níveis de enzimas e antioxidantes naturais e presença elevada de íons metálicos reativos (como Fe (III) e Cu (II)). Nessas condições, eles podem gerar espécies reativas de oxigênio (ROS) em vez de neutralizá-las, resultando em danos às moléculas celulares, incluindo lipídios, proteínas e DNA, o que nos casos de câncer pode ser benéfico, favorecendo a apoptose e morte de células cancerosas, além de contribuir na redução de efeitos adversos das drogas citotóxicas, protegendo as células normais (Shin et al., 2020).

Pesquisas recentes, tanto mecanicistas quanto epidemiológicas, vem apontando uma relação favorável entre a ingestão de licopeno e a redução de riscos e prevenção de complicações de doenças crônicas como: alguns tipos de câncer; doenças cardiovasculares; diabetes tipo 2; obesidade; distúrbios neurodegenerativos e outras relacionadas ao estresse oxidativo induzido por um processo de inflamação sistêmica e crônica de baixo grau. Ele atua como um potente antioxidante, reduzindo os níveis elevados de mediadores pró-inflamatórios (por exemplo, citocinas pró-inflamatórias IL-8, -6 e -1, e fosfolípidios oxidados) e modulando o estresse oxidativo por prevenir a ativação de NF- κ B. Além disso, o licopeno gera produtos de clivagem oxidativa que interagem com fatores de transcrição, promovendo a expressão de enzimas antioxidantes e citoprotetoras, bem como proteínas de crescimento que contribuem para a proteção contra distúrbios inflamatórios crônicos (Saini et al., 2020; Wu et al., 2022; Zhao et al., 2021).

O mercado global de licopeno foi avaliado em 164,6 milhões de dólares em 2023, com projeção de crescimento para 274,1 milhões de dólares até 2031, impulsionado por uma taxa composta anual de 6,70%. Esse aumento reflete a crescente demanda por produtos naturais que promovem a saúde, devido à conscientização sobre os benefícios antioxidantes do licopeno e sua ampla aplicação nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética. O licopeno, encontrado principalmente em tomates, pode ser obtido de fontes naturais ou sintéticas, mas a preferência por produtos naturais tem impulsionado a demanda por licopeno derivado de tomates. Além disso, os avanços tecnológicos em métodos de extração têm aprimorado a pureza e a estabilidade do composto, reforçando sua adoção em mercados como o de suplementos dietéticos, alimentos funcionais e produtos cosméticos. As tendências de mercado indicam uma crescente preferência por produtos naturais, orgânicos e de rótulo limpo, impulsionada pela conscientização dos consumidores sobre a saúde e os possíveis efeitos adversos de ingredientes sintéticos. Setores como alimentos e bebidas e cuidados pessoais estão liderando essa transição, com o licopeno sendo amplamente utilizado como antioxidante e corante natural. A Ásia-Pacífico desponta como mercado emergente, com rápido crescimento devido à maior disponibilidade de renda e conscientização sobre saúde, enquanto a Europa mantém uma participação significativa, apoiada por regulamentações rígidas e forte demanda por ingredientes naturais. Além disso, práticas de produção sustentáveis, como a utilização de subprodutos do processamento de tomates e extração com dióxido de carbono supercrítico, têm ganhado destaque para atender às demandas ambientais e regulatórias (Ashim, 2023).

3.4 Valorização Sustentável de Subprodutos: obtenção de produtos ricos em licopeno a partir dos resíduos do processamento industrial do tomate

Com pesquisas robustas fornecendo suporte para os benefícios da ingestão de licopeno para as pessoas e também para animais (Lu et al., 2022; Lu et al., 2019), surge como grande desafio a obtenção deste nutriente usando técnicas de extração eficientes e sustentáveis. A indústria de processamento de tomates gera grandes volumes de resíduos, conhecidos como bagaço de tomate ou *pomace*, compostos por pele ou casca, sementes e uma fração residual de polpa. A gestão adequada desses resíduos representa um desafio para as empresas, devido aos impactos ambientais adversos decorrentes do descarte inadequado e ao desperdício de recursos valiosos, como licopeno, proteínas e outros nutrientes e compostos bioativos com potencial de aplicação em diversas áreas, tais como na nutrição animal, em alimentos funcionais, cosméticos e nutracêuticos (Garcia-Garcia et al., 2017; Guil-Guerrero et al., 2016; Lu et al., 2022; Lu et al., 2019; Strati & Oreopoulou, 2014).

Tecnologias mais eficientes e sustentáveis para recuperação de licopeno a partir dos subprodutos da indústria tomateira é um desafio para os pesquisadores e para as empresas que investem na valorização dos seus resíduos. A escolha adequada dos solventes, bem como a otimização de parâmetros como temperatura, proporção de solvente e tempo de extração, são cruciais para melhorar o rendimento da extração. Muitos estudos usam misturas de solventes para aumentar o rendimento da extração de licopeno das cascas de tomate. Além disso, pesquisadores têm investigado o uso de solventes verdes, como óleos vegetais, mistura de solventes eutéticos profundos e uso de surfactantes aliados a técnicas como extração com fluido

supercrítico, pré-tratamento enzimático, extração assistida por ultrassom, entre outras. Essas técnicas oferecem alternativas eficazes e sustentáveis para a recuperação de licopeno a partir de resíduos de tomate, com potencial aplicação na indústria alimentícia e de saúde (Silva et al., 2019; Viñas-Ospino et al., 2023).

Esses processos ainda não superaram desafios importantes, como a qualidade dos compostos extraídos, acessibilidade econômica, reprodutibilidade industrial e segurança ambiental. É preciso que novos estudos apontem tecnologias inovadoras que preencham essas lacunas e contribuam para uma Economia Verde, com o máximo de eficiência e uso sustentável dos recursos naturais.

4. Considerações Finais

O presente estudo reforça a importância do tomate e seus subprodutos como fontes ricas em compostos bioativos, com destaque para o licopeno, devido ao seu elevado potencial antioxidante e benefícios à saúde. A revisão apresentada demonstra a relevância da valorização dos resíduos do processamento industrial do tomate, abordando estratégias sustentáveis de extração e aproveitamento desses subprodutos na perspectiva da economia circular.

Os resultados evidenciam que métodos inovadores, como a extração assistida por fluido supercrítico, ultrassom e solventes verdes, representam abordagens promissoras para a obtenção de extratos ricos em licopeno e outros carotenoides. No entanto, desafios como viabilidade econômica, escalabilidade industrial e impacto ambiental ainda precisam ser superados para a implementação efetiva dessas tecnologias em larga escala.

Dessa forma, esperamos contribuir para a ampliação do conhecimento sobre as potencialidades de obtenção de produtos ricos em licopeno a partir do aproveitamento dos subprodutos do processamento do tomate, reforçando a importância do desenvolvimento de pesquisas futuras que abordem a otimização dos processos de extração, a redução de custos e a busca por aplicações inovadoras para esses compostos, promovendo a sustentabilidade na cadeia produtiva do tomate e agregando valor a seus derivados industriais.

Agradecimentos

Esse estudo teve o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq

Referências

- Ashim, L. (2023). *Informe de investigación, participación y tamaño del mercado de licopeno*. Kings Research. <https://www.kingsresearch.com/es/lycopeno-market-1036>
- Bergougnoux, V. (2014). The history of tomato: From domestication to biopharming. *Biotechnology Advances*, 32(1), 170–189. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.11.003>
- Branthôme, F.-X. (2022). *Consumption: 2021 in the wake of 2020*. Tomato News. https://www.tomatonews.com/en/consumption-2021-in-the-wake-of-2020_2_1618.html
- Caseiro, M., Ascenso, A., Costa, A., Creagh-Flynn, J., Johnson, M., & Simões, S. (2020). Lycopene in human health. *LWT*, 127, 109323. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109323>
- Clinton, S. K. (1998). Lycopene: Chemistry, Biology, and Implications for Human Health and Disease. *Nutrition Reviews*, 56(2), 35–51. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1998.tb01691.x>
- FAO. (2021). *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2021*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb4477en>
- FAO - Faostat. (2023). [FAOstatistics]. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity
- FAOSTAT. (2023). <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Filgueira, F. A. R. (2008). *Novo Manual de Olericultura*. (3ª ed.). Editora UFV.

- García-García, G., Woolley, E., Rahimifard, S., Colwill, J., White, R., & Needham, L. (2017). A Methodology for Sustainable Management of Food Waste. *Waste and Biomass Valorization*, 8(6), 2209–2227. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9720-0>
- Gómez-Romero, M., Arráez-Román, D., Segura-Carretero, A., & Fernández-Gutiérrez, A. (2007). Analytical determination of antioxidants in tomato: Typical components of the Mediterranean diet. *Journal of Separation Science*, 30(4), 452–461. <https://doi.org/10.1002/jssc.200600400>
- Górecka, D., Wawrzyniak, A., Jędrusek-Golińska, A., Dziedzic, K., Hamułka, J., Kowalczewski, P., & Walkowiak, J. (2020). Lycopene in tomatoes and tomato products. *Open Chemistry*, 18(1), 752–756. Scopus. <https://doi.org/10.1515/chem-2020-0050>
- Guil-Guerrero, J., Ramos, L., Moreno, C., Zuniga-Paredes, J., Carlosama-Yepe, M., & Ruales, P. (2016). Plant Foods By-Products as Sources of Health-Promoting Agents for Animal Production: A Review Focusing on the Tropics. *Agronomy Journal*, 108(5), 1759–1774. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0555>
- IBGE. (2021). Produção de Tomate no Brasil. <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/tomate/br>
- Khan, U. M., Sevindik, M., Zarrabi, A., Nami, M., Ozdemir, B., Kaplan, D. N., Selamoglu, Z., Hasan, M., Kumar, M., Alshehri, M. M., & Sharifi-Rad, J. (2021). Lycopene: Food Sources, Biological Activities, and Human Health Benefits. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2021/2713511>
- Khoo, H.-E., Prasad, K. N., Kong, K.-W., Jiang, Y., & Ismail, A. (2011). Carotenoids and Their Isomers: Color Pigments in Fruits and Vegetables. *Molecules*, 16(2), 1710–1738. <https://doi.org/10.3390/molecules16021710>
- Knoblich, M., Anderson, B., & Latshaw, D. (2005). Analyses of tomato peel and seed byproducts and their use as a source of carotenoids. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(7), 1166–1170. Scopus. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2091>
- Kong, K.-W., Khoo, H.-E., Prasad, K. N., Ismail, A., Tan, C.-P., & Rajab, N. F. (2010). Revealing the Power of the Natural Red Pigment Lycopene. *Molecules*, 15(2), Artigo 2. <https://doi.org/10.3390/molecules15020959>
- Lu, S., Chen, S., Li, H., Paengkoum, S., Taethaisong, N., Meethip, W., Surakhunthod, J., Sinpru, B., Sroichak, T., Archa, P., Thongpea, S., & Paengkoum, P. (2022). Sustainable Valorization of Tomato Pomace (*Lycopersicon esculentum*) in Animal Nutrition: A Review. *Animals*, 12(23). <https://doi.org/10.3390/ani12233294>
- Lu, Z., Wang, J., Gao, R., Ye, F., & Zhao, G. (2019). Sustainable valorisation of tomato pomace: A comprehensive review. *Trends In Food Science & Technology*, 86, 172–187. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.020>
- Madia, V., De Vita, D., Ialongo, D., Tudino, V., De Leo, A., Scipione, L., Roberto, S., Costi, R., & Messori, A. (2021). Recent Advances in Recovery of Lycopene from Tomato Waste: A Potent Antioxidant with Endless Benefits. *Molecules*, 26(15). <https://doi.org/10.3390/molecules26154495>
- Melo, P. C. T. de, & Vilela, N. J. (2005). Desafios e perspectivas para a cadeia brasileira do tomate para processamento industrial. *Horticultura Brasileira*, 23, 154–157. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362005000100032>
- Misawa, N. (2010). Carotenoids. Em *Comprehensive Natural Products II - Chemistry and Biology* (1º ed, p. 733–753). Hung-Wen (Ben) Liu Lew Mander. <https://doi.org/10.1016/B978-008045382-8.00009-5>
- Neitzke, R. S., & Büttow, M. V. (2008). Origem e Evolução das Plantas Cultivadas—Tomate. Em *Origem e Evolução das Plantas Cultivadas* (1ª, p. 803–818). Rosa Líia Barbieri, Elisabeth Regina Tempel Stumpf. <https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/biologia/livros/ORIGEM%20E%20EVOLUCAO%20DE%20PLANTAS%20CULTIVADAS%20-%20EMBRAPA.pdf>
- Nisar, N., Li, L., Lu, S., Khin, N. C., & Pogson, B. J. (2015). Carotenoid Metabolism in Plants. *Molecular Plant*, 8(1), 68–82. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2014.12.007>
- Peralta, I. E., & Spooner, D. M. (2005). *Morphological characterization and relationships of wild tomatoes (Solanum L. Section Lycopersicon [Mill.] Wettst. Subsection Lycopersicon)*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/107948>
- Rawat, A., Upadhyay, M., & Singh, O. (2024). Exploring the pharmacological potential and traditional use of *Solanum lycopersicum* L. (Tomato): A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 13(2), 768–771. <https://doi.org/10.22271/phyto.2024.v13.i2f.14920>
- Saini, R. K., Rengasamy, K. R. R., Mahomoodally, F. M., & Keum, Y.-S. (2020). Protective effects of lycopene in cancer, cardiovascular, and neurodegenerative diseases: An update on epidemiological and mechanistic perspectives. *Pharmacological Research*, 155, 104730. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2020.104730>
- Salehi, B., Sharifi-Rad, R., Sharopov, F., Namiesnik, J., Roojintan, A., Kamle, M., Kumar, P., Martins, N., & Sharifi-Rad, J. (2019). Beneficial effects and potential risks of tomato consumption for human health: An overview. *Nutrition*, 62, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2019.01.012>
- Shin, J., Song, M.-H., Oh, J.-W., Keum, Y.-S., & Saini, R. K. (2020). Pro-oxidant Actions of Carotenoids in Triggering Apoptosis of Cancer Cells: A Review of Emerging Evidence. *Antioxidants*, 9(6), 532. <https://doi.org/10.3390/antiox9060532>
- Silva, Y. P. A., Ferreira, T. A. P. C., Celli, G. B., & Brooks, M. S. (2019). Optimization of Lycopene Extraction from Tomato Processing Waste Using an Eco-Friendly Ethyl Lactate–Ethyl Acetate Solvent: A Green Valorization Approach. *Waste and Biomass Valorization*, 10(10), 2851–2861. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0317-7>
- Strati, I. F., & Oreopoulou, V. (2014). Recovery of carotenoids from tomato processing by-products – a review. *Food Research International*, 65, 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.09.032>

Teixeira, F. M. V., Mendonça, J. L., & Alvarenga, M. A. R. (2022). *Tratos Culturais—Tomate*. Embrapa. <https://www.embrapa.br/hortalicas/tomate-de-mesa/tratos-cultuais>

Tropicos.org. (2025). Tropicos.org. Missouri Botanical Garden. <https://www.tropicos.org/name/Search?name=Solanum%20lycopersicon>

Vieira, D. A. D. P., Caliari, M., Souza, E. R. B. D., & Soares Júnior, M. S. (2019). Mechanical resistance, biometric and physicochemical characteristics of tomato cultivars for industrial processing. *Food Science and Technology*, 39(suppl 2), 363–370. <https://doi.org/10.1590/fst.32417>

Viñas-Ospino, A., López-Malo, D., Esteve, M. J., Frígola, A., & Blesa, J. (2023). Green Solvents: Emerging Alternatives for Carotenoid Extraction from Fruit and Vegetable By-Products. *Foods*, 12(4), Artigo 4. <https://doi.org/10.3390/foods12040863>

World trade in Tomato Products. (2023). Tomato News. https://www.tomatonews.com/en/trade_46.html

WPTC - World Processing Tomato Council. (2023). WPTC. <https://www.wptc.to/production/>

Wu, S.-X., Li, J., Zhou, D.-D., Xiong, R.-G., Huang, S.-Y., Saimaiti, A., Shang, A., & Li, H.-B. (2022). Possible Effects and Mechanisms of Dietary Natural Products and Nutrients on Depression and Anxiety: A Narrative Review. *Antioxidants*, 11(11), 2132. <https://doi.org/10.3390/antiox11112132>

Zhao, Y., Bao, R.-K., Zhu, S.-Y., Talukder, M., Cui, J.-G., Zhang, H., Li, X.-N., & Li, J.-L. (2021). Lycopene prevents DEHP-induced hepatic oxidative stress damage by crosstalk between AHR–Nrf2 pathway. *Environmental Pollution*, 285, 117080. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117080>